



Kaya Mekaniği Bülteni

Bulletin of Rock Mechanics

Mart / March 2003

15

TÜRK ULUSAL KAYA MEKANİĞİ DERNEĞİ
Turkish National Society for Rock Mechanics

Yönetim Kurulu / Executive Committee

Doç. Dr. H.Aydın Bilgin
Doç. Dr. Candan Gökçeoğlu
Hasan Şişman
Ümit Erdem
H.Sinan İnal

Yayın Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Hasan Gerçek
Prof. Dr. Reşat Ulusay
Prof. Dr. Bahtiyar Ünver
Y.Doç.Dr. M. Ali Hindistan
Mehmet Altıntaş

Yazışma Adresleri / Addresses

Hasan Şişman
Genel Sekreter/Secretary General
Ulaştırma Bakanlığı, DLH İnşaatı Genel
Müdürlüğü, Araştırma Dairesi Başkanlığı
Macunköy ANKARA
Tel : (312) 397 38 10
Faks : (312) 397 38 11
E-mail : hassisman@yahoo.com

Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği
P.K. 774 Yenışehir-Ankara/TURKEY

Baskı : Kozan Ofset, Ankara, 2003

İçindekiler Contents

Zonguldak Havzasındaki Bazı
Tortul Kayaçların Sismik Dalga
Yayılmı Anizotropisi
*Seismic wave propagation anisotropy
of some sedimentary rocks from
Zonguldak region*
Kenan Çolak,
Yadigar V. Müftüoğlu

Silindirik ve Küresel Açıklıklar
Çevresindeki Gerilme ve Birim
Deformasyon Alanlarının Belirlenmesi
İçin Birleştirilmiş Analitik Çözüm
*An unified analytical solution for
determination of the stress and strain
fields about cylindrical and spherical
openings*
Ömer Aydan, Melih Geniş

Şişme Davranışı ve Mühendislik
Yapılarına Etkileri
*Swelling behavior and its effects on the
engineering structures*
M. Erdinç Bilir,
Yadigar V. Müftüoğlu

YAZIM VE YAYIMA KABUL İLKELERİ

Kaya Mekaniği Bülteninde yayımlanması istemiyle gönderilecek olan yazılar; kaya mekaniğine yeni bir katkısı olan araştırmaları, bilimsel ve teknik yöntemlerle yapılmış özgün sonuçları olan çalışmaları, kaya mekaniğinin herhangi bir konusunda daha önce yapılmış çalışmaları eleştirel bir yaklaşımla derleyip o konuda yeni bir görüş ortaya koyan eleştiri-derleme yazılarını ve tanıtma amaçlı çalışmaları veya ülkemizde kaya mekaniği camiasına yararlı olabilecek yabancı yayınların çevirilerini kapsayabilir.

Bültende yayımlanabilmesi için yazıların daha önce Türkçe olarak yayımlanmamış olması gerekir. Daha önce yabancı dilde yayımlanmış olan yazılar geniş bir araştırmacı ve uygulamacı kitlesini ilgilendirdiği takdirde Türkçe olarak bültende yayımlanabilir.

Yazıların hazırlanması ve düzeni:

- a) Metin A4 ebadında kağıt üzerine 12 punto, 1.5 satır aralıkla ve bilgisayarla yazılmış olmalı, ayrıca sayfanın kenarlarında 3'er cm.lik boşluk bırakılmalıdır. Baskıda ofset tekniği kullanılacağından bilgisayar çıktılarının silik olmaması gerekmektedir.
- b) Başlık kısa konuyu en iyi şekilde belirtebilir ve 10 sözcüğü geçmeyecek şekilde seçilmeli ve Türkçe başlığın (tamamı büyük harfle ve koyu yazılmış) yanısıra, İngilizcesi (küçük harflerle ve koyu)de yazılmalıdır.
- c) Yazının başlangıcında 200 kelimeyi geçmeyecek şekilde hazırlanmış Türkçe ve İngilizce özet (abstract) bulunmalıdır. Özet içinde; yararlanılan kaynaklara, şekil, çizelge ve eşitlik numaralarına değinilmemelidir. Ayrıca, özet ve abstract bölümlerinin altına, bir satır ara verilerek *anahtar kelimeler* ve *key words* (en az 2 en çok 6) verilmelidir.
- d) Yazının genel olarak aşağıda belirtilen düzene göre sunulmasına özen gösterilmelidir:
 1. Başlık (Türkçe ve İngilizce)
 2. Yazar ad(lar)ı ve adres(ler)i
 3. Özet (anahtar kelimeler eklenerek)
 4. Abstract (key words eklenerek)
 5. Giriş (2. sayfanın başından başlayacak)
 6. Metin bölümü (yöntemler, teknikler, çalışılan malzeme, saha tanımlamaları, vb.)
 7. Sonuçlar
 8. Tartışmalar
 9. Katkı belirtme (gerekliyse)
 10. Kaynaklar
 11. Ek açıklamalar
- e) Metin içinde kaynaklara atıf yapılırken aşağıdaki örnekler dikkate alınmalıdır. (Hoek (1990) veya (Aydan ve Paşamehmetoğlu, 1994; Hoek vd., 1994;.... gibi)
- f) Yararlanılan kaynaklar, yazar soyadları esas alınarak alfabetik sırayla verilmeli ve metin içinde değinilen tüm kaynaklar, kaynaklar dizininde eksiksiz olarak belirtilmelidir. Kaynakların yazılmasında aşağıdaki örneklerde belirtilen düzen dikkate alınmalıdır.

- Süreli yayınlar ve bildiriler için:
Hoek, E., 1990 Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion Values from Hoek-Brown failure criterion. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 27, No.3, 227-229
- Kitaplar için :
Goodman, R.E., 1989. Introduction to Rock Mechanics. John Wiley and Sons, New York, 562 pp.

g) Metin içerisinde verilen eşitliklerin karşısına sırayla ve parantez içinde numara verilmelidir.

Çizimler ve Çizelgeler

- a. Çizimler teknik çizim normlarına uygun olarak çini mürekkep ile aydınlar kağıda çizilmeli, harf, rakam ve simgeler kolaylıkla okunabilmelidir. Bilgisayar çıktısı olarak alınan çizimlerin de yeterli koyulukta olması gereklidir. Çizimlerin metin içindeki yerlerine aydınlar olarak veya temiz bir fotokopisi çekilerek yerine yapıştırılmalıdır.
- b. Fotoğraflar aydınlık olmalı ve parlak kağıda siyah-beyaz olarak basılmalıdır ve fotoğraflar da şekil olarak değerlendirilmelidir.
- c. Yazarlar, Bültenin boyutlarını dikkate alarak, çizelgeleri sınırlamalı ve gerekiyorsa küçük karakterlerle hazırlamalıdır. Çizelgelerin altında gerekli durumlarda açıklayıcı dipnotlarına yer verilmelidir. Çizelge başlıkları kısa ve öz olarak seçilerek, çizelgelerin üzerine ilk harfleri büyük olmak kaydıyla yazılmalıdır.
- d. Bülten ofset tekniği ile basılacağı için şekil, fotoğraf ve çizimler metin içinde anıldıkları ilk paragraftan sonraki uygun bir başlığa, gerekiyor ise küçülterek, monte edilip gönderilmeli ve bunlar metindeki sıralarına göre numaralandırılmalıdır. Şekil altı açıklamaları küçük harflerle yazılmalıdır.

Yazıların gönderilmesi:

Yazılar, biri orijinal diğer ikisi ise fotokopi olmak üzere 3 nüsha halinde gönderilmelidir. Yazıyla birlikte yazının kaydedildiği disket (tercihan 3.5", double density (DD) veya high density (HD)) de kullanılan yazılım programı ve versiyonu belirtilerek gönderilmelidir.

Yazıların yayına kabul edilmesi ve ayrı basımlar:

Yayın kuruluna ulaşan yazılar Yayın Kurulu tarafından en kısa sürede değerlendirilerek incelemecilerden gelecek görüşler doğrultusunda yazının doğrudan veya bazı düzeltmeler yapılarak basılmasına veya basılmamasına Yayın Kurulunca karar verilir ve sonuç bir yazı ile yazara bildirilir.

Gönderilen yazılar Bülten'de yayımlansın yada yayımlanmasın geri iade edilmez. Bültende yayımlanması kabul edilen yazıların ayrı basımından on adet yazarına (birden fazla yazarlı yazılarda başvuru yapan yazara) gönderilir.

Okurlarımıza,

Kaya Mekaniği Bülteni'nin 15. sayısını yayımlayarak sizlerle buluşmanın sevincini yaşamaktayız. Sizler tarafından da çok iyi bilindiği gibi, son yıllarda ülkemizde özellikle akademik yükseltmelerin belli ölçütlere bağlanması ve bu ölçütlerin de uluslararası nitelikteki dergilerde yapılan yayınlara ağırlık vermesi nedeniyle, Kaya Mekaniği Bülteni'ne gelen makale sayısında çok büyük bir düşüş yaşanmıştır. Bu nedenle Kaya Mekaniği Bülteni'mize olağan yayım sıklığımızı aşan uzun bir ara vermek zorunda kaldık. Kuşkusuz ülkemizdeki araştırmacı ve uygulamacıların çalışmalarını uluslararası düzeyde duyurmaları ne denli önemliyse, bunların ülkemizde konuyla ilgili kitlelere daha yaygın bir şekilde ulaştırılması, kaya mekaniği ile ilgili kaynakların geliştirilmesi ve yayım üretilmesine teşvik sağlanması da vazgeçilmez birer olgudur. Dolayısıyla, ülkemizde yapılan Kaya Mekaniği konulu çalışmaların duyurulması açısından önemli bir görevi olan Kaya Mekaniği Bülteni'nin işlevinin artırılması bir zorunluluk haline gelmiştir.

Kaya Mekaniği Bülteni'nin 15. sayısı alışılagelmiş haliyle son kez yayımlanmaktadır. Bununla birlikte, sizlere Kaya Mekaniği Bülteni'nin **Türk Kaya Mekaniği Dergisi** adıyla yeniden düzenlenmesi, yeni şekli ve işleyişi ile ilgili değişiklik çalışmalarının son aşamaya geldiğini müjdelemekten mutluluk duymaktayız. Bu çerçevede; **Türk Kaya Mekaniği Dergisi**'nin uluslararası indeksler tarafından da taranan bir dergi olması yönünde çaba sarfetmeyi başlıca hedeflerimizden birisi olarak seçmiş bulunuyoruz. Bu nedenle Dergi'yi yılda iki kez düzenli olarak yayınlamak planlanmaktadır. Derginin formatı ile yazım ve yayıma kabul ilkeleri konusunda yakında gerekli duyurular yapılacaktır. Yazılarımızla dergiyi desteklemenizi umuyor ve bekliyoruz.

Bu bağlamda, Derginin editörlük görevini kabul eden Prof. Dr. Hasan Gerçek ile Prof. Dr. Reşat Ulusay'a TUKMD Yönetim Kurulu olarak teşekkürü borç biliriz.

Bültende yer alan birinci yazı sayın Kenan Çolak ve Yadigar V. Müftüoğlu tarafından hazırlanmış olup, **“Zonguldak Havzasındaki Bazı Tortul Kayaçların Sismik Dalga Yayılımı Anizotropisi”** başlıklıdır. Çalışma tortul kayaçlarda, tabakalanmaya dik, paralel ve farklı yönlerde yapılan sismik hız ölçümleri ile sismik özelliklerdeki değişimin araştırılması konusundadır.

İkinci yazı ise sayın Ömer Aydan ve Melih Geniş tarafından kaleme alınmıştır ve **“Silindirik ve Küresel Açıklıklar Çevresindeki Gerilme ve Birim Deformasyon Alanlarının Belirlenmesi için Birleştirilmiş Analitik Çözüm”** başlığını taşımaktadır. Çalışma hidrostatik birincil gerilme alanı içindeki Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyan bir kaya kütlesi için birleştirilmiş bir analitik çözüm önermektedir. Önerilen çözüm kullanılarak gerçekleştirilen bir uygulama da sunulmuştur.

Sayın M.Erdinç Bilir ve Yadigar V. Müftüoğlu tarafından kaleme alınmış olan **“Şişme Davranışı ve Mühendislik Yapılarına Etkileri”** başlıklı üçüncü yazı geniş bir literatür taramasıdır. Yazıda şişme davranışı ve ilgili mühendislik sorunları örneklerle tanıtılmış ve yeraltı yapılarında uygulanan şişme tasarımı yaklaşımları sunulmuştur.

Türk Kaya Mekaniği Dergisi'nde buluşmak dileğiyle tüm üyelerimize ve okurlarımıza saygılarımızı sunarız.

TUKMD Yönetim Kurulu

ZONGULDAK HAVZASINDAKİ BAZI TORTUL KAYAÇLARIN SİSMİK DALGA YAYILIMI ANİZOTROPİSİ

**Seismic Wave Propagation Anisotropy of Some Sedimentary
Rocks From Zonguldak Region**

Kenan ÇOLAK ve Yadigar V. MÜFTÜOĞLU

Zong. Karaelmas Üniv. Müh. Fak. Maden Müh. Bölümü, 67100 Zonguldak

ÖZET

Tortul kayaçların sismik anizotropisinin araştırıldığı çalışmalarda, genellikle tabakalanmaya dik ve paralel yönde sismik hız ölçümleri yapılmaktadır. Bu çalışmalar sismik dalga yayılımı açısından düzlemsel izotropinin olduğunu göstermiştir. Ayrıca, tabakalanmaya dik yönde dalga yayılım hızının düşük olduğu ortaya konmuştur. Burada yapılan çalışmada tabakalanma düzleminin konumunun değişmesi ile sismik özelliklerdeki değişim araştırılmıştır. Sonuçlar, en düşük hız değerinin yalnızca tabakalanmaya dik doğrultuda değil, aynı zamanda tabakalanma düzlemine 30-60° eğimli doğrultularda da olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Tortul Kayaçlar, Sismik Özellikler, P-S Dalgaları

ABSTRACT

In studies involving the investigation of seismic anisotropy of sedimentary rocks, seismic wave measurements and generally carried out in directions perpendicular and parallel to the beddings plane. These studies have shown that transversal isotropy exists in terms of seismic wave propagation. In addition, it has been found that the wave propagation velocity perpendicular to the bedding plane is low. In this study the variation of seismic properties with the orientation of bedding plane has been studies. The results have shown that the lowest values of velocity are obtained not only in the direction perpendicular to the bedding but also in directions between 30 and 60 degree inclinations to the bedding plane.

Key Words: Sedimentary Rocks, Seismic Properties, P-S Waves

1. GİRİŞ

ÇİM>

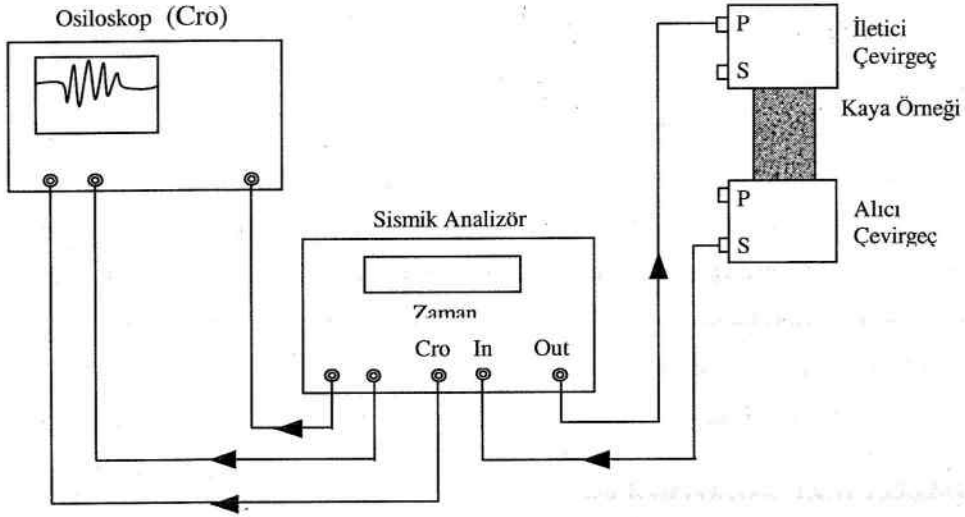
Kayaç içerisinde sismik dalgaların yayılımının ölçülmesi esasına dayanan ve dinamik yöntemler olarak bilinen değerlendirmeler, mineral aramaları, madencilik çalışmaları ve son yıllarda gündeme gelen atık depolama sahalarının araştırılmasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Uygulamada karşılaşılan bir çok durumda, kaya malzemesinde düşük yükler altında oluşan düşük birim deformasyonlar seviyesinde belirlenen elastik sabitler, malzeme davranışını ortaya koymakta önemli rol oynamaktadır. Küçük birim deformasyonlarda elastik sabitlerin belirlenmesinde, sonik dalgaların kullanılması oldukça yaygın bir yöntemdir. Bu şekilde belirlenen elastik sabitler, "Dinamik Elastik Sabitler" olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde, bir kaynaktan yayılan sismik basınç (P) ve kesme (S) dalgalarının yayılım hızlarının doğru bir şekilde ölçülmesi, elastik sabitlerin hızlı ve güvenilir bir şekilde belirlenmesi açısından önemli olmaktadır.

Sonik dalgaların kayaç içinde yayılım hızlarının belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntem, bir üretici ile oluşturulan P ve S dalgalarının, belirli bir boydaki kayaç örneği içinden geçerek alıcıya varış zamanının ölçülmesi yöntemidir. Böyle bir deney setinin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Bu deney setinde ileticide oluşturulan sismik dalga, kaya örneği içinden geçerek alıcıya ulaşmaktadır. Daha sonra sismik analizörden geçen dalga osiloskopa ulaşmaktadır. Osiloskop üzerinde gözlenen ardışık iki dalganın başlangıç noktası pointer ile işaretlenmekte ve sismik analizör üzerinde bir dalganın iletici ile alıcı arasındaki mesafeyi katetme süresi belirlenmektedir. Yapılan basit hesaplamalarla kayaç içindeki dalga yayılım hızı belirlenebilmektedir.

