

## *Saplamaların Kemer*

## *Oluşturma Etkisi*

The Effect of Rock-bolts on Arching

Ömer AYDAN (\*)

### ÖZET

Bu çalışmada, kaya saplamalarının kemer oluşturma etkisi gözönüne alınarak saplamaların boyutlandırılmalan ile ilgili kuramlar irdelenmekte, uygulanabilirliği tartışılmakta ve yetersiz olanlar yeniden düzenlenmektedir. Kuramsal yaklaşımlar pratikte önemli sayılan durumlara uygulanmakta ve kuramların uygulanma sınırları anlatılmaktadır.

### ABSTRACT

In this paper, the current state of the arch on dimensioning of rockbolts are outlined, discussed and some modifications to some existing models are made. The mathematical models are applied to the practical situations and the results are discussed.

(\*) Dr. Maden Y. Mühendisi, Nagoya Üniversitesi, Nagoya-JAPONYA

## 1. GİRİŞ

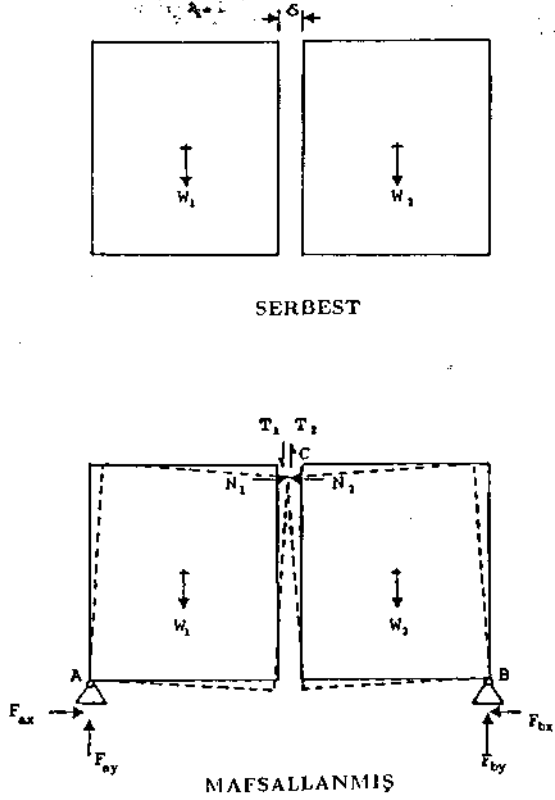
Kaya saplamalarının belli başlı tahkim edici etkilerinden birinin kaya kemeri oluşturma etkisi olduğundan literatürde sık sık söz edilmektedir. Bu etki, saplamalarla kaya bloklarının düşmesine ya da kaymasına engel olarak blokların yer değiştirmesine ve dönmesine mücadele ederek yalnızca basma gerilmelerinin etkilediği bir kemeri oluşturulması olarak belirir. Evans (1962), Galczynski ve Düdek (1978), Rabcewicz (1961), Straka (1963) ve Egger (1973) kemer oluşturma etkisi ile ilgili olarak saplamaların boyutlandırılmaları üzerine bir takım kuramsal çözümler önermektedirler.

Bu çalışmada, kaya saplamalarının kemer oluşturma etkisi üzerine saplamaların boyutlandırılmaları ile ilgili kuramlar gözden geçirilmekte. Uygulanabilirliği tartışılmakta ve yetersiz olanlar yeniden düzenlenmektedir. Kuramsal yaklaşımlar pratikte önemli sayılan durumlara uygulanmakta ve kuramların uygulanma sınırları anlatılmaktadır.

