



Kaya Mekaniği Bülteni
Bulletin of Rock Mechanics
Eylül / September 1997

13





Kaya Mekaniği Bülteni

Bulletin of Rock Mechanics

13

TÜRK ULUSAL KAYA MEKANİĞİ DERNEĞİ
Turkish National Society for Rock Mechanics

İçindekiler
Contents

Sayfa
Page

Yönetim Kurulu / Executive Committee

Prof.Dr. Seyfi Kulaksız
Prof.Dr. Abdurrahim Özgenoğlu
Doç.Dr. Aydın Bilgin
Hasan Şişman
Sedat Esen

Yayın Kurulu / Editorial Board

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

Yazışma Adresleri / Addresses

Prof.Dr. Abdurrahim Özgenoğlu
Genel Sekreter / *Secretary General*
Maden Mühendisliği Bölümü, ODTÜ
06531 ANKARA
Tel : (312) 210 26 55
Fax : (312) 210 12 65
E-mail : aozgen@rorqual.cc.metu.edu.tr

Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği
P.K. 774
06423 Kızılay - ANKARA

Baskı : Kozan Ofset, Ankara, 1997

Kayalarda Akışkanların Akışı İçin Darcy Yasasının 1
Kuramsal Türetimi ve Geçerliliği
*Theoretical formulation of Darcy's law for fluid flow
through porous and/or jointed rock and its validity*
Ömer AYDAN, Hasan ÜÇPİRTİ, Reşat ULUSAY

Laboratuvarlarda Kayaların Geçirgenlik Ölçüm 19
Yöntemlerinin Kuramı ve Deneyler
*Theory of laboratory methods for measuring
permeability of rocks and tests*
Ömer AYDAN, Hasan ÜÇPİRTİ, Necdet TÜRK

Kayaların Gözenek ve Akışkan Geçirgenliğinin 37
Basınca Bağımlılığı
*Pressure dependency of porosity and permeability of
rocks*
Ömer AYDAN

Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi Varmıdır? 53
Yeni Avusturya Tünelcilik Yönteminin (NATM)
arkasındaki Yanlış Kavramlar
*On the existence of the NATM: Erroneous concepts
behind the New Austrian Tunneling Method*
Kalman KOVARI
Çevirenler: Ömer AYDAN, Reşat ULUSAY, Halil
KUMSAR

YAZIM VE YAYINA 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 Bülten'de yayımlanabilir.

Yazıların hazırlanması ve düzeni :

- a) Metin A4 ebadında kağıt üzerine 12 punto, 1.5 satır aralıklı ve bilgisayarla yazılmış olmalı, ayrıca sayfanın kenarlarında 3'er cm.lik boşluk bırakılmalıdır. Baskıda ofset tekniği kullanılacağından bilgisayar çıktıların 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) Yaratılan 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.
-Sürekli 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. Çizimler 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, gerekiyorsa küçültülerek, monte edilip gönderilmeli ve bunlar metindeki sıralarına göre numaralandırılmalıdır. Şekil altı açıklamaları küçük harflerle yazılmalıdır.

Yazıların gönderilmesi:

Yazılar, biri orijinal diğer ikisi 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. Bülteinde yayımlanması kabul edilen yazıların ayrı basımından on adet yazarına (birden fazla yazarlı yazılarda başvuru yapan yazara) gönderilir.

Okurlarımıza,

Uzun bir aradan sonra Bülten'imizin onüçüncü sayısını çıkarmış olmanın mutluluğu ile sizlerle bir kez daha buluşuyoruz.

Bülten'imizde yer alan yazılardan ilki sayın Ömer AYDAN, Hasan ÜÇPİRTİ ve Reşat ULUSAY tarafından kaleme alınan "**Kayalarda akışkanların akışı için Darcy yasasının kuramsal türetimi ve geçerliliği**" başlığını taşımaktadır. Bu yazıda, son yıllarda yoğun olarak gündeme gelen nükleer artıkların kaya ortamlarında zararsız halde saklanması konusu kapsamında kayaların geçirgenliği ile ilgili deneysel bir yasanın kuramsal olarak elde edilmesine bir yaklaşım yapılmakta ve bu yöntemden elde edilen sonuçların laboratuvarında yapılmış gerçek deney sonuçları ile bir karşılaştırması verilmektedir.

Sayın Ömer AYDAN, Hasan ÜÇPİRTİ ve Necdet TÜRK'e ait "**Laboratuvarında kayaların geçirgenlik ölçüm yöntemlerinin kuramı ve deneyler**" başlıklı ikinci yazıda, kayalarda gözenek geçirgenliği özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan temel eşitlikler verildikten sonra kararlı ve kararsız akışlar için kullanılan deney yöntemleri ile yeni deney yöntemlerinin kuramsal temelleri ile türetilmelerinde yapılan varsayımlar verilmektedir.

İlk iki yazının konusuna yakın ve yine Sayın Ömer AYDAN tarafından verilen "**Kayaların gözenek ve akışkan geçirgenliğinin basınca bağımlılığı**" başlıklı yazıda, kayaların akışkan geçirgenliği ile gözenekliliklerinin basınca bağlı olarak değişimini kuramsal olarak açıklayan bir model sunulduktan sonra bu değişkenler arasında yeni bir görgül ilişki önerilmekte ve deneysel sonuçlara olan uygulamaları verilmektedir.

Bu sayımızda yer alan son yazı, konusunda çeşitli ülkelerde bir tartışma başlatan ve bu nedenle de ülkemizde konuyla uğraşanların ilgisini çekeceğine inandığımız bir çeviri yazı. Almanca ve İngilizce olarak birçok Avrupa ülkelerinde yayımlanmış olan, sayın Prof.Dr. Kalman KOVARI tarafından kaleme alınmış ve sayın Ömer AYDAN, Reşat ULUSAY ve Halil KUMSAR tarafından dilimize çevirilen "**Yeni Avusturya tünelcilik yöntemi var mıdır? Yeni Avusturya Tünelcilik Yönteminin (NATM) arkasındaki yanlış kavramlar**" başlığını taşımaktadır. Sayın Prof.Dr. K. Kovari bu yazısında, L.Müller tarafından "Düşüncenin Yapısı" olarak tanımlanan NATM'ın sadece kuramsal bir temele dayalı olmadığı, aksine iki temel yanlış kavram üzerine kurulmuş olduğunu göstermektedir.

Gelecek sayılarda buluşmak dileğiyle tüm üyelerimize ve okurlarımıza saygılarımızı sunarız.

Yayın Kurulu

KAYALARDA AKIŞKANLARIN AKIŞI İÇİN DARCY YASASININ KURAMSAL TÜRETİMİ VE GEÇERLİLİĞİ

Theoretical formulation of Darcy's law for fluid flow
through porous and/or jointed rock and its validity

Ömer Aydan

Tokai Üniversitesi, Deniz İnşaat Mühendisliği Bölümü
Shimizu, 424 Japonya

Hasan Üçpırtı

Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Esentepe Kampüsü, Sakarya

Reşat Ulusay

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Beytepe, Ankara

Özet

Son yıllardaki sivil ve askeri nitelikteki nükleer atıkların hissedilir bir oranda artış göstermesi kayaların geçirgenliğinin incelenmesini güncelleştirmiştir. Son derece tehlikeli olan bu atıkların belli bir süre canlılardan uzak bir ortamda, örneğin kaya ortamlarda, güvenilir bir şekilde depolanmasına ilişkin yoğun araştırma programları yürütülmektedir. Bu çalışmanın ilk kısmında, yazarlar 1856'da Darcy tarafından gözenekli ve/veya süreksizlik içeren ortamların geçirgenliği için önerilen deneysel yasanın kuramsal olarak nasıl elde edilebileceğini göstereceklerdir. İkinci kısımda ise, kuramın sayısal değerlendirmesini yaparak elde edilen sonuçları laboratuvarında yapılmış gerçek deneylerin sonuçları ile karşılaştırmakta ve tartışmaktadır.

Anahtar kelimeler: Gözenek, süreksizlik, akışkan, Darcy yasası, kuram, geçirgenlik

Abstract

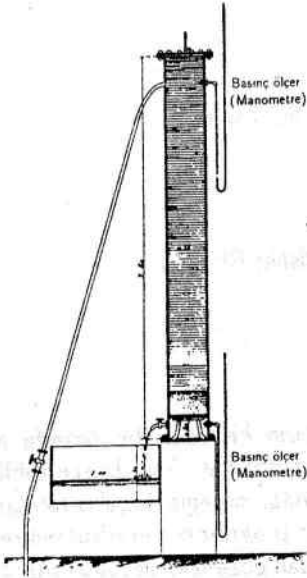
In literature, some research on the theory of fluid or gas flow through pores and/or discontinuity in rocks are available. There is a huge accumulation of nuclear wastes in countries utilising nuclear energy and nuclear arsenals, which must be kept away from biosphere for certain years. Underground space may be one of the safe places for waste disposal on which there are a number of researches going on this topic in recent years. In this study, a theoretical formulation of Darcy's law for fluid flow through pores and/or discontinuities is presented. Then, several applications of the theory are given and theoretical prediction are compared with some actual examples and their implications are discussed.

Key words: Pore, discontinuity, fluid, Darcy's law, theory, permeability

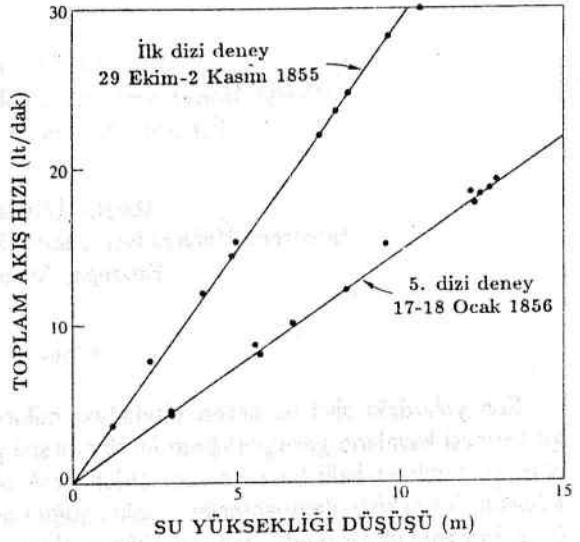
1. Giriş

Yeraltı yapılarının kazısı sırasında bir takım güçlüklerle karşılaşmaktadır. Özellikle yeraltısuyu hem bu yapıların duraylılığına hem de yapının inşaatında önemli zorluklara neden olmaktadır. Son yıllarda nükleer nitelikteki atıkların yeraltında oluşturulan açıklıklarda güvenli bir şekilde depolanması planlanmaktadır. Dolayısıyla bu tür depolardan radyoaktif maddelerin sızıp yeryüzüne ulaşabilmesi önemli oranda yeraltısuyuna bağlı olacaktır. Bu nedenle son yıllarda gözenekli ve/veya süreksizlik içeren kayaların akışkan geçirgenliği üzerinde yapılan kuramsal ve deneysel çalışmalar giderek artmaya devam etmektedir.

Yer tekniği mühendisliğinde kayalarda ve zeminlerde sıvıların akışı ile ilgili olarak 1854 yılında Darcy tarafından öne sürülen yasa yaygın olarak kullanılmaktadır (Darcy, 1956). Darcy bu ilişkiyi Şekil 1'de gösterilen deney düzenini kullanarak öne sürmüştür. Darcy'nin



Şekil 1. Darcy'nin deneysel düzeni

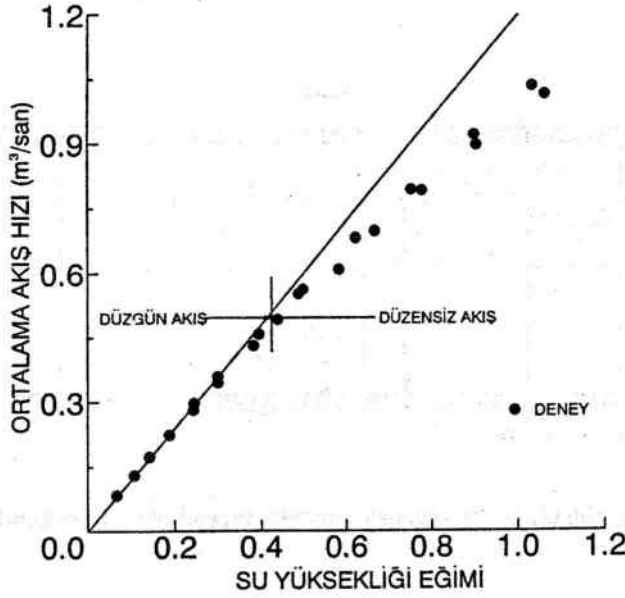


Şekil 2. Toplam akış hızı ile su yüksekliği düşüşü arasındaki ilişki

elde ettiği sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Darcy yasasında su yüksekliği eğimi ($-\partial h/\partial x$) ile ortalama hız ($\bar{v}$) arasındaki ilişkinin aşağıda verildiği şekilde doğrusal olduğu ileri sürülmektedir:

$$\bar{v} = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

burada K sıvı iletkenlik katsayısı (hydraulic conductivity) dir. Bu terim yaygın ve yanlış olarak geçirgenlik yerine kullanılmaktadır. Şekil 3'te gösterildiği gibi akışkanın hızı basınç eğiminin artması ile 1 numaralı eşitlikteki verilen ilişki doğrusallığını yitirmektedir (Sharp ve Maini, 1972). Yeraltısu biliminde gözlenen suyun akış hızı gözönüne alındığında Darcy yasası kullanılmasında bir sakınca olmamaktadır. Bu çalışmanın ilk kısmında, deneysel olarak bilinen Darcy yasasının kuramsal olarak bir boyutlu akış için nasıl elde edilebileceği gösterilecektir. İkinci kısımda ise Darcy yasasında bir katsayı olarak beliren geçirgenlik katsayısını etkileyen faktörler incelenecek ve kuramsal ilişkileri kullanarak laboratuvarda yapılmış gerçek deney sonuçları ile karşılaştırıp tartışılacaktır.



Şekil 3. Ortalama akış hızı ile su yüksekliği eğimi arasındaki ilişki

2. Akışkan akışı için Darcy yasasının kuramsal temeli

Burada bir boyutlu (boyuna veya radyal) durum düşünülerek gözenek veya çatlak içerisinde akan akışkanın statik denge denklemi ile Newton tipi makaslama gerilmesi - deformasyon hızı ilişkisinden Darcy yasası kuramsal olarak türetiləcəktir. Burada verilecek kavramların bir kısmı geçmişteki akışkan mekaniği ile ilgili yayınlarda bulunmakla birlikte elde edilen ilişkilerin geçerliliğini tartışırken hangi varsayımlara dayanarak türetildiklerinin bilinmesini yazarlar gerekli bulmaktadır.

2.1. Gözenekli kayalarda akışkan geçirgenlik özelliği¹

x -yönü için silindirik bir boru içinde akan suyun veya gazın statik denge denklemi aşağıdaki eşitlikle verilir (Şekil 4):

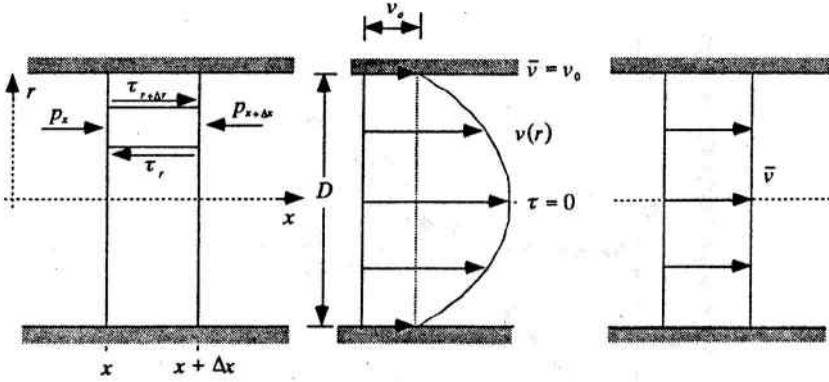
$$\sum F_x = (p_{(x)} - p_{(x+\Delta x)})\pi[(r+\Delta r)^2 - r^2] + \tau_{(r+\Delta r)}2\pi(r+\Delta r)\Delta x - \tau_{(r)}2\pi r\Delta x = 0 \quad (2)$$

burada p basınç, τ makaslama gerilmesi, r borunun merkezinden olan radyal uzaklıktır. Yukarıda verilen denklemde p ve τ 'nin Taylor açılımı yapılır ve basınç (p) ve kesme gerilmesi (τ)'nin ikinci derece ve daha yüksek olan türevleri ihmal edilirse denge denklemi

$$\frac{dp}{dx} - \frac{d\tau}{dr} - \frac{\tau}{r} = 0 \quad (3)$$

¹Denklemlerde beliren parametrelerin açıklaması ve boyutları notasyon kısmında verilmiştir.

olarak elde edilir.



Şekil 4. Silindirik bir gözenek içindeki düzenli akımın mekanik modeli

Ortamdaki akımın düzenli (laminar flow) ve makaslama gerilmesi τ ile makaslama birim deformasyon hızı $\dot{\gamma}$ arasındaki ilişkinin doğrusal (linear) olduğu düşünülürse, aşağıdaki ilişkiler yazılabilir:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}, \quad \dot{\gamma} = \frac{du}{dr} = \frac{dv}{dr}, \quad v = \dot{u} = \frac{du}{dt} \quad (4)$$

Burada η viskozite ve deformasyon u 'nun üzerindeki nokta zamana göre türeve işaret eder. Yukarıda verilen ilişkiler 3 numaralı denklemden yerine konduğunda aşağıdaki kısmi diferansiyel denklem elde edilmektedir.

$$\frac{dp}{dx} - \eta \frac{d^2v}{dr^2} - \frac{\eta}{r} \frac{dv}{dr} = 0 \quad (5)$$

Bu kısmi diferansiyel denklemin r -yönüne göre integrali alınırsa, akış hızı v

$$v = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2 \quad (6)$$

olarak elde edilir. Aşağıda verilen sınır koşulları için

$$r = \frac{D}{2} \text{ 'de } v = v_0, \quad r = 0 \text{ 'da } \tau = 0$$

integral sabitleri C_1 ve C_2

$$C_1 = 0, \quad C_2 = v_0 - \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{D^2}{16} \quad (7)$$

olarak bulunur. Burada D gözenek çapı, η akışkanın viskozitesidir. Eğer,

$$v_0 = -\alpha \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{D^2}{16} \quad (8)$$

olduğu varsayılırsa yukarıda verilen C_2 katsayısı aşağıda verilen hali alır:

$$C_2 = -(1 + \alpha) \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{D^2}{16} \quad (9)$$

Birim zamanda süreksizlikten geçen toplam akış hızı (flow rate) v_t

$$v_t = \int_0^{2\pi} \int_{r=0}^{\frac{D}{2}} v r dr d\theta \quad (10)$$

olarak tanımlanır ve yukarıda verilen integral alınır aşağıdaki ilişki elde edilir.

$$v_t = -(1 + \alpha) \frac{\pi}{\eta} \frac{D^4}{128} \frac{dp}{dx} \quad (11)$$

Eğer birim zamandaki toplam akış hızı v_t , gözenek alanındaki ortalama hız $\bar{v}$ cinsinden yeniden tanımlanır:

$$v_t = \bar{v} \pi \frac{D^2}{4} \quad (12)$$

ve 12 numaralı denklem 11 numaralı denklemde yerine konursa aşağıdaki ilişki elde edilir.

$$\bar{v} = -(1 + \alpha) \frac{1}{\eta} \frac{D^2}{32} \frac{dp}{dx} \quad (13)$$

Bu ilişki $\alpha = 0$ için Hagen-Poiseuille eşitliği olarak bilinir (Welty vd. 1984). Yukarıdaki denklem Darcy yasasına benzer olarak şu şekilde yazılabilir:

$$\bar{v} = -\frac{k}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (14)$$

burada

$$k = (1 + \alpha) \frac{D^2}{32} \quad \text{veya} \quad k = (1 + \alpha) \frac{a^2}{8}, \quad a = \frac{D}{2}$$

14 numaralı eşitlikteki k gözeneklerin geçirgenliği olarak bilinir.² Gözeneklilik n ile gösterilir ve gözeneklerin alanının $\sum_{i=1}^N A_p^i$ toplam alana A_t olan oranı olarak tanımlanırsa (Şekil 5):

$$n = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^N \pi \frac{D_i^2}{4} \quad \text{veya} \quad n = \frac{N \pi \bar{D}^2}{4 A_t} \quad (15)$$

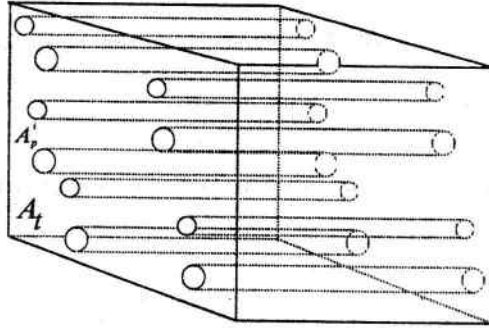
eşitliği elde edilir ve görünür geçirgenlik (apparent permeability) k_a ile gerçek geçirgenlik (actual permeability) k arasında aşağıdaki gibi bir ilişki kurulabilir:

² $p = \rho g H$ (H :suyun belirli bir yüzeyden olan yüksekliği) olarak yazılır ve ρ 'nun sabit olduğu varsayılırsa $\bar{v}_a = n \bar{v} = -n \frac{k \rho g}{\eta} \frac{\partial H}{\partial x}$ olarak elde edilir. Darcy'nin yasası genel olarak $\bar{v}_a = -K \frac{\partial H}{\partial x}$ yazılır. K , $n \frac{k \rho g}{\eta}$ 'e eşdeğer olup suyun yoğunluğunu ve vizkositesini içeren bir katsayıdır. Bu katsayı ortamın sıvı iletkenlik katsayısı (hydraulic conductivity) olarak bilinir ve birimi hızın birimi ile aynıdır.

$$k_a = nk$$

(16)

burada gözenekliliğin değişmediği varsayılmıştır.



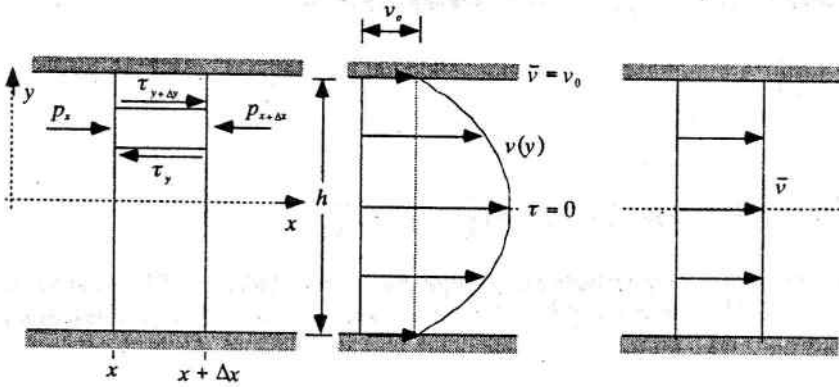
Şekil 5. Kaya ortamlardaki gözeneklerin idealleştirilmiş görünümü

2.2. Süreksizliklerin akışkan geçirgenlik özelliği

x -yönü için sıvı veya gazın kuvvet denge denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir (Şekil 6):

$$\sum F_x = p_{(x)}\Delta y - p_{(x+\Delta x)}\Delta y + \tau_{(y+\Delta y)}\Delta x - \tau_{(y)}\Delta x = 0 \quad (17)$$

burada p basınç, τ makaslama gerilmesidir.



Şekil 6. Süreksizlikler içindeki düzenli akımın mekanik modeli

Yukarıda verilen eşitlik tekrar düzenlenir ve p ile τ 'nın Taylor açılımı yapılır ve ikinci derece ve daha yüksek olan terimler ihmal edilirse aşağıdaki şekli alır:

$$\frac{dp}{dx} - \frac{d\tau}{dy} = 0 \quad (18)$$

Ortamdaki akımın düzenli ve makaslama gerilmesi ile makaslama birim deformasyon hızı $\dot{\gamma}$ arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu düşünülür

$$\tau = \eta \dot{\gamma}, \quad \dot{\gamma} = \frac{d\dot{u}}{dy} = \frac{dv}{dy}, \quad v = \dot{u} = \frac{du}{dt} \quad (19)$$

ve yukarıda verilen ilişkiler 18 numaralı eşitlikte yerine konursa aşağıdaki kısmi diferansiyel denklem elde edilir:

$$\frac{dp}{dx} - \eta \frac{d^2v}{dy^2} = 0 \quad (20)$$

Bu kısmi diferansiyel denklemin y -yönüne göre integrali alınır, akış hızı v

$$v = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2 \quad (21)$$

olarak elde edilir. Aşağıda verilen sınır koşulları için

$$y = \frac{h}{2} \text{ 'de } v = v_o, \quad y = 0 \text{ 'da } \tau = 0$$

integral sabitleri C_1 ve C_2 değerleri aşağıdaki gibi bulunur:

$$C_1 = 0, \quad C_2 = v_o - \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{h^2}{8} \quad (22)$$

Burada h süreksizlik açıklığı (aperture of discontinuity) dır. Eğer,

$$v_o = -\alpha \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{h^2}{8} \quad (23)$$

olduğu varsayılırsa yukarıda verilen C_2 katsayısı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$C_2 = -(1 + \alpha) \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{h^2}{8} \quad (24)$$

Birim genişlikteki süreksizlikten birim zamanda geçen toplam akış hızı v_t ,

$$v_t = 2 \int_{y=0}^{y=\frac{h}{2}} v dy \quad (25)$$

olarak tanımlanır ve yukarıdaki integral alınır aşağıdaki ilişki elde edilir.

$$v_t = -(1 + \alpha) \frac{1}{\eta} \frac{h^3}{12} \frac{dp}{dx} \quad (26)$$

$\alpha = 0$ için bu eşitlik yeraltısuyu bilminde 3. derece yasası (qubic law) olarak bilinen tanıma karşılık gelir (Snow 1965) ve ilk defa Polubarinova-Kochina (1962) tarafından jeomekanik alanda tanıtılmıştır. Eğer toplam akış hızı (v_t), süreksizlik açıklığı (h) ile ortalama hız ($\bar{v}$) arasındaki ilişki

$$v_t = \bar{v} h \quad (27)$$

olarak yazılır ve elde edilen 27 numaralı eşitlik 26 numaralı eşitlikte yerine konursa, aşağıdaki ilişki elde edilir.

$$\bar{v} = -(1 + \alpha) \frac{1}{\eta} \frac{h^2}{12} \frac{dp}{dx} \quad (28)$$

28 numaralı eşitlik Darcy yasasına benzer olarak aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir:

$$\bar{v} = -\frac{k_d}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (29)$$

burada

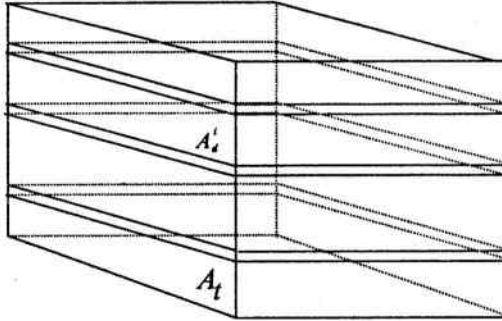
$$k_d = (1 + \alpha) \frac{h^2}{12}$$

Yukarıdaki denklemde k_d süreksizliklerin geçirgenliği olarak bilinir. Süreksizlik sıklık oranını n_d ile gösterilir ve süreksizliklerin alanının $\sum_{i=1}^N A_d^i$ toplam alana A_t olan oranı olarak tanımlanırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir (Şekil 7).

$$n_d = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^N A_d^i \quad (30)$$