Sismik ölçümler sonucunda elde edilen verilerin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için, sismik dalgaların yayılımını etkileyen faktörlerin bilinmesi gerekir.

2. SİSMİK DALGA HIZINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Sismik dalgaların kayaç içinde yayılımının bir çok faktörden etkilendiği bilinmektedir. Bu faktörlerin en çok bilinenleri, süreksizliklerin varlığı, nem durumu, kil içeriği, boşluk oranı ve ortamda etkin olan gerilmelerin büyüklüğüdür.



Şekil 1. Sismik hız deneylerinde kullanılan düzeneğin şematik gösterimi

Kaya kütlelerinin süreksizlik içeriğini belirlemek için geliştirilen Hız Oranı İndeksi, dalga yayılımının mevcut süreksizliklerden etkilenmesi esasına dayanmaktadır. Ortamda ne kadar sık süreksizlik varsa, Hız Oranı İndeksi de o derecede küçük olmaktadır. Çünkü, Hız Oranı İndeksi, yerinde ve laboratuvarında elde edilen P dalgası hız değerlerinin oranlanması ile belirlenmektedir.

Basınç dalgası hızının, ortamdaki nem oranının artmasına paralel olarak arttığı, kesme dalgalarının ise hemen hemen etkilenmeden kaldığı belirlenmiştir (McDowell, 1993).

İzotropik bir kaya malzemesinde P ve S dalga hızları arasında aşağıdaki eşitlikle verilen bir ilişki gözlenmiştir (Wu et al., 1991).

$$\frac{V_p}{V_s} > \sqrt{2}$$

(1)

Johnston ve Christensen (1993) bu oranın, kumtaşlarının porozite ve boşluk oranının bir göstergesi olarak önem taşıdığını, kayaçların kil içeriğinin ve boşluklarda bulunan sıvının dalga yayılım hızına etkideğini belirtmişlerdir.

Wu ve arkadaşları (1991), etkin gerilmelerin dalga hızına etkisinin, ortamdaki süreksizliklerin varlığına ve özelliklerine bağlı olduğunu söylemektedirler. Genellikle dalga hızları, gerilmenin belirli bir seviyeye kadar çıkması durumunda artış gösterirken, bu seviyeden sonra hızların değişimi daha az olmaktadır. Gerilmelerin artışı ile kayaç içerisinde mevcut olan çatlakların tamamen kapanması için gerekli gerilme seviyesi belirleyici olmaktadır. Wu ve arkadaşları (1991)'na göre, eksenel gerilmenin 0'dan 20 MPa'a çıkması durumunda yükleme yönüne paralel yönde ölçülen P dalgası hızının yaklaşık %30 arttığını, gerilmenin bu seviyenin üzerinde artırılması durumunda ise sabit kaldığını belirtmişlerdir.

3. DALGA HIZI ANİZOTROPİSİ

Bir çok tortul kayaç sismik açıdan anizotropik özellik göstermektedir. Bu durum kayacın oluşumu esnasında kazandığı dokusal ve yapısal özellikler ile mikro çatlakların birlikte neden oldukları bir durumdur. Cole (1976) değişik tortul kayaçlarda yaptığı çalışmalarda, birbirine dik üç yönde dalga hızı ölçümleri yapmış ve en düşük dalga hızı değerlerinin her zaman tabakalanmaya dik yönde yapılan ölçümlerde elde edildiğini, bu nedenle tortul kayaçlarda düzlemsel izotropinin olduğunu belirtmiştir. Mukerji ve Mavko (1994) kayaç bünyesinde bulunan taneciklerin birbiri ile temas etmediği yerlerde bulunan boşlukların birer çatlak gibi değerlendirilebileceğini ve bu çatlakların konumu ile içerdikleri sıvının sismik anizotropiye neden olabileceğini ifade etmişlerdir.

King ve arkadaşlarının (1994) daha önce yaptıkları çalışmalar, şeyldeki sismik anizotropinin düzlemsel izotropik durum olduğunu ve S dalga hızı anizotropisinin P dalgasındakinden daha önemli ölçüde olduğunu göstermiştir. Bu araştırmacılara göre, şeyllerde kayacı oluşturan tanelerin belirli bir dizilimi olmasına rağmen, şeyllerle aynı mineralojik bileşime sahip olan çamurtaşı ve kiltaşlarında rasgele dağılım söz konusu

olduğundan, bu tür kayalarda dalga hızı anizotropisi şeydeki kadar büyük olmamaktadır.

Wu ve arkadaşlarının (1991) kumtaşları üzerinde yaptıkları çalışmalarda, gerilmelerin etkemediği bir durumda, birbirine dik üç yönde P ve S dalgası hızlarını ölçmüşler ve P dalgası hızındaki değişimin en çok %3.9, S dalgası hızındaki değişimin ise en çok %7.3 olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar ortalama P dalgası hızını 2.83 km/s, ortalama S dalgası hızını ise 1.87 km/s olarak ölçmüşler ve V_p/V_s oranının Eşitlik 1'deki izotropik örnek için verilen değere yakın olduğunu belirtmişlerdir.

Remi ve arkadaşları (1994) dalga hızlarına göre anizotropiyi (A_v) tanımlamak için Eşitlik 2'de gösterilen bağıntıyı önermişlerdir.

$$A_v = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{ort}}} \quad (2)$$

Cole (1976), kayalardaki hız anizotropisini değerlendirmek için üç yönde yapılan dalga hızı ölçümlerinden, en büyük ve en küçük olan değerlerin, student t testi kullanılarak, ortalama değer ile karşılaştırılmasını önermiştir.

Müftüoğlu (1983), İngiltere'de kömür açık işletmelerindeki kömür çevre kayalarının kazılabilirliğini araştırdığı çalışmalarında, Hız Oranı İndeksini belirlemek amacıyla sismik ölçümler yapmış ve hız anizotropisini de belirlemiştir. Bu çalışmada ince taneli kumtaşlarında tabakalaşmaya paralel yöndeki P dalgası hızı 3000-3600 m/s arasında, tabakalanmaya dik yönde ise 2500-3500 m/s arasında belirlemiştir. Bu çalışmada kömür çevre kayalarını oluşturan kumtaşları için hız anizotropisinin ortalama %13 olduğu belirtilmiştir. Ayrıca laboratuvar model çalışmalarında Müftüoğlu (1990), kumtaşı blokları arasına asetat kağıdı yerleştirerek yapılan sonik P dalga hızları ve Hız Oranı İndeksinin, yapay çatlak sayısına ve dolgu kalınlığına yeterince duyarlı olduğunu gözlemlemiştir.

4. STATİK VE DİNAMİK ELASTİK SABİTLER ARASINDAKİ İLİŞKİ

Kayalarda yapılan dalga hızı ölçümleri, kayaların birçok kütsel ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi yanısıra elastik sabitlerin tahmin edilmesi amacı ile de

kullanılmaktadır. Dinamik araştırmaların maliyetinin statik deneylere göre oldukça düşük olması, bu yöndeki çalışmaların kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

Sismik dalga hızı ile kayaç gözenekliliği, yoğunluk, atlaklanma durumu ve nem içeriği arasında ilişkiler tanımlanmıştır. Benzer şekilde, sismik dalga hızları kullanarak, kayaçlar için karakteristik olan dinamik elastik sabitlerin belirlenmesine yönelik olarak çalışmalar da yapılmaktadır (King, 1983). P ve S dalga hızlarından Young modülü ve rijitlik modülünü belirlemek için, elastik teori kullanarak, Eşitlik 3 ve 4’de verilen ilişkiler kurulmuştur (Kolsky, 1963).

$$E_{din} = V_s^2 \rho \frac{3 \left(V_p / V_s \right)^2 - 4}{\left(V_p / V_s \right)^2 - 1} \quad (3)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (4)$$

Ayrıca Poisson oranı da Eşitlik 5 kullanılarak belirlenebilir.

$$\nu_{din} = \frac{1}{2} \frac{\left(V_p / V_s \right)^2 - 2}{\left(V_p / V_s \right)^2 - 1} \quad (5)$$

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan ρ , kayaın yerinde yoğunluğu olup, kg/m^3 birimindedir. Bu ilişkiler sonsuz ortam için geçerli (Kolsky, 1963) olmasına rağmen, ISRM (1977) laboratuvar örneklerinde kullanılabilmesi için gerekli koşulları belirlemiştir. Buna göre;

Örneğin ort. tane boyutu < Kullanılan dalga boyu < örneğin en küçük boyutu koşulunun sağlanması yeterli olmaktadır.

Mühendislik çalışmalarında ihtiyaç duyulan statik elastik sabitlerin, dinamik elastik sabitlerden tahminine yönelik çalışmalar halen yapılmaktadır. Bu güne kadar yapılan çalışmalar, statik Young modülü ile dinamik Young modülü arasında önemli bir fark olduğunu ortaya koymaktadır (Siggins, 1993).

Yale ve Jamieson (1994), dinamik elastik modülün, statik elastik modülden %15-70 arasında daha büyük olduğunu ve aralarında iyi bir ilişkinin olduğunu belirtmişlerdir. Bu araştırmacılara göre, kayaç türüne bağlı olarak 0.68 ve 0.79 gibi iki faktör kullanılarak modüller arasında dönüşüm yapmak mümkündür.

Eissa ve Kazi (1988) yaptıkları çalışmalarda Eşitlik 3'ü kullanarak belirledikleri dinamik Young modülü ile statik Young modülü arasında aşağıdaki ilişkiyi kurmuşlardır. Bu eşitlikte ilişki katsayısı 0.96'dır.

$$\log_{10}E_{st} = 0.02 + 0.77 \log_{10}(\rho E_{din}) \quad (6)$$

Bu ilişkide; E_{st} ve E_{din} GPa, ρ ise g/cm^3 boyutundadır.

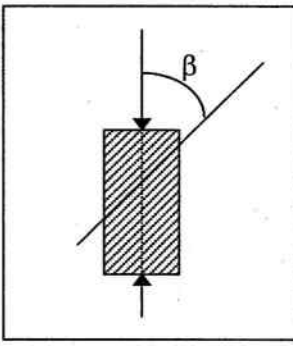
King (1983), 174 adet magmatik ve metamorfik kayaç örneğinden elde ettiği sonuçlara göre, statik ve dinamik Young modülü arasında aşağıdaki ilişkinin olduğunu ileri sürmüştür. Bu eşitlikte ilişki katsayısı 0.9 ve birimler GPa'dır.

$$E_{st} = 1.263 E_{din} - 29.5 \quad (7)$$

5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Bu makaleye temel oluşturan çalışmada (Çolak, 1998), Zonguldak havzasında çalışılan bazı kömür damarlarının tavan ve taban kayaçlarından blok örnekler alınmıştır. Laboratuvara getirilen blok şeklindeki örneklerden karotlar alınarak dikkatle hazırlanmış, oda sıcaklığında kurutulmuş ve boyutları 0.01mm hassasiyetle ölçülmüştür. 200 kHz ve 1MHz frekanslarında P ve S dalgası üreticileri kullanılarak dalga hızları belirlenmiştir. Üretici ve alıcı arasına yerleştirilen örnek üzerinden geçen sismik dalgaların karot boyu ile sınırlı olan bir mesafeyi geçiş süresi ölçülmüştür. Daha sonra da dalga hızları hesaplanmıştır.

Çalışma, Türkiye Taşkömürü Kurumu bünyesindeki değişik müesseselerden alınan kumtaşları üzerinde yoğunlaştırılırken 1 adet silttaşı ve 1 adet kiltası örneği de araştırılmıştır. Araştırmada, Şekil 2'de tanımlandığı gibi, değişik konum açılarında yaklaşık 300 adet karot örneği hazırlanarak deneylerde kullanılmıştır. Sonuçlar Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 2. Konum açısı (β)'nın tanımı

Çizelge 1. Laboratuvar çalışmalarında belirlenen kayaç özellikleri (Çolak,1998).

Kayaç Türü	β	n	σ_c (MPa)	d (kg/m^3)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
Acenta Tv Kumtaşı I	0	6	156.5 $\pm$ 30.8	2685 $\pm$ 51	5161 $\pm$ 201	2785 $\pm$ 32
	30	—	79.4 $\pm$ 8.3		-----	-----
	45	10	101.9 $\pm$ 5.9		3871 $\pm$ 161	2405 $\pm$ 97
	60	10	120.0 $\pm$ 11.5		4017 $\pm$ 177	2470 $\pm$ 76
	90	10	138.9 $\pm$ 27.5		4241 $\pm$ 170	2498 $\pm$ 41
Büyük Tv Kumtaşı III	0	8	101.9 $\pm$ 9.7	2584 $\pm$ 68	3645 $\pm$ 84	2320 $\pm$ 43
	30	10	75.4 $\pm$ 8.5		3464 $\pm$ 80	2232 $\pm$ 45
	45	7	95.9 $\pm$ 5.4		3352 $\pm$ 48	2160 $\pm$ 150
	60	5	96.3 $\pm$ 9.7		3247 $\pm$ 332	2133 $\pm$ 127
	90	12	101.0 $\pm$ 10.1		3437 $\pm$ 307	2261 $\pm$ 102
Çay Tb Kumtaşı IV	0	11	143.8 $\pm$ 11.3	2556 $\pm$ 26	5030 $\pm$ 156	2773 $\pm$ 74
	30	7	85.2 $\pm$ 4.8		4265 $\pm$ 110	2644 $\pm$ 51
	45	12	101.4 $\pm$ 4.5		4061 $\pm$ 188	2613 $\pm$ 125
	60	8	118.5 $\pm$ 4.8		4261 $\pm$ 110	2696 $\pm$ 41
	90	15	131.0 $\pm$ 13.3		4484 $\pm$ 51	2530 $\pm$ 26
Domuzcu Tb Kumtaşı V	0	3	135.8 $\pm$ 16.3	2690 $\pm$ 7	-----	-----
	30	4	114.7 $\pm$ 10.1		4130 $\pm$ 210	2390 $\pm$ 78
	45	4	108.0 $\pm$ 8.7		4100 $\pm$ 42	2392 $\pm$ 44
	60	3	127.5 $\pm$ 11.3		4162 $\pm$ 126	2390 $\pm$ 25
	90	4	132.7 $\pm$ 8.7		3839 $\pm$ 92	2361 $\pm$ 48
Nasufoglu Tv Silttaşı	0	11	72.7 $\pm$ 5.8	2700 $\pm$ 19	4484 $\pm$ 73	2853 $\pm$ 31
	30	10	36.3 $\pm$ 4.9		4321 $\pm$ 139	2808 $\pm$ 73
	45	—	51.0 $\pm$ 11.2		-----	-----
	60	5	60.2 $\pm$ 5.2		4032 $\pm$ 209	2614 $\pm$ 105
	90	3	70.6 $\pm$ 5.3		3762 $\pm$ 409	2436 $\pm$ 235
Domuzcu Tb Kiltası	0	6	38.5 $\pm$ 7.2	2748 $\pm$ 22	4202 $\pm$ 177	2225 $\pm$ 117
	30	4	14.5 $\pm$ 5.6		3853 $\pm$ 96	1956 $\pm$ 100
	45	4	18.6 $\pm$ 4.7		3735 $\pm$ 51	2199 $\pm$ 88
	60	5	31.6 $\pm$ 2.3		3893 $\pm$ 28	2132 $\pm$ 247
	90	4	44.1 $\pm$ 6.9		3609 $\pm$ 194	2080 $\pm$ 222
Acılık Tb Kumtaşı II	0	4	149.4 $\pm$ 7.3	2784 $\pm$ 27	4694 $\pm$ 240	2693 $\pm$ 27
	30	4	86.8 $\pm$ 10.3		4180 $\pm$ 210	2598 $\pm$ 95
	45	4	106.6 $\pm$ 7.4		4445 $\pm$ 53	2663 $\pm$ 120
	60	3	127.4 $\pm$ 8.9		4307 $\pm$ 381	2469 $\pm$ 210
	90	3	141.0 $\pm$ 9.1		4208 $\pm$ 399	2596 $\pm$ 170

β =izotropi düzlemi konum açısı, σ_c =tek eksenli basınç dayanımı, d=yoğunluk

V_p =P dalgası yayılma hızı, V_s =S dalgası yayılma hızı.

Yapılan deney sonuçlarına göre; P dalgası hızı, kumtaşlarında 3200 m/s ile 5200 m/s arasında değişmektedir. Genel olarak $\beta=0^\circ$ olduğu durumlarda elde edilen hız değerleri, 90° 'de elde edilen değerlerden fazladır. Ancak çoğu durumda en düşük hız değeri, β 'nın 30° - 60° arasında olduğu değerlerde elde edilmiştir. Oysa araştırmacılar genel olarak tabakalanmaya dik ve paralel durumları dikkate almakta, eğimli durumu ise ihmal etmektedirler.

Bir adet kıltaşı ve bir adet silttaşı örneği üzerinde yapılan deneylerde, P dalga hızı 3700 m/s ile 4500 m/s arasında elde edilmiştir. Bu örneklerde en düşük hız değeri $\beta=90^\circ$ 'de gözlenmiştir. 0° ile 90° arasında hız değişimi yaklaşık %15 kadardır.

P dalgası hızları hız anizotropisi açısından değerlendirildiğinde, kumtaşları için %2-10, kıltaşı ve silttaşları için ise yaklaşık %10-20'lik bir değişim gözlenmiştir. S dalgası hızındaki anizotropi ise kumtaşlarında %1-10 arasında, kıltaşı ve silttaşları için ise yaklaşık %10-15'lik bir değişim gözlenmiştir.