## 2. KEMERLENME

Açıklıkların kazısı sırasında ya da hemen ardından oluşan gevşeme zonu içinde kaya bloklarının yerçekiminin etkisiyle aşağıya doğru yer değiştirmesi ve dönmesinden dolayı kemerlenme olgusunun meydana geldiği ileri sürülmektedir. En basit bir örnek olarak Şekil 1 'de gösterilen aralarında 8 gibi bir aralık olan 2 blok düşünölsün. Eğer bu bloklar şekilde gösterilen A ve B noktalarında saptanamazlarsa yerçekiminin etkisiyle serbest olarak düşecekler ve kemerlenme meydana gelemeyecektir. Ancak bloklar A ve B'de saptanır ve dönmelerine izin verilirse belirli bir dönme ve yer değiştirmeden sonra C noktasında birbirlerine değeri konuma gelecekler ve dolayısıyla bir kemerlenme olgusu oluşacaktır.

Yerinde ya da laboratuvarında birkaç blok düşmesinden sonra açıklığın tavanında bir kemeri oluşturduğu sık sık gözlenmektedir. Bu kemeri, dıştan başka bir kuvvet (örneğin patlamadan dolayı oluşan dinamik kuvvetler) uygulanmadığı sürece duraylı kalacaklardır. Bu tür kemeri genellikle parabolik bir şekil aldığı ileri sürülmektedir (Trollope, 1966; Coates, 1967; Aydan, 1987). örneğin Prodyakov'un (1973) sınıflaması böyle bir kemeri ile



Şekil 1. Kemerlenme olgusu ile ilgili basit bir model.

tavan arasında kalan kısmın tahkimat üzerine yük olarak etkiyeceği varsayımına dayanmaktadır. Ancak parabolik kemer yalnızca düzgün yüklenme için söz konusu olup, diğer yüklenme durumları için parabolden farklı bir şekil olabilir.

## 3. KAYA SAPLAMALARININ BOYUTLANDIRILMASI

Burada süreksizliklerin uzaysal konumlarına yükleme koşullarına bağlı olarak saplamaların boyutlandırılması üzerine genel bir yöntem anlatılacaktır. Kemerler genelde iki tür yenilme şekline birinde yenilerek duraysızlık gösterirler. Bunlar:

1- Kemerin tepesinde ya da mesnetlerde basma yenilmesi

2- Mesnetlerde kesme yenilmesi ya da kemer içindeki bir süreksizlik boyunca kayma yenilmesi

Kemerler statik açıdan 3 mafsallı kiriş ola-

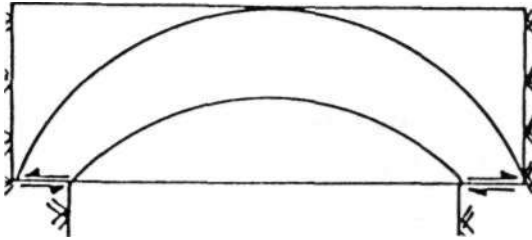
KEMERİN TEPESİNDE VEYA MESNETLERDE  
BASMA YENİLMESİ



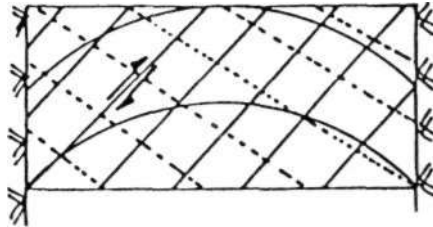
MESNETLERDE DÜŞEY KESME YENİLMESİ



MESNETLERDE YATAY KESME YENİLMESİ



KEMER İÇİNDE BİR SÜREKSİZLİK BOYUNCA  
KAYMA YENİLMESİ



Şekil 2. Kemerlerin yenilme biçimleri.

rak düşünülürler (Şekil 3). Sistemin denge koşulları olarak aşağıdaki ilişkilerin sağlanması gerekir:

$$\sum F_x = 0 \quad (1a)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (1b)$$

$$\sum M = 0 \quad (1c)$$

Açıklığın ortasına göre simetrik bir yüklenme fonksiyonu  $f(x)$  için, yukarıdaki ilişkiler aşağıdaki gibi açıkça yazılabilir:

$$\sum F_x = F_{ax} - F_{bx} = 0 - F_{ax} = F_{bx} = H \quad (2.a)$$

$$\sum F_y = W \frac{l}{2} - F_{by} l = 0 - F_{by} = \frac{W}{2} \quad (2.b)$$

$$\sum M_B = W \frac{l}{2} - F_{ay} l = 0 - F_{ay} = \frac{W}{2} \quad (2.c)$$

Burada

$$w(x) = \int_0^l \gamma f(x) dx$$

C noktasına (sağ veya sol tarafa) göre moment alınır

$$\sum M_c = F_{ax} ( = H ) i / c - F_{ay} i + ( - x ) = 0 \quad (3)$$

gibi bir ilişki elde edilir. Dolayısıyla yatay itki H

$$H = \frac{W}{2} \frac{c}{x} \quad (4)$$

olarak elde edilir.