Ayrıca, görünür geçirgenlik (apparent permeability) k_{da} ile gerçek geçirgenlik (actual permeability) k_d arasında aşağıdaki gibi bir ilişki kurulabilir:

$$k_{da} = n_d k_d \quad (31)$$



Şekil 7. Kaya ortamlardaki süreksizliklerin idealleştirilmiş görünümü

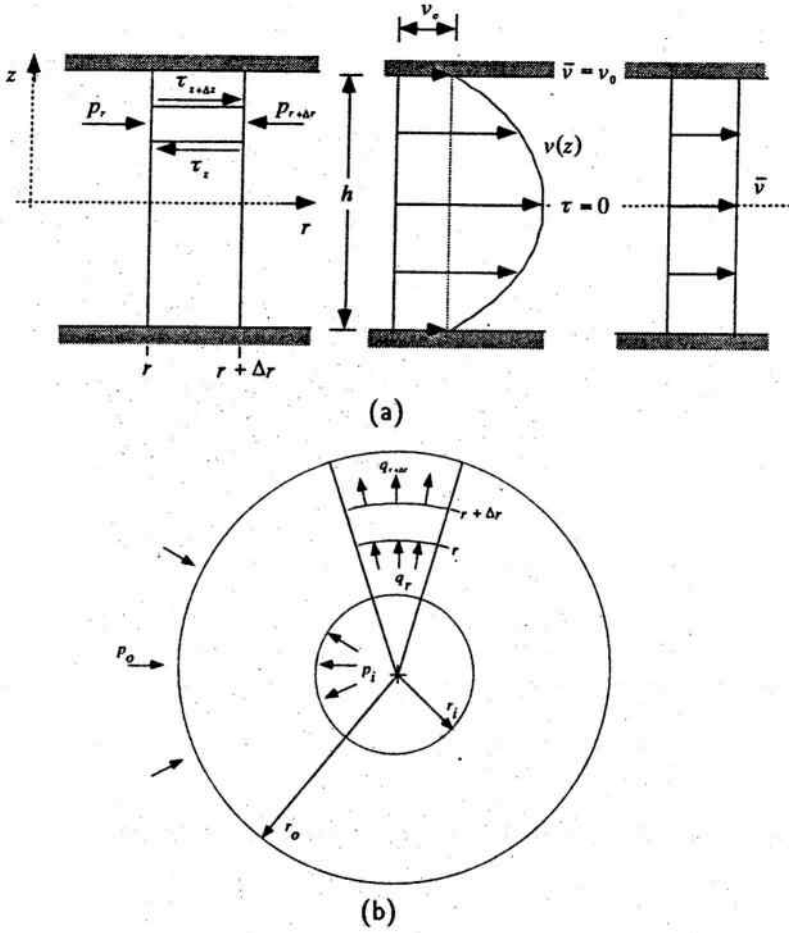
2.3. Eksenel simetrik numunelerdeki süreksizliklerin akışkan geçirgenlik özelliği

Silindirik koordinat sisteminde akan akışkanın denge denklemi aşağıdaki eşitlikle verilir (Şekil 8):

$$(\tau_{(z+\Delta z)} - \tau_{(z)})r\Delta r\Delta\theta + \sigma_{r(r)}r\Delta\theta\Delta y - \sigma_{r(r+\Delta r)}(r+\Delta r)\Delta\theta\Delta y + 2\sigma_\theta\Delta r\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) = 0 \quad (32)$$

$$\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \approx \frac{\Delta\theta}{2}$$

Yukarıda verilen denklem tekrar düzenlenir ve τ ile σ_r 'in Taylor açılımı kullanılırsa 32 numaralı denklemin kısmi diferansiyel şekli



Şekil 8. Eksenel simetrik bir boru içindeki düzenli akımın mekanik modelinin (a) yandan (b) üstten görünümü

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \frac{d\tau}{dz} = 0 \quad (33)$$

olarak elde edilir. Eğer, ortam hidrostatik ise ($\sigma_r = \sigma_\theta = p$) yukarıdaki denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{d\tau}{dz} = 0 \quad (34)$$

Ortamdaki akımın düzenli ve makaslama gerilmesi ile makaslama birim deformasyon hızı $\dot{\gamma}$ arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu düşünülürse, aşağıdaki ilişkiler yazılabilir.

$$\tau = \eta \dot{\gamma}, \quad \dot{\gamma} = \frac{du}{dz} = \frac{dv}{dz}, \quad \sigma_r = p, \quad v = \dot{u} = \frac{du}{dt} \quad (35)$$

Yukarıda verilen ilişkiler 34 numaralı eşitlikte yerine konursa aşağıda verilen kısmi diferansiyel denklem elde edilir:

$$\frac{dp}{dr} - \eta \frac{d^2 v}{dz^2} = 0 \quad (36)$$

Bu kısmi diferansiyel denklemin y -yönüne göre integrali alınır, akış hızı v

$$v = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dr} \frac{z^2}{2} + C_1 z + C_2 \quad (37)$$

olarak elde edilir. Aşağıda verilen sınır koşulları için:

$$z = \frac{h}{2} \text{ 'de } v = v_o, \quad z = 0 \text{ 'da } \tau = 0$$

integral sabitleri olan C_1 ve C_2 değerleri aşağıdaki gibi bulunur:

$$C_1 = 0, \quad C_2 = v_o - \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dr} \frac{h^2}{8} \quad (38)$$

Eğer,

$$v_o = -\alpha \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dr} \frac{h^2}{8} \quad (39)$$

olduğu varsayılırsa yukarıda verilen C_2 katsayısı aşağıda verildiği şekilde yazılabilir:

$$C_2 = -(1 + \alpha) \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dr} \frac{h^2}{8} \quad (40)$$

Birim zamanda süresizlikten geçen toplam akış hızı v_t aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$v_t = 2 \int_0^{2\pi} \int_{z=0}^{z=\frac{h}{2}} v r dz d\theta \quad (41)$$

ve integral işlemi yapılırsa toplam akış hızı

$$v_t = -(1 + \alpha) \frac{2\pi r}{\eta} \frac{h^3}{12} \frac{dp}{dr} \quad (42)$$

olarak elde edilir. Eğer birim zamandaki toplam akış hızı v_t ile ortalama hız $\bar{v}$ arasındaki ilişki

$$v_t = 2\pi r \bar{v} h \quad (43)$$

olarak tanımlanır ve 43 numaralı eşitlik 42 numaralı eşitlikte yerine konursa, aşağıdaki ilişki elde edilir.

$$\bar{v} = -(1 + \alpha) \frac{1}{\eta} \frac{h^2}{12} \frac{dp}{dr} \quad (44)$$

Yukarıdaki denklem Darcy yasasına benzer bir şekilde yeniden yazılabilir:

$$\bar{v} = -\frac{k_d}{\eta} \frac{dp}{dr} \quad (45)$$

burada

$$k_d = (1 + \alpha) \frac{h^2}{12} \text{ veya } h = \sqrt{\frac{12k_d}{(1 + \alpha)}}$$

45 numaralı eşitlikte verilen ilişkiler 42 numaralı eşitlikte yerine konursa toplam akış hızı v_t

$$v_t = -\frac{2\pi r h k_d}{\eta} \frac{dp}{dr} \quad (46)$$

olarak elde edilir. Yukarıdaki denklem aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2\pi h k_d dp}{v_t \eta} \quad (47)$$

Yukarıdaki denklemin integrali

$$\int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = -\int_{p_i}^{p_o} \frac{2\pi h k_d}{v_t \eta} dp \quad (48)$$

olarak yazılabilir. İntegral işlemi ve gerekli düzenlemeler yapılırsa süreksizliğin geçirgenliği k_d aşağıdaki şekilde bulunur:

$$k_d = \left[\frac{v_t \eta \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{4\pi \sqrt{\frac{3}{(1+\alpha)}} (p_i - p_o)} \right]^{2/3} \quad (49)$$

49 numaralı eşitliğin süreksizlik açıklığından bağımsız olduğuna dikkat edilmelidir. Bu şekli ile gözenekli kayalarada uygulanabilir.

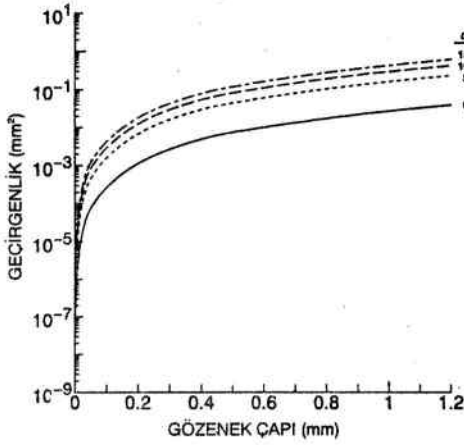
3. Geçirgenliğin değerini etkileyen faktörler

Burada gözenekli kayalarda ve süreksizliklerin akışkan geçirgenlik özelliğine ilişkin olarak 2. bölümde verilen kuramın sayısal bir değerlendirmesi yapılacak ve elde edilen sonuçların laboratuvarında yapılmış gerçek deney sonuçları ile karşılaştırılıp tartışılacaktır.

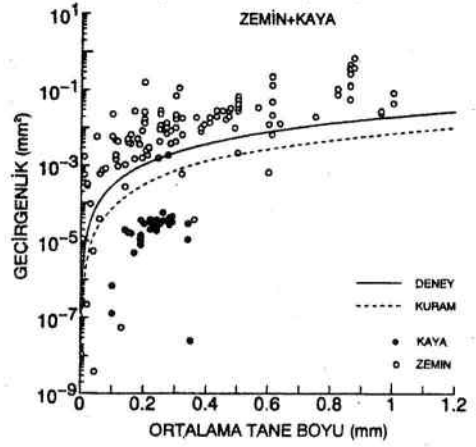
Buradaki deney sonuçları yazarların yapmış olduğu deneyleride içeren literatürde yayınlanmış kaya (gözenekli ve/veya süreksizlik) ve zeminlerdeki deney sonuçları için geliştirilmiş ve "PERROSO" olarak adlandırılan bir veri tabanından (data-base) elde edilmiştir. Şu anda bu veri tabanındaki veri sayısı 1200'dir.

İlk karşılaştırmada gözenek çapının (D) geçirgenliğe (k) olan etkisi farklı α değerleri incelenmiştir. Hesaplamalarda gözenek çapı 0 mm'den 1.2 mm'ye kadar α ise 0 ile 15 arasında değiştirilmiştir (Şekil 9). Eşitlik 14'den de görüleceği gibi geçirgenlik gözenek yarıçapının karesine bağlı olması nedeniyle doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Dolayısıyla zeminde tane boyutu veya kayalarda mineral boyutları arttıkça aradaki boşlukların boyutlarının büyümesi doğal olarak beklenebilir.

Deneyisel çalışmalarda gözenek çapının ölçümü oldukça güç olması nedeniyle ortalama tane boyu ölçümleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Tanelerin çapı küre şeklinde olduğu ve karesel olarak dizildiği varsayılırsa bir boyutlu akış için eşdeğer gözenek çapı D^* aşağıdaki ilişkiden hesaplanabilir:



Şekil 9. Geçirgenlik (k) ile gözenek çapı (D) arasındaki kuramsal ilişki



Şekil 10. Geçirgenlik (k) ile ortalama tane boyu arasındaki kuramsal ve deneysel ilişki

$$D^* = D \sqrt{\frac{4}{\pi} - 1}$$

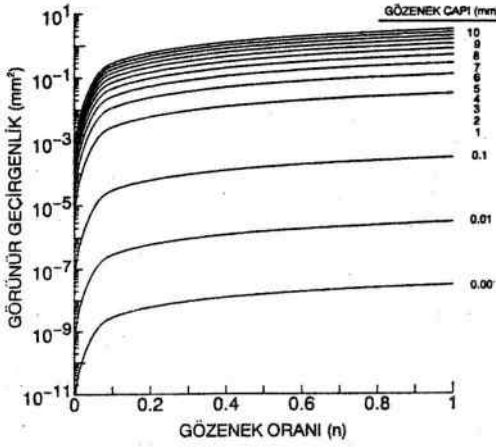
(50)

Şekil 10'da geçirgenliğin ortalama tane boyu ile olan ilişkisi gösterilmektedir. Sürekli çizgi deneysel sonuçlar için en küçük kareler yöntemi ile elde edilen ilişkiyi ve kırıklı çizgi ise 50 numaralı eşitlik kullanılarak elde edilen ilişkiyi ($\alpha = 0$) göstermektedir. Şekilden de görüleceği gibi kuramsal ilişki ile deneysel ilişki birbirlerine çok benzemekle beraber zemin için deneysel ilişki kuramsal ilişkiye göre geçirgenliği daha büyük olan değerleri vermektedir. Kayada ise tersine bir ilişki görülmektedir. Bu farklılık gerçekte kaya ve zemindeki tanelerin aynı büyüklükte olmamasında kaynaklanmaktadır. Zemin için deneysel geçirgenliğin daha büyük olması gözenek cidarında akışkanın kaydığına başka bir değişle bunun kuramsal varsayımdan farklı bir durumun meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülebilir.

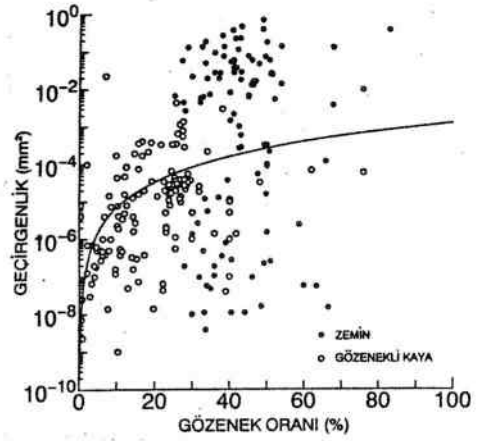
Şekil 11'de kayanın görünür geçirgenlik değeri (k_a) ile gözenek oranı (n) arasındaki ilişki düşünülen her bir örnekte bütün gözeneklerin çapı aynı olduğu varsayılarak farklı gözenek çapı (D) değerleri için gösterilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi gözenek oranının ve gözenek çapının büyümesi kayanın görünür geçirgenliğini artırmaktadır.

Şekil 12, kaya ve zeminler için deneysel gözenek oranı ile geçirgenlik ilişkisini göstermektedir. Gözenek oranının artması ile geçirgenliğin arttığı şekilden açık olarak görülmekle birlikte aynı gözenek oranı için geçirgenlik değeri çok değişebilmektedir. Bu bir önceki kuramsal modelden görüleceği üzere kaya veya zeminin gözenek oranları aynı olsa bile gözenek çapının farklı olması halinde geçirgenlik değerinin değişebilmesinden kaynaklanmaktadır.

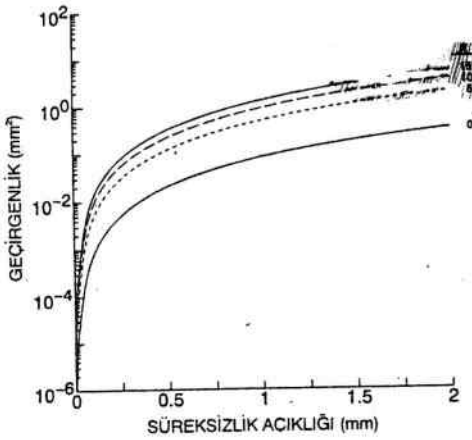
Süreksizlik açıklığının (h) gerçek geçirgenliğe (k_d) olan etkisini incelemek için yapılan hesaplamaların sonuçları Şekil 13'de gösterilmiştir. Hesaplamalarda süreksizlik açıklığı değiştirilerek gerçek geçirgenlik hesaplanmıştır. Ayrıca süreksizlik cidarında oluşabilecek



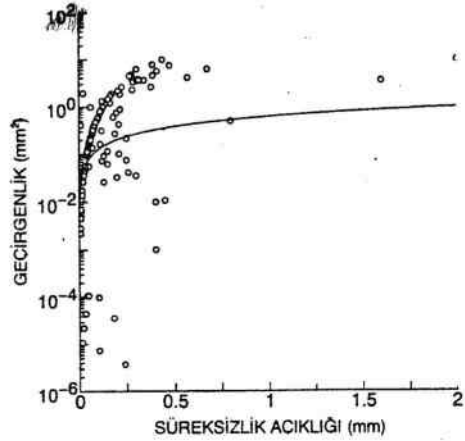
Şekil 11. Farklı gözenek çapı (D) değerleri için görünür geçirgenlik (k_a) ile gözenek oranı (n) arasındaki kuramsal ilişkiler



Şekil 12. Geçirgenlik (k) ile gözenek oranı arasındaki deneysel ilişki



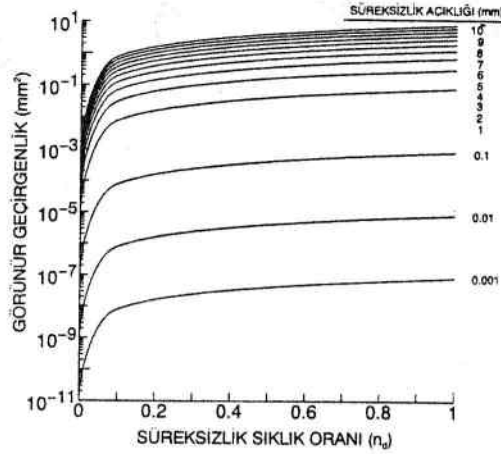
Şekil 13. Farklı α değerleri için gerçek geçirgenlik (k_d) ile süreksizlik açıklığı (h) arasındaki kuramsal ilişki



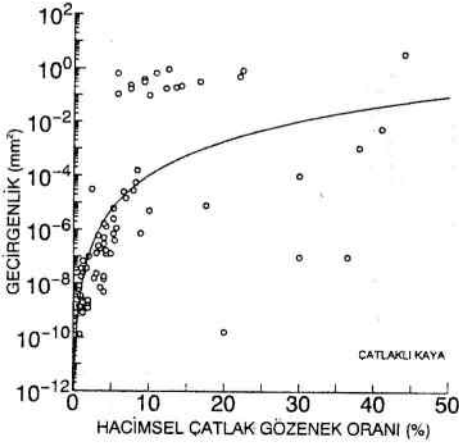
Şekil 14. Geçirgenlik (k) ile süreksizlik açıklığı arasındaki deneysel ilişki

kayma olgusu içinde α katsayısı 0 ile 15 arasında değiştirilmiştir. $\alpha = 0$ olduğunda süreksizlik cidarında kayma olmadığına karşılık gelmektedir. Bu örnekte de görüleceği gibi süreksizliğin geçirgenliği süreksizlik açıklığının karesine bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Bu konuda, yazarların geliştirdiği veri tabanı kullanılarak yapılan deney sonuçları Şekil 14'de gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar kuramsal modele nitelik olarak benzerlik göstermektedir.

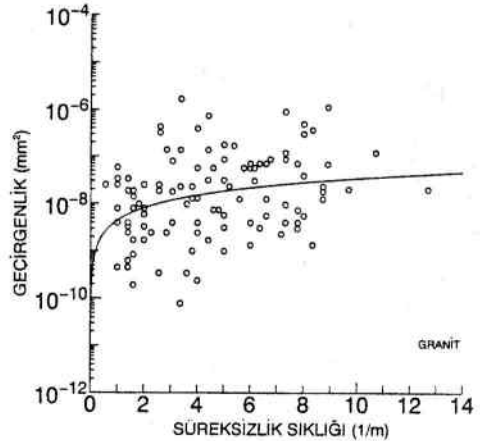
Şekil 15'de kayanın görünür geçirgenlik değeri (k_{da}) ile süreksizlik sıklık oranı (n_d) arasındaki ilişki farklı süreksizlik açıklığı (h) değerleri için gösterilmiştir. Buradan da



Şekil 15. Farklı süreksizlik açıklığı değerleri için görünür geçirgenlik (k_{da}) ile süreksizlik sıklık oranı (n_d) arasındaki kuramsal ilişki



Şekil 16. Geçirgenlik (k) ile hacimsel çatlak gözenek oranı arasındaki deneysel ilişki



Şekil 17. Geçirgenlik (k) ile süreksizlik sıklığı arasındaki deneysel ilişki

görüldüğü gibi süreksizlik sıklığının ve açıklığının artması kayanın görünür geçirgenliğini de arttırmaktadır.

Yazarların geliştirdiği veri tabanı kullanılarak, yapılan deney sonuçları Şekil 16 ve 17'de gösterilmiştir. Şekil 16, hacimsel çatlak gözenek oranı ile geçirgenlik arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 17'de de süreksizlik sıklığı ile geçirgenlik arasındaki ilişki için verilmiştir. Bir önceki şekille karşılaştırıldığında deney sonuçları niteliksel olarak kuramsal modelle iyi bir uyum içerisinde olmakla birlikte niceliksel olarak farklıdır. Bu

farklılık doğadaki süreksizliklerin ve boşlukların geometrik şekillerinin karmaşık olması ve süreksizlik cidarında kayma gibi olguların oluşmasından kaynaklanmaktadır.

3.1. Geçirgenliğin basınca bağlı olarak değişimi

Gözenekli kayaların veya süreksizliklerin geçirgenliğinin basıncın veya normal gerilmenin artması ile azaldığı deneysel olarak gözlenmiştir (Tsang ve Witherspoon, 1981; Iwai, 1976; Üçpırtı vd, 1992). Bir önceki bölümde verilen örneklerde geçirgenlik katsayısının boşlukların gözenek çapına veya süreksizlik açıklığına bağlı olduğu sayısal olarak gösterilmiştir. Eğer uygulanan basınca bağlı olarak gözenek çapında veya süreksizlik açıklığında küçülme oluyorsa geçirgenlik katsayısında da bir azalma olmasını beklemek doğaldır. Diğer bir ifadeyle doğada derinlik arttıkça kayaların geçirgenliği azalacaktır.

Gözenek çapının veya süreksizliklerin etkin açıklığının basınca bağlı olarak değişiminin aşağıdaki gibi verildiğini varsayalım:

a-) Gözenek için:

$$D = D_o e^{-\frac{p}{\tau_p}} \quad (51)$$

burada

D_o : atmosfer basıncındaki ortalama gözenek çapı
 τ_p : malzeme özelliklerine bağlı bir katsayı
 p : basınç (hidrostatik gerilme)

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (52)$$

burada

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: asal gerilmeler

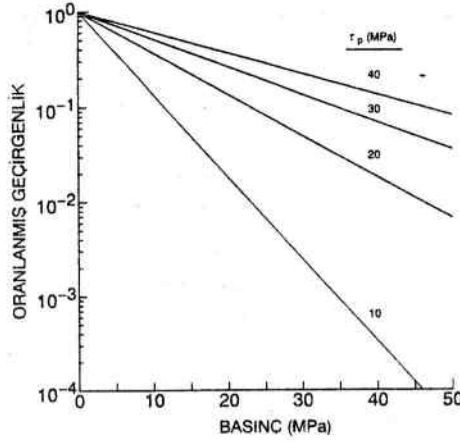
b-) Süreksizlik için:

$$h = h_o e^{-\frac{\sigma_n}{\tau_n}} \quad (53)$$

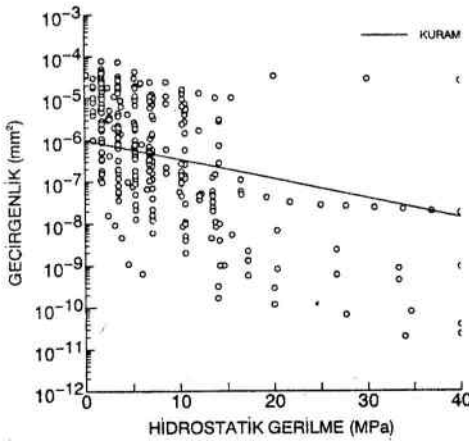
burada

h_o : atmosfer basıncındaki ortalama etkin süreksizlik açıklığı
 σ_n : normal gerilme
 τ_n : süreksizliğin mekanik özelliklerine bağlı bir katsayı

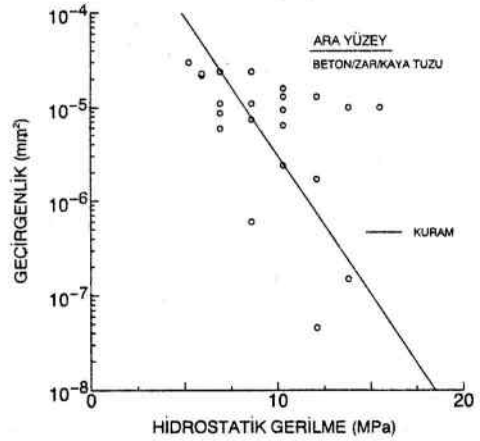
Şekil 18'de yukarıda verilen bu kuramsal modelin sayısal uygulaması gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi geçirgenlik katsayısı basınca (veya normal gerilmeye) bağlı olarak azalmaktadır. Şekil 19, kayalar için (laboratuvar deneyleri) geliştirilmiş veri tabanından elde edilen sonuçları ve en küçük kareler yönteminden elde edilen eğriyi göstermektedir. Bu şekilden de görüleceği gibi deneysel sonuçlar ile kuramsal modelle iyi bir uyum içerisinde. Şekil 20, Üçpırtı vd. (1992) tarafından kaya tuzu/zar/beton ara yüzeyi için yapılan deney sonuçlarını göstermektedir. Ara yüzey numuneleri üç farklı malzemeden oluşmaktadır: kaya tuzu, zar ve beton. Silindirik eksenleri boyunca kesilerek hazırlanan kaya tuzu ve beton numuneler, bunların ara yüzeyi boyutunca kesilerek hazırlanan zar birleştirilerek boyuna ara yüzey akış deneyi için kullanılan numune hazırlanır. Daha sonra basınç hücresine (Hoek cell) konarak boyuna ara yüzey akış deneyi gerçekleştirilir. Deney sonuçları ile öne sürülen modellerden elde edilen sonuçlar arasında niteliksel ve niceliksel olarak iyi bir uyum görülmektedir.



Şekil 18. Oranlanmış geçirgenlik ile basınç arasındaki kuramsal ilişki



Şekil 19. Kayalar için geçirgenlik (k) ile hidrostatik gerilme arasındaki deneysel ve kuramsal ilişki



Şekil 20. Kaya tuzu/zar/beton ara yüzeyi için geçirgenlik (k) ile hidrostatik gerilme arasındaki deneysel ve kuramsal ilişki

4. Sonuçlar

Bu çalışmanın ilk bölümünde deneysel olarak bilinen Darcy yasası gözenekli ve/veya süreksizlik içeren kayalar için kuramsal olarak elde edilmiştir. İkinci bölümde gözenekli kayalarda ve süreksizliklerin akışkan geçirgenlik özelliğine ilişkin kuramın sayısal bir değerlendirilmesi yapılmış olup, elde edilen sonuçlar laboratuvarında yapılmış gerçek deneylerin sonuçları ile karşılaştırılarak aralarındaki olası ilişki tartışılmıştır. Bu çalışmada aşağıda

verilen sonuçlar elde edilmiştir:

- 1) Gözeneğin geçirgenliği ile gözenek çapı arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır.
- 2) Gözenekli kayanın görünür geçirgenliği ile gözenek oranı arasındaki ilişki doğrusaldır. Ayrıca kayanın gözenek çapının büyümesi kayanın görünür geçirgenlik değerinin artmasına neden olmaktadır.
- 3) Süreksizliğin geçirgenliği ile süreksizlik açıklığı arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır.
- 4) Kayanın görünür geçirgenliği ile süreksizlik sıklık oranı arasındaki ilişki doğrusal olup kayanın süreksizlik açıklığı büyüdükçe kayanın görünür geçirgenlik değeride artmaktadır.
- 5) Kayanın geçirgenliği basıncın büyümesi ile azalmaktadır.
- 6) Kuramsal olarak elde edilen geçirgenlik genellikle deneysel olarak elde edilen geçirgenlikten küçük olmaktadır.