6. SONUÇLAR

Zonguldak Taşkömürü Havzasında bazı kömür çevre kayaçlarından beş adet kumtaşı, bir adet silttaşı ve bir adet kıltaşı üzerinde yapılan bu çalışmada; dayanım anizotropisi açısından düşük anizotropi gösteren kumtaşı türü kayaçlarda, en düşük P dalga hızının genel olarak kabul edildiği gibi, tabakalanmaya dik yönde değil, β 'nın 30° - 60° olduğu durumlarda elde edilmiştir. Bu durum daha önceki araştırmacıların ortaya koydukları duruma aykırıdır. Anizotropik özelliği göreceli olarak yüksek olan kayaçlarda ise en düşük hız değerleri, daha önce yapılan araştırmalara uygun olarak, β 'nın 90° olduğu durumlarda gözlenmiştir. Bütün örneklerde, tabakalanmaya dik konumda yapılan ölçümler, paralel konumda yapılan ölçümlerden yüksek çıkmıştır.

Kumtaşı türü kayaçlarda en büyük ve en küçük P dalgası hızı değişimi %10-25 arasında, silttaşı ve kıltaşı ise %10-15 arasındadır. Kıltaşı ve silttaşı türü kayaçlarda, tabakalanma düzleminin paralel konumdan dik konuma doğru değişmesi ile P dalgası hızının da buna uygun olarak azaldığı gözlenmiştir. Ancak örnek sayısının az olması nedeni ile sonuçların genellenmesi doğru olmayacaktır.

KAYNAKLAR

Cole, D.I., 1976. Velocity/porosity relationships in limestones from the Portland group of Southern England. *Geoexploration*, Vol. 14, pp. 37-50.

Çolak, K., 1998. Zonguldak Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Dayanım ve Deformasyon Anizotropisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Z. Karaelmas Üniv., 214 s.

Eissa, E. A. and Kazi, A., 1988. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocs. Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol. 25, pp. 479-482.

ISRM, 1977. Suggested methods for determining sound velocity. ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Document No. 8.

Johnston, J. C. and Christensen, N. I., 1993, Compressional to shear velocity ratio in sedimentary rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol. 30, pp. 751-754.

King, M. S., 1983. Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian Shield. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol. 20, pp. 237-241.

King, M. S., Andrea, M. and Khanshir, M. S., 1994. Velocity anisotropy of carboniferous mudstones. Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol. 20, pp. 261-263.

Kolsky, H., 1963. *Stress Waves in Solids*. Dover Publications, 213 p.

McDowell, P. W., 1993. Seismic investigation for rock engineering. *Comprehensive Rock Engineering*, (edt. J. A. Hudson), Vol. 3, Chapter 25, pp. 619-633.

Mukerji, T. and Mavko, G., 1994. Pore fluid effects on seismic velocity in anisotropic rocks. *Geophysics*, Vol. 59, No. 2, pp. 233-244.

Müftüoğlu, Y. V., 1983. A study of factors affecting diggability in British surface coal mines. Ph.D. Thesis, The Univ. of Nottingham, 322 p.

Müftüoğlu, Y. V., 1990. Sismik hız ile eklem tipi süreksizliklerin saptanabilirliği. *Kaya Mekaniği Bülteni*. Sayı: 4, s. 19-36.

Remi, J. M., Bellanger, M. and Homand-Etienne, F., 1994. Laboratory velocities and attenuation of P waves in limestone during freeze-thaw cycles. *Geophysics*, Vol. 59, No. 2, pp. 245-251.

Siggings, A. F., 1993. Dynamic elastic tests for rock engineering. *Comprehensive Rock Engineering*, (edt. J. A. Hudson), Vol. 3, Chapter 24, pp. 601-618.

Wu, B., King, M. S. and Hudson, J. A., 1991, Stress-induced ultrasonic wave velocity anisotropy in a sandstone. Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol. 1, pp. 101-107.

Yale, D. P. and Jamieson W. H. Jr., 1994. Static and dynamic mechanical properties of carbonates. *Rock Mechanics*, pp. 463-471.

**SİLİNDİRİK VE KÜRESEL AÇIKLIKLAR ÇEVRESİNDEKİ
GERİLME VE BİRİM DEFORMASYON ALANLARININ BELİRLENMESİ
İÇİN BİRLEŞTİRİLMİŞ ANALİTİK ÇÖZÜM**

**An Unified Analytical Solution for Determination of the Stress and Strain Fields
About Cylindrical and Spherical Openings**

Ömer AYDAN

Department of Marine Civil Engineering, Tokai University, Orido 3-20-1
Shimizu 424, Japan

Melih GENİŞ

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü
67100 Zonguldak

Özet

Bu çalışmada, silindirik ve küresel açıklık çevresindeki gerilme ve birim deformasyon alanlarının belirlenmesi için birleştirilmiş bir analitik çözüm önerilmektedir. Silindirik ve küresel açıklık hidrostatik birincil gerilme alanında oluşturulmuştur. Açıklığı çevreleyen kaya kütlesi Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uymaktadır. Çözümleme elastik-kusursuz ve kalıcı plastik malzeme davranışı modeli için geliştirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, kuramsal temeller ve malzeme davranışı açıklanmıştır. Daha sonra, çözümleme yöntemi verilmiştir. Son bölümde ise bir uygulama sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Silindirik açıklık, küresel açıklık, arazi reaksiyon eğrisi, elastik-kusursuz ve kalıcı plastik davranış

Abstract

In this study, an unified analytical solution for determination of the stress and strain fields about cylindrical and spherical openings is proposed. Cylindrical and spherical openings are excavated in a hydrostatic initial stress. Rock mass about opening obeys to the Mohr-Coulomb yield criterion. Solution is developed for material behaviour of elastic-perfect and residual plastic. In the first section of the study, fundamentals and material behaviour explained. Then, method of derivation has been given. In the last section, an application is presented.

Key Words: Cylindrical opening, spherical opening, ground response curve, elastic-perfect and residual plastic behaviour.

1. GİRİŞ

Hidrostatik birincil gerilme alanında silindirik (dairesel) ve küresel açıklık çevresindeki gerilme ve birim deformasyon alanlarının belirlenmesi için çeşitli araştırmacılar bir çok çalışma yapmıştır. Yeraltı açıklıkları çevresindeki elasto-plastik malzeme davranışının tanımlandığı çözümlemeler, açıklık tahkimatı tasarımı ve kazısı sırasında genel bir değerlendirme sağladığından önem taşımaktadır. Analitik çözüm yöntemleri kullanılarak yapılan analizler, tasarımcıya açıklık yüzeyinde oluşan birim deformasyonlar, plastik bölge kalınlığı ve arazi reaksiyon eğrileri hakkında ön bilgiler sunmaktadır. Bu çalışmada, Aydan vd. (1993) tarafından silindirik açıklıklar için önerilen, kaya malzemesinin elastik-kusursuz ve kalıcı plastik davranış gösterdiği ve Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyan bir ortam için yapılan çözümleme küresel açıklığı da içerecek şekilde birleştirilerek sunulmuştur. Benzer bir çalışma Torres ve Fairhurst (1999) tarafından elasto-plastik davranış gösteren ve Hoek-Brown yenilme ölçütüne uyan ortamlar için yapılmıştır. Brown vd. (1983) tarafından silindirik açıklıklar için çeşitli malzeme davranış modellerini içeren çözümler verilmiştir. Şenyur (1998) tarafından Hoek-Brown yenilme ölçütüne uyan ve elastik-kalıcı plastik davranış gösteren ortamlardaki küresel açıklıklar için çözümleme sunulmuştur.

Burada önerilen analitik çözümde, açıklık geometrisi katsayısı (n), $n=1$ için silindirik açıklık ve $n=2$ için de küresel açıklık için çözüm elde edilmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Oluşumsal Kanunlar

Açıklık çevresinde elastik bölgede oluşan gerilme ve birim deformasyon arasındaki oluşumsal kural, düzlem birim deformasyon koşulunda silindirik açıklık için,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda \\ \lambda & \lambda + 2\mu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} \quad (1.a)$$

burada σ_r , radyal gerilme; σ_θ , teğetsel gerilme; ε_r , radyal birim deformasyon; ε_θ , teğetsel birim deformasyon; λ , Lamé sabiti ve μ rijitlik (kayma) modülü olup,

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{ve} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.b)$$

ile verilmektedir. Burada, E , kayacın elastik modülü ve ν ise Poisson oranıdır.

Eksenel simetriklikten dolayı $\varepsilon_\theta = \varepsilon_\phi$ olduğundan küresel açıklık için oluşumsal kuralı,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & 2\lambda \\ \lambda & 2\lambda + 2\mu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} \quad (1.c)$$

şeklinde verilmektedir. Silindirik ve küresel açıklıklar için verilen (1.a) ve (1.c) nolu eşitlikler karşılaştırıldığında aşağıda sunulan şekilde bir genelleştirme yapmak mümkün olmuştur.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & n\lambda \\ \lambda & n\lambda + 2\mu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Burada, n açıklık geometrisi katsayısı olup, silindirik açıklıklar için $n = 1$ ve küresel açıklıklar için de $n = 2$ olmaktadır.

2.2 Denge Eşitlikleri

Problem eksenel simetrik olduğunda denge eşitlikleri silindirik açıklık için,

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (3.a)$$

ve küresel açıklık için

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (3.b)$$

şeklindedir. Burada, r , açıklığın merkezinden olan uzaklıktır. Silindirik ve küresel açıklıklar için verilen (3.a) ve (3.b) nolu eşitlikler karşılaştırıldığında, denge eşitliklerinde aşağıda sunulan şekilde bir genelleştirme yapmak mümkün olmuştur.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + n \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (4)$$

2.3 Uyumluluk Koşulları

Hem silindirik hem de küresel açıklık çevresindeki birim deformasyonlara ilişkin uyumluluk koşulu,

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \frac{\varepsilon_\theta - \varepsilon_r}{r} = 0 \quad (5)$$

şeklinde verilmektedir. Açıklık çevresindeki radyal yerdeğiştirme (u) ve birim deformasyon arasındaki ilişki,

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (6)$$

şeklinde verilmektedir.

3. MALZEME DAVRANIŞI

Kaya malzemesinin elastik-kusursuz ve kalıcı plastik davranış gösterdiği ve Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyduğu varsayımı yapılmıştır (Şekil 1). Elastik-kusursuz ve kalıcı plastik davranış gösteren çevre kayaç içinde oluşturulan silindirik ve küresel açıklık çevresinde oluşması beklenen bölgeler ve gerekli tanımlamalar Şekil 2'de gösterilmiştir.

$$\sigma_1 = q\sigma_3 + \sigma_c, \quad q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \text{elastik, kusursuz-plastik bölge} \quad (7.a)$$

$$\sigma_1 = q^*\sigma_3 + \sigma_c^*, \quad q = \frac{1 + \sin \phi^*}{1 - \sin \phi^*} \quad \text{kalıcı plastik bölge} \quad (7.b)$$

Burada, σ_1 , maksimum asal gerilme; σ_3 , minimum asal gerilme; σ_c , kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı; σ_c^* , kırılmış kayacın tek eksenli basınç dayanımı; ϕ , kaya malzemesinin içsel sürtünme açısı ve ϕ^* , kırılmış kayacın içsel sürtünme açısıdır. Plastik bölgede toplam radyal ve teğetsel birim deformasyon arasındaki ilişkiler,

$$\varepsilon_r = -f \varepsilon_\theta \quad \text{kusursuz plastik bölge} \quad (8.a)$$

$$\varepsilon_r = -f^* \varepsilon_\theta \quad \text{kalıcı plastik bölge} \quad (8.b)$$

şeklindedir. Burada f ve f^* deneylerden elde edilen fiziksel sabitlerdir.

4. GERİLME VE BİRİM DEFORMASYON ALANLARI

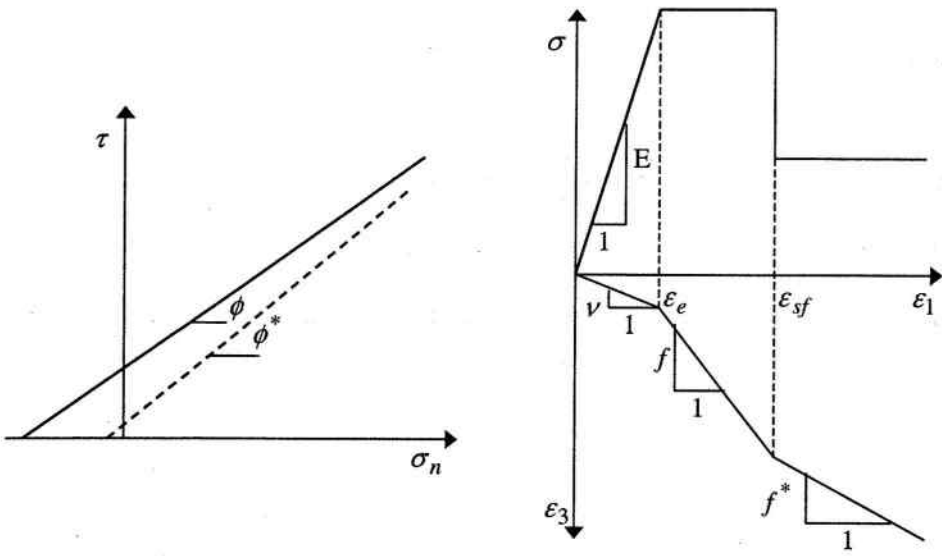
Bu bölümde, hidrostatik birincil gerilme (p_0) ortamında açılan ve düzgün yayılı bir içsel basınca (p_i) sahip silindirik ve küresel açıklık çevresindeki gerilme ve birim deformasyon alanlarını veren kapalı çözüm, elastik-kusursuz ve kalıcı plastik malzeme davranışı için sunulmuştur.

4.1 Elastik Davranış ve Kazı Öncesi Birim Deformasyonlar

4 no.lu eşitlik ile verilen diferansiyel denge eşitliğinde (2) no.lu eşitlik ile verilen oluşumsal eşitlik yerleştirildiğinde aşağıda verilen diferansiyel eşitlik elde edilir.

$$\frac{d}{dr}[(\lambda + 2\mu)\varepsilon_r + n\lambda\varepsilon_\theta] + \frac{n}{r}\{(\lambda + 2\mu)\varepsilon_r + n\lambda\varepsilon_\theta - [\lambda\varepsilon_r + (n\lambda + 2\mu)\varepsilon_\theta]\} = 0 \quad (9)$$

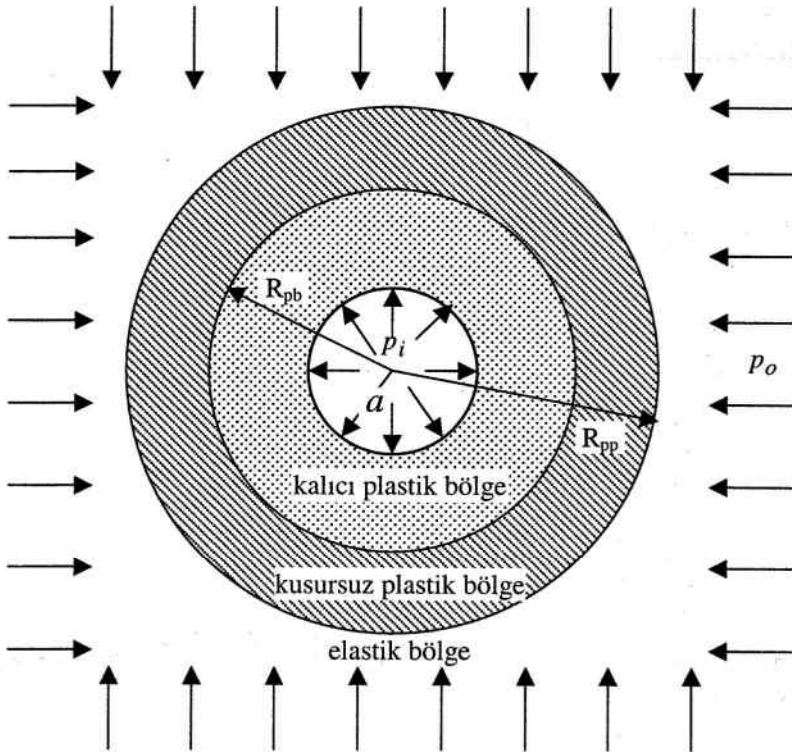
eşitlik düzenlendiğinde,



a. Mohr-Coulomb yenilme ölçütü.

b. Gerilme-birim deformasyon davranışı.

Şekil 1. Kaya için mekanik model.