Burada

$x$  : Yük vektörünün orijinden olan uzaklığı  
 $tf_c$  : Kemerin ortasında ve dayanaklarında yatay itki H'in etkidiği noktalar arasındaki uzaklık

Kemer içinde eğilme, kemerin eksenine göre itki ekseninin geometrik konumlarındaki farklılıktan kaynaklanır. Kemer içindeki aksiyel gerilim dağılımı aşağıdaki ilişkiden hesaplanabilir:

$$\sigma = a_0 (1 + 12 \frac{y}{t} \frac{e}{t}) \quad (5)$$

Burada

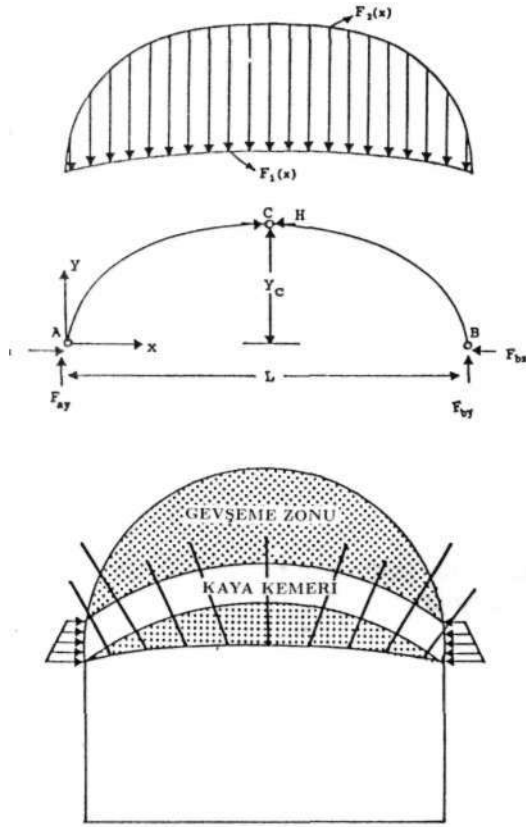
$t$  : Kemerin kalınlığı

$e$  : Kemerin eksenine göre itki ekseninin arasındaki sapma miktarı

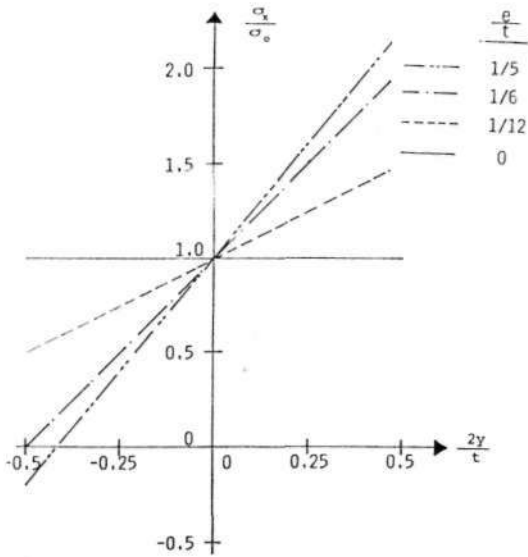
$y$  : Herhangi bir noktanın kemer ekseninden olan uzaklığı

$T$  : itki

$\sigma_0$  :  $T/t$



Şekil 3. Kaya kemerinin statik modeli.



Şekil 4. Kemer içinde gerilmenin \$(e/t)\$'ye olarak değişimi.