Gözenek veya süreksizliklerin şekilleri ve boyutları karmaşık olması ve gözenek ve süreksizlik cidarındaki sınır koşulu her zaman sağlanamaması nedeniyle deneysel olarak geçirgenliğin ölçülmesi daha geçerli olacaktır. Yalnız, kuramsal ilişkiler deneysel olarak geçirgenliğin elde edilmesinde dikkat edilmesi gereken hususlar ile deneysel sonuçların irdelenmesine ışık tutacaktır.

Kaynaklar

- Darcy, H. 1956. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.
- Iwai, K. 1976. Fundamental studies of the fluid flow through a single fracture. *Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.*
- Polubarinova-Kochina, P. YA. 1962. Theory of groundwater movement. Princeton University, Press.
- Sharp, J. C. and Maini, Y. N. T. 1972. Fundamental considerations on the hydraulic characteristics of joints in rock. *Proc. Int. Sym. on Percolation through Fractured Rock*, ISRM, T1-F, Stuttgart, Germany.
- Snow, D. T. 1965. A parallel plate model of fractured permeable media. *Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.*
- Tsang, Y. W. ve P. A. Witherspoon. 1981. Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress. *Journal of Geophysical Research*, 86, B10, 9287-9298.
- Üçpırtı, H., J. J. K. Daemen, R. E. Finley and J. T. George. 1992. Laboratory measurement of gas flow along a pressurized grout/membrane/halite interface for waste isolation pilot plan. *SAND92-2121*. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- Welty, J.R., Wicks, C.E., Wilson, R.E. 1984. Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer. J. Wiley, Third Edition.

NOTASYON

D	: gözenek çapı (L)
D_o	: atmosfer basıncındaki ortalama gözenek çapı (L)
h	: süreksizlik açıklığı (L)
h_o	: atmosfer basıncındaki süreksizlik açıklığı (L)
u	: akışkanın deformasyonu (L)
v	: akışkanın hızı (LT^{-1})
$\bar{v}$	: gözenekteki ortalama akış hızı (LT^{-1})
K	: akışkan iletkenlik katsayısı (LT^{-1})
g	: yerçekimi ivmesi (LT^{-2})
k	: gözeneklerin gerçek geçirgenliği (L^2)
k_a	: gözeneklerin görünür geçirgenliği (L^2)
k_d	: süreksizliklerin gerçek geçirgenliği (L^2)
k_{da}	: süreksizliklerin görünür geçirgenlik (L^2)
v_t	: toplam akış hızı (L^3T^{-1})
ρ	: akışkanın yoğunluğu (ML^{-3})
η	: akışkanın viskozitesi ($ML^{-1}T^{-1}$)
p	: basınç ($ML^{-1}T^{-2}$)
τ	: makaslama gerilmesi ($ML^{-1}T^{-2}$)
σ_i	: asal gerilmeler ($i = 1, 2, 3$) ($ML^{-1}T^{-2}$)
σ_n	: normal gerilme ($ML^{-1}T^{-2}$)
τ_n	: süreksizliğin mekanik özelliklerine bağlı bir katsayı ($ML^{-1}T^{-2}$)
τ_p	: malzeme özelliklerine bağlı bir katsayı ($ML^{-1}T^{-2}$)
t	: zaman (T)
$\dot{\gamma}$	: makaslama birim deformasyon hızı (T^{-1})

LABORATUVARDA KAYALARIN GEÇİRGENLİK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN KURAMI VE DENEYLER

Theory of laboratory methods for measuring
permeability of rocks and tests

Ömer Aydan

Tokai Üniversitesi, Deniz İnşaat Mühendisliği Bölümü
Shimizu, 424 Japonya

Hasan Üçpırtı

Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Esentepe Kampüsü, Sakarya

Necdet Türk

Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Bornova, İzmir

Özet

Kaya ortamların akışkan geçirgenliğinin gerek kuramı gereksede laboratuvarda ölçümüne ilişkin bazı çalışmalar bulunmakla birlikte kaya mekaniği literatüründe derli toplu bir yayını bulmak oldukça zordur. Bu çalışmanın ilk kısmında kayalarda gözenek geçirgenliği özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan temel denklemlerin vererek kuramsal ve deneysel anlamdaki kararlı ve kararsız akış kavramları anlatılacaktır. İkinci kısmında ise kararlı ve kararsız akış için kullanılan deney yöntemleri ile yeni deney yöntemlerinin kuramsal temelleri ile türetilmelerinde yapılan varsayımlar verilecektir. Her bir deney yöntemi için yazarlar veyahutta literatürde yayınlanmış örnek deney sonuçları verilecek ve geçirgenliğin nasıl saptandığı gösterilecektir.

Anahtar kelimeler: Laboratuvar, akış, boyuna akış, radyal akış, geçirgenlik, ölçüm

Abstract

Although there are some available theoretical and experimental researches on the topic of the laboratory methods for measuring permeability of rocks, it is very rare to find a good article or book covering these methods. In the first part of this study, fundamental equations governing the flow of fluid through pores and discontinuities are given and the definitions of steady-state and unsteady-state flow are explained. In the second part, the theoretical derivation of several available and new methods for measuring permeability and their fundamental assumptions are described. For each method for measuring permeability, test examples are given and the determination of permeability is explained.

Key words: Laboratory, flow, longitudinal flow, radial flow, permeability, measurement

1. Giriş

Kaya yapılarının kazısı esnasında yeraltısuyu hem bu yapıların duraylılığına hem de yapının inşaatında güçlükler neden olmaktadır. Bunun yanısıra, özellikle nükleer atıkların yeraltı depolarına atılması dolayısıyla bu tür depolardan radyoaktif maddelerin sızıp yeryüzüne ulaşabilmesi yeraltısuyu akışına bağlıdır. Bu nedenle, son yıllarda kayaların akışkan geçirgenliği üzerine yapılan kuramsal ve deneysel çalışmalar oldukça artmaya devam etmektedir.

Literatürde kaya ve zeminlerin geçirgenliği için değişik deney yöntemleri öne sürülmüş olmakla birlikte bu yöntemlerin kuramsal temelleri ile türetilmelerinde yapılan varsayımları kapsayan derli bir yayın bulmak oldukça zordur. Bunun yanısıra, mühendislik alanında ve geçirgenliği ölçülen malzemenin özelliklerine göre farklı geçirgenlik ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır. Özellikle kaya mekaniği alanında geçirgenlik ölçümleri üzerine yazılmış ne bir kitap nede iyi bir tebliğ bulmak mümkün değildir. Bunun yanısıra, geçirgenlik ölçüm yöntemlerinden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan kuramların türetilmesi ve yapılan varsayımlar çok-kez belirtilmemekte ve pratikte karşın güçlüklerden söz edilmemektedir. Bu nedenle, yazarlar bu eksikliği doldurmak amacıyla bu çalışmada kayaların laboratuvarlardaki geçirgenlik özelliğini ölçmek için kullanılan yöntemlerin kuramsal temellerini ve yapılan varsayımları sunmakta ve her bir deney yöntemi için gerçek laboratuvar deneylerinden elde edilen deney sonuçlarına ilişkin örnekleri vermektedir.

2. Temel denklemler¹

Tek faz olarak akışkanın kütle korunum yasası aşağıdaki gibi verilebilir (Eringen, 1980):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + Q \quad (1)$$

burada ρ yoğunluk, $\mathbf{q}$ birim zamandaki akış miktarı, Q birim hacimde birim zamandaki kütle kazanımı veya azalımıdır. 1 numaralı eşitlik akışkan mekaniğinde bilinen süreklilik denkleminin bir başka şeklidir. Laboratuvarlarda kullanılan yöntemlerde ya silindirik numune eksenine paralel ya da ortasına silindirik bir delik açılmış silindirik bir numunede radyal olarak kullanılarak geçirgenlik ölçülmektedir. Bu nedenle, problem matematiksel olarak tek bir bağımsız değişkene bağlı olmaktadır. Numunenin eksenine paralel akış boyuna akış ve eksenel simetrik bir numunede radyal yöndeki akış radyal akış olarak adlandırılacaktır. Dolayısıyla 1 numaralı eşitlikten bir boyutlu boyuna ve radyal akış için aşağıdaki gibi bir ilişki yazılabilir:

Boyuna:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} + Q \quad (2)$$

Radyal:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rq) + Q \quad (3)$$

Bu denklemler kararsız durumun (non-steady state) temel denklemleridir.

Akışkanın yoğunluğu konuma göre değişim göstermiyorsa ve kütlenin kazanımı veya azalımı yoksa yukarıdaki 2 ve 3 numaralı denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir:

¹Denklemlerde beliren parametrelerin açıklaması ve boyutları notasyon kısmında verilmiştir.

Boylam :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \quad (4)$$

Radyal :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{v}) \quad (5)$$

Zemin ve kayalar için Reynolds sayısının artması ile akışkanın hızı ile basınç eğimi arasındaki ilişkinin doğrusallıktan ayrılmakta olduğu bilinmekle birlikte deney sonuçlarının yorumlanmasında Darcy yasası yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir boyutlu durumda boyuna ve radyal akış için Darcy yasası aşağıdaki gibi yazılabilir:

Boyuna :

$$\bar{v} = -\frac{k}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (6)$$

Radyal :

$$\bar{v} = -\frac{k}{\eta} \frac{dp}{dr} \quad (7)$$

burada k geçirgenlik, η akışkanın viskozitesi p 'de basınçtır. 6 ve 7 numaralı ilişkiler 4 ve 5 numaralı eşitlikte kullanıldığında, akışın temel denklemleri

Boyuna :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho k}{\eta} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (8)$$

Radyal:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho k}{\eta} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) \quad (9)$$

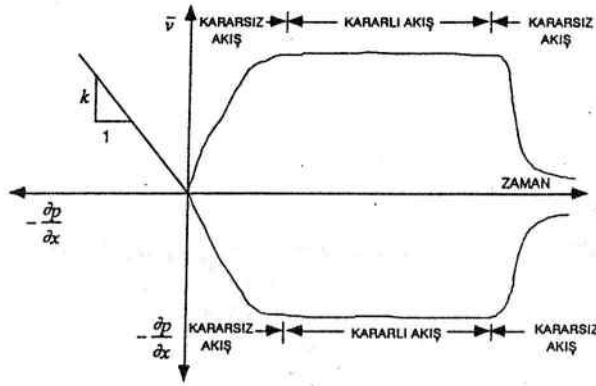
olarak elde edilir.

3. Kararlı ve kararsız akışın tanımları

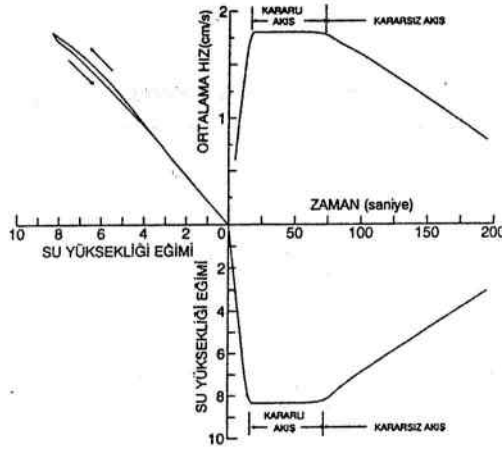
Yoğunluk sadece zamanın fonksiyonu olduğu varsayılırsa 8 ve 9 numaralı denklemler kararsız akışın (non-steady flow) temel denklemleri olacaktır. Eğer akışkan yoğunluğunun zaman bağılı değişimi ihmal ediliyorsa kararlı akış (steady flow) için Laplace denklemleri olarak bilinen temel denklemler elde edilecektir. Bu nedenle kaya numunelerinin geçirgenliğinin ölçümü için iki çeşit laboratuvar deneyi söz konusudur; kararlı ve kararsız akış deneyleri. Birim zamandaki akış miktarı $q(= \rho \bar{v})$, deney süresince geçen zaman (t) ve numune boyu ile basınç eğimi ($\partial p / \partial x$) arasındaki olası ilişkinin modeli Şekil 1'de, laboratuvar da deneysel olarak elde edilmiş benzer ilişkide Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi akışın kararlı olduğu durumda gerek basınç eğimi gerekse de akış hızı zamanla değişmemektedir.

Kararlı akış deneyinde basınç eğimi ve akış hızı zamanla değişmez duruma ulaştığında basınç ve akış hızı değerleri kullanılarak geçirgenlik tespit edilir. Kararlı akış deneyleri genellikle geçirgenliği büyük olan malzemelerde kullanılır.

Kararsız akış deneyinde (transient) ise basınç eğimi ve akış hızı zamanla değişir. Geçirgenlik, zamanla değişen basınç eğimi ve akış hızı değerleri kullanılarak tespit edilir. Kararsız akış deneyi yapılabilmesi açısından hızlı ve geçirgenliği küçük olan malzemelerde



Şekil 1. Ortalama akış hızı ($\bar{v}$), zaman (t) ve basınç eğimi ($-\frac{\partial p}{\partial x}$) arasındaki olası ilişkinin modeli



Şekil 2. Deneyel ortalama akış hızı ($\bar{v}$), zaman (t) ve basınç eğimi ($-\frac{\partial p}{\partial x}$) ilişkisi

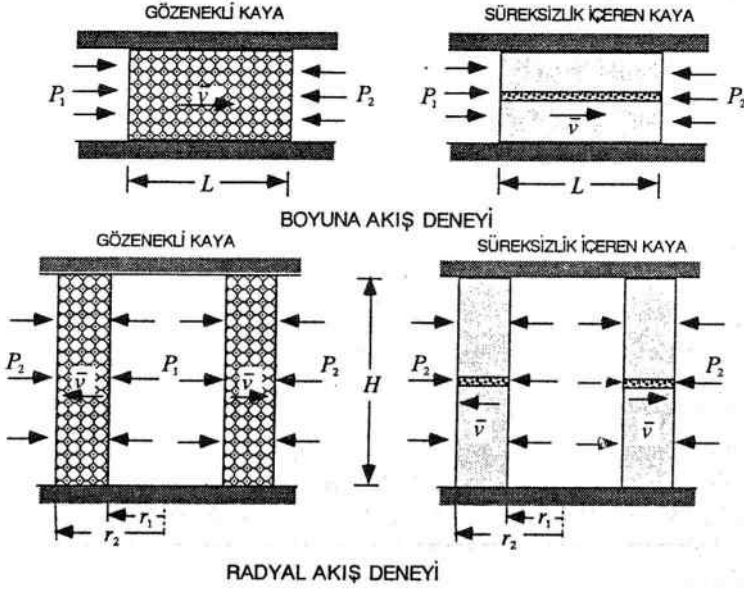
kullanılabilir olması nedeniyle tercih edilmekle birlikte deney esnasındaki basınç değişimi ve birim zamandaki akış miktarının hassas bir şekilde ölçülmesi gereksinimi nedeniyle deneysel olarak bazı zorluklara sahiptir. Şekil 3'de gözenekli veya süreksizlik içeren kayalarda bu tip deneyler için deney düzeni gösterilmiştir.

Deneylerde kullanılan numunelerin geçirgenliği boyuna (uzun eksen) veya silindirik bir numunenin ortasına açılmış bir delik kullanılarak radyal olarak ölçülür. Eğer basınç sıvının ölü ağırlığından kaynaklanıyorsa geçirgenlik katsayısının ölçümü için kullanılan formüllerin yerçekimi etkisinden bağımsız duruma getirebilmek amacıyla numuneler böyle deneylerde yatay olarak hazırlanır.

Kararlı akış durumunda 8 ve 9 numaralı denklemlerden aşağıda verilen sınır koşulları için (Şekil 3)

Boyuna :

$$x = 0 \text{ 'da } p = p_1, \quad x = L \text{ 'de } p = p_2$$



Şekil 3. Akış deneylerinde kullanılan deney düzeninin genel görünümü

Radial :

$$r = r_1 \text{ 'de } p = p_1, \quad r = r_2 \text{ 'de } p = p_2$$

basınç eğimi şu şekilde gibi elde edilir.

Boyuna :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{(p_1 - p_2)}{L} \quad (10)$$

Radial :

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{(p_1 - p_2)}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{r} \quad (11)$$

Eğer sıvının yoğunluğu ile basınç arasındaki ilişki

$$\rho = cp \quad (12)$$

olarak verilirse benzer şekilde aşağıdaki ilişkiler elde edilir.

Boyuna :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{2} \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} \frac{1}{\eta} \quad (13)$$

Radial :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{2r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) \frac{1}{\eta} \quad (14)$$

Kararlı akış için 13 ve 14 numaralı ilişkilerden basınç eğimi aşağıdaki şekilde elde edilir:
Boyuna :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{(p_1^2 - p_2^2)}{2Lp} \quad (15)$$

Radyal :

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{(p_1^2 - p_2^2)}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{2rp} \quad (16)$$

Şu anda kullanılan geçirgenlik ölçüm deneylerinde, numune içerisindeki akışkanın akışı kararlı akış olduğu varsayılarak numune uçlarına uygulanan basınç zamanın fonksiyonu olarak değişebilmektedir. Deneyel çalışmalarda numuneye uygulanan ortalama basınç eğimi sabit kalıyorsa bu tür deneyler kararlı akış deneyi olarak nitelenmekte ve eğer bu basınç eğimi zamanla değişiyorsa kararsız akış deneyi olarak tanımlanmaktadır. Laboratuvar deneylerinin yorumlanmasında kullanılan ortalama basınç eğimi zamanla değişmesi durumunda bile kararlı akış varsayımına göre türetilmiş eşitliklerden (10,11,15 ve 16 numaralı) biri kullanılmaktadır. Yazarlar tarafından bu husus bir başka yayında detaylı olarak incelenecektir (Aydan vd, 1997). Bu tür bir tanımlama akışkan mekaniğindeki tanımlamadan farklı olmakla birlikte aşağıda deneyçilerin tanımlamasına göre kullanılan deney yöntemleri sınıflanıp kuramları verilecektir.

4. Kararlı akış deneyleri

4.1. Basınç farkı ve akış hızı ölçülmesi durumunda

Deneylerde numunenin sınırlarına uygulanan basınçlar ile ortalama akış hızı $\bar{v}$ ölçülür. Akışkan yoğunluğunun basınca bağlı değişimi ihmal edilebilecek düzeyde ise 6 ve 7 numaralı denklemlere 10 ve 11 numaralı eşitlikler konur ve toplam hız v_t ile ortalama hız $\bar{v}$ arasında

$$v_t = \bar{v} A \quad (17)$$

gibi bir ilişki kullanılarak boyuna ve radyal akış deneylerinden geçirgenlik aşağıdaki ilişkilerden saptanır. Burada A numunenin kesit alanıdır.

Boyuna :

$$k = \frac{v_t}{A} \frac{L}{p_1 - p_2} \eta \quad (18)$$

Radyal :

$$k = \frac{v_t}{2\pi r_1 H} \frac{\ln(r_2/r_1) \eta}{p_1 - p_2} \quad (19)$$

Eğer akışkan olarak gaz kullanılıyorsa boyuna akış ile radyal akış için aşağıda verilen formüller kullanılabilir:

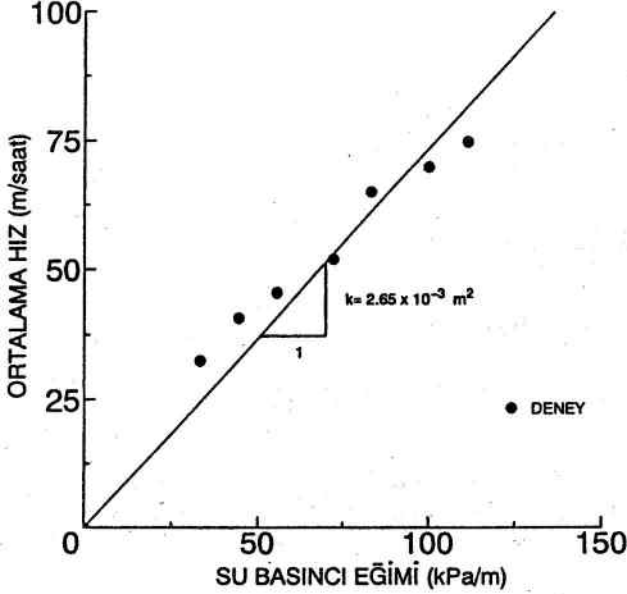
Boyuna :

$$k = \frac{v_t}{A} \frac{2Lp_1 \eta}{p_1^2 - p_2^2} \quad (20)$$

Radyal :

$$k = \frac{v_t \ln(r_2/r_1)}{\pi H \frac{p_1^2 - p_2^2}{p_1}} p_1 \eta \quad (21)$$

Şekil 4 yazarlar tarafından laboratuvarında yapılan deneysel bir neticeyi göstermektedir. Bu deneyde kullanılan malzemenin gözenekliliği yaklaşık olarak %70 ve geçirgenliği $2.65 \times 10^{-3} m^2$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Kararlı akış deneyinde ortalama akış hızı ile su basıncı eğimi arasındaki ilişki

4.2. Basıncı farkı ölçümüne dayanan yöntem

Basıncın zamanla doğrusal olarak değişmesi durumunda akışkanın hızı doğrusal olarak değişecektir. Böyle bir durum için basıncı farkı ölçümüne dayanan deney düzeni kullanılabilir. Bu deneylerde akışkan olarak gaz kullanılır. Gazın yoğunluğu ile basıncı arasında aşağıdaki gibi bir ilişkisinin var olduğu bilinmektedir.

$$\rho = c p \quad (22)$$

Bunun yanısıra, kütsel sıkışma katsayısı ile hacimsel sıkışma katsayısı arasındaki ilişki şu şekilde verilmektedir:

$$c = \rho c^* \quad (23)$$

Hacmi değişmeyen bir haznede sıkıştırılmış gazın birim zamanda kütleğinde olan değişim aşağıdaki gibi verilebilir.

$$q = \rho c^* V \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (24)$$

Kesit alanı A olan bir numuneden birim zamanda geçen kütle miktarı q

$$q = \rho A \bar{v} \quad (25)$$

olarak yazılabilir.

24, 25 numaralı eşitlikler birbirine eşitlenir, 6 ve 7 numaralı ilişkiler kullanılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa boyuna akış deneylerinden geçirgenlik aşağıdaki ilişkiden saptanır.

Boyuna :

$$k = \frac{2\eta V}{A} \frac{L}{p_1^2 - p_2^2} \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (26)$$

Radyal :

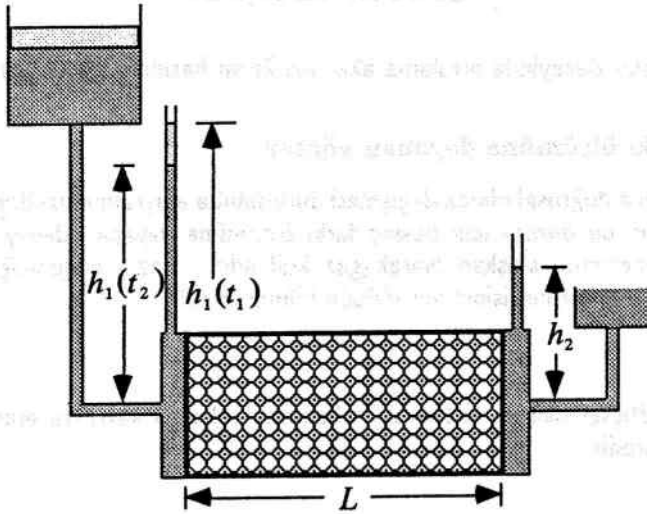
Benzer şekilde radyal akış deneylerinden geçirgenlik aşağıdaki ilişkiden saptanır.

$$k = \frac{\eta V \ln(r_2/r_1)}{\pi L} \frac{\partial p_1}{p_1^2 - p_2^2} \quad (27)$$

5. Kararsız akış deneyleri

5.1. Azalan (düşen) seviye boyuna akış deneyi (sıvının ölü ağırlığına dayanan)

Şekil 5'de gösterildiği gibi deney düzeninde numunenin uçlarına kesit alanı a olan basınç ölçer (manometre) yerleştirildiğini düşünelim. Bu basınç ölçerler aracılığıyla deney



Şekil 5. Azalan (düşen) seviye boyuna akış deney düzeni

süresince basınç değişimleri ve akış hızı ölçülebilir. Burada, numunenin diğer ucundaki basınç ölçerdeki su yüksekliğinin h_2 değişmeyecek şekilde bir düzenin kurulduğu varsayılacaktır. Sıvı akışının başlaması ile numunenin başındaki basınç ölçerdeki h_1 su seviyesindeki toplam hacim değişimi (Erguvanlı ve Yüzer, 1973)

$$v_p = -a \frac{\partial h_1}{\partial t} \quad (28)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada h_1 basınç ölçerdeki sıvının yüksekliğidir. Numunenin kesit alanından (A) birim zamanda geçen sıvının toplam akış miktarı

$$v_t = \bar{v}A \quad (29)$$

olarak yazılabilir. Dolayısıyla numune içinden geçen sıvının toplam akış miktarı ile numunenin başındaki basınç ölçerdeki hacim değişiminin birbirine eşit olması gerektiği düşünülür ve numunedeki basınç eğimi için aşağıda verilen ilişki

$$\frac{\partial p}{\partial x} \approx -\rho g \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (30)$$

6 numaralı ilişki de kullanılır ve elde edilen ilişki 29 numaralı eşitlikte yerine konursa sıvı seviyesinin değişimi için aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilir. Burada ρ yoğunluk, g yerçekimi ivmesidir.

$$\frac{\partial h_1}{h_1 - h_2} = -\frac{kA\rho g}{La\eta} \partial t \quad (31)$$

Burada h_2 numunenin diğer ucundaki basınç ölçerdeki sıvının yüksekliği, L ise numunenin boyudur.

Yukarıda verilen diferansiyel denklemin çözümü aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$h_1 = h_2 + Ce^{-\alpha t} \quad (32)$$

burada

$$\alpha = \frac{kA\rho g}{La\eta}$$

Başlangıç koşulları aşağıdaki şekilde tanımlanırsa:

$$t = 0 \text{ 'da } h_1 = h_{10}$$

burada h_{10} , $t = 0$ anındaki sıvı yüksekliği olup integral sabiti C

$$C = h_{10} - h_2 \quad (33)$$

olarak elde edilir.

Elde edilen integral sabiti 32 numaralı denklemde yerine konursa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$-\alpha t = \ln\left(\frac{\Delta h}{\Delta h_0}\right) \quad (34)$$

burada

$$\Delta h = h_1 - h_2, \quad \Delta h_o = h_{10} - h_2$$

Bu denklemde yukarıda önceden tanımlanan α yerine konur ve gerekli düzenlemeler yapılırsa düşen seviye boyuna deneylerindeki geçirgenlik (k) değeri aşağıda verilen ilişkiden saptanabilir:

$$k = \frac{La \ln\left(\frac{h_{10}-h_2}{h_1-h_2}\right) \eta}{A \frac{t}{\rho g}} \quad (35)$$

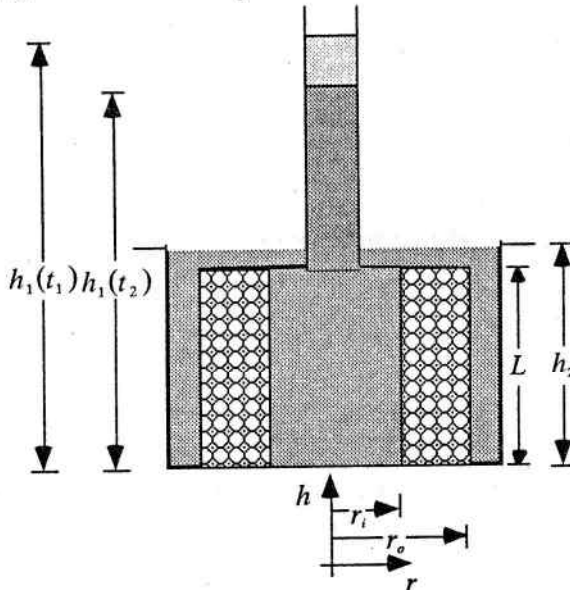
Eğer akışkan olarak su kullanılıyorsa $\rho g/\eta$ 'nin değeri 1×10^6 $1/ms$ 'dir.