Şekil 2. Açıklık çevresinde oluşan elastik ve plastik bölgeler.

$$r^2 \frac{d^2 u}{dr^2} + nr \frac{du}{dr} - nu = 0 \quad (10)$$

u 'nun çözümü için $u = r^\alpha$ dönüşümü yapıldığında eşitlik,

$$\alpha(\alpha - 1) + n\alpha - n = 0 \quad (11)$$

şekline dönüşür. Buradan, $\alpha_1 = -n$, $\alpha_2 = 1$ elde edilir. Yerdeğiştirme eşitliği,

$$u = C_1 r + \frac{C_2}{r^n} \quad (12)$$

radyal ve teğetsel birim deformasyon,

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr} = C_1 - n \frac{C_2}{r^{n+1}} \quad (13)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{u}{r} = C_1 + \frac{C_2}{r^{n+1}} \quad (14)$$

ve radyal gerilme,

$$\sigma_r = [(n+1)\lambda + 2\mu] C_1 - n \frac{2\mu}{r^{n+1}} C_2 \quad (15)$$

şeklinde elde edilir. Burada C_1 ve C_2 integrasyon sabitleridir. $r = \infty$ 'da $\sigma_r = P_0$ sınır koşulu (15) no.lu eşitlikte yazılırsa C_1 integrasyon sabiti,

$$C_1 = \frac{P_0}{[(n+1)\lambda + 2\mu]} \quad (16)$$

ve açıklık yüzeyinde ($r = a$), $\sigma_r = \sigma_{ra}$ sınır koşulu (15) no.lu eşitlikte yazılırsa C_2 integrasyon sabiti,

$$C_2 = (P_0 - \sigma_{ra}) \frac{a^{n+1}}{n2\mu} \quad (17)$$

elde edilir. Böylece sırasıyla toplam yerdeğiştirme, toplam radyal ve teğetsel birim deformasyon,

$$u = \frac{P_0}{[(n+1)\lambda + 2\mu]} r + \frac{P_0 - \sigma_{ra}}{n2\mu} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} r \quad (18)$$

$$\varepsilon_{\theta}^I = \frac{u}{r} = \frac{P_0}{[(n+1)\lambda + 2\mu]} + \frac{P_0 - \sigma_{ra}}{n2\mu} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \quad (19)$$

$$\varepsilon_r^I = \frac{du}{dr} = \frac{P_0}{[(n+1)\lambda + 2\mu]} - \frac{P_0 - \sigma_{ra}}{2\mu} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \quad (20)$$

ve radyal ve teğetsel gerilme,

$$\sigma_r = P_0 - (P_0 - \sigma_{ra}) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \quad (21)$$

$$\sigma_{\theta} = P_0 + \frac{1}{n} (P_0 - \sigma_{ra}) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \quad (22)$$

şeklinde elde edilmektedir. Kazıdan önce oluşan birim deformasyonları elde etmek için $\sigma_{ra} = P_0$ sınır koşulu (19) ve (20) no.lu eşitliklerde yazıldığında,

$$\varepsilon_{\theta}^0 = \frac{P_0}{[(n+1)\lambda + 2\mu]} \quad (23)$$

$$\varepsilon_r^0 = \frac{P_0}{[(n+1)\lambda + 2\mu]} \quad (24)$$

elde edilir. Kazı sonucu oluşan birim deformasyonları elde etmek için (19) ve (20) no.lu eşitliklerle verilen toplam birim deformasyonlardan, (23) ve (24) no.lu eşitliklerle verilen kazı öncesi birim deformasyonların çıkartılması gerekmektedir. Böylece,

$$u = \frac{1+\nu}{nE} (P_0 - \sigma_{ra}) \frac{a^{n+1}}{r^n} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1+\nu}{nE} (P_0 - \sigma_{ra}) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \quad (26)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{1+\nu}{E} (P_0 - \sigma_{ra}) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \quad (27)$$

elde edilir.

4.2 Elasto-plastik Davranış

Aydan vd. (1993, 1995) tarafından silindirik açıklık çevresindeki, elastik-kusursuz ve kalıcı plastik malzeme davranışı gösteren kaya malzemesinde oluşan gerilme, birim deformasyon ve normalleştirilmiş açıklık yüzeyi birim deformasyonları için çözüm sunulmuştur. Burada, hem silindirik hem de küresel açıklık için birleştirilmiş çözüm sunulmaktadır.

4.2.1 Gerilme ve birim deformasyon alanları

4.2.1.1 Kalıcı plastik bölge ($a \leq r \leq R_{pb}$)

(4) no.lu denge eşitliğinde $\sigma_3 = \sigma_r$ ve $\sigma_1 = \sigma_\theta$ alınarak, (7.b) no.lu yenilme ölçütü eşitliğinde yerleştirilirse,

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + n(1 - q^*) \frac{\sigma_r}{r} = n \frac{\sigma_c^*}{r} \quad (28)$$

elde edilir. Bu diferansiyel denklem çözüldüğünde aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\sigma_r = C r^{n(q^*-1)} - \frac{\sigma_c^*}{q^*-1} \quad (29)$$

Burada C integrasyon sabiti olup, $\sigma_r = p_i$ ve $r = a$ sınır koşulunda integrasyon sabiti,

$$C = \left(p_i + \frac{\sigma_c^*}{q^*-1} \right) \frac{1}{a^{n(q^*-1)}} \quad (30)$$

elde edilir. Böylece radyal ve teğetsel gerilmeler,

$$\sigma_r = \left(p_i + \frac{\sigma_c^*}{q^*-1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{n(q^*-1)} - \frac{\sigma_c^*}{q^*-1} \quad (31)$$

$$\sigma_\theta = q^* \left(p_i + \frac{\sigma_c^*}{q^*-1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{n(q^*-1)} - \frac{\sigma_c^*}{q^*-1} \quad (32)$$

şeklinde elde edilir. Uyumluluk eşitliğinde (5), eşitlik (8.b) nin yerleştirilmesiyle elde edilen diferansiyel eşitliğin çözümü ile,

$$\varepsilon_\theta = \frac{A}{r^{f^*+1}} \quad (33)$$

elde edilir. Burada A , integrasyon sabiti olup, kusursuz-kalıcı plastik sınırdaki ($r = R_{pb}$) teğetsel birim deformasyonun sürekliliğinden dolayı,

$$A = \varepsilon_{\theta}^{pb} R_{pb}^{f^*+1} \quad (34)$$

olarak bulunur. Burada, $\varepsilon_{\theta}^{pb}$, kusursuz-kalıcı plastik sınırdaki ($r = R_{pb}$) teğetsel birim deformasyon olup aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$\varepsilon_{\theta}^{pb} = \eta_{sf} \varepsilon_{\theta}^{ep} \quad \eta_{sf} = \frac{\varepsilon_{sf}}{\varepsilon_e} \quad (35)$$

Burada, ε_{sf} , kusursuz-kalıcı plastik sınırdaki teğetsel birim deformasyon seviyesi (Şekil 1); $\varepsilon_{\theta}^{ep}$ ise elastik-kusursuz plastik sınırdaki teğetsel birim deformasyon olup aşağıdaki eşitlik ile

$$\varepsilon_{\theta}^{ep} = \frac{1+\nu}{nE} (p_0 - \sigma_{rp}) \quad (36)$$

tanımlanır. Burada σ_{rp} ise elastik-kusursuz plastik sınırdaki radyal gerilme olup (48) no.lu eşitlik ile tanımlanmaktadır. Sonuç olarak, kalıcı plastik bölgede teğetsel birim deformasyon,

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1+\nu}{nE} (p_0 - \sigma_{rp}) \eta_{sf} \left(\frac{R_{pb}}{r} \right)^{f^*+1} \quad (37)$$

şeklinde elde edilir.

4.2.1.2 Kusursuz plastik bölge ($R_{pb} \leq r \leq R_{pp}$)

(4) no.lu denge eşitliğinde $\sigma_3 = \sigma_r$ ve $\sigma_1 = \sigma_{\theta}$ alınarak, (7.a) no.lu yenilme ölçütü eşitliğinde yerleştirilirse,

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + n(1-q) \frac{\sigma_r}{r} = n \frac{\sigma_c}{r} \quad (38)$$

elde edilir. Bu diferansiyel denklem çözüldüğünde aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\sigma_r = C r^{n(q-1)} - \frac{\sigma_c}{q-1} \quad (39)$$

$\sigma_r = \sigma_{rp}$ ve $r = R_{pp}$ sınır koşulunda integrasyon sabiti,

$$C = \left(\sigma_{rp} + \frac{\sigma_c}{q-1} \right) \frac{1}{R_{pp}^{n(q-1)}} \quad (40)$$

elde edilir. Böylece radyal ve teğetsel gerilmeler,

$$\sigma_r = \left(\sigma_{rp} + \frac{\sigma_c}{q-1} \right) \left(\frac{r}{R_{pp}} \right)^{n(q-1)} - \frac{\sigma_c}{q-1} \quad (41)$$

$$\sigma_\theta = q \left(\sigma_{rp} + \frac{\sigma_c}{q-1} \right) \left(\frac{r}{R_{pp}} \right)^{n(q-1)} - \frac{\sigma_c}{q-1} \quad (42)$$

Bir önceki bölüme benzer olarak, kusursuz plastik bölgedeki teğetsel birim deformasyon,

$$\varepsilon_\theta = \frac{1+\nu}{nE} (p_0 - \sigma_{rp}) \left(\frac{R_{pp}}{r} \right)^{f+1} \quad (43)$$

şeklinde elde edilir. Eşitlik (37) ve (43), $r = R_{pb}$ 'de teğetsel birim deformasyonların sürekliliğinden dolayı eşitlenirse, plastik bölge yarıçapları arasındaki ilişki,

$$\frac{R_{pp}}{R_{pb}} = \eta_{sf}^{\frac{1}{f+1}} \quad (44)$$

4.2.1.3 Elastik bölge ($R_{pp} \leq r$)

Daha önceki bölümde detaylı çözümü sunulan elastik bölgedeki gerilme ve birim deformasyonlar,

$$\sigma_r = p_0 - (p_0 - \sigma_{rp}) \left(\frac{R_{pp}}{r} \right)^{n+1} \quad (45)$$

$$\sigma_\theta = p_0 + \frac{1}{n} (p_0 - \sigma_{rp}) \left(\frac{R_{pp}}{r} \right)^{n+1} \quad (46)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1+\nu}{nE} (p_0 - \sigma_{rp}) \left(\frac{R_{pp}}{r} \right)^{n+1} \quad (47)$$

şeklinde elde edilir. Elastik-kusursuz plastik sınırdaki teğetsel gerilme (σ_{rp})'nin spesifik şekli, $r = R_{pp}$ 'de teğetsel gerilmelerin sürekliliğinden dolayı, (42) ve (45) no.lu eşitliklerin eşitlenmesiyle aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$\sigma_{rp} = \frac{p_0 + n(p_0 - \sigma_c)}{1 + nq} \quad (48)$$

4.2.2 Açıklık Yüzeyine Göre Normalleştirilmiş Birim Deformasyonlar

4.2.2.1 Elastik durum

Açıklık yüzeyindeki teğetsel birim deformasyon ve teğetsel gerilme aşağıdaki eşitliklerle verilebilir.

$$\varepsilon_{\theta}^a = \frac{1+\nu}{nE} (p_0 - p_i) \quad (49)$$

$$\sigma_{\theta}^a = \frac{n+1}{n} p_0 - \frac{1}{n} p_i \quad (50)$$

Burada, p_i içsel veya tahkimat basıncıdır. Eğer açıklığın birim deformasyonu elastik sınır değerinde ise teğetsel gerilme σ_{θ}^a , kayacın tek eksenli basınç dayanımına σ_c eşittir ($p_i = 0$ için). Böylece, elastik birim deformasyon sınırı,

$$\varepsilon_{\theta}^e = \frac{1+\nu}{E} \cdot \frac{\sigma_c}{n+1} \quad (51)$$

olarak elde edilir. Yukarıda bulunan ilişki (49) no.lu eşitlikte kullanılırsa açıklık yüzeyindeki normalleştirilmiş birim deformasyon (ξ) elde edilir.

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\theta}^a}{\varepsilon_{\theta}^e} = \frac{n+1}{n} \left(\frac{1-\beta}{\alpha} \right) \leq 1 \quad (52)$$

Burada, β , birincil gerilmeye göre normalleştirilmiş tahkimat basıncı,

$$\beta = \frac{p_i}{p_0} \quad (53)$$

ve α ise direnç katsayısı olup,

$$\alpha = \frac{\sigma_c}{p_0} \quad (54)$$

eşitliği ile elde edilir.

4.2.2.2 Kusursuz-plastik durum

Açıklık yüzeyindeki teğetsel birim deformasyon aşağıdaki eşitlikle verilebilir.

$$\varepsilon_{\theta}^a = \frac{1+\nu}{nE} (p_0 - \sigma_{rp}) \left(\frac{R_{pp}}{a} \right)^{f+1} \quad (55)$$

Elastik sınır ise şu şekildedir.

$$\varepsilon_{\theta}^e = \frac{1+\nu}{nE} (p_0 - \sigma_{rp}) \quad (56)$$

Yukarıda elde edilen ilişkiyi (55) no.lu eşitlikte kullanılırsa açıklık yüzeyindeki normalleştirilmiş birim deformasyon elde edilir.

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\theta}^a}{\varepsilon_{\theta}^e} = \left\{ \frac{(1+n)[(q-1)+\alpha]}{(1+nq)[(q-1)\beta+\alpha]} \right\}^{\frac{f+1}{n(q-1)}} \quad (57)$$

4.2.2.3 Kalıcı plastik durum

Açıklık yüzeyindeki teğetsel birim deformasyon aşağıdaki eşitlikle verilebilir.

$$\varepsilon_{\theta}^a = \frac{1+\nu}{nE} (p_0 - \sigma_{rp}) \eta_{sf} \left(\frac{R_{pb}}{a} \right)^{f^*+1} \quad (58)$$

(56) ve (58) no.lu eşitliklerin kullanılmasıyla, açıklık yüzeyindeki normalleştirilmiş birim deformasyon aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\theta}^a}{\varepsilon_{\theta}^e} = \eta_{sf} \left\{ \frac{\left(\frac{(1+n)[(q-1)+\alpha]}{(1+nq)(q-1)} (\eta_{sf})^{\frac{n(1-q)}{f+1}} - \frac{\alpha}{q-1} + \frac{\alpha^*}{q^*-1} \right)^{\frac{f^*+1}{n(q^*-1)}}}{\beta + \frac{\alpha^*}{q^*-1}} \right\} \quad (59)$$

Burada,

$$\alpha^* = \frac{\sigma_c^*}{p_0} \quad (60)$$

şeklindedir.

5. UYGULAMA

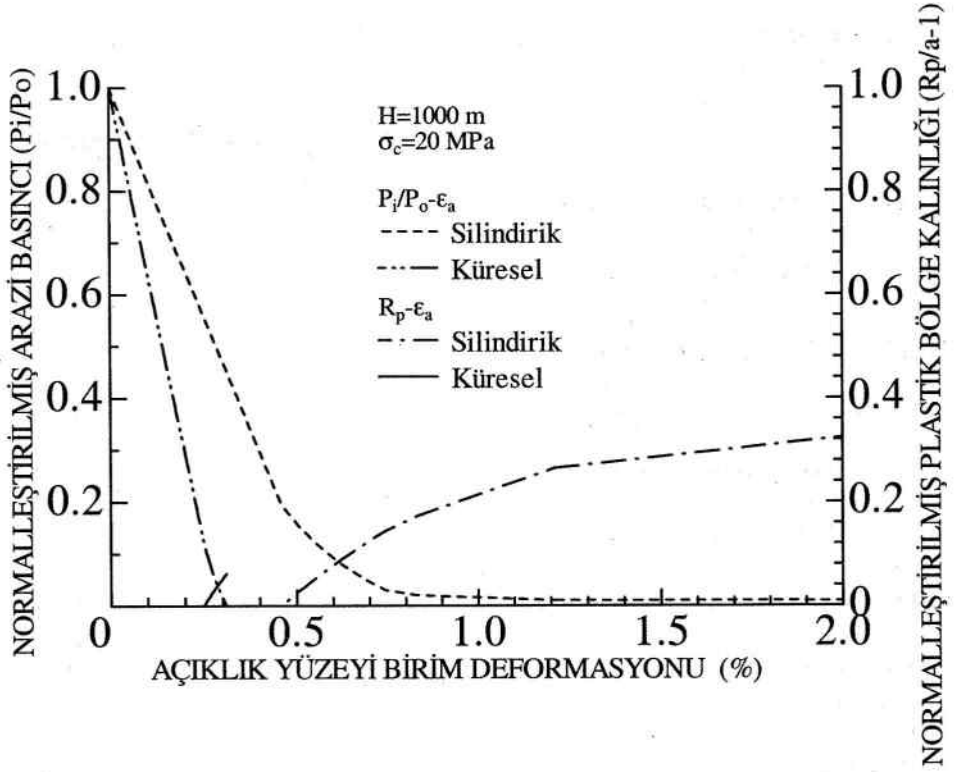
Bir önceki bölümde önerilen analitik çözüm yöntemi kullanılarak hem silindirik hem de küresel bir açıklığın elasto-plastik tepkisi elde edilmiştir. Yeryüzünden 1000 m derinlikte, 6 m çapındaki silindirik ve küresel açıklığın tek eksenli basınç dayanımı 20 MPa ve birim hacim ağırlığı 25 kN/m³ olan bir ortamda açıldığı varsayılmıştır.

Kaya kütlesi ve malzemesine ilişkin dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde Aydan vd. (1993, 1995) tarafından önerilen görgül eşitlikler kullanılmıştır. Söz konusu eşitliklerde, kaya malzemesi veya kütlesinin özellikleri, kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ile ilişkilendirilmiştir. Burada bu görgül eşitlikler açıklanmayacaktır. Analizde kullanılan parametrelerin değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Analizde kullanılan kaya malzemesi ve kütlesine ilişkin dayanım ve deformasyon özellikleri.

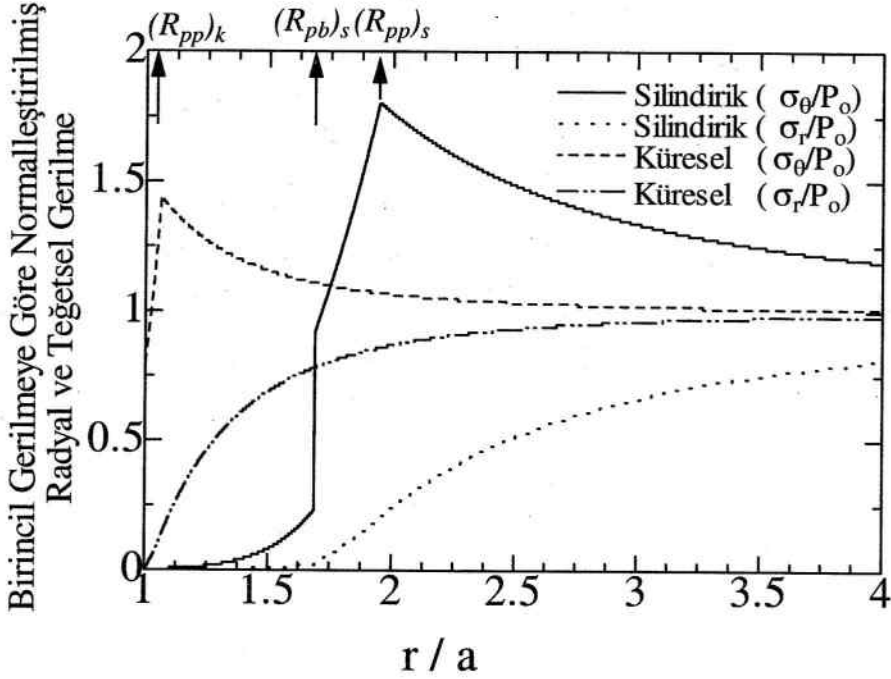
Özellik	Sembol	Değer
Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı	σ_c	20 MPa
Kaya kütlesinin tek eksenli basınç dayanımı	σ_c^*	0.05 MPa
Kaya malzemesinin deformasyon modülü	E	5.5 GPa
Poisson oranı	ν	0.25
Kaya malzemesinin birim hacim ağırlığı	γ	25 kN/m ³
Kaya malzemesinin içsel sürtünme açısı	ϕ	42.3°
Kırılmış kayacın içsel sürtünme açısı	ϕ^*	54.8°
Kalıcı-kusursuz plastik sınırdaki normalleştirilmiş birim deformasyon seviyesi	$\eta_{sf} = (\eta_p + \eta_s)/2$	1.311
Kusursuz plastik evredeki fiziksel sabit	f	2.60
Kalıcı plastik evredeki fiziksel sabit	f^*	3.96
Hidrostatik birincil gerilme	P_o	25 MPa

İlk olarak, silindirik ve küresel açıklık için arazi reaksiyon eğrisi oluşturulmuştur. Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyan kaya kütleğinde oluşturulan açıklığın yüzeyinde oluşan birim deformasyon ile normalleştirilmiş arazi basıncı ve normalleştirilmiş plastik bölge genişliği arasındaki ilişki ortaya konmuştur (Şekil 3). Aynı içsel basınca sahip silindirik açıklık çevresindeki plastik bölge genişliği ve açıklık yüzeyi birim deformasyonu, küresel açıklığa göre daha fazla olmaktadır (Şekil 3 ve 4). Sunulan örnekte, silindirik açıklık çevresindeki elastik-kusursuz plastik bölge yarıçapı 5.84 m, kalıcı-kusursuz plastik bölge yarıçapı 5.07 m olarak bulunmuştur. Aynı koşullardaki küresel açıklıkta ise kalıcı plastik bölge oluşmamış olup elastik-kusursuz plastik bölge yarıçapı 3.19 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 4).



Şekil 3. Silindirik ve küresel açıklık yüzeyinde oluşan birim deformasyon, plastik bölge kalınlığı ve arazi reaksiyon eğrisi.

Daha sonra, içsel basıncın olmadığı silindirik ve küresel açıklık çevresindeki teğetsel ve radyal ikincil gerilme dağılımları Şekil 4'de sunulmuştur. Bu örnekte, silindirik açıklık çevresindeki teğetsel gerilmenin küresel açıklığa göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca küresel açıklık çevresinde oluşan radyal ve teğetsel gerilmeler açıklıktan uzaklaştıkça silindirik açıklığa göre daha hızlı birincil gerilmeye yakınsamaktadır. Bunun sonucu olarak da küresel açıklık çevresinde oluşan plastik bölge aynı koşullarda açılan silindirik açıklığa göre daha az olmaktadır.



Şekil 4. Silindirik ve küresel açıklık çevresinde oluşan radyal ve teğetsel gerilme dağılımı ($P_i = 0$).

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, elastik-kusursuz ve kalıcı plastik malzeme davranışı gösteren, Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uyan ve hidrostatik birincil gerilme ortamında oluşturulan silindirik ve küresel açıklık çevresindeki gerilme ve birim deformasyon alanlarının belirlenmesi için birleştirilmiş bir analitik çözüm önerilmiştir. Bu tür analitik çözümler, ön tasarım aşamasında, tasarımcıya tasarım değişirgelerinin değişiminin duraylılığı ne yönde değiştireceği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca aynı birincil gerilme ortamı ve kaya kütesinde oluşturulan küresel açıklığın silindirik açıklığa göre duraylılık açısından daha uygun olduğu gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR

İkinci yazar, bu çalışmanın Japonya'da gerçekleşmesinde sağladığı finansal kaynak için Matsumae Uluslararası Vakfı (Matsumae International Foundation)'na teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKLAR

- Aydan, Ö., Akagi, T. ve Kawamoto, T. 1993. The squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26 (2), 137-163.
- Aydan, Ö., Akagi, T. ve Ito, T. 1995. Prediction of deformation behaviour and design of support systems of tunnels in squeezing rocks. Development Scientific Research of Monbusho, Research No. 05555139, 94 p.
- Brown, E.T., Bray, J.W., Ladanyi, B. ve Hoek, E. 1983. Characteristic line calculations for rock tunnels. *J. Geotech. Engineering*, ASCE, 109, 15-89.
- Fairhurst, C. ve Carranza-Torres, C. 1999. The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 36, 777-809.
- Şenyur, G. 1998. Küresel bir yeraltı açıklığı için arazi reaksiyon eğrisi. *Kaya Mekaniği Bülteni*, TUKMD, 14, 15-28.

**ŞİŞME DAVRANIŞI
VE
MÜHENDİSLİK YAPILARINA ETKİLERİ**

**Swelling Behaviour
and
its effects on the engineering structures**

**M. Erdinç BİLİR
Yadigar V. MÜFTÜOĞLU**

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZET

İnsanoğlu için vazgeçilmez bir besin kaynağı olan su, buna karşın montmorillonit, anhidrit gibi şişen mineraller içeren zemin ve kayaçların hacmini arttırarak mühendislik yapıları için zararlı ve tehlikeli bir durum oluşturabilmektedir. Bu çalışmada, ilk olarak şişme olgusunun daha iyi tanınması ve anlaşılabilmesi için hacim artışı etkileyen üç temel faktör olan şişen mineraller, su ve gerilme rahatlaması incelenmiş, daha sonra şişme davranışının ne denli ciddi sorunlara neden olabileceği ele alınarak bu sorunlar literatürdeki bazı örneklerle açıklanmıştır. Ayrıca, yeraltı yapıları için şişme sorununa karşı alınabilecek önlemler tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Anhidrit, kil, montmorillonit, şişme, tünel.

ABSTRACT

Water which is an essential nutrition resource for humanbeing; yet, it may create detrimental and dangerous situations for engineering structures, by increasing the volume of rocks and soils bearing swelling minerals like montmorillonite and anhydrite. In this study, at first, three main parameters, i.e. swelling minerals, water and stress-relief which effect the volume increase were examined for the better definition and understanding of the swelling phenomenon. Then, how serious problems can be produced by the swelling behavior were introduced and they were illustrated with some examples taken from the literature. Furthermore, the remedial measures which can be applied to swelling problems for underground structures were discussed.

Key Words: Anhydrite, clay, montmorillonite, swelling, tunnel.

1. GİRİŞ

Şişme olgusu, insanoğlunun zemin veya kayaçlar üzerinde veya içinde mühendislik yapıları oluşturmaya başladığından bu yana problemlere neden olmuştur. Başlangıçta, yeterli deneyim ve bilginin olmayışı, şişme sonucu oluşan basınçların küçümsenmesi, günümüzde ise yapılan araştırmalara rağmen konunun karmaşık olması nedeniyle problemlere bulunan çözümler geçici olmaktadır. Bu çalışmada, şişme davranışını etkileyen üç temel faktör ayrıntılı olarak incelenerek şişmeyle ilgili problemlerden örnekler verilmiş ve yeraltı mühendislik yapılarındaki şişme tasarımı yaklaşımları tanıtılmıştır.

2. ŞİŞME DAVRANIŞI

Şişme, zemin ve kayaçları oluşturan minerallerden bazılarının su ile fiziko-kimyasal reaksiyona girmesi sonucu oluşan zamana bağlı hacim artışıdır. Hacim artışı, herhangi bir yüzey tarafından engellendiğinde o yüzeyde aşırı şişme gerilmeleri oluşmakta, hacim artışına izin verildiğinde ise, yüksek şişme deformasyonları ile karşılaşmaktadır.

Şişme özelliği olmayan bir zemin veya kayaç, ortamdaki koşullar ne olursa olsun, şişmeye maruz kalmamaktadır. Öte yandan, şişme potansiyeli olan bir ortamın suyla teması sonucunda da, ortamdaki doğal gerilmelerin yüksek olması sebebiyle şişme olmayabilir. Su içeren fiziko-kimyasal reaksiyonlar şişme davranışında genellikle başlıca rolü oynar. Ancak aynı anda veya daha sonra oluşan bir gerilme rahatlamasıyla şişme meydana gelir. Bu faktörleri göz önüne alan Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) Şişen Kayaçlar Komisyonu, şişme mekanizmasını su içeren fiziko-kimyasal reaksiyonlar ile gerilme rahatlamasının bir kombinasyonu olarak tanımlamıştır (ISRM, 1983). Bu tanımlamaların ışığında şişme davranışından söz edebilmek için ortamda üç temel faktörün bir arada bulunması gerekmektedir. Bunlar; şişen mineraller, su ve gerilme rahatlamasıdır.

2.1. Şişen Mineraller

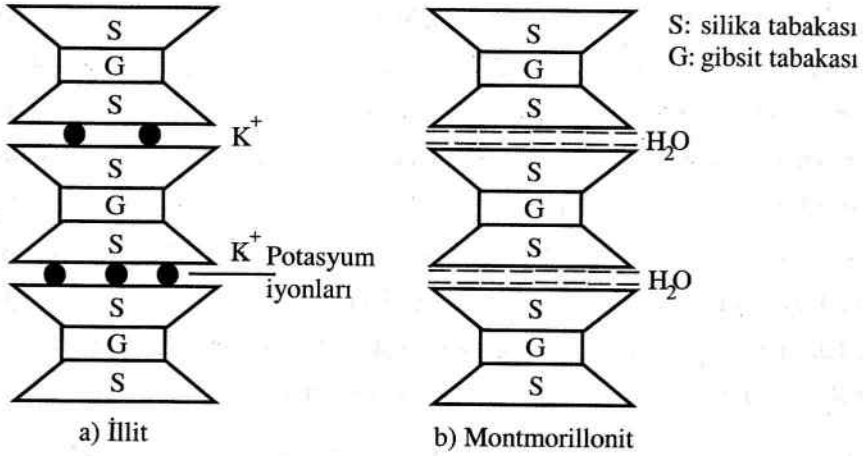
Şişme özelliğine sahip simektit grubu kil, anhidrit ve pirit-markazit minerallerinde oluşan başlıca üç şişme mekanizması aşağıda sıralanmıştır (Einstein, 1996).

Mekanik şişme: Killi kayalarda görülür ve konsolidasyonun tersi yönünde çalışan bir süreçtir. Gerilme rahatlaması, negatif aşırı gözenek basıncına neden olur. Böylece yeraltı suyu gözenekler içine doğru akarak aşırı gözenek basıncı dengelenir ve basınç artışı sonucunda şişme gerçekleşir.

Ozmotik şişme: Killerde ve killi kayalarda görülen ozmotik şişme çift tabaka etkisi ile ilgilidir. Çift tabaka kuramına göre, 10 Å'a kadar olan ilk birkaç su katmanının kil kristali etrafında tutulmasında yüzey kimyası ve iyon konsantrasyonu önemli bir rol oynamaktadır. Kristal yüzeyinden 10 Å'dan daha uzak mesafelerde suyun tutulması ise ozmotik süreçle mümkün olmaktadır. Çift tabakanın sınırları serbest gözenek suyu ile temas halinde yarı geçirgen ozmotik bir zar olarak etki yapar. Bu durumda boşluk suyu iyon konsantrasyonunu azaltmaya yönelik olarak çift tabakanın içine girer. Çift tabaka su hacmi artış gösterir, birbiriyle temas halinde olan öteki kil taneciklerine ait çift tabaka üzerinde etki yapar ve sonuçta hacim artışı olur.

Taneler arası şişme: Taneler arası şişme veya hidrasyon; simektit, anhidrit ve pirit-markazitte oluşur. Simektitlerde, değişebilir katyonların hidrasyonu taneler arası şişmeye neden olur. Dört yüzlü-sekiz yüzlü-dört yüzlü kristal yapısına sahip simektit grubu minerallerinin başlıca örnekleri olarak montmorillonit, montronit, beidellit, saponit, vermikulit verilebilir. Montmorillonitte olduğu gibi, silika tabakasındaki dört yüzlülerden bazılarının merkezine Si^{+4} yerine Al^{+3} , Fe^{+2} gibi, alümina (gibsit) tabakasındaki sekiz yüzlülerden bazılarının merkezine ise Al^{+3} yerine Mg^{+2} , Fe^{+2} , Zn^{+2} , Li^{+1} gibi yükseltgenme basamağı daha küçük iyonların geçmesi nedeniyle mineral içindeki negatif (-) yük fazlalığı ortaya çıkar. Bu negatif (-) yük fazlalığı, katmanlar arasına giren katyonlar tarafından dengelenerek mineral içinde elektronötrallik sağlarlar. Bunlar; Na^{+} , K^{+} , Ca^{++} , Mg^{+} katyonları olabilir. Sodyum katyonu, katmanlar arasına çok miktarda suyun girmesine ve mineralin şişmesine yol açarken, kalsiyum iyonu daha az miktarda suyun girmesine ve mineralin daha az şişmesine neden olur. Montmorillonitik killerin absorbe su tabakası kalınlığı ve özgül tane yüzey alanları diğer killere göre büyüktür. Dolayısıyla su tutma kapasiteleri de büyüktür (Lambe ve Whitman, 1969). Şişmeyen kil ve şişen kil mineralleri Şekil 1'de gösterilmiştir.

Anhidrit (susuz alçıtaşı) ve jips (alçıtaşı) gibi evaporitik kayalar, kurak iklim koşullarındaki içdeniz ve göllerde veya açık denizle olan bağlantıları zaman zaman kopan sığ denizlerin koy ve körfezlerinde hızlı buharlaşmayla oluşurlar.



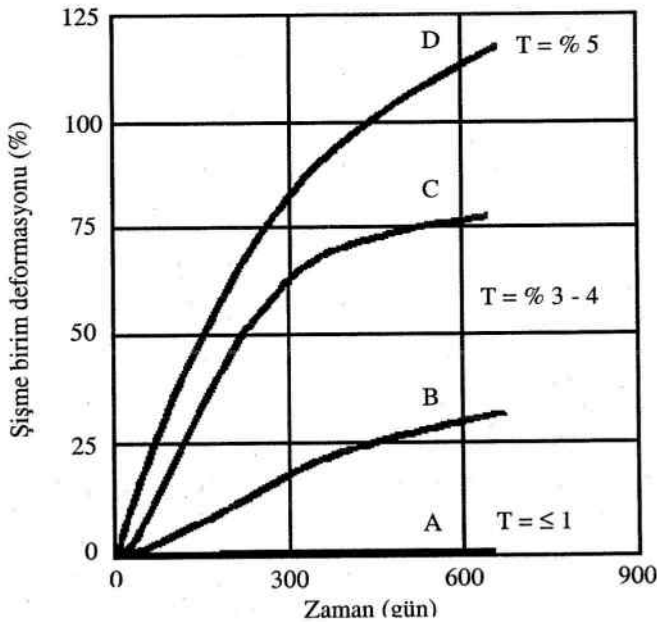
Şekil 1. Tabakaları genişleyebilen ve genişleyemeyen kil mineralleri (Grim, 1968).

Anhidritin hidrasyonu, jipse dönüşüm evresidir. Anhidrit genellikle önce su ile çözünür ve daha sonra jips olarak çöker. Dışa açık kuru bir sistemdeki geçirimli anhidrite dönüşüm için, suyun dışardan beslenmesi halinde oluşan jipsin hacmi anhidrite oranla % 61 daha fazladır (Vardar ve Fecker, 1986). Doğal çatlaklı, ince tabakalı, kazı sırasında örselenmiş anhidritte önemli miktarda şişme meydana gelirken, birkaç çatlaklı masif anhidritte hidrasyon sadece yüzeyde olacağından çok az miktarda şişme gelişecektir.

Su gerektirmeyen pirit ve markazitlerin oksidasyonunda bazı bakterilerin etkisiyle sülfürik asit meydana gelir. Asidik yeraltısuyunun mika içindeki sodyum ve potasyum gibi iyonlarla tepkimeye girmesi, jarosit gibi ikincil sülfatları oluşturarak şişmeye neden olur. Asidik yeraltısuyu kalsit gibi kalsiyum karbonatlarla da jips dolayısıyla ikincil bir şişme oluşturmak için tepkimeye girebilir. Harper vd. (1979)'ne göre kalsitten jipse dönüşüm sürecinde % 99'luk bir hacim artışı olabilir. Franklin ve Oussealt (1989); Oslo (Norveç), Ottova (Ontario, Kanada) ve Cleveland (Ohio, ABD)'da bulunan pirit içeren bazı siyah şeyllerin, temellerde şişme sorunlarına yol açtığını bildirmektedirler.