5.2. Azalan (düşen) seviye radyal akış deneyi (sıvının ölü ağırlığına dayanan)

Bu tür deneylerde kullanılabilecek deney düzeni Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi numunenin ortasına açılan deliğin üstüne, kesit alanı A_h olan basınç ölçer yerleştirildiğini düşünelim. Deney süresince basınç ölçer aracılığıyla basınç değişimi ve akış hızı ölçülebilir. Numunenin dış yüzeyindeki su yüksekliğinin h_2 değişmediği burada da varsayılacaktır.

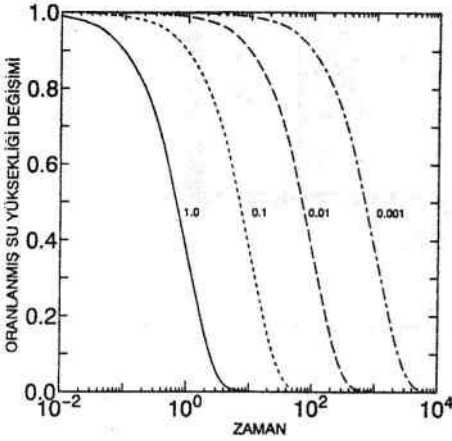
Bu deney düzenin kuramsal modeli ile boyuna deneyin kuramsal modeli benzer olması nedeniyle, kuramsal ilişkilerin elde edilmesi benzer bir şekilde yapılabilir. Sonuç olarak düşen seviye radyal deneylerindeki geçirgenlik (k) değeri aşağıda verilen denklemden saptanabilir:

$$k = \frac{\eta r_i \ln(r_o/r_i) \ln\left(\frac{h_{10}-h_2}{h_1-h_2}\right) A_h}{\rho g \frac{t}{A_p}} \quad (36)$$

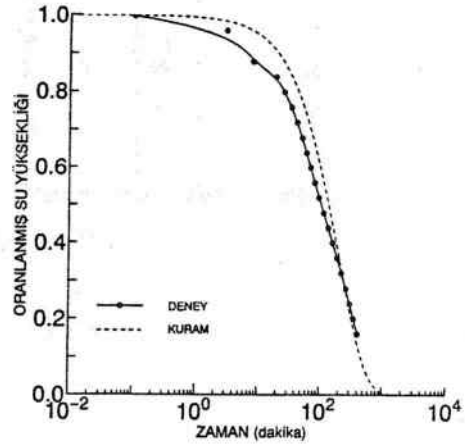


Şekil 6. Azalan (düşen) seviye radyal akış deney düzeni

Şekil 7'de kuramsal olarak bu tür deneylerden elde edilebilecek oranlanmış su yüksekliği değişimi ($\Delta h/\Delta h_o$) ile zaman (t) ilişkisi değişik α değerleri için gösterilmiştir. Şekil 8'de yazarlar tarafından laboratuvarında yapılan boyuna deney sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 7. Oranlanmış su yüksekliği değişimi ($\Delta h/\Delta h_o$) ile zaman (t) arasındaki kuramsal ilişki



Şekil 8. Oranlanmış su yüksekliği değişimi ($\Delta h/\Delta h_o$) ile zaman (t) arasındaki deneysel ve kuramsal ilişki

5.3. Boyuna kararsız akış deneyleri (Brace yöntemi)

Brace vd. (1968) önerdikleri kararsız akış deneyinde aşağıda verilen varsayımları yapmaktadır:

- 1-) akışkanın akışı Darcy yasasına göre,dir,
- 2-) gözeneklerdeki akışkanın zamana bağlı yoğunluk değişimi ihmal edilir,
- 3-) haznelerin hacimleri (V_1, V_2) sabittir,
- 4-) basınç ile hacimsel birim deformasyon arasındaki ilişki doğrusaldır.

Geçirgenlik numune uçlarına uygulanan basıncın zamanla değişimine göre saptanır ve birim zamandaki toplam akış hızı deney sırasında ölçülmez (Şekil 9).

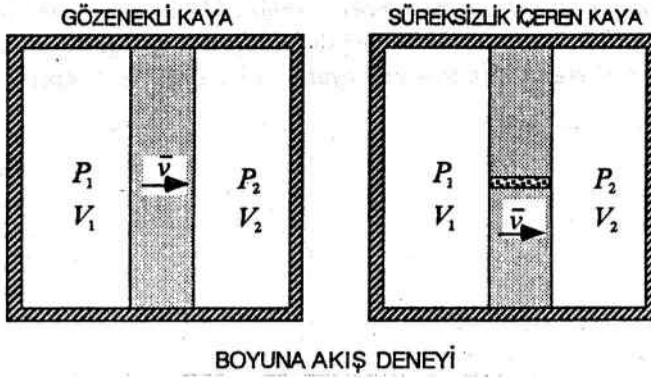
Eğer ortamda akışkan olarak sıvı kullanılırsa V_1 ve V_2 haznelerindeki sıvının hacimsel birim deformasyonu

$$\epsilon_V^1 \approx \frac{\Delta V_1}{V_1}, \quad \epsilon_V^2 \approx \frac{\Delta V_2}{V_2} \quad (37)$$

olarak yazılabilir.

Benzer şekilde hacimsel birim deformasyon hızı için aşağıda verilen ilişkiler yazılabilir:

$$\dot{\epsilon}_V^1 \approx \frac{\dot{\Delta V}_1}{V_1}, \quad \dot{\epsilon}_V^2 \approx \frac{\dot{\Delta V}_2}{V_2} \quad (38)$$



Şekil 9. Kararsız boyuna akış deney düzeni

veya

$$\Delta \dot{V}_1 = \epsilon_V^1 V_1, \quad \Delta \dot{V}_2 = \epsilon_V^2 V_2 \quad (39)$$

Eğer sıvının hacimsel birim deformasyonu ile basınç arasındaki ilişki

$$\epsilon_V^1 = -c_f p_1, \quad \epsilon_V^2 = -c_f p_2 \quad (40)$$

olarak verilir ve sıkışabilirlik katsayısı c_f sabit ise hacimsel birim deformasyon hızı için aşağıdaki ilişkiler yazılabilir:

$$\dot{\epsilon}_V^1 = -c_f \dot{p}_1, \quad \dot{\epsilon}_V^2 = -c_f \dot{p}_2 \quad (41)$$

Birim zamandaki toplam akış hızı

$$v_{t1} = \Delta \dot{V}_1, \quad v_{t2} = \Delta \dot{V}_2 \quad (42)$$

olarak tanımlanır ve 39 ile 41 numaralı eşitlikler kullanılırsa birim zamandaki toplam akış hızları

$$v_{t1} = -c_f V_1 \frac{\partial p_1}{\partial t}, \quad v_{t2} = -c_f V_2 \frac{\partial p_2}{\partial t} \quad (43)$$

olarak elde edilir.

Aşağıda verilen sınır koşulları ile

$$x = 0 \text{ 'da } p = p_1, \quad x = L \text{ 'de } p = p_2$$

6 numaralı ilişki kullanıldığında birim zamandaki toplam akış hızı için aşağıdaki ilişkiler yazılabilir:

$$v_{t1} = -\frac{kA}{\eta} \left(\frac{dp_1}{dx} \right)_{x=0}, \quad v_{t2} = -\frac{kA}{\eta} \left(\frac{dp_2}{dx} \right)_{x=L} \quad (44)$$

burada A numunenin kesit alanı ve L ise numunenin boyudur. Yukarıda verilen ilişkilerdeki basınç eğimleri eşitlik 10^4 'dan

$$\frac{dp_1}{dx} \approx -\frac{(p_1 - p_2)}{L}, \quad \frac{dp_2}{dx} \approx \frac{(p_1 - p_2)}{L} \quad (45)$$

olarak verilebilir. Bunlar 44 numaralı denklemde kullanılır ve 43 numaralı denkleme eşitlenirse aşağıdaki denklem takımı elde edilir:

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = -\beta \frac{1}{V_1} (p_1 - p_2) \quad (46)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial t} = \beta \frac{1}{V_2} (p_1 - p_2) \quad (47)$$

burada

$$\beta = \frac{kA}{c_f L \eta}$$

Brace vd. 46 ve 47 numaralı denklem takımını Laplace dönüşüm transformasyon yöntemi kullanarak çözmüştür. Bu çalışmada eleme çözüm yöntemi (solution by elimination, Kreyszig, 1983) kullanılarak bu denklem takımı çözülecektir. Dolayısıyla, 46 numaralı denklem yeniden

$$p_2 = p_1 + \frac{V_1}{\beta} \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (48)$$

olarak düzenlenebilir. Yukarıda verilen denklemin zamana göre türevi alınır

$$\frac{\partial p_2}{\partial t} = \frac{\partial p_1}{\partial t} + \frac{V_1}{\beta} \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} \quad (49)$$

48 ile 49 numaralı denklemler 47 numaralı denklemde yerine konur ve yeniden düzenlenirse aşağıda verilen homojen diferansiyel denklem elde edilir:

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial p_1}{\partial t} = 0 \quad (50)$$

burada

$$\alpha = \beta \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2}$$

Bu diferansiyel denklemin genel çözümü

$$p_1 = C_1 + C_2 e^{-\alpha t} \quad (51)$$

olarak elde edilebilir.

Aşağıdaki başlangıç koşulları için

$$t = 0 \text{ 'da } p_1 = p_i, \quad t = \infty \text{ 'da } p_1 = p_f$$

burada p_i 1 numaralı haznedeki ilk basınç, p_f ise deney sonundaki basınç olup integral sabitleri

$$C_1 = p_f, \quad C_2 = p_i - p_f \quad (52)$$

olarak elde edilebilir.

Elde edilen integral sabitleri 51 numaralı denklemde yerine konursa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$p_1 = p_f + (p_i - p_f)e^{-\alpha t} \quad (53)$$

Bu denklemin zamana göre türevi

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = -(p_i - p_f)\beta \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} e^{-\alpha t} \quad (54)$$

olarak yazılabilir.

Eğer 53 ve 54 numaralı denklemler 46 numaralı denklemde yerine konur ve tekrardan düzenlenirse aşağıdaki verilen denklem elde edilir:

$$p_2 = p_f - (p_i - p_f) \frac{V_1}{V_2} e^{-\alpha t} \quad (55)$$

p_2 için başlangıç koşulu

$$t = 0 \text{ 'da } p_2 = p_0$$

olarak verilirse 55 numaralı denklem aşağıdaki şekli alır:

$$(p_i - p_f) = (p_f - p_0) \frac{V_2}{V_1} \quad (56)$$

Yukarıda verilen denklem benzer şekilde $p_i - p_0$ cinsinden yeniden

$$(p_i - p_f) = (p_i - p_0) \frac{V_2}{V_1 + V_2} \quad (57)$$

olarak yazılabilir.

Elde edilen bu denklem 55 numaralı denklemde yerine konur ve gerekli düzenlemeler yapılırsa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$-\alpha t = \ln\left(\frac{p_1 - p_f}{p_i - p_0} \frac{V_1 + V_2}{V_2}\right) \quad (58)$$

burada

$$\alpha = \frac{kA}{c_f L} \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \frac{1}{\eta}$$

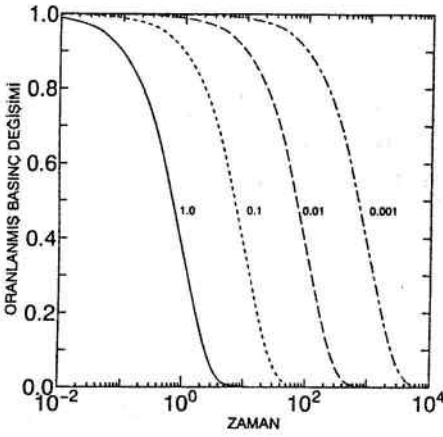
Dolayısıyla, geçirgenlik k aşağıdaki ilişkiden elde edilebilir.

$$k = \frac{\eta c_f L}{A} \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \ln\left(\frac{\Delta p_o}{\Delta p} \frac{V_2}{V_1 + V_2}\right) \frac{1}{t} \quad (59)$$

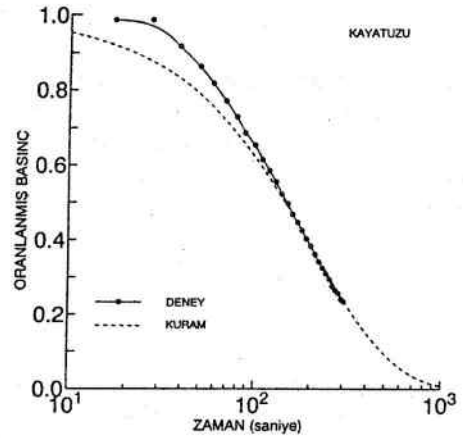
burada $\Delta p = p_1 - p_f$, $\Delta p_o = p_i - p_o$ 'dır. Akışkan olarak gaz kullanılması durumunda p_1 yerine $U_1 (= p_1^2)$ ve p_2 yerine $U_2 (= p_2^2)$ konarak yukarıdaki ilişkiler aynen kullanılarak geçirgenlik saptanabilir. Eğer hazne 2'nin hacmi V_2 hazne 1'inkinden çok büyükse ($V_2 \gg V_1$) (örneğin numunenin bir ucu havaya açıksa) yukarıdaki denklemlerde p_o ve p_f hava basıncına (p_a) eşit olacaktır. Bu özel durum için numunenin geçirgenliği aşağıdaki ilişkiden elde edilebilir.

$$k = \frac{\eta c_f L V_1}{A} \ln\left(\frac{p_i - p_a}{p_1 - p_a}\right) \frac{1}{t} \quad (60)$$

Şekil 10'da kuramsal olarak elde edilebilecek oranlanmış basınç değişimi ($\Delta p/\Delta p_o$) ile zaman (t) ilişkisi değişik α değerleri için gösterilmiştir.



Şekil 10. Oranlanmış basınç değişimi ($\Delta p/\Delta p_o$) ile zaman (t) arasındaki kuramsal ilişki



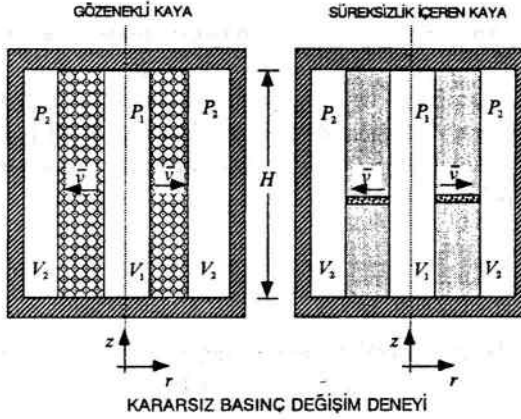
Şekil 11. Kaya tuzu numunesi için oranlanmış basınç değişimi ($\Delta p/\Delta p_o$) ile zaman (t) arasındaki deneysel ve kuramsal ilişki

Laboratuvarında kaya tuzu numunesinde yapılan deneyde elde edilen oranlanmış basıncın ($\Delta p/\Delta p_o$) zamanla değişimi (t) Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü gibi deney esnasında kayıtlı edilen basınç farkı ile zaman arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Deneysel sonuçlar, kuramsal olarak elde edilen sonuçlardan biraz farklılık göstermektedir. Geçirgenliğin elde edilmesi için genellikle ilişkinin doğrusal olduğu kısım kullanılarak 59 numaralı eşitlik elde edilmektedir. Böylece yukarıda verilen ilişkiler kullanılarak geçirgenlik saptanabilir.

5.4. Radyal kararsız akış deneyleri

Radyal deneyler (Şekil 12) için bir önceki bölüme benzer şekilde kuramsal olarak problem modellenebilir. Sonuç olarak, bu tür deneylerden geçirgenlik k aşağıdaki ilişkiden elde edilir.

$$k = \eta c_f \frac{\ln(r_2/r_1) V_1 V_2 r_2 r_1}{V_2 r_2 A_{p1} + V_1 r_1 A_{p2}} \ln\left(\frac{\Delta p_o}{\Delta p} \frac{V_2 r_2 A_{p1}}{V_2 r_2 A_{p1} + V_1 r_1 A_{p2}}\right) \frac{1}{t} \quad (61)$$

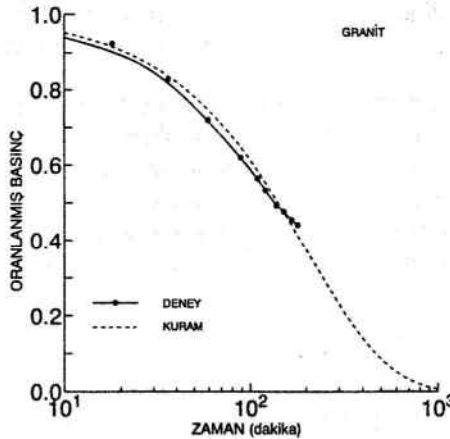


Şekil 12. Kararsız radyal akış deney düzeni

Akışkan olarak gaz kullanılması durumunda p_1 yerine $U_1 (= p_1^2)$ ve p_2 yerine $U_2 (= p_2^2)$ konarak yukarıdaki ilişkiler aynen kullanılarak geçirgenlik saptanabilir. Eğer hazne 2'nin hacmi V_2 hazne 1'inkinden çok büyükse ($V_2 \gg V_1$) (örneğin numunenin dış yüzü havaya açıksa) yukarıdaki denklemlerde p_o ve p_f hava basıncına (p_a) eşit olacaktır. Bu özel durum için numunenin geçirgenliği aşağıdaki ilişkiden saptanır.

$$k = \frac{\eta c_f \ln(r_2/r_1) V_1 r_1}{A_{p1}} \ln\left(\frac{p_i - p_a}{p_1 - p_a}\right) \frac{1}{t} \quad (62)$$

Şekil 13'de laboratuvarıda granit numunesinde yapılan deneyde elde edilen oranlanmış basınç $(\Delta p/\Delta p_o)$ ile zaman ilişkisi (t) gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi basınç ile zaman arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Deneyssel olarak elde edilen sonuçlar kuramsal sonuçlardan bir miktar farklıdır. Geçirgenlik değeri, genellikle zamanla değişen basınç eğiminin doğrusal olduğu kısım kullanılarak saptanmaktadır.



Şekil 13. Granit numunesi için oranlanmış basınç değişimi $(\Delta p/\Delta p_o)$ ile zaman (t) arasındaki deneyssel ve kuramsal ilişki

6. Sonuçlar

Bu çalışmanın ilk kısmında kayada akan akışkanın temel denklemleri verilmiş ve akışkan mekaniğinde kullanılan kararlı ve kararsız akış kavramları ile deneyciler tarafından kullanılaninkinden farklı olduğuna işaret edilmiştir. Deneycilerin sınıflamasına göre mevcut deney yöntemleri ile bazı yeni deney yöntemlerinin kuramsal temelleri ve deney sonuçlarından geçirgenliğin elde edilmesi gösterilmiştir. Mümkün olduğu kadar her bir deney yöntemi için deney sonuçları verilmiş ve deney sonuçların yorumlanmasında kullanılan kuramsal ilişkilerle bazı farklılıkların olduğu işaret edilmiştir.

Kaynaklar

- Aydan, ., H. pırtı and Y. Shimizu. 1997. Finite element analysis of transient pulse tests for un-steady state flow condition. *IACMAC, Wuhan*, (to be appeared).
- Brace, W. F., J. B. Walsh and W. T. Frangos. 1968. permeability of granite under high pressure. *Journal of Geophysical Research*, 73, No.6, 2225-2236.
- Erguvanlı, K. ve E. Yzer. 1973. Yeraltısuları Jeolojisi (Hidrojeoloji). İ.T. Ktphanesi, Sayı 967.
- Eringen, A. C. 1980. *Mechanics of Continua*. R.E. Krieger publishing, New York.
- Kreyszig, E. 1983. *Advanced Engineering Mathematics*, J. Wiley & Sons, New York.

NOTASYON

x	: uzaklık (L)
r	: radyal uzaklık (L)
L	: boyuna numunenin boyu (L)
H	: radyal numunenin boyu (L)
r_1, r_i	: radyal numunenin ortasına açılan deliğin yarıçapı (L)
r_2, r_o	: radyal numunenin dış yarıçapı (L)
h_1	: numune ucundaki kılcal borudaki su yüksekliği (L)
h_2	: numune sonundaki kılcal borudaki veya su tankındaki su yüksekliği (L)
h_{10}	: $t=0$ anında boyuna numune ucundaki kılcal borudaki su yüksekliği (L)
g	: yerçekimi ivmesi (LT^{-2})
$\bar{v}$	: ortalama akış hızı (LT^{-1})
k	: geçirgenlik (L^2)
A	: boyuna numunenin kesit alanı (L^2)
a	: kılcal borunun kesit alanı (L^2)
A_h	: radyal numunenin ortasına açılan deliğin üstündeki kılcal borunun kesit alanı (L^2)
A_p, A_{p1}	: radyal numunenin ortasına açılan veya basınç verilen deliğin yüzeyin alanı (L^2)
A_{p2}	: basıncın çıktığı yüzeyin alanı (L^2)
c	: kütleli sıkışabilirlik katsayısı ($L^{-2}T^2$)
V, V_1, V_2	: hazne hacmi (L^3)
v_t	: toplam akış hızı (L^3T^{-1})
v_{t1}, v_{t2}	: V_1 ve V_2 haznelerindeki toplam akış hızı (L^3T^{-1})
η	: akışkanın vizkozitesi ($ML^{-1}T^{-1}$)
p_i	: deney başlanğıcındaki basınç ($ML^{-1}T^{-2}$)
p_f	: deney sonundaki basınç ($ML^{-1}T^{-2}$)
p_a	: atmosfer basıncı ($ML^{-1}T^{-2}$)
p	: basınç ($ML^{-1}T^{-2}$)
p_1	: numune ucundaki ($x = 0$) veya iç çeperdeki ($r = r_1$) basınç ($ML^{-1}T^{-2}$)
p_2	: numune sonundaki ($x = L$) veya dış çeperdeki ($r = r_2$) basınç ($ML^{-1}T^{-2}$)
q	: birim zamandaki kütle akış miktarı ($ML^{-2}T^{-1}$)
ρ	: yoğunluk (ML^{-3})
Q	: birim zamandaki kütle kazanımı veya azalımı ($ML^{-3}T^{-1}$)
c_f	: sıvının sıkışabilirliği ($M^{-1}LT$)
c^*	: hacimsel sıkışabilirlik katsayısı ($M^{-1}LT^2$)
t	: zaman (T)
α	: katsayı (T^{-1})
β	: katsayı ($T^{-1}L^{-3}$)

KAYALARIN GÖZENEK VE AKIŞKAN GEÇİRGENLİĞİNİN BASINCA BAĞIMLILIĞI

Pressure Dependency of Porosity and Permeability of Rocks

Ömer AYDAN

Tokai University, Marine Civil Engineering Department

Orido 3-20-1, Shimizu, 424, Japonya

ÖZET

Kayaların akışkan geçirgenliğinin basınca bağlı olarak değişimi, kaya yapılarının duraylılığı, yapıya gelen yeraltı suyunun atımı, nükleer artıkların yeraltında depolanması ve petrol mühendisliği alanında kuyu veriminde oldukça önemli bir konudur. Bu konu ile ilgili olarak kaya mekaniği alanında son yıllarda deneysel olarak çalışmalar yapılmakla birlikte, kuramsal olarak bu konuyu incelemiş bir yayın bulmak oldukça zordur. Bu çalışmanın ilk kısmında kayaların akışkan geçirgenliği ile gözeneklerinin basınca bağlı olarak değişimi kuramsal olarak açıklayan bir model sunulmaktadır. Daha sonra bu kuramsal çalışmanın ışığı altında gözenekli veya süreksizlik içeren kayalar için akışkan geçirgenliğinin basınca bağlı olarak değişimi için yeni bir görgül ilişki önerilmekte ve deneysel sonuçlara olan uygulamaları verilmektedir.

Anahtar kelimeler: geçirgenlik, gözeneklilik, süreksizlik, kuram, görgül ilişki, basınç bağımlılığı

ABSTRACT

The pressure dependency of permeability and porosity of rocks is quite important in relation to the stability of rock engineering structures, underground water drainage, nuclear waste disposal in underground cavities and well efficiency in petroleum engineering. Numerous experimental studies have been undertaken on the pressure dependency of permeability of rocks and discontinuities in recent years. However, it is

very difficult to find any theoretical approach to explain why the pressure dependency of permeability and porosity can occur. In the first part of this study, the author presents a theoretical model for the pressure dependency of permeability for porous rock and the results of several parametric studies. In the second part of the article, an empirical approach is proposed to model the pressure dependency of permeability and porosity of porous rocks and discontinuous rock masses and it is applied to experimental results.

Keywords: permeability, porosity, discontinuity, theory, empirical relation, pressure dependency

1. GİRİŞ

Kaya yapılarının kazısı esnasında yapıya gelen yeraltı suyu yapının duraylılığının yanısıra kazı koşullarının güçleşmesine neden olmaktadır (Aydan ve Ersen 1983). Son yıllarda enerji üretimi nükleer santrallara dayanan ülkelerde nükleer atıkların canlılardan uzak yeraltı açıklıklarında depolanması üzerine çalışmalar oldukça yoğunlaşmaktadır. Bu atıkların yeryüzüne ulaşabilmesi kaya kütlelerinin geçirgenliğine sıkı sıkıya bağlıdır. Ayrıca petrol mühendisliğinde kuyuların verimi yine kayaların geçirgenlik özelliklerinden etkilenmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar kayaların geçirgenliğinin kayaya etkiyen basınçtan etkilendiğini ve geçirgenliğin basıncın artması ile azaldığını göstermektedir (Brace vd., 1968, Gale 1990, Tsang ve Witherspoon 1981).

Literatürde deneysel olarak gözlenen bu olguyu mekanik açıdan inceleyen bir yayın bulmak oldukça zordur. Önerilen kuramsal modeller mikro-mekanik (micro-mechanics), karışım kuramı (mixture theory) ve görgül (empirical) yaklaşımlar olmak üzere üç kümeye ayrılabilir. Mikro-mekanik yaklaşıma dayanan kuramsal modeller genellikle Hertz'in öne sürdüğü ve Mindlin'in geliştirdiği elastik küresel taneciklerden oluşan ortamlar için önerilmiştir (Mindlin 1949, Fatt 1958, Ko ve Scott 1967, Gangi 1978). Fatt (1958) ile Ko ve Scott (1978) değişik tane dizilimleri için ortamların basınç altında hacimsel değişimlerini Mindlin'in kuramsal modelini kullanarak incelemiş ve geçerliliğini deneysel olarak sınamışlardır. Deneysel sonuçlar kuramsal sonuçlarla karşılaştırıldığında birbirlerine benzer olmakla birlikte kesin bir çakışma elde edilememiştir. Bunun

nedenlerinden birisi küresel tanecikleri oluşturan malzemenin mekanik davranışı belirli bir gerilme seviyesinden sonra elastik davranışını yitirmesidir. Gangi (1978) Mindlin'in yaklaşımını kayaların ve süreksizliklerin gözenek ve geçirgenliğinin basınçla değişimi olgusuna uygulamıştır. Bu tür bir yaklaşım tortul kayalar için geçerli olmakla birlikte her kaya türü için geçerliliği tartışmalıdır.

İkinci tür yaklaşımlar ise karışım kuramına dayanmaktadır (Terzaghi 1925, Biot 1941, Geertsma 1957, Zimmerman vd. 1986, Palciauskas ve Domenico 1989). Bu tür yaklaşımlarda zemin veya kayanın gözeneklerinin gerçek büyüklüğü, geometrisi ve dizilimi göz önüne alınmamakta ve bütün kuramsal ilişkilerde boyutsuz bir birim olan gözenek oranı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım daha pratik bir yaklaşım olarak görünmesine karşın deneysel sonuçların fiziksel olarak yorumlanması oldukça zor olup yaklaşık bir asırlık tartışmanın ana nedenini oluşturmaktadır (Kümpel 1991, de Boer ve Ehlers 1990).

Üçüncü yaklaşım ise görgül (empirical) olup deneysel sonuçlara dayanmaktadır (Athy 1930, Hall 1953, Gale 1990). Gözenek oranının basınçla değişimi ile ilgili olarak Athy (1930) tarafından gözenek oranının derinlikle değişimi için eksponansiyel bir fonksiyon önerilmiş ve geçerliliği değişik derinliklerden elde edilmiş kaya numuneleri kullanılarak deneysel olarak sınanmıştır. Athy'nin önerdiği bu ilişki basınç ile gözenek oranının değişimi arasında doğrudan bir ilişkiyi yansıtmamakta, başka bir deyişle, çeşitli derinliklerden alınan tortul kaya numunelerinde ölçülen kalıcı (plastik) deformasyon sonrası gözenek oranını ile derinlik ilişkisine karşılık gelmektedir. Önerilen diğer ilişkiler logaritmik veya üstsel fonksiyonlar olarak sınıflandırılmıştır (Walsh 1985, Barton vd. 1981).

Bu çalışmanın en önemli amacı kayaların gözenek ve akışkan geçirgenliğinin basınca bağımlılığını açıklayan ve mikro-mekanik yaklaşıma dayanan bir yeni model önermektir. Ayrıca kayaların gözenek ve süreksizlik geometrileri oldukça karmaşıktır. Bu nedenle, olguyu kolaylaştırmak açısından pratik bir çözüm getirmesi nedeniyle görgül ilişkilerin

kullanıldığı yaklaşımlarda dikkat edilmesi gereken önemli hususlar bulunmaktadır. Bu hususların ortaya konup tartışılması, bu çalışmanın bir diğer amacını oluşturmaktadır.

2. KURAMSAL MODEL

Karmaşık şekilli gözenekler içeren kayaların mikroskopik ve makroskopik birim deformasyon-gerilme ilişkilerinin kuramsal olarak elde edilmesi oldukça zordur. Burada kuramsal ilişkinin elde edilebileceği basit bir şekil olarak boru şeklinde bir gözenek göz önüne alınacaktır. Şekil 1'de gösterildiği gibi kaya kütlesi bu tür gözenekleri içeren homojen bir yapıya sahip olduğu varsayılacaktır. Dolayısıyla birim yapı, iç ve dış basınçların etkidiği silindirik bir yapı olarak modellenenecektir. Çözümlerin elde edilmesi için belli başlı varsayımlar şu şekildedir:

- 1) Problem eksenel simetrik olup kuvvet denge denklemi aşağıdaki gibi verilir

(Eringen 1980, Aydan vd. 1993):

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

Burada

r : gözenek merkezinden olan uzaklık

σ_r : radyal gerilme

σ_θ : teğetsel gerilme

- 2) Gerilme ve birim deformasyonlar arasındaki ilişki elastik davranış gösterir ve aşağıdaki gibi verilir (Eringen 1980, Aydan vd. 1993):

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

Burada

ϵ_r : radyal birim deformasyon

ϵ_θ : teğetsel birim deformasyon

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

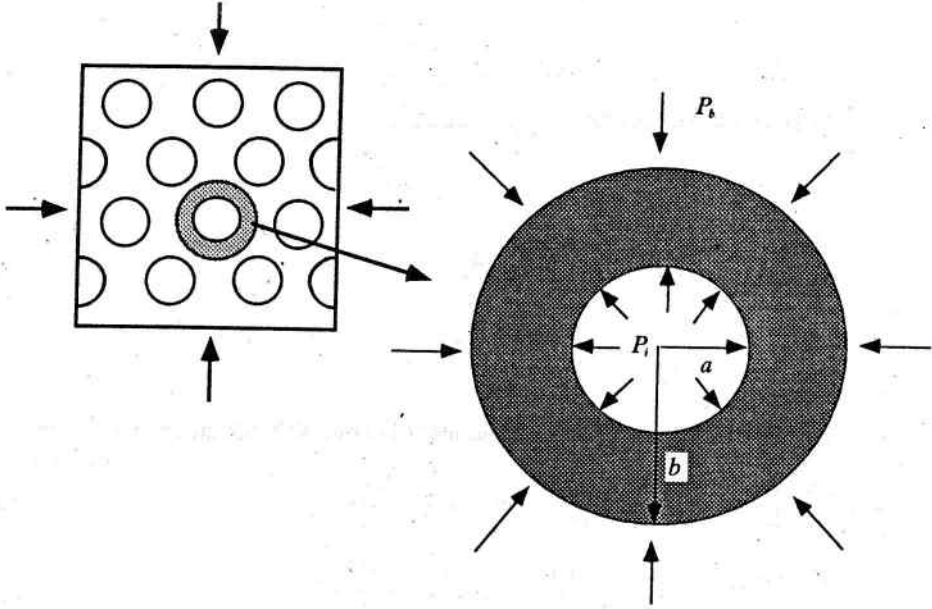
E : kayanın elastik modülü

ν : kayanın Poisson oranı

- 3) Birim deformasyonlar ile radyal deformasyon arasındaki ilişkiler aşağıdaki gibi verilir (Eringen 1980, Aydan vd. 1993):

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr}, \epsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (3)$$

Burada u radyal deformasyondur.



Şekil 1 Gözenekli kaya için idealleştirilmiş birim yapı

Gerilmeler ve birim deformasyonlar, (1) nolu denge denklemi, (2) nolu gerilme birim deformasyon ilişkisi ve (3) nolu sınır koşulları yardımıyla çözülebilir. (2) nolu gerilme birim deformasyon ilişkisi ile (3) nolu bağıntı (1) denge denkleminde kullanılırsa aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilir:

$$r^2 \frac{d^2 u}{dr^2} + r \frac{du}{dr} - u = 0 \quad (4)$$

Bu diferansiyel denklemin çözümü aşağıdaki şekli alır:

$$u = A_1 r + A_2 \frac{1}{r} \quad (5)$$

Aşağıdaki sınır koşulları için

$$r = a \text{ da } \sigma_r = p_i$$

$$r = b \text{ de } \sigma_r = p_b$$

integrasyon sabitleri A_1 ve A_2

$$A_1 = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E} \frac{p_b b^2 - p_i a^2}{b^2 - a^2}, \quad A_2 = \frac{(1+\nu)}{E} \frac{b^2 a^2}{b^2 - a^2} (p_b - p_i)$$

olarak elde edilir. Yukarıdaki verilen sabitler (5) nolu ilişkide yerine konursa radyal deformasyon ve gerilmeler aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$u = \frac{1+\nu}{E} \left[(1-2\nu) \frac{p_b b^2 - p_i a^2}{b^2 - a^2} r + (p_b - p_i) \frac{b^2}{b^2 - a^2} \frac{a^2}{r} \right] \quad (6)$$

$$\sigma_r = \frac{p_b b^2 - p_i a^2}{b^2 - a^2} - (p_b - p_i) \frac{b^2}{b^2 - a^2} \frac{a^2}{r^2} \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_b b^2 - p_i a^2}{b^2 - a^2} + (p_b - p_i) \frac{b^2}{b^2 - a^2} \frac{a^2}{r^2} \quad (8)$$

Yarıçap a ve b 'de teğetsel birim deformasyonlar (6) nolu ilişkiden şu şekilde verilebilir:

$$\frac{u_a}{a} = \frac{1+\nu}{E} \left[(1-2\nu) \frac{p_b b^2 - p_i a^2}{b^2 - a^2} + (p_b - p_i) \frac{b^2}{b^2 - a^2} \right] \quad (9)$$

$$\frac{u_b}{b} = \frac{1+\nu}{E} \left[(1-2\nu) \frac{p_b b^2 - p_i a^2}{b^2 - a^2} + (p_b - p_i) \frac{a^2}{b^2 - a^2} \right] \quad (10)$$

Birim yapının deformasyon sonrası iç ve dış yarıçapları ise aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$a_c = a - u_a \text{ veya } a_c = a \left(1 - \frac{u_a}{a} \right) \quad (11)$$

$$b_c = b - u_b \text{ veya } b_c = b \left(1 - \frac{u_b}{b} \right) \quad (12)$$

Birim yapının deformasyon öncesi gözenek oranı n_o

$$n_o = \frac{a^2}{b^2} \quad (13)$$

olarak tanımlanabilir. (11), (12) ve (13) nolu ilişkiler (9) ve (10) nolu bağıntılarda kullanıldığında birim deformasyonlar aşağıdaki şekli alır:

$$\frac{u_o}{a} = \frac{1}{1-n_o} \frac{1+\nu}{E} [(1-2\nu)(p_b - p_i n_o) + (p_b - p_i)] \quad (14)$$

$$\frac{u_b}{b} = \frac{1}{1-n_o} \frac{1+\nu}{E} [(1-2\nu)(p_b - p_i n_o) + (p_b - p_i) n_o] \quad (15)$$

İç ve dış basıncın etkilediği bir gerilme koşulu altında boru gibi bir gözenegın geçirgenliğı

$$k_o = \frac{1+\alpha}{8} a^2 \quad (16)$$

olarak elde edilebilir (Aydan vd., 1997). (16) nolu ilişkide verilen geçirgenliğın birimi alanın ki ile aynı olup vizkozite katsayısını içermediğı için akışkanın cinsinden bağımsız olduğuna dikkat edilmelidir. Dolayısıyla deformasyon öncesi geçirgenlik ile oranlanmış deformasyon sonrası geçirgenlik aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\frac{k}{k_o} = \frac{a_c^2}{a^2} \quad (17)$$

(11) nolu ilişkide verilen bağıntı yukarıdaki bağıntıda kullanıldığında aşağıdaki ilişki elde edilebilir

$$\frac{k}{k_o} = (1 - \frac{u_o}{a})^2 \quad (18)$$

Birim yapının deformasyon sonrası gözenek oranı n

$$n = \frac{a_c^2}{b_c^2} \quad (19)$$

olarak yazılabilir. (11) - (15) nolu ilişkiler (19) nolu ilişkide yerine konursa, deformasyon öncesi gözeneklilik ile oranlanmış deformasyon sonrası gözeneklilik aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\frac{n}{n_o} = \frac{(1 - \frac{u_o}{a})^2}{(1 - \frac{u_b}{b})^2} \quad (20)$$

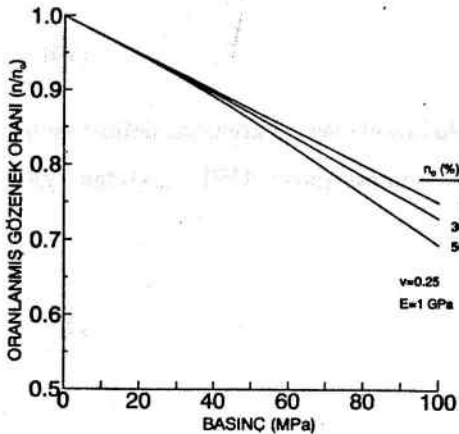
3. PARAMETRİK ÇALIŞMA

Burada bir önceki bölümde verilen kuramsal ilişkileri kullanarak gözenek ve akışkan geçirgenliğinin basınca bağımlılığını gösteren birkaç parametrik çalışmanın sonuçları sunulacaktır. İlk örnekler gözeneklerle ilgili olup aşağıda verilen durumlar incelenmiştir:

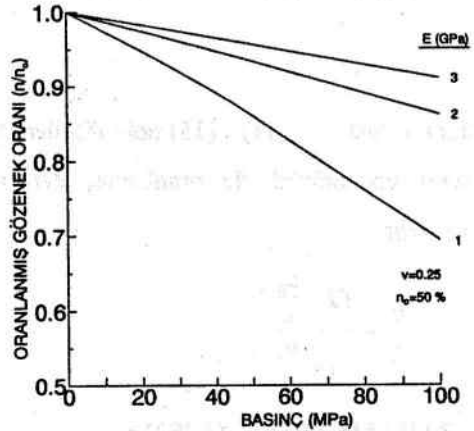
- *Durum 1:* İlk gözenek oranı değişken ve kayanın elastik modülü ve Poisson oranı sabit,
- *Durum 2:* İlk gözenek oranı ile Poisson oranı sabit ve kayanın elastik modülü değişken.

Durum 1 için kayanın elastik modülü 1 GPa, Poisson oranını 0.25 ve ilk gözenek oranını %1, %30 ve %50 olarak elde edilen oranlanmış gözenekğin basınçla değişim ilişkileri Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere gözenek oranı basınç arttıkça azalmaktadır. İlk gözenek oranının farklı olmasına karşın basıncın artması ile gözenek oranının azalımı eğrileri birbirlerine çok benzerlik göstermesi kayanın gözeneklerinde oluşabilecek sıvı basıncının gözenek oranına pek bağlı olmayacağını göstermektedir.

Durum 2 için ilk gözenek oranını %50, Poisson oranını 0.25 ve kayanın elastik modülü 1,2 ve 3 GPa olarak elde edilen oranlanmış gözenekğin basınçla değişim ilişkileri Şekil 3’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere gözenek oranı basınç arttıkça azalmaktadır. Özellikle gözenek oranının basınçla değişimi kayanın elastik modülü azaldıkça daha açık bir şekilde görülmektedir. Başka bir deyişle zayıf kayalarda basınca bağlı olarak gözenek oranında değişiminin büyük olacağına işaret etmektedir.



Şekil 2: Oranlanmış gözenekğin basınçla değişimi (ilk gözenek oranı değişken)

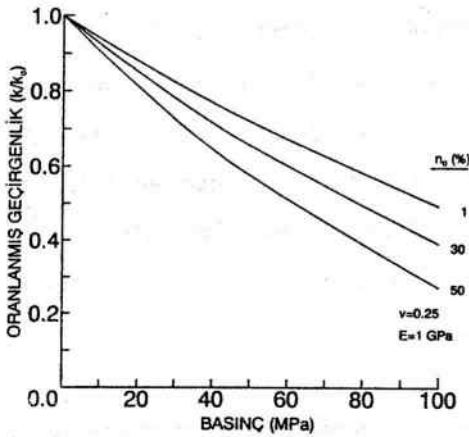


Şekil 3: Oranlanmış gözenekğin basınçla değişimi (elastik modül değişken)

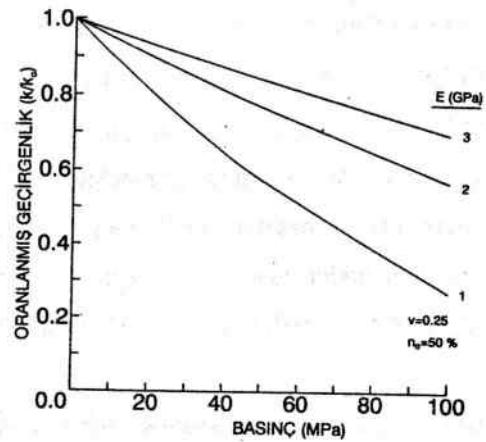
Akışkan geçirgenliğinin basınçla değişimini incelemek üzere gözenek oranı ile ilgili örneklerde olduğu gibi aşağıda verilen durumlar incelenmiştir:

- *Durum 1:* İlk gözenek oranı değişken ve kayanın elastik modülü ve Poisson oranı sabit,
- *Durum 2:* İlk gözenek oranı ile Poisson oranı sabit ve kayanın elastik modülü değişken.

Durum 1 için kayanın elastik modülü 1 GPa, Poisson oranını 0.25 ve ilk gözenek oranını %1, %30 ve %50 olarak elde edilen oranlanmış akışkan geçirgenliğinin basınçla değişim ilişkileri Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere oranlanmış akışkan geçirgenliği basınç arttıkça azalmaktadır. Bu azalma ilk gözenek oranı büyüdükçe daha fazla olmaktadır. Başka bir deyişle gözenek oranı yüksek kayalarda kayanın akışkan geçirgenliği değişiminin büyük olacağını göstermektedir.



Şekil 4: Oranlanmış akışkan geçirgenliğinin basınçla değişimi (ilk gözenek değişken)



Şekil 5: Oranlanmış akışkan geçirgenliğinin basınçla değişimi (elastik modül değişken)

Durum 2 için ilk gözenek oranını %50, Poisson oranını 0.25 ve kayanın elastik modülü 1,2 ve 3 GPa olarak elde edilen oranlanmış akışkan geçirgenliğinin basınçla değişim ilişkileri Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere akışkan geçirgenliği basınç arttıkça azalmaktadır. Özellikle akışkan geçirgenliğinin basınçla değişimi kayanın elastik modülü azaldıkça daha açık bir şekilde görülmektedir. Başka bir deyişle zayıf

kayalarda basınca bağılı olarak akışkan geçirgenliğinin değişiminin büyük olacağına işaret etmektedir.

4. GÖRGÜL YAKLAŞIM

2. Bölümde de belirtildiği gibi doğada gözeneklerin şekillerinin karmaşık olması nedeniyle kuramsal ilişkilerin elde edilmesi oldukça güç olup sonlu elemanlar veya sonlu farklar gibi sayısal yöntemlerinin kullanımını gerektirmektedir. Diğer bir yaklaşımda deneysel sonuçlara dayanan görgül ilişki yaklaşımıdır. Laboratuvarda kayaların gözenek ve geçirgenliğinin ölçümü için değişik deney sistemleri geliştirilmiştir (örneğin Hall 1953, Brace vd. 1968, Bernaix 1967, Green ve Wang 1986, Zimmerman vd. 1986, Gale 1990). Deneysel olarak geçirgenlik ile gözenek oranının ölçümü ayrı ayrı yapılmaktadır. Geçirgenliğin ölçümü gözenek oranının ölçümüne göre daha kolay gerçekleştirilebilmektedir. Gözenek oranın basınçla değişimini doğrudan ölçmek mümkün olmadığı için deneylerde sıvı veya gazla doygun numuneler kullanılarak sıvı veya gazın hacmi ve hacimsel değişiminden yararlanılmaktadır. Sıvı veya gaz ile kayayı oluşturan katı kısmın sıkışabilirliği, gözeneklerin geometrik şekli ve kaya içerisindeki dağılımı gözenek oranın basınçla değişimini ölçmede güçlükler neden olmaktadır. Bu tür deneysel güçlükler ve maliyet yönünden bir sorun olmadığı sürece deneylere dayanan bir yaklaşım oldukça kullanışlı ve gerçekçi olacaktır.

Literatürde yayınlanan deneysel sonuçlar ile kuramsal bölümde verilen kuramı kullanarak yapılan parametrik sonuçları göz önüne alarak gözenekli kayalarda gözenek oranın basınçla değişimi için aşağıdaki gibi görgül bir ilişki önerilecektir:

$$n = n_0 e^{-\frac{p}{\tau_n}} \quad (21)$$

Burada n_0 : atmosfer basıncında gözenek oranı

p : basınç

τ_n : görgül katsayı

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

Yukarıda önerilen ilişki atmosfer basıncı altındaki kayaya basınç uygulanması durumunda basıncın artımına bağlı olarak gözenek oranının değişimi için önerilmekte ve yük boşaltması olmadığı sürece elastik ve kalıcı deformasyonun etkilerini de içermektedir.

Görünür akışkan geçirgenliği (k_a) ile gözeneğin gerçek geçirgenliği (k) arasındaki ilişki gözenek oranını (n) kullanarak aşağıdaki gibi verilebilir (Aydan vd. 1997).

$$k_a = n \cdot k \quad (22)$$

Yukarıda ki ilişki gözenek oranı ile gözenek çapına bağlı olan gerçek geçirgenlik basınç değişiminden etkilenecektir. Başka bir deyişle önerilecek görgül ilişki bu iki etkeni göz önüne almak zorundadır. Eğer gözenek çapına bağlı gerçek gözenek geçirgenliğinin basınçla değişimi gözenek oranının değişimine benzer bir fonksiyonla tanımlanabilirse aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$k = k_o e^{-\frac{p}{\tau_k}} \quad (23)$$

Burada k_o : atmosfer basıncında gerçek akışkan geçirgenliği

τ_k : görgül katsayı

(21) ve (23) nolu ilişkiler (22) nolu ilişkide yerlerine konulduğunda

$$k_a = n_o k_o e^{-\left(\frac{1}{\tau_k} + \frac{1}{\tau_n}\right)p} \quad (24)$$

olarak elde edilir. Yukarıda ki ilişki yeniden şu şekilde yazılabilir:

$$k_a = k_{ao} e^{-\frac{p}{\tau_{ka}}} \quad (25)$$

Burada k_{ao} : atmosfer basıncında görünür akışkan geçirgenliği

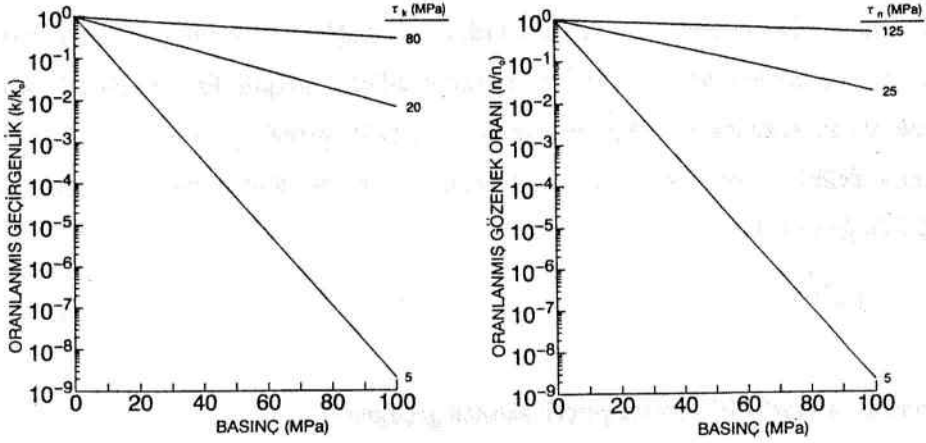
$$k_{ao} = n_o k_o$$

τ_{ka} : görgül katsayı

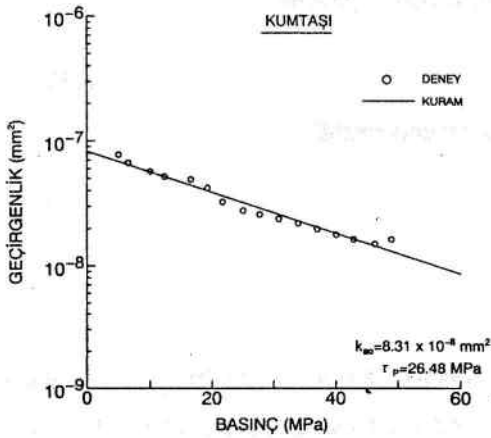
$$\tau_{ak} = \frac{\tau_k \tau_n}{\tau_k + \tau_n}$$

(21) ve (25) nolu görgül ilişkiler ile ilgili olarak yapılan parametrik bir çalışmanın sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu şekilde görgül katsayılar değiştirilerek bir takım eğriler elde edilmiştir. Görgül katsayısının değerinin artması ile basınca bağımlı gözenek ve akışkan geçirgenliğinin değişimi azalmaktadır. Kuramsal çalışmadan da bekleneceği

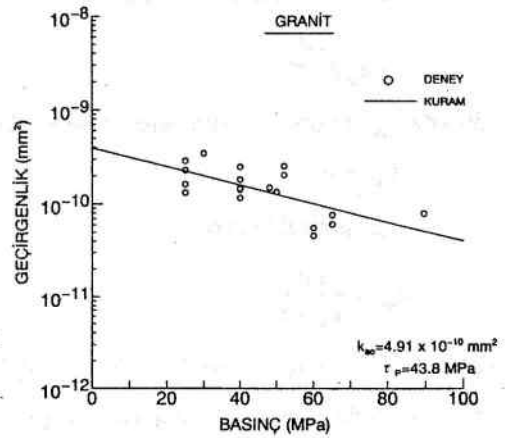
üzere görgül katsayıların değeri dayanımı yüksek kayalarda büyük ve dayanımı düşük kayalarda ise küçük olmasını gerektirmektedir.



Şekil 6: Oranlanmış gözenek oranı ile akışkan geçirgenliğinin basınçla değişimi



Şekil 7: Kumtaşının akışkan geçirgenliğinin basınçla değişimi



Şekil 8: Granitin akışkan geçirgenliğinin basınçla değişimi

Yazar tarafından kayaların gözenek ve akışkan geçirgenliği için geliştirilen PERROSO adlı bir veri tabanını kullanarak (25) nolu ilişkinin geçerliliğini sınamak üzere kumtaşı ve granitin akışkan geçirgenliği ile ilgili deneysel sonuçlara uygulanmıştır. Şekil 7 ve 8 bu uygulama sonuçlarını göstermektedir. Görgül ilişkilerdeki katsayılar deneysel sonuçlara en küçük kareler yöntemi uygulanarak saptanmıştır. Kumtaşının gözenek oranı 0.08-0.12 olup standart sapma 0.003'tür. Diğer yandan granitin gözenek oranı 0.01 olup standart sapma 0.17 olarak saptanmıştır. Kuramsal ilişkilerden de anlaşıldığı üzere görgül katsayı τ_{ka} 'ın değeri kumtaşı ile granitin elastik modülleri ile gözenek oranı göz önüne alındığında kumtaşı için küçük olmasını gerektirmekte ve saptanan değerler de bu olguyu desteklemektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada kayaların gözenek ve akışkan geçirgenliğinin basınca bağımlılığı olgusunu açıklayabilmek amacıyla mikro-mekanik yaklaşıma dayanan kuramsal bir model önerilmiştir. Önerilen modelde gözenekler boru şeklinde boşluklar olarak düşünülerek geliştirilen kuramsal ilişkiler bu olguyu açıklayabilmekte ve bu olguya etkiyen parametrelerin önem derecelerini göstermektedir. Kuramsal ilişkiler kullanılarak yapılan parametrik çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- gözenek oranı değişken ve kayanın elastik modülü ve Poisson oranı sabit olduğu durumda kayanın gözeneklerinde oluşabilecek sıvı basıncının gözenek oranına pek bağlı olmayacağını göstermektedir. Diğer yandan gözenek oranı yüksek kayalarda kayanın akışkan geçirgenliği değişiminin büyük olacağını göstermektedir.
- İlk gözenek oranı ile Poisson oranı sabit ve kayanın elastik modülü değişken olduğu durumda gözenek oranı ile geçirgenliğin basınçla değişimi kayanın elastik modülü azaldıkça daha açık bir şekilde görülmektedir. Başka bir deyişle zayıf kayalarda basınca bağlı olarak gözenek oranı ile geçirgenliğindeki değişiminin büyük olacağına işaret etmektedir.

Kuramsal modelin yanı sıra, kayalardaki gözenek şekillerinin karmaşık olması görgül ilişkilerin kullanımını gerekli kılacağı düşünülerek görgül ilişkiler önerilmiş ve yazarın

geliştirdiği bir veri tabanı kullanılarak kumtaşı ve granit ile ilgili deneysel sonuçlara uygulanarak geçerliliği gösterilmiştir. Kuramsal ilişkilerden de anlaşıldığı üzere (25) nolu ilişkideki görgül katsayı τ_{ka} 'ın değeri kumtaşı ile granitin elastik modülleri ile gözenek oranları göz önüne alındığında kumtaşı için küçük olmasını gerektirmekte ve saptanan değerler de bu olguyu desteklemektedir. Burada verilen kuramsal model basit bir gözenek şekli için geçerli olmakla birlikte kaya mühendisliği alanında basınca bağlı olarak kayaların gözenek ve akışkan geçirgenliğinin değişimine mekanik açıdan bir ışık tutacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazar bu yayının hakemliğini yapan Hacettepe Üniversitesi Hidro-jeoloji Bölümü Öğretim Görevlisi olan Doç. Dr. M. Ekmekçi ile Doç. Dr. L. Tezcan'a yapmış oldukları değerli ve yapıcı öneri ve tenkitler için teşekkür eder. Ayrıca yazar Doç. Dr. Ekmekçi'nin bu konuda Petrol Mühendisliği alanında yapılmış çalışmalara işaret etmesi bu yayının kalitesini artırmada ve içeriğinin genişletilmesinde oldukça faydalı olduğunu özellikle belirtmek ister.