Taşlaşmış çimento derecesi, bu üç temel mekanizmayı etkilemektedir. Genellikle kalsit dolgusu şeklinde olan bu çimento şişmeyi sınırlar. Çimentonun (örneğin kalsitin) çözünmesi veya ortadan kalkması ise şişmeyi kolaylaştırır.

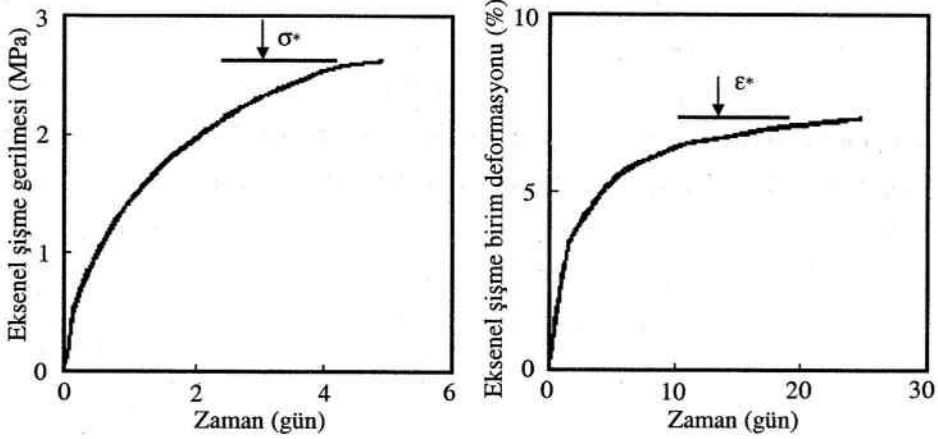
Her üç mekanizmanın birbirini etkilemesi gerçek hacim artışının tahmin edilmesini zorlaştırır. Örneğin, simektit türü kil içeren kayalarda ve anhidritle killerin bir arada bulunduğu kil-sülfat kayalarında üç mekanizmayla da şişme oluşabilir. Şekil 2’de gösterilen ve kil-sülfat kayalarında elde edilen “zaman-şişme deformasyonu” eğrisinin ilk kısımları kilin şişmesinden kaynaklanmaktadır (Madsen ve Nüesch, 1991). Yukarıda anlatılan şişme mekanizmalarındaki kuramsal değerler, hacmin ne kadar artacağını gösterir. Birkaç mekanizmanın etkileştiği durumda hacim artışını belirlemek için dikkatli ve hassas şekilde yürütülen deneyler yapılması gereklidir. Madsen ve Müller-von Moss (1989), kuramsal en büyük şişme gerilmesinin ozmotik şişme için yaklaşık 2 MPa, taneler arası kil şişmesinde ise 100 MPa olduğunu belirtmektedir. Anhidritteki en büyük şişme gerilmesi ise 1 ile 7 MPa arasında değişmektedir. (Madsen ve Nüesch, 1991; Madsen vd., 1995). Hem şişme gerilmelerini, hem de hacim artışını gösteren bu değerler, kuramsal olarak veya laboratuvar deneyleriyle belirlenmiş değerlerdir. Nüesch vd. (1995), bu değerlerin yerinde (in-situ) farklı (genellikle daha küçük) olacağını vurgulamaktadır.



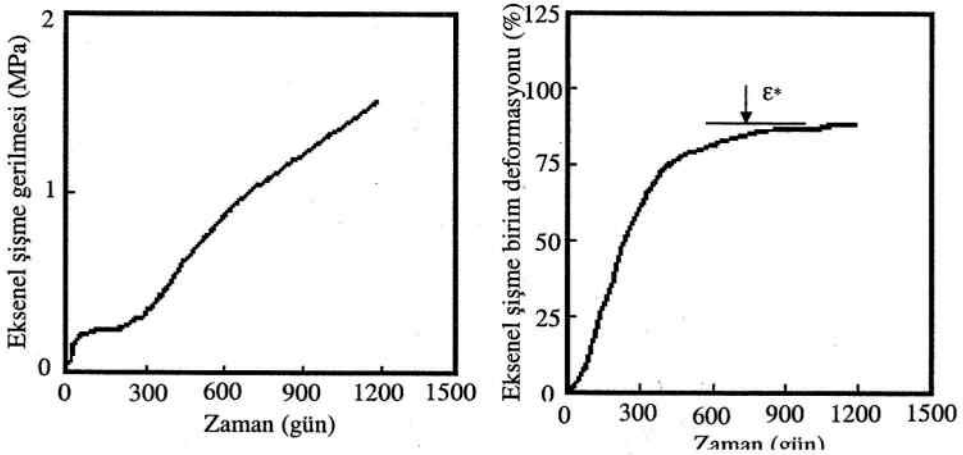
Şekil 2. Farklı kil miktarlarına (T) sahip kil-sülfat kayalarında (A, B, C, D) “eksenel serbest şişme- zaman” değişimi grafikleri (Madsen ve Nüesch, 1991).

Şişme hızı ve süresi geniş aralıklarda değişmektedir. Örneğin, tünellerde gözlenen şişme hızı aylık olarak hissedilmeyen değerlerden 1 m veya daha fazla değerlere kadar değişirken, şişme süresi birkaç günden birkaç yüzyıla kadar değişebilir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, killi kayaçlarda şişmenin büyük bir kısmı ilk birkaç günde gelişirken, killi anhidritik kayaçlarda şişmenin tamamlanması birkaç yıl almaktadır (Madsen, 1999). Şişme olgusunun incelenmesi ve değerlendirilmesinde zaman çok önemli bir

a) Killi kayaç



b) Killi anhidritik kayaç

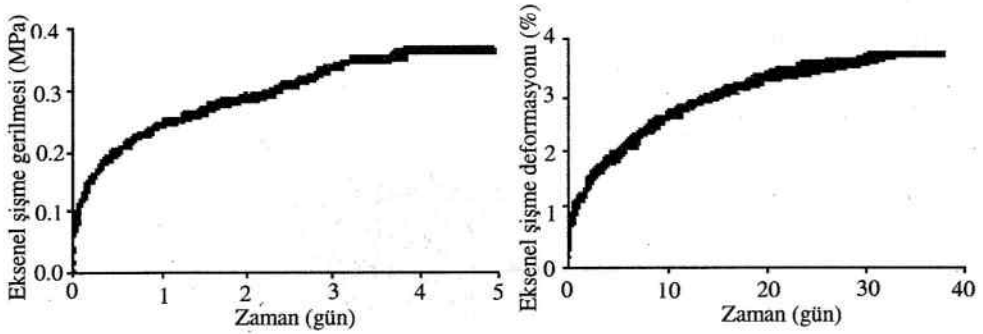


Şekil 3. Killi ve anhidritik killi kayaçlarda eksenel şişme gerilmesi ile eksenel şişme birim deformasyonunun zamanla değişimi (Madsen, 1999).

σ^* : En büyük eksenel şişme gerilmesi, ϵ^* : En büyük eksenel şişme birim deformasyonu

etkendir. Dolayısıyla yapılacak deneysel çalışmalarda verilerin sürekli ve sistematik bir şekilde kayıt edilerek değerlendirilmesi, çok büyük önem arz etmektedir. Bilir (2001), bu kapsamda Yeşil (1991) tarafından geliştirilen üç eksenli şişme deney düzenliğini geliştirerek gerek deneyin yürütülmesini ve gerekse veri kayıt işlemini bilgisayar kontrollu hale dönüştürmüştür.

Aynı araştırmacı, bu düzenekle simektit içeren yapay örnekler üzerinde yaptığı üç eksenli şişme deneylerinde, en büyük eksenel şişme gerilmesine 2 ile 4 gün arasında, en büyük eksenel şişme birim deformasyonuna ise, 9 ile 38 gün arasında ulaşıldığını belirtmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Simektit içeren bir kil örneğinin 0.25 MPa yanal basınçta sabit hacimdeki eksenel şişme gerilmesinin ve 0.183 MPa eksenel gerilme altında şişme birim deformasyonunun zamanla değişimi (Bilir, 2001).

2.2. Su

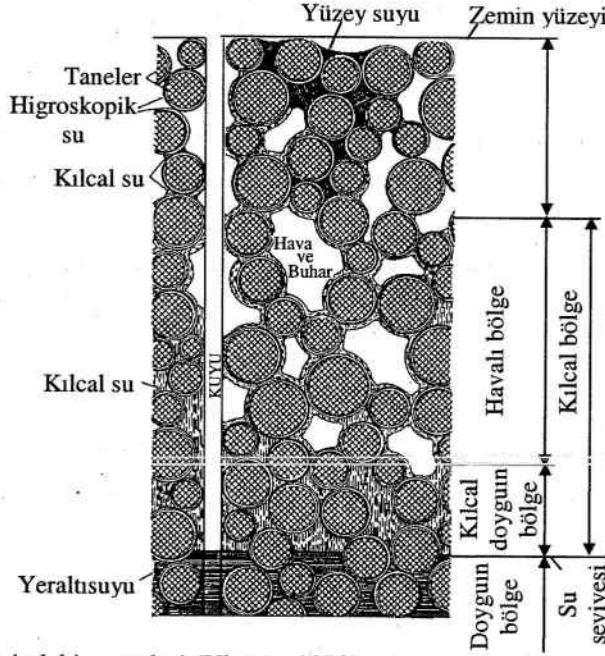
Hava ve zemin arasında sıvı, gaz ve katı hallerine girerek sonsuz bir çevrim içinde olan su, pozitif ve negatif yüzeylere bağlanabilme (ıslatma) özelliği sayesinde şişen mineralleri etkileyerek hacimlerini arttırmaktadır. Bu etki, zemin içindeki su türleri ve süreksizlikler gözönünde bulundurularak aşağıda tartışılmıştır.

2.2.1. Suyun Zemin İçindeki Düşey Dağılımı

Zemin içinde üç tür su bulunur (Ulugür, 1972; Şahinci, 1986). Birincisi, tanelerce emilmiş veya taneleri saran bağlı su; ikincisi, taneler arasındaki kılcal damarlarda yükselen kapiler su; üçüncüsü ise, taneler arası boşlukları dolduran ve yerçekimi etkisi altında olan yeraltısuyudur (Şekil 5). Bağlı su elektriksel kuvvetler, kapiler su sıvılarda

gözlenen yüzeysel çekme kuvvetleri, yeraltısuyu ise yerçekimi kuvvetleri tarafından denetim altında tutulur. Bağlı su ve kapiler su statik su kütleleri olarak kabul edilebilir. Yeraltısuyu ise statik olmayıp zemin içinde hareket edebilme yeteneğine sahiptir.

Bağlı su, zeminin öz yapısına dahil olmuş su kısmını belirler (Tarhan, 1989; Özyayın, 1997). Bu suların zeminden akaçlanması, yerçekimi etkisi altında olmamaları nedeniyle mümkün değildir. Bağlı su; adsorbe su (higroskopik su) ve peliküler su (zar suyu) olmak üzere ikiye ayrılır. Elektriksel çekim kuvvetleri sonucu su molekülleri tanelerin yüzeyine yapışır ve tane yüzeylerinin adsorbe su olarak nitelendirilen bir su tabakası ile kaplanmasına yol açar. Adsorbe su, küçük veya orta taneli zeminlerde % 15 – 20, iri taneli kumlarda % 0.2 – 0.5 arasında bulunur. Peliküler su, adsorbe suyu 0.1 mikronu geçmeyen bir kalınlıkta saran ve moleküllerin çekimi ile duran su tabakası olup, kayalardan santrifüjle çekilebilirler. Peliküler su, killerde % 40 - 45, kumlarda ise % 1.5 – 3 kadardır.



Şekil 5. Zemin içindeki su türleri (Ulugür, 1972).

Kapiler su, yeraltısuyu seviyesinin üzerinde bulunur ve zeminin cinsine bağlı olarak değişen kalınlıklara sahiptir. Bu kısımda zemin taneleri arasındaki boşluklar birbirine bağlı olduğu için, zemin içinde kılcal damarlar oluşur. Kılcallık, su ile hava arasındaki ara yüzeyin belirli yarıçapın altına düşmesiyle yüzey geriliminin etkinlik kazanması

şeklinde özetlenebilir. Su, bu kanallar boyunca yukarı doğru tırmanır. Belli bir yüksekliğe kadar tamamen suya doymuş hale gelebilen zemin, daha üst seviyelerde ise kısmen suya doymuş bir durumdadır.

Yeryüzüne düşen suyun önemli bir kısmı zemine sızarak yerçekimi etkisi altında düşey ve yatay yönde hareket eder. Arazinin topoğrafyasına bağlı olarak, belli bir seviyeye kadar zemin içindeki boşlukları tamamen doldurarak, üst yüzeyi yeraltısuyu seviyesi olarak adlandırılan sürekli bir su kütlesi meydana getirir. Yeraltısuyu seviyesi yüzeyi hemen hemen zemin yüzeyi topoğrafyasına paraleldir. Yeraltısuyu yüksek kotlardan düşük kotlara doğru yerçekimi kuvvetlerinin etkisi altında hareket halindedir, yamaçlarda ise yeraltısuyu seviyesi yaklaşık olarak topoğrafyaya paralel konumdadır. Yeraltısuyu seviyesi, düşey yönde mevsimsel farklılıklar gösterir. Yağışlı mevsimlerde yeraltı su seviyesinde yükselmeler, kurak mevsimlerde ise alçalmalar meydana gelir.

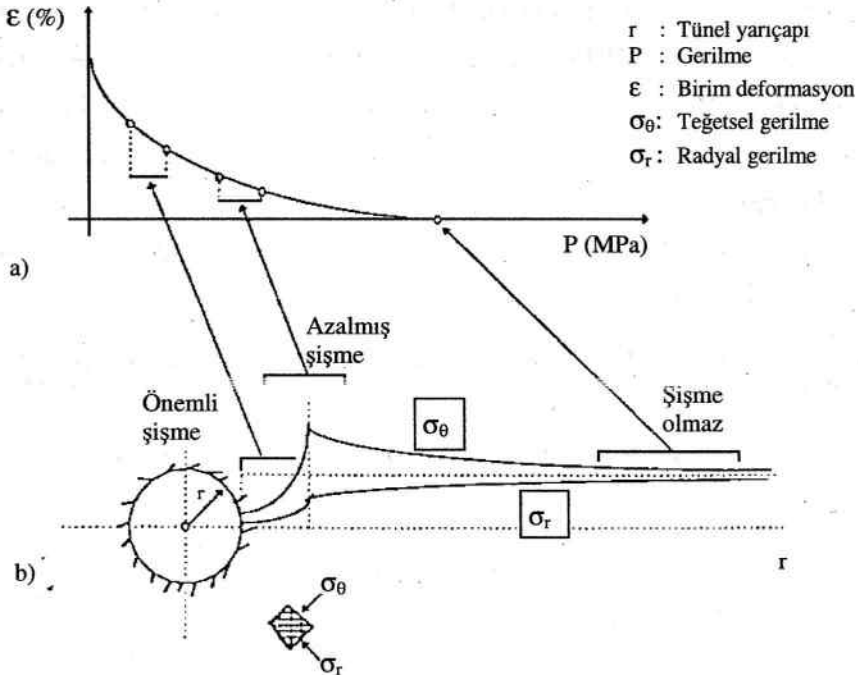
2.2.2. Süreksizlikler

Kaya kütlelerinde bulunan; tabakalanma düzlemleri, çatlak, yarık, fay vb. gibi süreksizlikler şişme ortamı için gerekli koşullardan birinin veya birkaçının oluşmasına neden olurlar (Erdem, 1976, Güleç, 1980; Tarhan, 1989). Sedimanter kayaçlarda çökme sırasındaki kesiklikleri simgeleyen tabakalanma düzlemleri bir tabakadan diğerine geçildiğini gösteren süreksizliklerdir. Diğer bir deyişle, her tabakanın alt ve üst yüzeyi bir tabakalanma düzlemdir. Su, yeraltında bu düzlemler boyunca hareket ederek bir noktadan diğer bir noktaya ulaşır ve izlediği yol boyunca şişen mineralleri etkileyerek hacim artışına neden olur.

Yarık (fissure), milimetre boyutunda mikroskobik veya gözle zor görülebilen küçük çatlaklardır. Fisürün açıklığı 1 mm'ye ulaştığında çatlak, çatlağın boyutu 1 mm'yi geçtiğinde ise yarık ismini almaktadır. Kuruma-soğuma, tuz kimyasındaki ani değişiklikler, (yeraltısuyu, yıpranma, iyon değişimiyle beliren) fiziko-kimyasal değişiklikler ve tektonik hareketler bu tür süreksizlikleri oluşturan ana etkenlerdir. Çekme gerilmeleri sonucunda oluşurlar ve makaslama hareketi söz konusu değildir. Boş ya da su, kil, kalsit, kuvars vb. gibi maddelerle dolu olabilirler. Su ile dolu olduklarında boşluk suyu basıncı oluşturarak açıklığın büyümesine sebep olurlar. Ayrıca, sıcak yeraltısuları da çatlak yüzeylerinin ayrışmasını kolaylaştırarak çatlak alanının büyümesine neden olur. Çatlaklar dolgu maddesi ile dolu olduklarında yeraltısuyu

açısından geçirimsiz bir perde oluşturdıkları gibi dolgunun suya karşı hassas mineraller içermesi durumunda şişme olgusu için gerekli ortamı hazırlamış olurlar. Boş olduklarında ise, yerüstü ve yeraltılarının kaçmasına ve sızmasına olanak sağlarlar.