KAYNAKLAR

- Athy, L.F. (1930). Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geology*, **14**(1), 1-24.
- Aydan, Ö., Akagi, T., Kawamoto, T. (1989). The squeezing potential of rocks around tunnels: theory and prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **26**(2), 137-163.
- Aydan, Ö. ve Ersen, A. (1983). Yeraltı suyunu dondurma yöntemi bir uygulaması. *Madencilik*, **22**(2), 33-44.

- Aydan, Ö., Üçpırtı, H. ve Ulusay, R. (1997). Kayalarda akışkanların akışı için Darcy yasasının türetimi ve geçerliliği. *Kaya Mekaniği Bülteni*, 13.
- Barton, N., Bandis, S., Bakhtar, K. (1985). Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, 20, 249-268.
- Bernaix, J. (1967). Etude geotechnique que de la roche de Malpasset. Ed. Dunod, Paris.
- Biot, M. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *J. Appl. Phys.*, 12, 155-185.
- Brace, W.F., Walsh, J.B. ve Frangos, W. T. (1968). Permeability of granite under high pressure. *Journal of Geophysical Research*, 73(6), 2225-2236.
- de Boer, R. ve Ehlers, W. (1990). The development of concept of effective stresses. *Acta-Mechanica*, 83, 77-92.
- Eringen, A. C. (1980). Mechanics of Continua. R.E. Krieger Pub. Co., 2nd Ed., New York.
- Fatt, I. (1958). Compressibility of sandstones at low to moderate pressures. *Bull. Amer. Ass. Petr. Geol.* 42, 1924-1957.
- Gale, J. (1990). Hydraulic behaviour of rock joints. *International Symposium on Rock Joints*, Loen, 351-362.
- Gangi, A.F. (1978). Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure. *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, 15, 249-257.
- Geertsma, (1957). The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks. *Trans. AIME, Petrol.* 210, 331-340.

- Green, D.H. ve Wang, H.F. (1986). Fluid pressure response to undrained compression in saturated sedimentary rock. *Geophysics*, **51**(4), 948-956.
- Hall, H.N. (1953). Compressibility of reservoir rocks. *Trans. of AIME*, **198**, 309-316.
- Ko, H.Y. ve Scott, R.F. (1967). Deformation of sand in hydrostatic compression. *J. Soil Mechs. And Found. Eng., ASCE*, **93**(3), 137-156.
- Kümpel, H.J. (1991). Poroelasticity: parameters reviewed. *Geophys. J. Int.*, **105**, 783-799.
- Mindlin, R.D. (1949). Compliance of elastic bodies in contact. *J. Appl. Mechs., Trans. ASME*, **16**, A-259.
- Palciauskas, V.V. ve Domenico, P.A. (1989). Fluid pressures in deforming porous rocks. *Water Res. Resour.*, **25**, 203-213.
- Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics: VII-Friction in sand and clay. *Eng. News Records*. **95**, 1026-1029.
- Tsang, Y.W. Witherspoon, P.A. (1981). Hydro-mechanical behaviour of a deformable rock fracture subject to normal stress. *J. Geophys. Res.*, **86**(B10), 9287-9298.
- Walsh, J.B. (1981). Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **18**, 429-435.
- Zimmerman, R.W. , Somerton, W.H., King, M.S. (1986). Compressibility of porous rocks. *J. Geophys. Res.*, **91**(B12), 12765-12777.

YENİ AVUSTURYA TÜNELCİLİK YÖNTEMİ VARMIDIR ?
YENİ AVUSTURYA TÜNELCİLİK YÖNTEMİNİN (NATM) ARKASINDAKİ
YANLIŞ KAVRAMLAR*

Prof. Dr. Kalman KOVÁRI

Institut für Geotechnik, ETH-Hönggerberg, Postfach 133, CH-8093, Zürich, İsviçre

Çevirenler

Ömer AYDAN

Dept. of Marine Civil Eng., Tokai University, Shimizu, JAPONYA

Reşat ULUSAY

Hacettepe Üniv. Jeoloji Müh. Böl., Beytepe Kampüsü, ANKARA

Halil KUMSAR

Pamukkale Üniv., Jeoloji Müh. Böl., Kınıklı Kampüsü, DENİZLİ

ÖZET

Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (New Austrian Tunnelling Method, NATM), kurucularından olan L. Müller'e göre 'DÜŞÜNCENİN YAPISI' olarak tanımlanmaktadır. Bu makalede bu yapının sadece kuramsal bir temele dayalı olmadığı, aksine iki temel yanlış kavram üzerine kurulu olduğu gösterilecektir. Bunlardan ilki NATM'ın tanımı ile ilgili olan, NATM kullanılırsa tüneli çevreleyen kayanın veya zeminin tahkimat sisteminin bir parçası olacağı düşüncesidir. Bu düşünce daha yakından incelendiğinde, tüneli çevreleyen kaya veya zeminin seçilen tünelcilik yönteminden bağımsız olarak tahkimat sisteminin bir parçası olması böyle bir düşüncenin temelini olmadığını ortaya koymaktadır. İkinci temel hata, NATM'ın Fenner-Pacher kaya/zemin reaksiyon eğrisi olarak adlandırılan zemin veya kayanın davranış eğrisi kullanıldığında tünel kaplamasının ekonomik tasarımının yapılabileceği iddiasında yatmaktadır. Kuramsal ve deneysel olarak ikinci temel düşüncenin geçerliliğinin (varlığının) doğrulanmamış olması nedeniyle, kaplama sisteminin optimizasyonu ile ilgili esas iddia temelsizdir. Bu makalenin son bölümünde, bu yanlış kavramların mühendislik toplumunda neden bu denli güven kazandığı ve NATM'ın red edilmeden neden bu kadar uzun süre yaşayabildiği sorusu tartışılacaktır. Bunun nedeni anlamı açık olmayan veya tanımlanmamış terimlerle ifade edildiğinden, • NATM'ın yanlışlığının kolayca açıklanmasında yatmaktadır.

* Bu yazı, Prof. Dr. Kalman Kovári tarafından Tunnel Dergisinin 1994 yılı 1 No.lu sayısında yayımlanan "On the Existence of the NATM: Erroneous Concepts Behind the New Austrian Tunnelling Method" başlıklı makalesinin çevirisidir. Söz konusu makale 10 ayrı dile çevrilerek çeşitli ülkelerde yayımlanmış olup, Türkçe çevirisi de Prof. Dr. K. Kovári'nin konunun ülkemizde de tartışılması amacı ile kendi isteği üzerine yapılmıştır.

1. YENİ AVUSTURYA TÜNELCİLİK YÖNTEMİNİN RESMİ TANIMI

1980 yılında Uluslararası Tünelcilik Topluluğunun (International Tunnelling Association) Yeraltı İnşaatı ile ilgilenen Avusturya Ulusal Komitesi (ITA) Yeni Avusturya Tünelcilik Yönteminin resmi tanımını aşağıda belirtildiği şekilde on dilde yayınlamıştır.

Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) "bir yeraltı açıklığını çevreleyen kayacın (kaya veya zemin), taşıyıcı bir kayaç halkasının harekete geçirilmesiyle taşıyan bir yapı ögesine dönüştürülmesi" ilkesine dayanır. Bu halka yer halkası olarak adlandırılacaktır.

Bu tanımlama üç ana ifadeden oluşmaktadır.

- Yer, yük taşıyıcı yapısal bir unsurdur.
- Bunu sağlamak için özel bir yaklaşım gereklidir.
- Bu yaklaşım yer halkasının harekete geçirilmesini içerir.

Bu ve ileriki bölümlerde NATM'in babaları olarak adlandırılan L. Rabcewicz, L. Müller ve F. Pacher gibi yazarların yayınlanmış yazıları üzerinde ağırlıklı olarak durulacaktır. Ayrıca NATM'ı kullanan ve destekleyen ikinci neslin çalışmalarına da değinilecektir.

1.1 Taşıyıcı Yük Ögesi Olarak Kayaç

Yukarıda verilen tanımlamanın özü, yer halkasının NATM'de kayacın taşıyan bir yapı ögesi yapılmasıdır. Bu tanımlama, diğer ilgili kavramlardan (diğer tünelcilik yöntemlerinden) NATM'in kendisini ayırt eden özelliğini öne çıkarmaktadır. Yalnızca bu yöntemde yer halkası yapısal bir bileşen olmaktadır. Bu ana önermeden diğer iyi bilinen eşitlikler türetilmiş ve sık sık NATM'la ilgili literatürde yayınlanmıştır. Örneğin NATM başlığı altında;

- ☐ Yer malzemesinin yük taşıma kapasitesi kullanılır hale getirilir (kayaç taşımaya çalıştırılır).
- ☐ Kayaç kendisini taşır.
- ☐ NATM'de kayaç başta gelen taşıyıcı öğedir.
- ☐ Kayaç yük oluşturan ortamdan yük taşıyıcı ortama dönüştürülür.
- ☐ Kayacın kendisini taşıma kapasitesi kullanılmıştır.
- ☐ NATM kayalara karşı değil, birlikte çalışır.

Kaya ve zeminin ancak NATM'ın sayesinde yapısal tahkimat unsuru olarak davranması temel olarak yanlış bir ifadedir. Gerçekte kaya ve zeminin taşıma kapasitesinin olmadığı bir tünelticilik düşünülemez. Yeraltı açıklığını desteklemek için mühendis teknik önlem kullansın veya kullanmasın kaya ve zeminin kendiliğinden devreye giren destekleyici özelliği değişmez.

Kaya kütlelerinin davranışını belirleyen mekanik yasalara güvenerek insanoğlu çok eski zamanlardan beri mağaraları işgal etmiş ve kendi amaçları için yeraltı açıklıkları oluşturmuştur. Gerçekte kayacın taşıyıcı unsur olarak tünelticiliğin özündeki bir kavram olduğu gösterilebilir. Mantıksal olduğundan bu bilginin deneyimlere dayandırılması bile gerekmez; çünkü mekaniğin ana ilkelerinden kaynaklanır.

Dolayısı ile NATM, tünelticilikte ve diğer tünelticilik yöntemlerinde de geçerli olan doğal bir kuramlılığın (kayacın yapısal destekleyiciliğinin) kendisine ait olduğunu belirtmektedir.

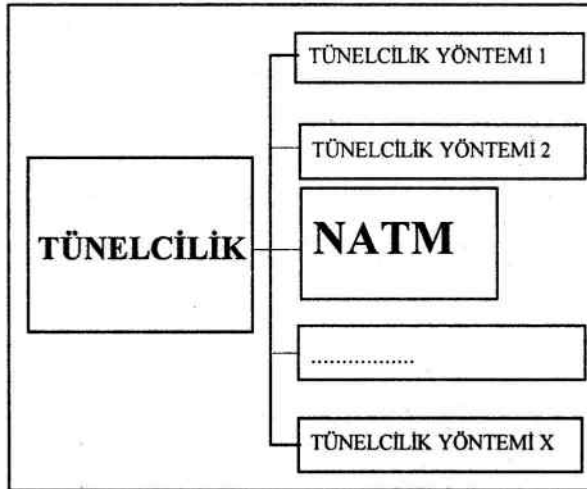
NATM'ın tanımlanmasındaki mantıksal yanlışlığı açıklamak için aşağıda verilen benzer bir hatalı tanımlama üzerinde duralım:

"Yeni yüzme tekniği, kaldırma etkisinin harekete geçirilmesi ile suyun taşıyıcı ortam haline getirilmesi üzerine kurulmuştur." Bu örnekte tünelticiliğe benzer şekilde, bir kavram veya yöntemden bağımsız olarak doğal bir yasadaki dolayı (burada suyun kaldırma özelliği, diğerinde ise yapısal tahkimat) bir mekanizma çalışmaktadır.

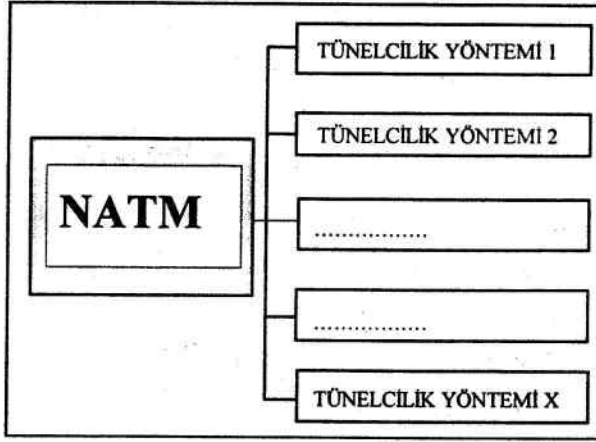
Dolayısıyla her iki tanımlama da kabul edilemez niteliktedir. Çünkü kökensel kavramlar kullanılarak türler tanımlanmaktadır.

NATM'ın tanımındaki bu yanlışlık Şekil 1 ve 2'de gösterilmiştir. Doğru bir tanım için (Şekil 1) NATM kendisini diğer tünelcilik yöntemlerinden farklı kılan bir özelliğe sahip olmalıdır. Oysa NATM diğer tünelcilik yöntemlerinde de bulunan ortak bir temel özellik ile kendini tanımlamaktadır. NATM farkında olmadan inşaat yöntemleri kümesinden ayrılarak, tünelciliğin genel tanımlarına kaymakta (Şekil 2) ve diğer tünelcilik yöntemlerini kendisine bağlama hakkı bulunduğunu sanmaktadır. NATM dünyasında, hangi inşaat yöntemlerinin hangi ölçütlere göre NATM'ın altında sınıflandırılabilceği ciddi olarak tartışılmaktadır (Lauffer, 1988). Bugün NATM'ın sadece bir yöntem olmadığına, ancak evrensel bilgi ve yeteneğin birikimi olduğuna inanılmaktadır (Hagenhofer, 1990).

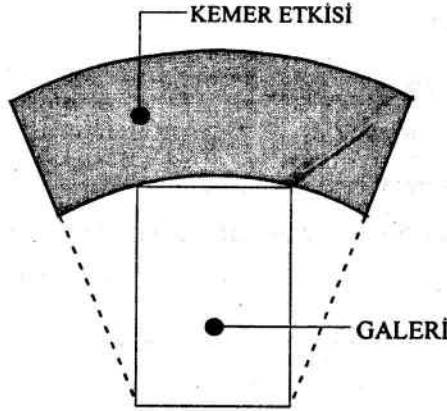
Böylece NATM kavramı tünelcilik kavramının yerine geçmiştir. Bu nedenle NATM en kapsamlı hem de aynı zamanda en boş tünelcilik kavramını simgelemektedir. Mantık öğretisine göre bir fikrin içeriği kapsamı arttıkça azalır. Buradan çıkan sonuç; örneğin NATM'de inşaat yönteminin uygulanabilirliği değil, onun istenildiğinde uzatılabilen tanımıdır.



Şekil 1. NATM'ın tanımlamasının amacı.



Şekil 2. NATM tanımlamasının uygulamadaki etkisi: NATM, tünelcilik kavramının yerine geçer.



Şekil 3. Engesser'e (1882) göre kohezyonsuz zemindeki kemerlenme etkisi.

Yüzme ile ilgili anlamsız örnekten Arşimed'in suyun destek etkisini, diğer bir ifade ile suyun kaldırma yasasını farkettiğini hepimiz biliyoruz. Peki ya tünelcilikteki çevre kayacının taşıyıcı işlevine ilişkin kuralı bulma başarısı kime aittir?

Ritter (1879) daha 1879'da tünelde örtü kalınlığının belirli derinlikten sonra arazi basınçları üzerinde ya çok az etkili olduğunu ya da etkisinin bulunmadığını saptamıştır. Kayaç örtü yükünü kendi taşımaktadır. Üç yıl sonra (1882'de) Engesser (1882) tünel tavanındaki sarkmanın kohezyonsuz malzemelerde 'kemerlenme etkisi'ne neden

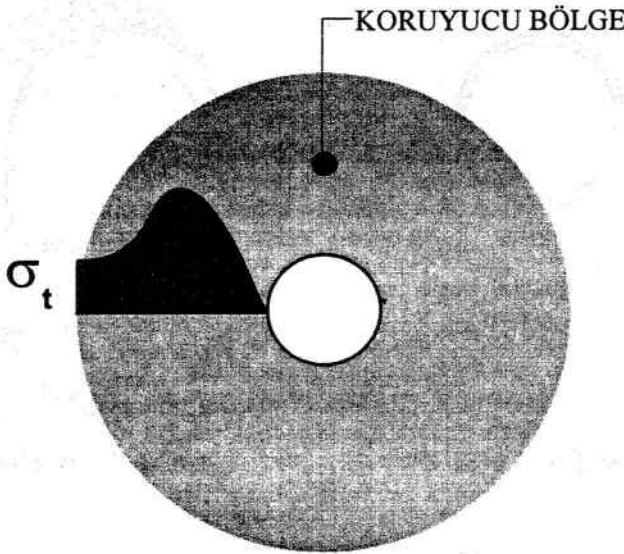
olacağını öne sürmüştür (Şekil 3). Böylece kaya deformasyonu ve tünel kaplaması üzerine gelen kaya basıncı arasındaki ilişki dikkate alınmış olup, açık bir şekilde aralarındaki bağıntılar verilmiştir.

Wiesmann 1912 yılında kaya kütlelerinin destekleyici etkisini şöyle tanımlamıştır: "Şayet bir yeraltı açıklığının oluşturulması ile kaya kütlelerinin denge durumu bozulmuş ise, açıklığı çevreleyen malzeme parçacıkları kazı malzemesinin taşımış olduğu yükleri taşımak zorundadır. Bu bir duvara delik açmaya benzer". Wiesmann ayrıca tünelcinin yeraltı açıklığını bu aşırı yükü alacak şekilde desteklemesi gerekmediğini eklemektedir. Bu, koruyucu kütle (zon) tarafından yapılmaktadır. Tünel mühendisi bu koruyucu kütlelerin korunması ile ilgilenmek zorundadır. Wiesmann koruyucu zon olarak boşluğu kuşatan, içinde gerilmelerin yer değiştirdiği kayacı anlamaktadır (Şekil 4). Koruyucu zonun kesin bir sınırı yoktur.

50 yıl sonra, NATM'in ortaya atıldığı 1962 yılında, Rabcewicz (1962) "günümüzde yeraltı açıklıklarının inşasında destek malzemesinin gerçekten kaya kütlelerinin kendisinin olduğunu kavramış bulunuyoruz" demiş ve "kaya kütlelerinin destek özelliklerini mümkün olduğunca korumanın ve geliştirmenin çağdaş tünelciliğin en önemli görevi olduğunu" eklemiştir. Bu görüşün kendinden önce daha o zamanki tünelcilik kitaplarında yer aldığını ve iyi bir şekilde düşünüldüğünü Rabcewicz görememiştir. Bu nedenle doğru olan bu saptamayı çağdaş tünelciliğin tamamına uygulayamamış, ancak aynı yıl kendisi tarafından önerilen "Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi" terimiyle geçerli kılmıştır. Böylece, NATM'in kavramsal zorlukları kendisi ile birlikte önceden programlanmış olup, bugün de azalmaksızın sürmektedir.

NATM'in resmi tanımı kaleme alınırken, Müller ve Pacher'in de yer aldığı Avusturya Yeraltı Yapıları İnşası Milli Komitesinin üyeleri de bu yüzyılın başlarından beri kayanın destek işlevinin ne denli önemli bir yer tuttuğunu görememişlerdir. 1923 yılında Maillart (1923) tarafından verilen diğer bir ifade şöyledir "Dış basınçlara karşı kayabilen bir galeri kaplaması oluşturulabildiği sürece, kayacın dayanımı artar ve böylece onun kendisini taşıması sağlanmış olur".

NATM ileri sürülmeden 6 yıl önce, yani 1956'da, Mohr "kaya kütlesinin belirli miktardaki yer değiştirmesine izin verilirse, takimat üzerine etkiyen kuvvetler azalır" demekte ve şu şekilde devam etmektedir "bu görüşün uygulamadaki yararlı kullanımı, kayacın yalnızca kendi kendini taşımaya yetecek kadar desteklenmesini gerektirir". NATM'ın özellikle kayacın statik olarak birlikte etkiğini yalnızca kendine maletmesi burada sadece mantıksal bir hata olmakla kalmayıp, tünel statiğinin temel kuramlarını keşfeden ve bunların bağıntılarını çıkaranların hizmetlerini de dikkate almamaktadır. NATM, daha önceki tünelcilerin ve bilim adamlarının tanımlarındaki değişmez, temel varsayımlarını kullanmaktadır (Wiesmann, 1909 ve 1912 ve Maillart, 1923).



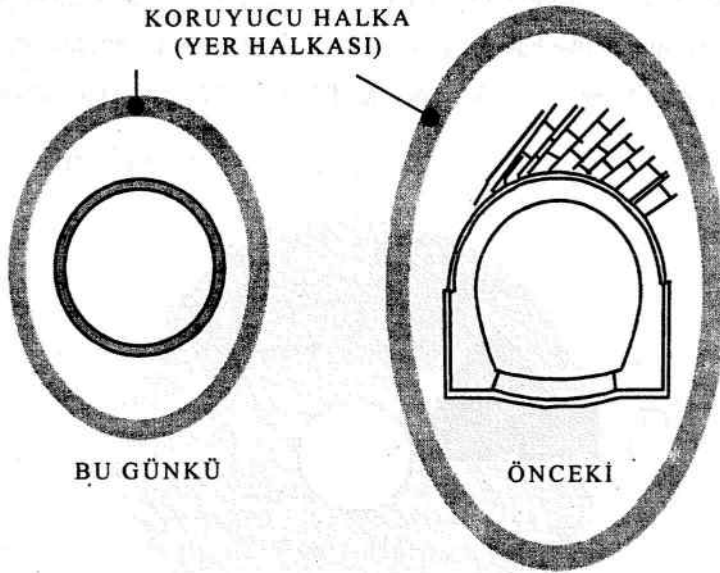
şekil 4. Wiesmann'a göre (1909 ve 1912) koruyucu zon.

1.2 Kayaçlardaki Taşıyıcı Halkanın Etkinleştirilmesi

şimdi NATM'deki kayaçta taşıyıcı halkanın etkinleştirilmesi fikrine dönelim. Yukarıda belirtildiği gibi basit olarak 'yer halkası' terimi kullanılır. Bu önerme NATM'ın düşünce yapısının gereği olup, olaylara bakış açısına özgüdür ve tünel inşaası ile ilgili diğer yayınlarda yer almaz.

Taşıyıcı halka nedir? Bu soruya NATM literatüründe ve Avusturya Milli Komitesinin broşüründe (Neue Österreichische Tunnelbaumethode, 1980) bir dizi cevap bulmak

- Manş tünelinin geçiş bölgesinde taşıyıcı halkanın şekli oldukça tuhaftır. Tavanda oldukça kalın olup yan duvarlarda giderek incelmekte ve tabanda kapanmamaktadır.
- NATM literatüründe; kayacı soğan kabuklarına benzeyen taşıyıcı bir sisteme dönüştüren çok sayıdaki halkalar da buluruz (Müller vd., 1978). Bu halkaların aynı anda mı yoksa ard arda mı oluştuğu açıklanmamıştır.



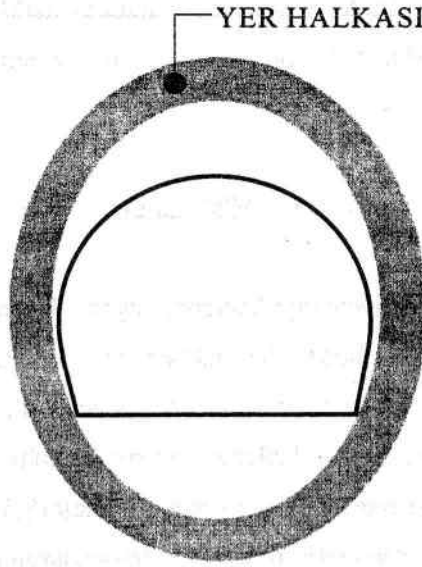
Şekil 5. Müller ve Fecker'e (1978) göre koruyucu bölge (yer halkaları).

Aslında NATM seçici bir şekilde 4 temel farklı destekleyici yer halkası kuramıyla çalışır. NATM'a göre halka aşağıdaki hususlara işaret etmektedir.

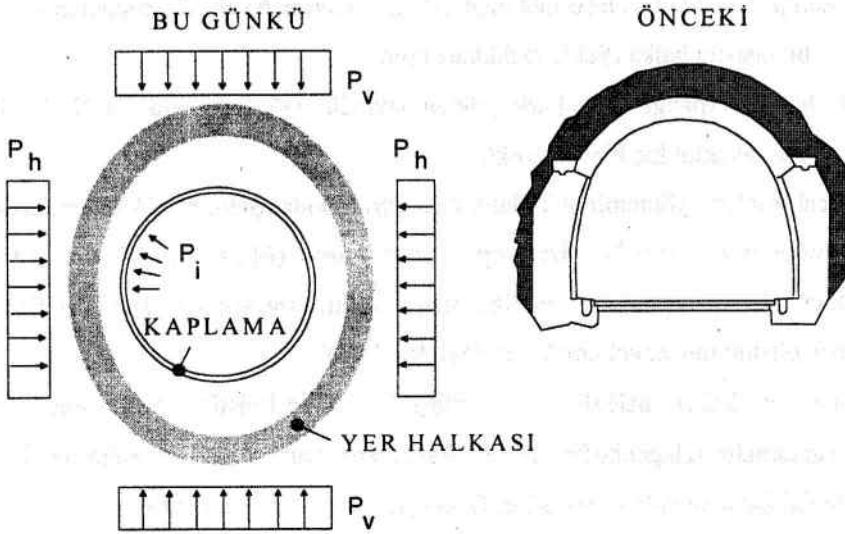
- 1) Wiesmann'a göre koruyucu bölge (doğal yapısal davranış) açıklıktan oldukça uzaklara kadar uzanır.
- 2) En yüksek teğetsel gerilmenin etkilediği bölge (koruyucu bölge)
- 3) Plastik bölge ve
- 4) Düzenli kaya saplamaları (kaya saplama ağı) ile desteklenmiş bölge

mümkündür. Ancak bütün bunlar birbirinden oldukça farklı olabilirler. Aşağıda kurucuları tarafından NATM'ın kullandıkları çok yönlü ve birbirleriyle sıkça çelişen görüşler kısaca özetlenmiştir.

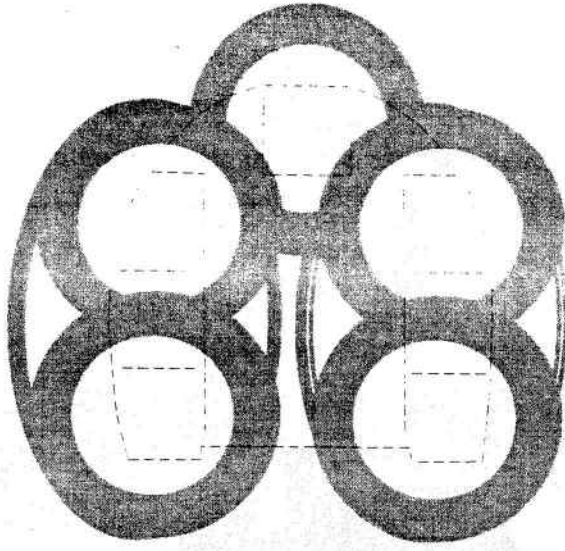
- Taşıyıcı halka (Müller ve Fecker, 1978) koruyucu zon olarak da adlandırılır (Şekil 5).
- Eski tünel inşaatlarında görülebildiği kadarıyla taşıyıcı halkalar açıklık çeperinden bugün NATM'de olduğundan biraz daha uzaklara kadar devam etmektedir (Şekil 5).
- Taşıyıcı halkalar genelde dikine duran elips şeklinde gösterilir (Şekil 5).
- Rabcewicz'e (1944) göre bu tür halkalar yarlarda yeraltı açıklığına yanaşırken Müller ve Fecker'e (1978) göre temas söz konusu değildir (Şekil 5 ve 6).
- Taşıyıcı halkaların izin verilebilir bir kayaç deformasyonu sonucunda harekete geçerler, aksi takdirde oluşamazlar. Eğer kayanın yerdeğiştirmesi yetersiz ise bunlar bir halka oluşturacak şekilde kapanmazlar (Neue Österreichische Tunnelbaumethode, 1980).
- Tünel statığı açısından sadece tahkimat (Neue Österreichische Tunnelbaumethode, 1980) ve bu taşıyıcı halka (Şekil 7) dikkate alınır.
- Taşıyıcı halka herhangi bir şekilde yüklenmektedir. Görünen odur ki NATM'dan önce taşıyıcı halkanın hiç bir rolü yoktu.
- Çok parçalı bir kazı yönteminin kullanılması durumunda (Şekil 8) NATM anlayışına göre, kayaca zarar veren bir dizi taşıyıcı halka oluşur (Müller, 1978). Bu nedenle NATM tam kesitte ayna kazısını ilke olarak kabul etmekte ve plastik zonlar bu halkaların oluşumunu engellemektedir (Müller, 1970).
- Kusursuz ve kalıcı halkaların da oluştuğu bildirilmiştir. Ama sonuncular kapanmamaktadır (Hagenhofer, 1990). Fakat kusursuz (örselenmemiş) ve kalıcı (örselenmiş) kaya halkaları arasındaki farkı açıklayan bir yayın yoktur.
- Geniş yeraltı açıklığının çevresindeki taşıyıcı halka (Ritter, 1879) herhalde bir salon tavanına benzer (Şekil 10), diğer bir ifade ile kubbe şeklindedir. Ancak bu kubbenin dayanakları açıklanmamıştır. Bunun yanı sıra, taban kesiminde niçin taşıyıcı halkanın bulunmadığı da açık değildir.



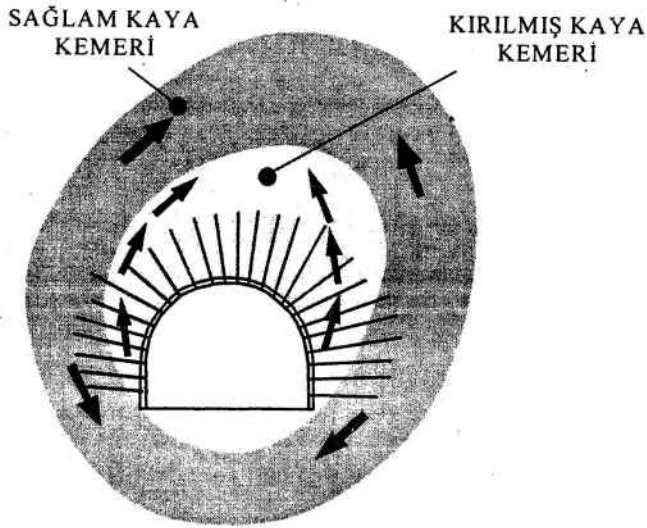
Şekil 6. Rabcewicz'e (1944) göre yer halkası.



Şekil 7. Müller ve Fecker'e (1978) göre taşıyıcı halkası.

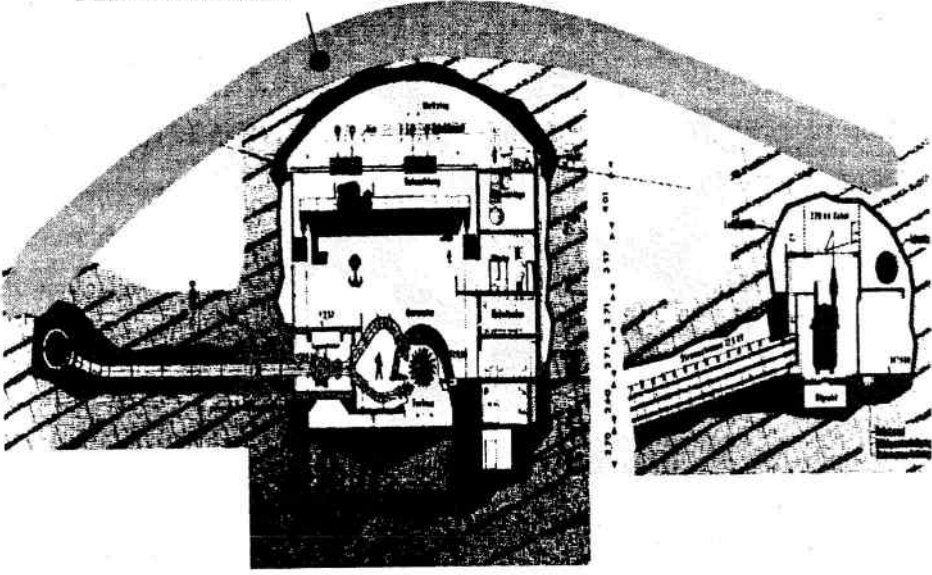


Şekil 8. Müller'e (1978) göre çok aynalı kazı etrafındaki yer halkaları.

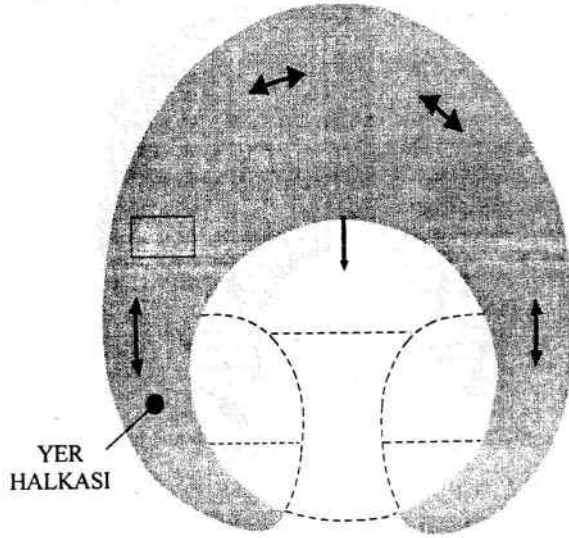


Şekil 9. Hagenhofer'e (1990) göre sağlam ve artık kaya kemeri.

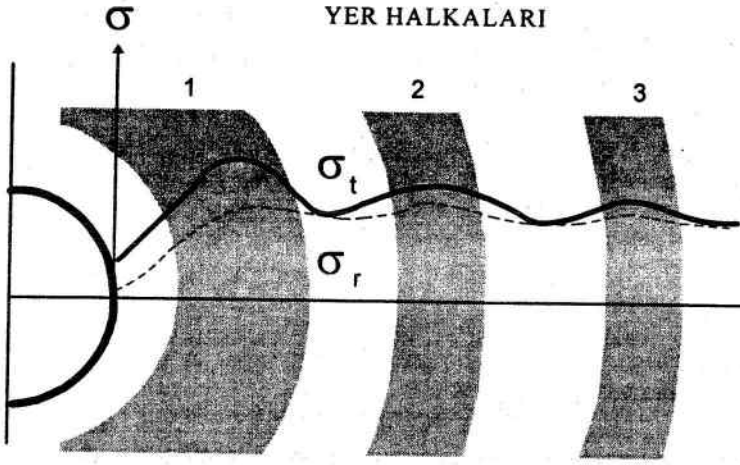
YER HALKASI



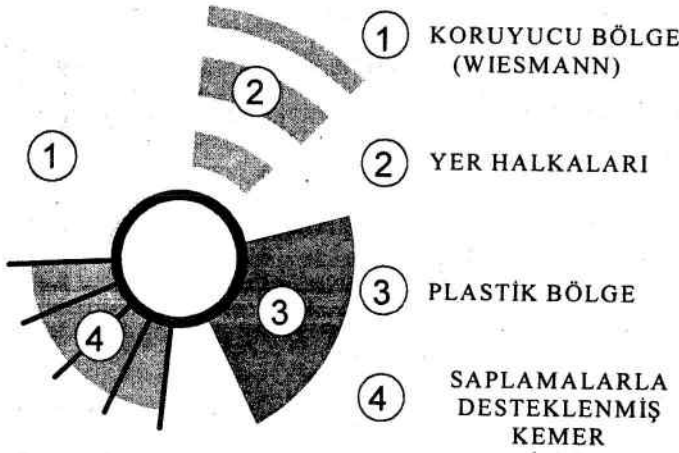
Şekil 10. Wissler'e (1990).göre geniş bir kazının üzerindeki yer halkası.



Şekil 11. Manş Tünelinde (Channel Tunnel) yer halkasının özel şekli (Myers vd., 1991).



Şekil 12. Müller, Sauer ve Vardar'a göre 'soğan kabuğu şeklinde kabuk yapısı' oluşturan çeşitli yer halkaları (Müller vd., 1978).



Şekil 13. Yer halkası kavramının farklılıkları.

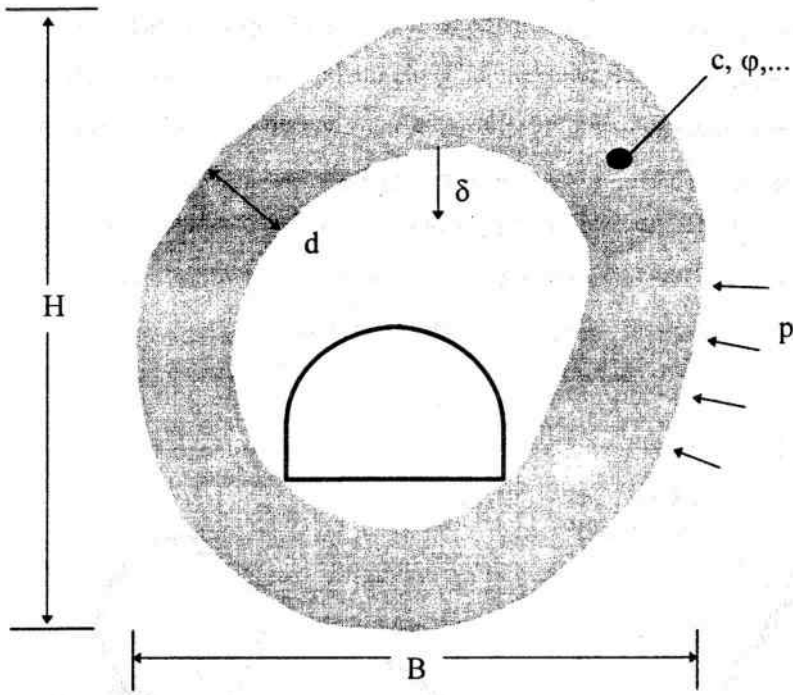
NATM literatüründe yazarlar birbirinden oldukça farklı bu dört hipotez arasında dolaşmaktadırlar. Hatta aynı makalede yer halkasının anlamının değiştiği kolaylıkla bulunabilir. Böyle bir halkanın ne kalınlığı ve ne de şekli üzerine NATM'ın yazarları ve onu savunanların bir bilgi vermesinin mümkün olmadığını anlamak oldukça zor olmasa

gerek. Bunun yanı sıra, malzemenin özellikleri bile verilmemektedir (Şekil 14). Kaya halkasının kalınlığının gelişi güzel seçildiğine ilişkin bazı deliller bile vardır (Duddek, 1979). Şekil 14 mühendislik açısından böyle bir sistemin çözülebilmesi için gerekli unsurları göstermektedir. Ama Şekil 14'e göre yer halkası bir kere olsun kalite kontrolünden geçmiş midir? Müller (1970), "halka şeklinde kapanmış koruyucu zonun tünelcilerin pek çoğu için yaşanmış gerçek" olduğunu iddia etmektedir.

NATM yer halkasının kapanmış olması için bazı koşullar vermektedir. Bunun için onun harekete geçirilmesi ya da etkinleştirilmesi gerekir. Aksi takdirde ya yavaş yavaş oluşur ya da hiç kapanmaz (Neue Österreichische Tunnelbaumethode, 1980). Etkinleştirme olarak, birileri düzenli kaya saplamaları uygulamasını, diğerleri de kayanın denetim altında şekil değiştirmesini kastederken, bazen de biraz zaman geçirilmesi kastedilir ve hatta püskürtme betonla koruyucu zonun hemen oluşturulabileceği de söylenir. En yaygın bir yaklaşıma göre NATM, kaya kütlelerinin yer değiştirmesine izin vermekte ve ona kendisini desteklemesi (taşması) için gerekli zamanı bırakmaktadır. Uygun yöntemlerle tüneldeki yer değiştirmelerin tamamen önlenmesi mümkün olmadığından ve destekleme önlemleri kaçınılmaz şekilde zaman gerektirdiğinden, böyle bir öneri dayanıksız ve yanıltıcıdır.

NATM'e resmi tanımında pay biçilen büyük önemi üzerinde yaptığımız araştırmanın 10 dilde yayımlanmış sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- ☐ Kayaç, tünelcilik yöntemlerinden bağımsız olarak ister istemez yapının taşıyıcı bir parçasıdır. Bunu farketmiş olmak NATM'in kurucularına mal edilemez.
- ☐ NATM'in özel gereği olan yer halkasının etkinleştirilmesi koşulu uygulanamaz niteliktedir. "Yer halkası" ve "etkinleştirme" kavramları da açık olamayıp, bilimsel bakış açısından kullanışsızdır. NATM'in tanımı, bir bilinmeyeni (NATM) bir başka bilinmeyenle (taşıyıcı yer halkasının etkinleştirilmesi) açıklamaya çalıştığından belirsiz bir tanımdır.



Şekil 14. Yer halkasının tayin edilmemiş olarak kalan şekil, malzeme ve kalınlık özellikleri.

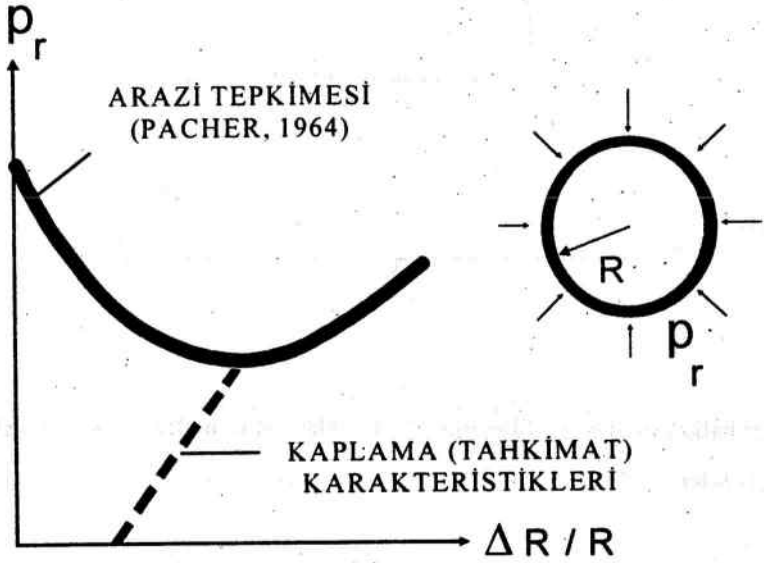
Böylece biz, Müller ve Fecker'in (1978) NATM hakkında, "hemen hemen bu yöntemi kullanan herkes, onu başka bir biçimle karıştırıyor" şeklindeki tesbitini kanıtlamış oluyoruz.

Bu ifadenin doğruluğu hakkında 1978'den beri hiç bir şey değişmemiştir. Böylece "NATM gerçekten var mı ?" sorusu yalnızca "HAYIR" ile cevaplanabilir.

2. KAYA BASINCININ AZALTILMASI (DESTEKLEME DİRENCİNİN OPTİMİZASYONU)

Bir adım daha ileri giderek, NATM'ın kaplamaya etkiyen kaya (arazi) basıncının azaltılması şeklindeki ana kuramını irdeleyelim.

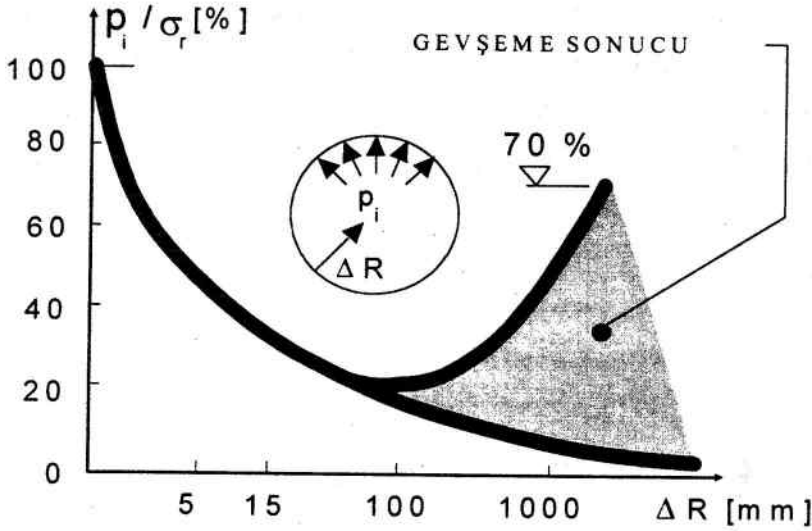
1972 yılından bu yana, Pacher'ın 1964 yılında yayınlanmış olduğu kayacın çanak şeklindeki davranış eğrisi ve buna dayandırılan destekleme önlemleri giderek NATM öğretisinin odak noktası haline gelmiştir (Rabcewicz vd., 1972). Müller'e göre, "NATM'ın ana fikri Pacher'ın kaya davranış eğrileri"ni temel almaktadır. Burada ne olmaktadır? Burada yalnızca (Neue Österreichische Tunnelbaumethode, 1980 ve Müller ve Fecker, 1978), kayaç davranış eğrisini en alt noktada kesecek şekilde, tahkimat karakteristiği (tanıtıcı eğrisi) belirlenmeye çalışılmaktadır (Şekil 15).



Şekil 15. Müller ve Fecker'e (1957) göre destekleme basıncının optimizasyonu.

Rabcewicz'e (Rabcewicz vd., 1972) göre ölçümler aracılığı ile optimuma ulaşmaya kadar kuvvetleri denetim altına almak ve buna göre kaplama direncini (p_i) seçmek mümkündür. Şekil 15'de Müller ve Fecker'den aldığımız bir gösterim şekli kullanılmıştır. Yatay eksene göreceli yansıma yerdeğiştirme $\Delta R/R$ ve dikey eksene kaplama tepkimesi p_r taşınmıştır. Bu gösterimdeki hem geometriye hem de gerilmelerin eksenel simetrisine dikkat edilmelidir.

Şekil 16'da eğrinin iki kola ayrıldığı görülmektedir (Müller, 1978). Alttaki yatay eksene yaklaşan eğri plastisite kuramının gereğidir. NATM, muhtemelen kaya gevşemesi ve dayanım yitirmesi ile kanıtlanabilen yukarıya doğru dallanan eğriyi önermektedir. Bu grafikte radyal yer değiştirme birimleri milimetre ve kaplama direnci de örtü basıncının yüzdesi olarak verilmektedir. Müller (1978), deformasyondan kaynaklanan gevşemenin dramatik etkisini şu şekilde belirtmektedir: "arazi basıncı arttıkça gevşemeler büyür; buna bağlı olarak arazi basıncını gösteren etkiler çoğalır".

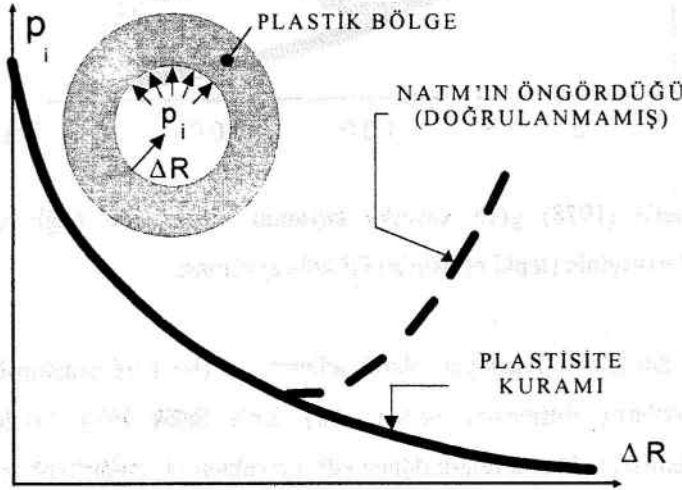


Şekil 16. Müller'e (1978) göre kayacın dayanım yitirmesine bağlı olarak kayaç karakteristiğinin (tepki eğrisinin) iki kola ayrılması.

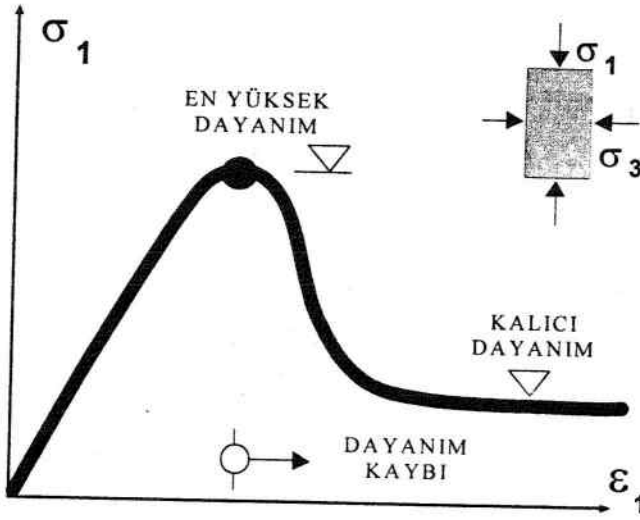
Böyle bir olay zincirleme reaksiyon olarak adlandırılır (bir kere oluşturulan reaksiyon türdeş reaksiyonların oluşmasına neden olur). Eğer Şekil 16'da verilen diyagram yakından incelenirse, yukarıya doğru dönen eğri gerçekten bir zincirleme reaksiyonunun sonucunu yansıtıyor gibidir. Kaya gevşemesi sonucu oluşan kaya basıncındaki artış örtü basıncının yaklaşık % 70'ine ulaşmaktadır. 1000 metre derinlikte yeralan bir tünelde Şekil 16'ya göre arazi basıncı 700 metre yüksekliğindeki bir kaya sütununun ağırlığına eşit olmaktadır. Bunun imkansız olduğu geçen yüzyılın ortasında bile mühendisler tarafından bilinmektedir. Bu olağanüstü ikilemin sebebi nerede yatmaktadır? Bu kayalarda zincir reaksiyonu olacağı varsayımının geçersizliğinde yatmaktadır. Gerçekte

Pacher'in önerdiği şekilde bir kaya tepki eğrisinin varlığına ilişkin ne kuramsal ne de deneysel bir kanıt bulunmamaktadır.

Teorik dayanağı olan yalnızca bir tek Şekil 17'deki plastisite teorisine dayalı karakteristik eğri vardır. Makaslama veya 3 eksenli sıkışma deneyinde gözlemlendiği gibi dayanımın azalmasını göz önüne alalım veya almayalım, bu eğri yukarıya doğru yükselemez. NATM'la ilgili tasarıma yönelik olarak kaya tepki eğrilerinin kullanımı konusunda hazırlanmış ayrıntılı bir araştırma raporunda (Seeber vd., 1980), çanak şeklindeki Pacher eğrisinin gerçekleşme olasılığına bile değinilmemiştir. ITA (1990) rehberinde de bu tür karakteristik eğrilere yer verilmemiştir. 'NATM'ın sonlu eleman analizi' (Swoboda, 1979) ve 'NATM ve sonlu elemanlar' (Wanninger, 1979) adlı yayınlarda ne etkinleştirilmiş taşıyıcı kaya halkasından ve ne de Pacher eğrisinden söz edilmemiştir.

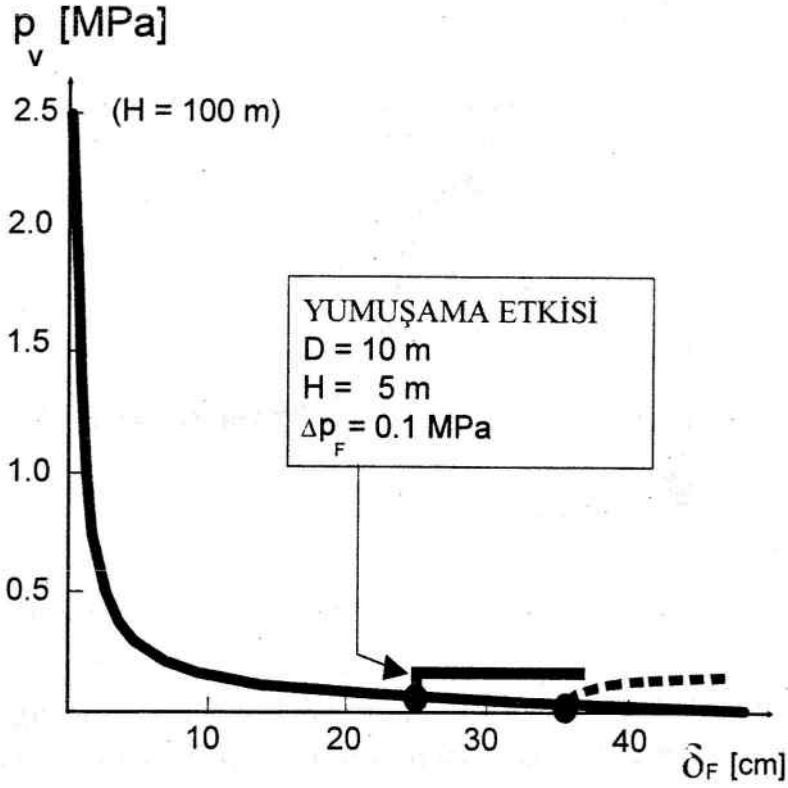


Şekil 17. NATM'da verilen eğri ile plastisite teorisinden elde edilen arazi tepkimesi eğrisinin karşılaştırılması.

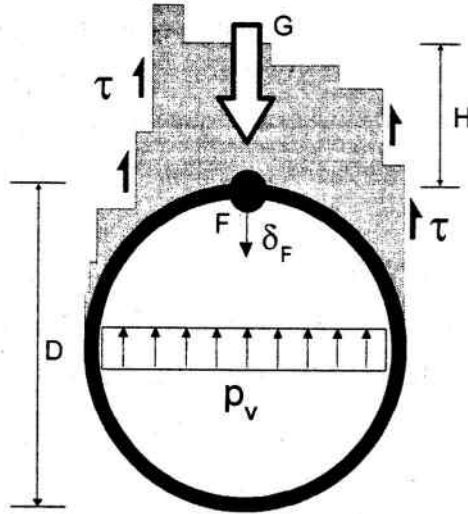


Şekil 18. Makaslama deneyi ve üç eksenli deneylerde dayanım kaybı (azalması).