Mühendislik yapılarının güzergahında fayların bulunması sorunları daha da karmaşık hale getirir. Bu tür ortamlarda kırılma ve blokların birbirleri üzerinde kaymaları sonucunda fay bölgesindeki kayalar parçalanarak ufalanır ve ezilir. Fayın tavan ve taban blokları arasında kalan makaslanmış malzemeye milonit, milonitin bulunduğu kesime de milonit bölgesi adı verilir. Milonit bölgesi köşeli ve çeşitli irilikteki kayaç ve mineral parçacıkları ile zemin türü malzemeden meydana gelir. Bu malzemeler faylanma sonrasındaki ortamın özelliğine göre çoğu kez çimentolanır, sert ve geçirimsiz bir kayaç yapısı kazanır. Bu kayaca fay breşi adı verilir. Bu bölgeler, yeni mineral ve maden yataklarının oluşumuna ve yeraltılarının hareketine son derece uygun ortamları hazırlarlar. Milonit bölgesindeki killi malzemeler, kırık ve çatlaklardan sızan ve akan su ile temas ederek en önemli potansiyel şişme alanlarını oluştururlar (Karaman, 1966).



Şekil 6. Dairesel kesitli bir tünel çevresinde radyal ve teğetsel gerilmelerdeki değişimler (Lombardi, 1984).

2.3. Gerilme Rahatlaması

Yeraltında şişme özelliği gösteren bir ortamda şişme meydana gelmiyorsa bunun iki anlamı vardır. Birincisi ortamın kuru olmasından dolayı suyun bulunmadığını, ikincisi ise, su olmasına rağmen ortamdaki gerilmelerin hacim artışına izin vermeyecek kadar yüksek olduğunu gösterir. Gerilmelerdeki değişim azalma yönünde olduğunda ortamda bir rahatlama olur ve su, zemin veya kayaca nüfus eder ve şişme süreci başlar. Şekil 6'da hidrostatik birincil gerilme alanında açılan dairesel bir tünel çevresinde meydana gelen elasto-plastik radyal ve teğetsel gerilmelerdeki değişimler görülmektedir. Açıklığın hemen etrafında gelişen plastikleşme nedeniyle gerilme rahatlaması olduğundan, bu bölge ciddi şişme problemlerinin oluşacağı potansiyel şişme alanı olarak tanımlanabilir. Açıklıktan uzaklaştıkça, elastik değerlerine doğru değişecek olan gerilmelerdeki artış ile şişme miktarında azalma meydana gelecektir.

3. ŞİŞME İLE İLGİLİ MÜHENDİSLİK SORUNLARI

Tropikal ve ılık iklime sahip kurak ve yarı kurak bölgelerde görülen şişmeyle ilgili mühendislik sorunları, yeraltı ve yerüstü yapılarında karşılaşılan sorunlar olmak üzere iki alt başlık altında incelenebilir:

- a) Karayolu, havaalanı, bina temelleri, duvarlar, kaldırım, şev, sulama kanalları gibi hafif yerüstü yapılarının mevsimlik yağış ve sıcaklık değişimlerinden etkilenen sığ derinliklerde inşa edilmesi durumunda ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir. Bina temelleri ve duvarlarında kırılma ve çatlama; karayolu, havaalanı ve kaldırımlarda beton veya asfaltın kalkması veya parçalanması; sulama vs. gibi çeşitli amaçlı boru hatlarının patlaması; şevlerde kaymaların görülmesi yerüstünde yaşanan problemlerdir. Çizelge 1'de bu sorunlardan örnekler verilmiştir.
- b) Yüksek şişme gerilmeleri; sondaj kuyuları, tabanyolu, galeri, tünel gibi yeraltı açıklıklarının performansı üzerinde etkili olmaktadır. Hizmet süresi daha kısa olan tabanyolu ve galerilerde tahkimatın bozulması ve taban kabarması şeklinde sorunlar gözlenirken, çalışma süresi uzun olan tünellerde tavanın ve yan duvarların göçmesi, tabanın kabarması, beton kaplamanın parçalanması gibi önemli sorunlarla karşılaşmaktadır. Sondaj kuyularında ise, dizinin sıkışması söz konusudur. Çizelge 2'de yeraltında karşılaşılan şişme sorunlarına örnekler verilmiştir.

Şişme sorunu; ince taneli, yüksek plastisiteli, aşırı konsolide, suya doymun olmayan zeminlerde ve kıltaşı, çamurtaşı, şeyl, marn, anhidritli kayaç, fay breşi, killi şist gibi zayıf, yumuşak ve düşük dayanımlı kayaçlarda meydana gelmektedir. Kayaçlardaki olayların büyük bir çoğunluğu sedimanter kökenli olanlarda görülmekle beraber, bazalt ve andezit gibi volkanik kayaçlarda da aşınma veya kimyasal ayrışma sonucunda şişme olaylarına rastlanılabilmektedir. Simektit grubu (özellikle montmorillonit) kil minerallerinden kaynaklanan şişme olayları, anhidrit minerallerinden oluşan şişme olaylarına oranla çok daha fazladır.

Çizelge 1. Yertüsti mühendislik yapılarında karşılaşılan şişme sorunlarıyla ilgili bazı örnekler.

Kaynak	Zemin/Kayaç	Sorun	Mühendislik Yapısı	Önemli Değerler
Güntekin (1985)	Şişen temel zemini	Kaplamada deformasyonlar	Cengiz Topel Havaalanı, Kocaeli	
Karacan vd. (1989)	Andezit (yüzeysel bozunma ile simektit gelişimi)	Büyük çapta blok düşmesi olayları, yerleşim alanlarında hevelanlar	Taş ocakları, yol yarmaları, Ankara	
Durgunoğlu vd. (1991)	Yüksek plastisiteli, aşırı konsolide kil ve yumuşak kilttaşları	Şev yüzeylerinde gerilme çatlakları, göçme	Tarsus Adana Gaziantep Otoyolu	σ_s : 0.08 MPa
Mesci (1991)	Sert ve sağlam görünümlü marn	Taban beton ve şevlerinde boydan boya sürekli çatlaklar, taban betonunda 20 cm kabarma	Yedikır Barajı iletim kanalı, Amasya	Kil örneklerinde şişme değerleri 2.4 ile 3.4 mm arasında
Tosun ve Kirmızıtaş (1993)	İllit ve montmorillonit minerallerince zengin temel zemini	Yapısal hasar	Harran Ovası'nda borulu sulama şebekesi, sedde vb hafif su yapıları, Şanlıurfa	σ_s : 0.17 MPa ϵ_s : % 5.9
Zarif ve Gözübol (1997)	Aşırı konsolide, bol yarıklı simektitte zengin killi düzeyleri bulunan Gürpınar Formasyonu	Kolon ve kirişlerde çatlaklar	Bina Yakuplu - Haramidere, İstanbul	σ_s : 0.1 - 0.3 MPa
Al-Mhaidib (1999)	Çoğu kaolinit ve biraz illit içeren şeyl formasyonu	Kolon ve kirişlerde çatlaklar, yol ve kaldırımlarda kabarma ve çatlaklar	Bina, kaldırım ve yol Al Ghatt, S. Arabistan	σ_s : 0.96 MPa (sabit hacim) σ_s : 0.88 MPa (örtüyüktü) σ_s : 1.7 MPa (serbest şişme) ϵ_s : % 19 (serbest şişme)
Du vd. (1999)	İllit ve illit-simektit mineralleri içeren zemin	Yol ve şevlerde çatlaklar	Ning - Lian Karayolu Huaiyin kesimi, Çin	σ_s : 0.587 MPa ϵ_s : % 11.8
Yılmaz (1999)	Simektit içeren killi zemin	İnşaatı planlama aşamasında, ancak yapının şişme davranışından etkileneceği tahmin edilmekte	Köklüce Regülatörü - Erbaa HES su iletim kanalı, Tokat	σ_s : 0.036 MPa ϵ_s : % 1.84

σ_s : Şişme gerilmesi, ϵ_s : Şişme birim deformasyonu

Çizelge 2. Yeraltı mühendislik yapılarında karşılaşılan şişme sorunlarıyla ilgili bazı örnekler.

Kaynak	Kayaç	Sorun	Mühendislik Yapısı	Önemli Değerler
Einstein ve Bischoff (1977)	Kiltaş-marm aratabakalı jips ve anhidrit	Taban kabarması	Kappellesberg demiryolu tüneli, Almanya	Konverjans 25 cm/yıl (1980-1987)
	Marn, killi şeyl ve anhidrit grubu kayalar	Taban kabarması ve konverjans, tahkimatın bozulması, drenaj kanallarının tahrip olması	Bozberg demiryolu tüneli, İsviçre	Ayaklar arasında 27 - 33 cm'lik daralmalar Konverjans 1 - 10 mm/yıl
Yücekent (1980)	Kil	Yan duvarlar ve tabanda kabarma, işçilik, nakliyat ve havalandırma güçlükleri	Alpagut - Dodurga Linyitleri İşletmesi tabanyolları	Tavan alçalması 0.7 ve 0.6 cm/gün Yan kapanma 0.8 ve 1.2 cm/gün
Aydın (1986)	Yumuşak ve şişen zemin, marn, killi marn, kil, kıltaşı ve 80'e yakın fay	Tahkimatın çökmesi, tünel kesitinin daralması, makinelerin çalışma güçlükleri	Kınık su iletim tüneli	
Mesci (1986)	Kiltaş ve marn	Ön kaplama betonunda çatlaklar tahkimatda deformasyonlar, tünelde göçükler	Kökütçe hidro elektrik santrali kuvvet tüneli	
Vardar ve Fecker (1986)	Jipsli, anhidritli, ince tabakalı kıltaşı ve marn	Anhidritte kazı yapılmadığından deformasyonlar çok küçük	Eski Engelberg tüneli, Almanya	
		Taban kabarması, 4 cm/yıl'a varan deformasyonlar	Eski Wagenburg tüneli, Almanya	Radyal basınç 0.48 MPa Araştırma kesitinde 1 m/yıl'a varan konverjans
		Taban kabarması	Yeni Engelberg/Leonberg karayolu tüneli	Araştırma galerilerinde 60 cm'ye aşan deformasyonlar

Çizelge 2. (devam ediyor).

Kaynak	Kayaç	Sorun	Mühendislik Yapısı	Önemli Değerler
Selmer – Olsen ve Palstrom (1989)	Fay bölgesinde 2.5 m kalınlığa sahip şişen kil damarları içeren breşli kayalar	200 m ³ lük bir göçme, yan duvarlardaki püskürtme betonda kavraklanma	Hemsil I hidro güç tesisi tüneli, Norveç	
	İki eklemler arasındaki breşli kayalar	30 m uzunluğunda bir göçme	Tunneodol hidro güç tesisi tüneli, Norveç	
	Kil içeren ve 5 m kalınlığa sahip birkaç bölge	Püskürtme betonunun yaklaşık 30 lokasyonda bozulması, 4 yerde büyük göçmelerle tünelin tıkanması	Rafnes su getirme tüneli, Norveç	
Varlık (1993)	İki fay arasında kalın bir kil tabakası	Tahkimatlarda eğilme, ön kaplamanın yer yer kırılarak dökülmesi	Gebzende barajı enerji tüneli	
Madsen vd. (1995)	Marnlı anhidrit, şeyl ve marn	Taban kabarması, ters kemerin kırılması	Belchen karayolu tüneli, İsviçre	Önce 0.9 m sonra 0.6 m taban kabarması
Dalgıç ve Gözübol (1995)	Anhidrit içeren kil ve kilttaşları	Püskürtme betonda çatlama kırılma ve dökülmeler, çelik bağlarda eğilme, kırılma, saplamalarda yenilme	Anadolu Otayolu Bolu tüneli	σ_s : 0.0004 – 0.07 MPa ϵ_s : % 0.2 – 0.7
Özçelik ve Kulaksız (1995)	Montmorillonit içeren kilttaş	Tahkimatın çökmesi, taban kabarması	ELİ Soma Işıklar ana nakliyat desandresi	$\sigma_{s, mak}$: 1.2 MPa Taban kabarması 5-34 cm
Ünver ve Kargı (1995)	Kilttaş ve marn	Galeri kesitinde daralma, demiryolu nakliyatı ve havalandırmada güçlükler	Yeni Çelttek İşletmesi, Bolu Yeraltı Ocağı ana nakliyat galerileri	Taban genişliğindeki yan kapama 9-22 cm arasında

σ_s : Şişme gerilmesi, ϵ_s : Şişme birim deformasyonu

Üretim, işgücü ve zaman kaybına yol açan problemlerin çözümü için büyük harcamalar yapılmaktadır. Örneğin, Acar (1994) ABD’de yüksek büzülme ve şişme potansiyeline sahip zeminlerin, yılda 9 milyar dolarlık maddi hasara yol açtığını belirtmiştir. Haunstein Base Tüneli’nde ise, 1980 – 1987 yılları arasındaki yeniden inşaat çalışmalarının maliyeti yaklaşık 100 milyon CHF’dir (Einstein, 1996).

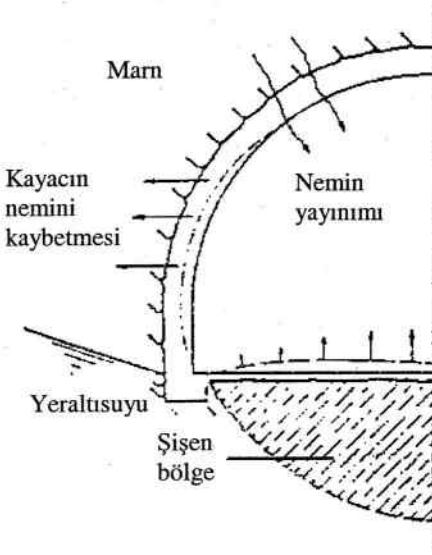
4. YERALTI YAPILARINDA ŞİŞME TASARIMI YAKLAŞIMLARI

Şişen ortamların içinde veya üstünde bir mühendislik yapısının tasarımında dikkat edilecek ölçüt, yapının güvenli ve sürekli olarak çalışma ömrü boyunca hizmet etmesidir (ISRM, 1994). Şişen kayalarda bu; hem yapıda, hem de çevre kayadaki gerilme ve deformasyonların malzemeye bağlı sınırlar içinde kalması anlamına gelir.

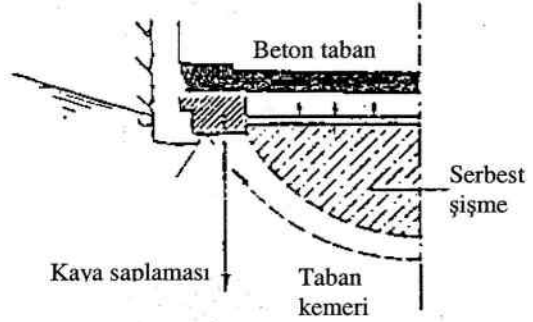
Şişen kayalarda herhangi bir tasarımın temelini oluşturan ana fikir, ne kadarlık bir şişme deformasyonuna izin verilebileceğiyle ilgilidir. Dolayısıyla tasarımda şişmenin derecesine göre getirilen yaklaşımlar pasif (esnek), aktif (rijit) ve ara tasarım olmak üzere üçe ayrılabilir.

Pasif tasarımda; yapıda gerilme meydana gelmeden şişme yerdeğiştirmelerinin tamamına veya çok büyük bir kısmına izin verilir. Tarama ve kayaç ile beton kaplama arasında boşluk bırakılması başlıca edilgen tasarım yaklaşımlarıdır. En basit tasarım yaklaşımlarından birisi tarama işlemidir. Yapının herhangi bir malzeme ile kaplanmadığı durumlarda karşı gerilmeler oluşmadığından kayaç serbestçe şişer. Yapının amacına uygun olarak hizmetine devam edebilmesi için şişen kısımlar düzenli olarak taranır (kaldırılır). Kovari vd. (1988) ve Einstein (1989)’a göre, tarama yapıldıkça açıklık çevresindeki zayıf bölge artacağından, bu uygulama açıklık çevresindeki tabaka kontrolü açısından ters bir yaklaşımdır. Tarama işlemi ile karşı gerilmelerin oluşması engellendiğinden bir sonraki taramada kaldırılacak kısım daha fazla olmaktadır.

Bu yaklaşıma benzer, ancak pratik olarak daha tatmin edici bir çözüm yöntemi ise rijit yapı ile kaya yüzeyi arasında boşluk bırakmaktır (Şekil 7). Ancak bırakılacak boşluğun, şişme sonrasında kapanıp rijit yapı üzerinde çok az bir gerilme oluşturmaması veya hiç oluşturmaması için dikkatli ve iyi bir şekilde tasarlanması gereklidir (ISRM, 1994).



a) İnşaat sırasındaki durum



b) Son durum

Şekil 7. Rijit yapı ile kaya yüzeyi arasında boşluk bırakılması yöntemi (ISRM, 1994).

Aktif tasarımda kayacın şişmesine izin verilmez ve bunun sonucu olarak da yapı üzerinde gerilmeler oluşur. Aktif tasarım; su akışını azaltan önlemleri, karşı gerilmelerin yapay uygulamalarını ve bunların kombinasyonlarını içerir.

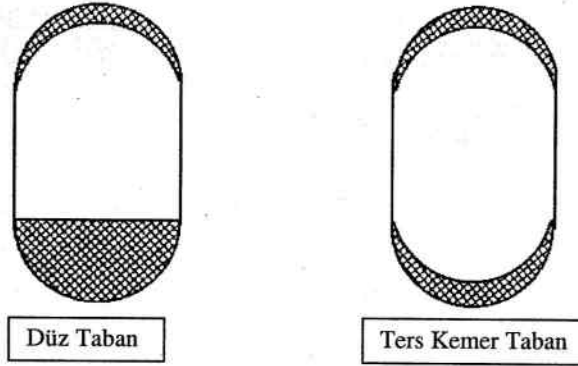
Suyun tünele veya galeriye akışının engellenmesi şişmeye karşı en etkili önlemlerden biridir. Suyun akaçlama kanalları ve borularıyla uzaklaştırılması, açığa çıkmış kaya yüzeyleri ile suyun temasını azaltır. Açığa çıkmış tüm yüzeylerin kaplanması da, özellikle havadaki nem ve akan suyun kayaca nüfuz etmesini azaltan çok etkili bir yöntemdir. Tünellerdeki hava, genellikle suya doygundur ve gerilme rahatlaması ile havadaki nem kayalar tarafından emilir. Hava ve kaya arasındaki bu sıcaklık farklılıkları nedeniyle oluşan şişme problemleri yüzeylerin kaplanmasıyla önenebilir.