NATM'a ait literatürde de belirtildiği gibi, arazi tepkimesi eğrisinin aşağıya doğru azalma eğiliminden göstereceği sapma ile ilgili sadece tek bir kabul edilebilir olasılık söz konusudur. Tünel tavan bölgesinde uygun olmayan eklemler veya kayma yüzeylerinin oluşmasına bağlı olarak, kırılan parçanın kısmen veya tümüyle kaya dokusundan ayrılması ve kendi ağırlığıyla tavan (tepe noktasındaki) kaplamasının üzerindeki basıncını artırmasıdır (Şekil 19 ve 20). Bu olasılık ITA (1990) rehberinde de belirtilmiştir. Bu tür ani olayların tünel boyunca hangi noktada ve ne kadar büyüklükte olacağını ve ne zaman olmasının beklendiğini hesaplamalarla tahmin etmek mümkün değildir. Burada belirtilmesi gereken husus zincirleme reaksiyonunun olmadığıdır. Örneğin Şekil 19'da verilen grafik dikkate alınırsa, yaklaşık 5m yüksekliğindeki (Şekil 20) bir kaya bloğunun yerinden ayrılmasının tavan bölgesinde kaya tepki eğrisi üzerindeki etkisinin ne kadar küçük olduğu görülecektir. Bu husus Rabcewicz (1944) tarafından "gevşeme basıncı deneyimli tüneller için genellikle en zararsız olanıdır" sözüyle doğrulanmıştır.



Şekil 19. Tavan bölgesindeki gevşemenin etkisinin kaya tepki eğrisi üzerindeki etkisi.



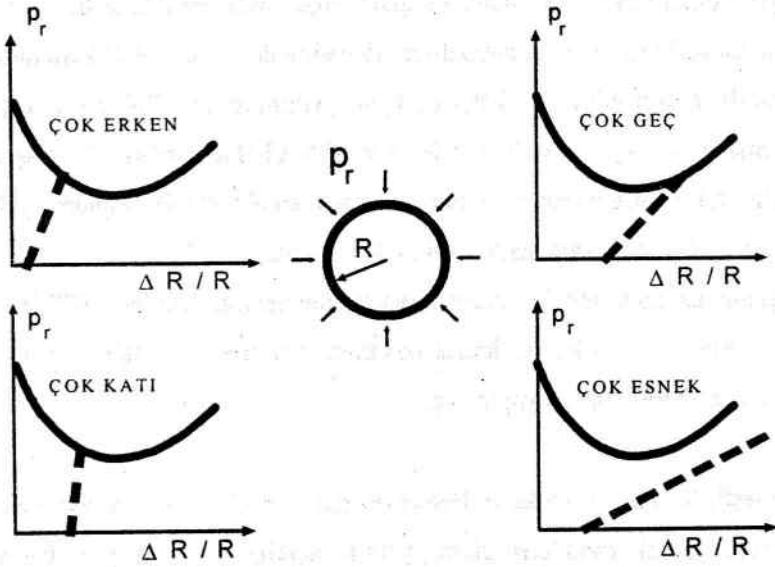
Şekil 20. Kaya gevşemesinden dolayı tavan kaplamasında basınç artışı (sayısal hesaplamaya olanak sağlamayan düzensiz ve beklenmeyen bir durum).

Başka bir yerde Müller (1978) de "tünel ve galeri inşaatında genellikle 0.5-5 metreye ulaşan gevşeme mesafelerini hesaba katmalıyız" demektedir. Fakat NATM literatüründe kaya gevşemesinin zararlı etkilerine karşı da uyarı yapılmaktadır. Rabcewicz'e (1965) göre izin verilemeyen kaya gevşemelerinin önlenmesi NATM'ın ayrılmaz bir koşuludur. Rabcewicz "izin verilebilir gevşeme" kavramını ortaya atmaktadır. Bu saptama yukarıda belirtilen gevşeme basıncı zararsızdır şeklindeki ifadeye aykırıdır. Ayrıca kabul edilebilir gevşeme kavramı hiç bir zaman tanımlanmamıştır. Müller 1978'de doğru olarak "kaya gevşemesine bağlı ne kadar dayanım azalması oluştuğuna ilişkin bir araştırmamız yoktur" belirlemesini yapmıştır.

Yeterince etkinleştirilen taşıyıcı halka ve Fenner-Pacher karakteristiği ayrı ayrı yeterince inceledik. Buradan arazi karakteristiğinin, yeraltı açıklığını çevreleyen kayaçların özelliğini yansıtmak zorunda olduğu kolayca anlaşılmaktadır.

Yer halkasından ne anlaşıldığına bakılmaksızın, yer halkası ile arazi tepki eğrisi arasında bir içiçeliğin bulunması gerekir. NATM literatüründe yer halkasının harekete geçirilmesi ile Pacher'in ileri sürdüğü davranış eğrisi, aralarında hiç bir bağıntı bulunmaksızın, ortada durmaktadır.

Özet olarak; NATM kurucularının (Rabcewicz, Müller ve Pacher) anladığı şekilde bir kaplama direnci optimizasyonu hiç de mümkün değildir; çünkü Şekil 21'deki yer tepki eğrisinin önce azalıp sonra artması ne kuramsal olarak elde edilmiş ve ne de deneysel olarak gözlenmiştir. Bu nedenle NATM'ın prensibi olan "kaplamayı ne çok erken ne de çok geç ve ne çok katı ne de çok esnek inşaa et" ilkesi kanıtlanamazdır (Müller ve Fecker, 1978). Yerleştirilme zamanının belirlenmesinin yanısıra, kaplama dayanım ve deformasyon özelliklerinin optimum şekilde seçimi de başka bir ölçüte dayanmalıdır. Bu husus tünelcilikteki en zor problemlerden birini oluşturmaktadır. Dolayısı ile NATM'ın bu ve benzeri temel kuramlarının ifadesi tünel inşaatının basitleştirilmesi için bir denemedir.



Şekil 21. NATM'in altıncı temel ilkesi: "tahkimatın ne geç ne de erken yerleştirilmesi - len, ne aşırı katı ne de çok esnek olmasından kaçının" (Müller ve Fecker, 1978).

Eğer bir kuram büyük hatalar içeriyor ise, böylece daha büyük hatalara kapı açık tutuluyor demektir. Sauer'e (1986) göre "NATM'in teorisi ve uygulaması" ek karakteristik eğriler yardımı ile çalışır. "Gözlemlere, deneyimlere ve ölçümlere daha fazla gereksinim olduğunu, özetle kazıya komşu olan bölgedeki maksimum ve minimumu hesaba katmak için Fenner-Pacher eğrisinin geliştirilmesinin gerekli olduğunu önermiştir."

Bu iddianın kanıtlanması amacıyla, altı değişken arasındaki ilişkiyi açıklamaya çalışan Pacher eğrisinin değiştirilmiş bir şekli gösterilir. Burada her koordinat eksenini sadece bir değil tam üç adet değişkeni temsil etmektedir. Karmaşayı son haddine vardırmak için altı değişkenden iki tanesi de tanımlanmamıştır. Yanlış matematiksel ifadelerle uğraşma çabası bilimsellik görüntüsü verebilir. NATM'ı (Austrian National Committee of the ITA, 1986) eleştirenlerin karşısına dikilen bir kuruluş olan ITA Avusturya Yeraltı inşaatı Milli Komitesi'nin bu tür iddiaları durdurmak için devlet dairesi gibi davranarak bir adım bile atmaması anlaşılabilir gibi değildir.

3. NATM'IN KAVRAMSAL DOKUSU VE SONUÇLARI

Yorumlarımızı NATM'in düşünce yapısının genel tanımı ile kapatıyoruz (Müller ve Fecker, 1978). Hepimiz, kavramların bizim düşüncemizin bel kemiğini ve sonuçta kararlarımızı oluşturduğunu biliyoruz (Hessen, 1947). Bilimsel vargıların kanıtlanması, açıkça tanımlanmış kavramları ve kusursuz sonuçlama yöntemlerini gerektirir. Kanıtlanmamış veya yanlış sonuçlamalara dayanan vargılar gerçek kabul edilemez. Eğer NATM kendi kavramlarını geliştiren bir yöntem olarak ele alınırsa, NATM'in nominal tanımlarla çalışmakta olduğu dikkati çeker. Bununla "anlamlarına somut sınırlama getirilmemiş kelimeler" anlaşılmaktadır. İsmi var tanımlar gerçek tanımların tersine kavramlara yalnızca yaklaşırlar. Gerçek tanımlar açık içerikli somut açıklamalardır. Ancak bunlar bilimsel çalışmalara uygundur.

NATM literatüründen alınan aşağıdaki örnekler (Çizelge 1), açıkça tanımlamalara dayanmayan sözcük açıklamalarının sonuçlarını vurgulamaktadır. Dil, yapısı yakından incelendiğinde varılabilecek bilgilerdeki eksikliklerini ilişkilere gömer. Hastalıklı şekilde büyümeye başlar. Burada, NATM literatüründeki "taşıyıcı yer halkası" ile anlam yakınlığı gösteren sözcük biraraya getirilmiştir (Çizelge 2). Terimlerin bu çeşitliliği bize Goethe'nin Faust'unu hatırlatmaktadır.

'Çünkü hemen eksikse kavramlar

Bir sözcük çıkar tam zamanında ortaya

Sözlerle derinlemesine tartışılır

Bir düzen de kurulur sözcüklerle'.

(Randall Jarrell tarafından tercüme edilmiştir)

Eğer tanımlamalar kesin değil ise, bunlara dayalı olarak verilecek kararlar da ya gerçek dışı olmalı, ya da en azından bağlayıcı olmamalıdır. NATM literatüründe yanlış veya tam olmayan sonuçlar bulunmaktadır. Yanlış bir sonuç çıkarma, aynı kelime değişik anlamda kullanıldığı zaman ortaya çıkmakta ve böylece aynı sonuç içerisinde bir çok tanım yer almaktadır (Hessen, 1947). Böylece kararı veren kişi şartlara uygun bir ifadeyi her zaman bulabilir ve uygun olmayan ifadelerin yan yana yer almasına imkan

sağlayabilir. Hatalı bir sonuca iyi bir örnek olarak halka şeklindeki bir kaya destek yapısının nasıl harekete geçirileceğinin tanım verilebilir.

Çizelge 1

Nominaldefinitionen	Nominal tanımlar*
Entfestigungsempfindlichkeit Entspannungsbereitschaft Entspannungsgeschwindigkeit Halbsteife Schale Kräftevakuum Momentenfilter Nachdrängende Gewichtskomponente Nachdrängender Belastungscharakter Selbstschutzwirkung Setzungsbeeinflusste Tragreserve Spannungsschatten der Umlagerungen Spannungsumlagerungsgeschehen Spannungsgeschehen Spezifischer Zeitfaktor Umlagerungsnotwendigkeit Zulässige Auflockerung (Aus dem Schrifttum der NÖT)	Dayanım azalması duyarlılığı Gerilme boşalmasına yatkınlık Gerilme boşalma hızı Yarı katı kabuk Kuvvet çekimi Bükülme momenti süzgeci İtici ağırlık bileşenleri Sonradan etkileşen yükleme karakteri Kendi kendini koruma etkisi Oturmalardan etkilenen taşıyıcılık rezervi Yer değişiminin yeni dağılımdan oluşan gerilme izleri Gerilmelerin yer değiştirmesi Gerilme olayı Özgül zaman etmeni Gerilme dağılımının gerekliliği İzin verilebilir gevşeme (NATM literatüründen alınmıştır)
* Almanca orijinal baskısında (versiyonunda) bile bu açıklamaların anlamı çoğunlukla açık olmadığından. İngilizce baskısı kelimesi kelimesine yapılan çeviriden Türkçe'ye çevrilmiştir.	

Çizelge 2

Dem Begriff "Gebirgstragring" sinnverwandte Wörter	"Taşıyıcı yer halkası" ile eşanlamlı terimler*
Aussenschale Aussengewölbe Aussenring Druckring Entspannungszone Felstragring Fliesszone Fliesslinienfeld Gebirgstragkörper Gebirgsschale Gewölbering Gewölbeschale	Dış kaplama (kabuk) Dış kemer Dış halka Basınç halkası Gerilme boşalması bölgesi Taşıyıcı kaya halkası Akma zonu Akım çizgileri alanı Taşıyıcı yer (kayaç) cismi Kayaç kabuğu Kemer halkası Kemer kabuğu

Gleitbruchzone	Kayma kırığı zonu
Ringgewölbe	Halka şeklindeki kemer (kubbe)
Ringstützlinie	Halka destek hattı
Schutzgewölbe	Koruyucu kemer
Schutzhülle	Koruyucu bölge (örtü)
Schutzzone	Koruyucu zon
Stützring	Destek halkası
Traggewölbe	Taşıyıcı kemer
Traghülle	Taşıyıcı örtü
Tragkörper	Taşıyıcı kütle
Tragring	Taşıyıcı halka
Tragschalengebilde	Taşıyıcı kabuk
Tragzone	Yapısal bölge
Zwiebelschalen	Soğan kabukları şeklindeki kabuk
Dickwandiges Rohr	Kalın çeperli boru
Intaktes Felsgewölbe	Sağlam kaya kemeri
In sich verspannende Zone	Kendi içinde gelişmiş bölge
Kastnersche Ohrenzonen	Kastner'in kulak şeklindeki bölgeleri
Massgebender Gebirgstragring	Etkin taşıyıcı kayaç halkası
Mitragende Zone	Birlikte taşıyan bölge
Natürliches Gewölbe	Doğal kemer
Ohrenförmige Scherzonen	Kulak şeklindeki makaslama bölgeleri
Ohrenförmige Taschen	Kulak şeklindeki cepler
Plastische Zone	Plastik bölge
Pseudoplastische Fliesszone	Aldatıcı plastik akma bölgesi
Pseudoplastische Diagonalzone	Aldatıcı plastik verev bölge
Residueller Felsgewölbe	Kalıcı (rezidüel) kaya kemeri
Residueller Gebirgstragring	Kalıcı kaya halkası yapısı
Ringflächenförmige Fliesszone	Halka-yüzey-şeklindeki akma bölgesi
Schalenförmige Tragzonen	Kabuk şekilli taşıyıcı bölge
Selbsttragendes Gewölbe	Kendini taşıyan kemer
Spannungsverminderte Schutzschalen	Gerilmeleri azaltılmış koruyucu kabuklar
Stabilisierter Tragring	Duraylı hale getirilmiş taşıyıcı halka
Taschenförmige Fliesszonen	Cep şeklindeki akma zonu
Tragkonstruktionen im Gebirge	Arazideki taşıyıcı yapılar
Trompeterche Zone	Trompeter bölgesi
Virtuelles Traggewölbe	Sanal taşıyıcı kemer
Wiesmannsche Zone	Wiesmann bölgesi
Zone erhöhten Druckes	Yüksek basınç bölgesi
Zungenförmige Zone	Dil şeklindeki bölge
(Aus dem Schrifttum der NÖT)	(NATM literatüründen alınmıştır)

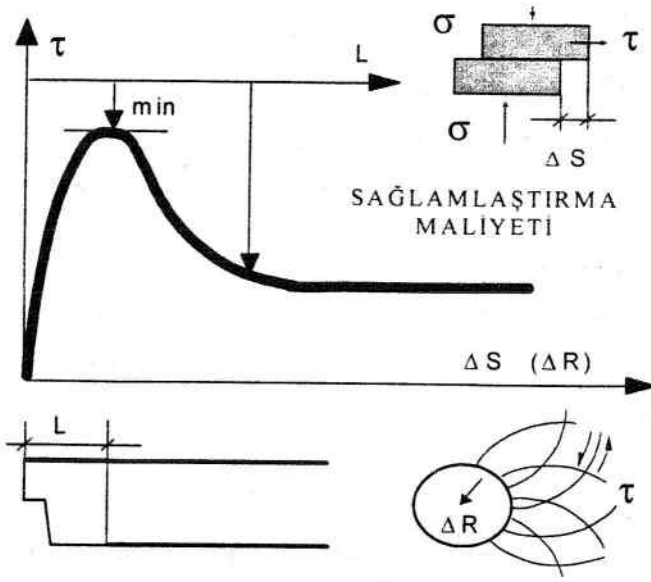
*Almanca orijinal baskısında (versiyonunda) bile bu açıklamaların anlamı çoğunlukla açık olmadığından, İngilizce baskısı kelimesi kelimesine yapılan çeviriden Türkçe'ye çevrilmiştir.

Bir değerlendirme yapılırken gerekli bir veya birkaç ifade belirtilmez ise, eksik bir sonuç elde edilir. NATM'ın "açıklığı çevreleyen kayaçta yeni denge durumunun oluşması için zamana ihtiyaç vardır" şeklindeki açıklaması eksik bir sonuç çıkarmadır. Bu önermenin yalnızca belirli kaya türlerinde pratik öneme sahip olacağı burada belirtilmelidir. Yaygın kullanımında olan kesinleştirilmiş bir kavram, keyfi ve amacından uzaklaştırılmış bir anlamla kullanılırsa da çok hatalı bir karara varılır (Locke, 1975). Açık bir kavramın bu şekildeki başka anlama çekilmesinden iki minimum ve bir maksimumlu kaya karakteristik eğrisinde yararlanılmaktadır (Sauer, 1986).

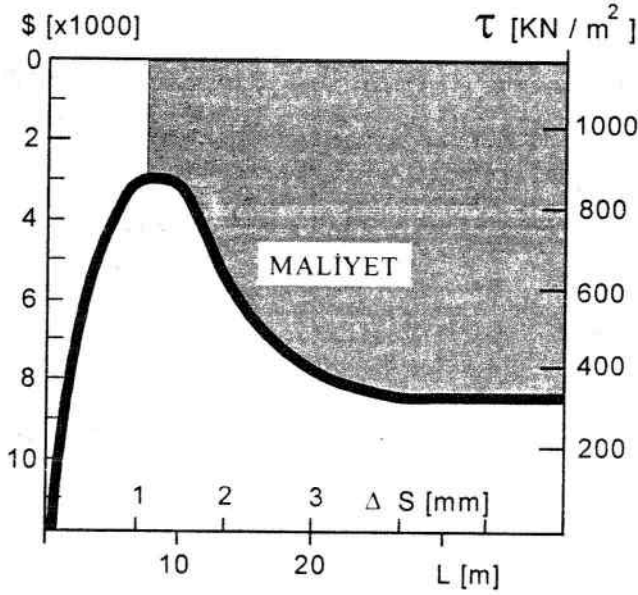
Daha ağır bir hata, bir vargının ortaya atılması, ama kanıtlanmamasında yatar. Buna bir örnek Sauer'in (1986) 'NATM Teorisi ve Pratiği' başlıklı yayınında bulunmaktadır. Şekil 22'de verilen Sauer'a ait grafik aşağıdaki nicelikler arasında ilişki kurmaya çalışmaktadır.

- ☐ doğrudan makaslama deneyindeki kayma mesafesi (ΔS) ve makaslama gerilmesi (τ) arasındaki ilişki
- ☐ açıklığın kapanımı (tünel konverjansı) (ΔR) ile kazı aynasının (aranın) kapanımı tamamlanmış halkadan uzaklığı (L) arasındaki ilişki

Sauer (1986) "benzer şekilde kaya desteği maliyetinin bu eğriden belirlenebileceğini" belirtmektedir. Dolayısıyla bu diyagramda NATM'a göre az sayıdaki laboratuvar makaslama deneyine dayalı tahkimat önlemlerinin maliyetini belirleyecek imkanların elimizin altında olması gerekir. Bu eğri Şekil 23'te gösterilen biçimde olabilir. Örneğin sol taraftaki düşey eksen, tünelde metre başına destek önlemlerinin maliyeti Dolar olarak alınabilir. Makaslama dayanımı diyagramının şekline bağlı olarak kazı aynasından belirli bir uzaklık sonrasında masraf hızlı bir şekilde artacaktır. Sauer'den sonra NATM'ın bu teorisi kanıtlanmamıştır. Bundan böyle de kanıtlanamaz. Gerçekten böyle bir ilişkinin var olamayacağı kolaylıkla gösterilebilir. Bu tür yanlış yola sevk edici eğrilerle okuyucuda, NATM'ın diğer tünelcilik yöntemlerinden gizlenen hususları bildiği izlenimini yaratmaktadır.



Şekil 22. Makaslama deneyi, yerdeğiştirme (konverjans), kazı aynasından uzaklık ve tahkimat önlemleri için maliyet arasındaki olasılığı bulunmayan ilişki.



Şekil 23. NATM teorisine uygun olarak makaslama dayanımının kabul edilmiş fonksiyonuna karşı destek önlemleri için maliyet.

NATM literatüründeki son yanlış karar verme örneği olarak aşağıda verilen temel ifadeyi ele alalım (Neue Österreichische Tunnelbaumethode, 1980): "İnşaat ve işletme yöntemlerinin değişen kayaç özelliklerine, kendini tutma süresine ve müdahale alanı ve derinliklerinin doğru seçilmesiyle aranın (kazı aynasının) duraylılığına uyumlu oluşu".

Yukarıdaki açıklamanın dikkatle okunması sonucunda, bu temel ifadede eş anlamlıları ile birlikte iki açıklama ortaya çıkmaktadır. Tünelcilikte inşaat ve uygulama yöntemi ile anlaşılan, bir kesit boyunca yapılan kazı için takip edilen yöntemdir. Örneğin bütün veya parça kesit, ve uygulama yöntemi adı altında bu kazının derinliğidir. Böylece NATM'ın bu ifadesi basit olarak şunu açıklamaktadır:

"Doğru inşaat ve uygulama yöntemlerinin seçilmesiyle inşaat ve uygulama yöntemlerinin uyumlandırılması". Eş anlamlılarını kullanarak aynı şeyleri tekrarlamak, bir yarar sağlamaz. Problemin özü olan doğru seçimi nasıl yapmalı sorusu cevaplanmamıştır.

4. NATM'IN DÜŞÜNCE YAPISINA İLİŞKİN SONUÇLAR

Kendisine özgü fikirlerinin çerçevesi içinde, NATM'ın eleştirel tartışmasını yapmak imkansızdır. NATM'ın açıklamaları o kadar tutarsızdır ki, yakından incelemeyi bile imkansız kılmaktadır. Eğer NATM'e bir bütün olarak bakılırsa, onun yalnızca eleştiriye ve elverişsizliğe değil, eleştiriler önünde varolmayacağı anlaşılır.

KATKI BELİRTME

Bu makalenin yayınlanmasındaki katkılarından dolayı yazarlar, Prof. Dr. Mahir Vardar, Prof. Dr. Hasan Gerçek ve Doç. Dr. Erdal Ünal'a teşekkür ederler.

YARALANILAN KAYNAKLAR

- Austrian National Committee of the ITA: In defence of NATM (Communication), Tunnels & Tunnelling, June 1986.
- Duddek, H.: Zu den Berechnungsmodellen für die Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT), Rock Mechanics, Suppl. 8, 1979.
- Engesser, F.: Über den Erddruck gegen innere Stützwände (Tunnelwände), Deutsche Bauzeitung, 1882.
- Hagenhofer, F.: NATM for tunnels with high overburden, Tunnels and Tunnelling, May, 1990.
- Hessen, J.: Wissenschaftslehre, Lehrbuch der Philosophie, Erasmus-Verlag, München, 1947.
- ITA-Richtlinien für den konstruktiven Entwurf von Tunneln, Taschenbuch für den Tunnelbau, Verlag Glückauf, 1990.
- Lauffer, H.: Forderungen der NÖT an maschinelle Vortriebssysteme, Felsbau 6, Nr. 4, 1988.
- Locke J., An Essay concerning Human Understanding, Clarendon Press, Oxford, 1975.
- Maillart, R.: Über Gebirgsdruck, Schweizerische Bauzeitung, Band 81, Nr. 14, 1923.
- Mohr, F.: Kraft und Verformung in der Gebirgsmechanik untertage, Deutsche Baugrundtagung, Köln, W. Ernst Verlag, 1957.
- Müller, L.: Der Einfluss von Klüftung und Schichtung auf die Trompeter-Wiesmannsche Zone, 10. Ländertreffen, Int. Büro für Gebirgsmechanik Leipzig, Akad. Verlag, Berlin, 1970.
- Müller, L.: Der Felsbau, Dritter Band: Tunnelbau, Enke Verlag Stuttgart, 1978.
- Müller, L., Fecker, E.: Grundgedanken und Grundsätze der "Neuen Österreichischen Tunnelbauweise", Felsmechanik Kolloquium Karlsruhe, Trans Tech Publ., Claustal, 1978.
- Müller, L., Sauer, G., Vardar, M.: Dreidimensionale Spannungsumlagerungsprozesse im Bereich der Ortsbrust, Rock Mechanics, Suppl. 7, 1978.
- Myers, A., John, M., Fugeman, I., Lafford, G., Purrer, W.: Planung und Ausführung der britischen Überleitstelle im Kanaltunnel, Felsbau 9, Nr. 1, 1991.

- Neue Österreichische Tunnelbaumethode, Definition und Grundsätze, Selbstverlag der Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen im ÖIAV, Wien, 1980.
- Pacher, F.: Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues, Felsmech. und Ing. Geol., Suppl. I, 1964.
- Rabcewicz, L.: Gebirgsdruck und Tunnelbau, Springer-Verlag, Wien, 1944.
- Rabcewicz, L.: Aus der Praxis des Tunnelbaus, Einige Erfahrungen über echten Gebirgsdruck, Geologie und Bauwesen, Jg. 27, Heft 3-4, 1962.
- Rabcewicz, L.: Die Neue Österreichische Tunnelbauweise, Entstehung, Ausführungen und Erfahrungen, Der Bauingenieur, 40. Jg., Heft 8, 1965.
- Rabcewicz, L., Golser, J., Hackl, E.: Die Bedeutung der Messung im Hohlraumbau, Teil I, Der Bauingenieur 47, Heft 7, 1972.
- Ritter, W.: Statik der Tunnelgewölbe, Berlin, 1879.
- Sauer, G.: Theorie und Praxis der NÖT, Tunnel 4, 1986.
- Seeber, G., Keller, S., Enzenberg, A., Tagwerker, J., Schletterer, R., Schreyer, F., Coleselli, A.: Bemessungsverfahren für die Sicherungsmassnahmen und die Auskleidung von Strass entunneln bei Anwendung der neuen Österreichischen Tunnelbauweise, Strassenforschung, Heft 133, Wien, 1980.
- Swoboda, G.: Finite element analysis of the New Austrian Tunnelling Method, 3rd Int. Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Aachen, 1979.
- Wanninger, R.: New Austrian Tunnelling Method and finite elements, 3rd Int. Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Aachen, 1979.
- Wiesmann, E.: Ein Beitrag zur Frage der Gebirgs- und Gesteinsfestigkeit, Schweiz. Bauzeitung, Band 53, 1909.
- Wiesmann, E.: Über Gebirgsdruck, Schweiz. Bauzeitung, Band 60, Nr. 7, 1912.
- Wisser, E.: Die Gestaltung von Krafthauskavernen nach felsmechanischen Gesichtspunkten, Felsbau 8, Nr. 2, 1990.

**Kayalarda Akışkanların Akışı İçin Darcy Yasasının Kuramsal
Türetimi ve Geçerliliği**

*Theoretical formulation of Darcy's law for fluid flow through porous and/or
jointed rock and its validity*

**Ömer AYDAN
Hasan ÜÇPİRTİ
Reşat ULUSAY**

**Laboratuvarlarda Kayaların Geçirgenlik Ölçüm Yöntemlerinin Kuramı
ve Deneyler**

Theory of laboratory methods for measuring permeability of rocks and tests

**Ömer AYDAN
Hasan ÜÇPİRTİ
Necdet TÜRK**

Kayaların Gözenek ve Akışkan Geçirgenliğinin Basınca Bağımlılığı

Pressure dependency of porosity and permeability of rocks

Ömer AYDAN

**Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi Varmıdır? Yeni Avusturya
Tünelcilik Yönteminin (NATM) Arkasındaki Yanlış Kavramlar**

*On the existence of the NATM:Erroneous concepts behind the New Austrian
Tunnelling Method*

**Kalman KOVARI
Çev. : Ömer AYDAN
Reşat ULUSAY
Halil KUMSAR**