Eklemler ve faylar gibi geniş açıklıklar boyunca su akışı ile karşılaşılması durumunda ise çimentolama bir çözüm yoludur. Ancak bu önlem kısa dönemde etkili olmasına rağmen, zamanla etkisini kaybetme olasılığı yüksektir.

Galeri veya tünel çevresindeki gerilme dağılımı tahkimat üniteleri tarafından uygulanan karşı gerilmelerden, galeri kesitinin şekillendirmesinden veya bunların her

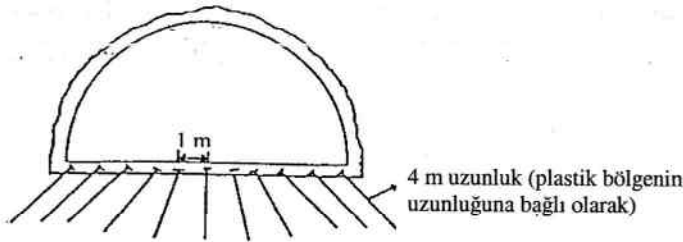
ikisinden de etkilenmiş olabilir. Açıklığın kesit şekli, ilk gerilme durumuna yakın olacak şekilde seçilirse, şişme potansiyeli azalacaktır. Eğik bir açıklık şekli, orijinal gerilme durumuna yakın bir gerilme durumu oluşturabilir (Einstein, 1989). Dairesel ve yay şeklindeki eğik şekiller düz yüzeylerden daha büyük karşı gerilmeler geliştirmeleri ve daha küçük gerilme rahatlaması bölgesi oluşturmaları açısından ek avantajlara sahiptir (Şekil 8).

GERİLME RAHATLAMASI BÖLGESİ



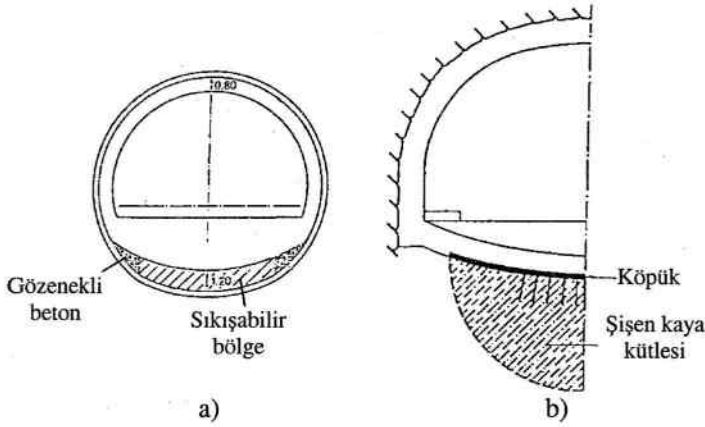
Şekil 8. Açıklığın taban şekline göre rahatlamış bölgenin büyüklüğü (Einstein, 1989).

Kaya saplamaları ile karşı gerilmelerin uygulanması diğer bir aktif tasarım yöntemidir (Şekil 9). Kaya saplamaları her şekildeki tünel yüzeyine rahatlıkla uygulanabilmekte olup, bunların elastik bölgeye tutturulması önemlidir. Şişme gerilmelerinin büyük olduğu durumlarda teknik olarak uygulanması zordur ve yeterli sayıda kaya saplamasının yerleştirilmesi ekonomik olmayabilir.

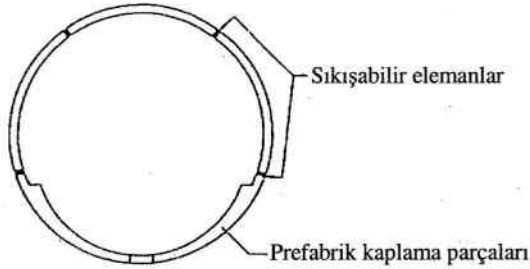


Şekil 9. Kaya saplamaları ile karşı gerilmelerin uygulanmasına bir örnek: İsviçre'de genişliği: 11 m yüksekliği: 6 m olan depolama amaçlı geniş yeraltı açıklığı (ISRM, 1994).

Pasif ve aktif tasarımların birleşiminden oluşan ara tasarım yaklaşımında kayaç ve kaplama arasına sıkışabilir dolguların konulmasıyla, yapıda deformasyonun başlaması üzerine dolgu tamamen sıkışana değin bir miktar deformasyona izin verilir (ISRM, 1994). Sıkışabilir dolgu olarak poliüretan köpük kullanılmaktadır (Şekil 10). Kaplama parçaları arasında sıkışabilir elemanlar kullanılması ise diğer bir alternatiftir (Şekil 11).



Şekil 10. Sıkışabilir bölge ve tabaka (poliüretan köpük) uygulamalarına iki örnek: a) Buechberg Tüneli, İsviçre b) Freudenstein Tüneli, Almanya (ISRM, 1994).



Şekil 11. Kaplama parçaları arasında sıkışabilir elemanların kullanılması (ISRM, 1994).

4. SONUÇLAR

Bina temelleri ve duvarları, kaldırım, karayolu, havaalanı, sulama kanalları ve şev gibi hafif yerüstü yapılarında ve sondaj kuyuları, tabanyolu, galeri, tünel gibi yeraltı açıklıklarında yüksek şişme gerilmeleri nedeniyle oluşan şişmeyle ilgili sorunlar, mühendislik yapılarında kabarma, kayma, kırılma, çatlama, parçalanma ve göçme şeklinde ortaya çıkmaktadır. Özellikle kullanım süresi uzun olan yapılarda bu sorunlar

sürekli olarak tekrarlanarak çoğu zaman giderilemeyen ve maliyeti yüksek hasarlar meydana gelmektedir.

Montmorillonit, anhidrit ve pirit; kilitaşı, marn, çamurtaşı, şeyl, anhidritli kayaç, fay breşi gibi zayıf ve yumuşak kayaçlar ile ince taneli, aşırı konsolide olmuş zeminlerin bünyesinde bulunduğunda, onlara şişme özelliği kazandırır. Bunların şişme davranışı gösterebilmesi için, ortamda mutlaka suyun bulunması ve bir gerilme rahatlamasının oluşması gerekmektedir.

Mekanik, ozmotik ve taneler arası şişme mekanizmalarının tümü simektit türü kil minerallerinde görülebilir. Kil-sülfat kayaçlarında bu mekanizmalara anhidritin hidratasyonu da eklenir. Bu mekanizmalar aynı anda veya biribiri ardına meydana gelir.

Şişme olayında başlıca rolü oynayan su; tabakalanma düzlemleri, yarık, çatlak ve fay gibi süreksizlikler boyunca hareket ederek geçtiği güzergahtaki şişen mineralleri etkilemektedir. Bu süreksizliklerden en önemlisi faylardır. Hem şişmeye eğilimli mineraller içeren dolgular bulunduğundan, hem de suyun hareketine son derece uygun olduğundan faylar potansiyel şişme açısından uygun zayıflık zonlarıdır.

Şişme sorunlarını çözümlemenin en etkili yolu, mühendislik yapısının jeoteknik araştırmalar yapılarak şişen ortamlarda oluşturulmasının önlenmesidir. Buna rağmen yapının mutlaka şişen ortamda oluşturulmasının gerektiği, veya ön araştırmanın yapılmayarak yapının şişen birimlerde oluşturulduğunun sonradan farkına varıldığı durumlarda en etkili ikinci önlem, suyun ortamdan uzaklaştırılmasıdır. İlk iki önlemden suyun şişen minerallerle temasına engel olunduğundan şişme meydana gelmeyecektir. Su gelirinin önlenemediği en son durumda ise, şişmenin meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bu durumda ya şişme birim deformasyonlarının belli ölçüde oluşmasına, ya da yapı üzerinde şişme gerilmelerinin gelişmesine izin verilir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, bu makalenin içeriğinin genişletilmesindeki yönlendirmeleri nedeniyle Prof.Dr. Hasan Gerçek'e ve burada kısaca değinilen çalışmayı destekleyen TÜBİTAK Yer Deniz Atmosfer Bilimleri Araştırma Grubu ve Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Araştırma Fonu'na teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Acar, C. (1994) *Kil Zeminlerin Şişme Davranışına Ön Yükleminin Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 59 s.
- Al-Mhaidib, A.I. (1999) Swelling behaviour of expansive shales from the middle region of Saudi Arabia. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 16, s. 291 - 307.
- Aydın, A. (1986) Kınık Tüneli'nde çıkan problemler ve bunların çözümleri. *Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası Semineri*, DSİ, Cilt II, Adana, s. 29 (1 - 13).
- Bilir, M.E. (2001) Bazı Deney Parametrelerinin Yapay Örneklerin Üç Eksenli Şişme Davranışına Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 135 s.
- Dalgıç, S. ve Gözübol, A.M. (1995) Bolu Otoyol Tüneli'nde stabilite problemleri. *Yerbilimleri Dergisi*, Sayı 27, s. 73 - 80.
- Du, Y., Li, S. and Hayashi, S. (1999) Swelling-shrinkage properties and improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China. *Engineering Geology*, Vol. 53, pp. 351 - 358.
- Durgunoğlu, H.T., Balkır, T., Fırat, Ç., Karadayılar, T., Aksoy, S., Kulaç, H.F., Etkesen, Z. (1991) TAG otoyolunda yüksek plastisiteli aşırı konsolide killerde projelendirme kriterleri. *Otoyollarda Geoteknik Problemler ve Çözümleri (Teknik Toplantı)*, Karayolları Genel Müdürlüğü Yollar Türk Milli Komitesi, s. 181 - 189.
- Einstein, H.H. (1989) Design and analysis of underground structures in swelling and squeezing rocks. *Underground Structures Design and Instrumentation Developments in Geotechnical Engineering*, ed. R. S. Sinha, Elsevier, Amsterdam, pp. 203 - 262.
- Einstein, H.H. (1996) Tunneling in difficult ground - Swelling behaviour and identification of swelling rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 29, pp. 113 - 124.
- Einstein, H.H. and Bischoff, N. (1977) Design of tunnels in swelling rock. *16th US Symp. on Rock Mechanics*, Univ. of Minnesota, ASCE, pp. 185 - 195.
- Erdem, P. (1976) *Mühendislik Jeolojisi*, İDMM Akademisi Yayınları, İstanbul, No. 156, 412 s.
- Franklin, J.A. and Ousseault, M.B. (1989) Viscous, thermal and swelling behavior. *Rock Engineering*, Mc Graw - Hill Publishing Company, New York, pp. 307 - 338.
- Grim, R.E. (1968) *Clay Mineralogy*, Mc Graw Hill Book Company, New York, 596 p.
- Güleç, K. (1980) *Mühendislikte Jeoloji*, Sakarya DMM Akademisi Yayını, No. 4, 295 s.
- Güntekin, A. (1985) Uygulamada zeminlerin şişmesi nedeniyle meydana gelen hasarlar ve alınacak önlemler. *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri*, DSİ, Adana, s. 12 (1 - 12).
- Harper, T.R., Appel, G., Pendleton, M.W., Szymanski, J.S. and Taylor, R.K. (1979) Swelling strain development in sedimentary rock in Northern New York. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 16, pp. 285 - 288.
- ISRM, (1983) Characterization of swelling rock, Pergamon Press, Oxford, 4 p.

- ISRM, (1994) Comments and recommendations on design and analysis procedures for structures in argillaceous swelling rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 31, No. 5, pp. 535 - 546.
- Karacan, E., Kasapoğlu, K.E. ve Yalçın, H. (1989) Ankara andezitlerindeki kil mineralleri ve ilgili mühendislik sorunları. *IV. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, s. 61 - 72.
- Karaman, E. (1966) *Temel Yapısal Jeoloji ve Uygulamaları*, Antalya.
- Kovari, K., Amstad, Ch. and Anagnostou, G. (1988) Design/construction methods - Tunnelling in swelling rock. *Key Questions in Rock Mechanics*, ed. Cundall et al., A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 17 - 31.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1969) *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons Inc., 547 p.
- Lombardi, G. (1984) Underground Openings in Swelling Rock. *Proc. 1st Natn. Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Lahore, Pakistan.
- Madsen, F.T. (1999) Suggested Methods for Laboratory Testing of Swelling Rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 36, pp. 291 - 306.
- Madsen, F.T., and Müller-von Moos, M. (1989) The swelling behavior of clays - sulfate rocks. *Appl. Clay. Sci.*, No:4, pp. 143 - 156.
- Madsen, F.T., and Nüesch, R. (1991) The swelling behavior of clay - sulfate rocks. *Proc. 7th Int. Congr. Int. Soc. for Rock Mechanics.*, ed. W. Wittke, Aachen, Germany, pp. 263 - 267.
- Madsen, F.T., Flückiger, A., Hauber, L., Jordan, P.A and Voegtli, B. (1995) New investigations on swelling rocks in the Belchen Tunnel, Switzerland. *8th Int. Congr. On Rock Mechanics.*, Vol. 1, pp. 263 - 267.
- Mesci, Ü. (1986) Karadeniz yöresinde açılan tünellerde çıkan problemler ve çözümleri. *Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası Semineri*, DSİ, Cilt II, Adana, s. 19 (1 - 35).
- Mesci, Ü. (1991) Marnlı (şişebilir) zeminlerde sulama kanalı tatbikatı. *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri*, Adana, s. 13 (1 - 14).
- Nüesch R., Madsen, F.T. and Steiner, W. (1995) Long time swelling of anhydritic rocks: Mineralogical and microstructural evaluation. *8th Int. Congr. On Rock Mechanics.*, Vol. 1, pp. 133 - 138.
- Özaydın, K. (1997) *Zemin Mekaniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 261 s.
- Özçelik, Y. ve Kulaksız, S. (1995) ELİ Soma Işıklar Desandresi'nde karşılaşılan sorunlar, denenen tahkimat şekilleri ve çözüm önerileri. *Madencilik*, Cilt 34, Sayı 3, s. 3 - 12.
- Selmer - Olsen, R. and Palmstorm, A. (1989) Tunnel collapses in swelling clay zones (Part I). *Tunnels & Tunnelling*, November, pp. 49-51.
- Şahinci, A. (1986) *Genel Hidrojeoloji*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İzmir, MM/JEO-86 EY 123, 384 s.
- Tarhan, F. (1989) *Mühendislik Jeolojisi Prensipleri*, KTÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Trabzon, Fakülte Yayın No. 41, 384 s.

- Tosun, H. ve Kırmızıtaş, H. (1993) Harran killlerinin şişme potansiyeli ve bölgede inşa edilen su yapıları için önemi. *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu*, DSİ, İzmir, s. 313 - 327.
- Ulugür, M.E. (1972) *Su Mühendisliği*, Çağlayan Kitabevi Yayını, İstanbul, 349 s.
- Ünver, B. ve Kargı, M.A. (1995) Yeni Çelteç Bolu Yeraltı Ocağı galerilerinde meydana gelen duraysızlık problemlerinin analizi. *Madencilik*, Cilt 34, Sayı 2, s. 3 - 16.
- Üşenmez, Ş. (1985) *Sedimentoloji ve sedimanter kayalar*, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık fakültesi, Yayın no.5, 400 s.
- Vardar, M. ve Fecker, E. (1986) Evaporitli kayalardaki sorunlu projelerden örnekler ve uygulama ilkeleri. *1. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Ankara, s. 289 - 310.
- Varlık, Z. (1993) Gebzende Barajı enerji tüneli kazı çalışmalarında karşılaşılan problemler ve çözüm yolları. *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu*, DSİ, İzmir, s. 279 - 296.
- Yeşil, M. M. (1991) *Determination of Three Dimensional Swelling Characteristics of Clay Bearing Rocks*, Ph. D. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mining Engineering, METU, Ankara, 109 p.
- Yılmaz, I. (1999) Niksar Havzası killi alüvyal zeminlerin konsolidasyon ve şişme özellikleri. *Yerbilimleri Dergisi*, Sayı 21, s. 173 - 184.
- Yücekent, U. (1980) ADL Ocakları'ndaki taban yollarında taban kabarmaları. *Türkiye 2. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, Zonguldak, s. 511 - 533.
- Zarif, İ.H. ve Gözübol, A.M. (1997) Gürpınar Formasyonu killi seviyelerinin şişme özelliği ve yapılara etkisi. *Yerbilimleri Dergisi*, Sayı 30, s. 351 - 359.

Zonguldak Havzasındaki Bazı Tortul Kayaçların Sismik Dalga Yayılımı Anizotropisi
Seismic wave propogation anisotropy of some sedimentary rocks from Zonguldak region

Kenan ÇOLAK
Yadigar V.
MÜFTÜOĞLU

Silindirik ve Küresel Açıklıklar Çevresindeki Gerilme ve Birim Deformasyon Alanlarının
Belirlenmesi İçin Birleştirilmiş Analitik Çözüm
An unified analytical solution for determination of the stress and strain fields about
cylindrical and spherical openings

Ömer AYDAN
Melih GENİŞ

Şişme Davranışı ve Mühendislik Yapılarına Etkileri
Swelling behavior and its effects on the engineering structures

M. Erdinç BİLİR
Yadigar V.
MÜFTÜOĞLU