Yukarıdaki ilişkilerden anlaşılacağı gibi kemerin içinde aksenal gerilme dikdörtgen dağılımından üçgen dağılıma kadar bir değişim gösterebilir (Şekil 4). Kemer içinde çekme ge-

rilmelerinin oluşması bile mümkündür. Gevşeyen kayanın çekme gerilmelerine karşı dayanıksız olduğu da iyi bilinen bir gerçek olduğundan, kaya kemerinde ancak basma gerilmelerinin etkidiği bir kemer olacaktır. Kemer eğilmeye maruz kalmadığı zaman kemerin ekseni ile itki eksenleri çakışacaktır.

Kemer içindeki gerilmeler kayanın kesme ya da basma dayanımlarından yüksek olmaz. Varsayılan biryükleme fonksiyonu ve yenilme biçimi ve aksenal gerilme dağılım şekli için kemerin maksimum yüksekliği kolaylıkla hesaplanabilir. Burada önce kemerin yüksekliği ile \$t/c\$ arasındaki ilişkinin elde edilmesi gösterilecektir. Kemer içinde oluşacak en yüksek basma gerilmesi \$a\_a\$ ile gösterilirse kemerin içinde oluşan en yüksek gerilim ile kemere etkileyen yük arasında (Şenyur, 1983)

$$\frac{\sigma_{cr} t}{1 + 6n_e} = \frac{W\bar{x}}{2y_c} \quad (6)$$

gibi bir ilişki elde edilir. Dolayısıyla \$y\_c\$

$$y_c = (1 - \alpha(1 - 2n_e)) l_a \quad (7)$$

olarak elde edilir.

Burada

\$l\_a\$ : Kemerin yüksekliği

\$n\_e = e/t\$

Dolayısıyla kemerin yüksekliği (\$a\$

$$l_a = \sqrt{\frac{W\bar{x}(1 + 6n_e)}{2\sigma_{cr} \alpha(1 - \alpha(1 - 2n_e))}} \quad (8)$$

olarak elde edilir. Yukarıdaki bağıntının \$a\$'ya göre türevi alınırsa, \$a\$

$$a = \frac{1}{2(1 - 2n_e)} \quad (9)$$

olarak elde edilir. Buradan kemer kalınlığı \$t\$ ve \$y\_c\$

$$t = \sqrt{\frac{W\bar{x}}{2\sigma_{cr}} \cdot \frac{1 + 6n_e}{1 - 2n_e}} \quad (10)$$

$$y_c = \frac{l_a}{2} \quad (11)$$

olarak elde edilir. Saplamanın uzunluğu kemerin yüksekliğine eşit olarak alınırsa saplamanın uzunluğu saptanmış olacaktır. Kemerin kalınlığı ise varsayılan yenilme biçimine bağlı olarak bulunabilir. Yenilme kriterleri şu şekilde yazılabilir:

1 - Kemerin tepesinde basma yenilmesi

$$O_c = C T_c r \quad (12)$$

Saplama sayısının kemer ile tavan arasında kalan zonu kemere iletmek amacıyla göre saptanması gerekir (Şekil 5). Dolayısıyla saplamaların sayısı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir.

$$n = \frac{\gamma \int_0^L (F_2 - F_1) dx}{T_b} \quad (13)$$

Burada

$F_1(x)$  : Kemerin alt sınırının fonksiyonu

$F_2(x)$  : Tavanın fonksiyonu

$\gamma$  : Kayanın birim ağırlığı

$T_b$  : Saplamanın taşıma kapasitesi



Şekil 5. Kemerin taşıyacağı, askıya alınması gereken yükün tanımı.

2- Kemerin dayanaklarında kesme yenilmesi veya bir süreksizlikte kayma yenilmesi

Seçilen bir kemer kalınlığı için kemerin duraylılığının aşağıdaki yenilme durumları için ir-delenmesi gerekir.

i Kemerin dayanaklarında kesme yenilmesi durumu:

DURUM 1 : Saplamaların ankrajı dayanakları kesmiyor

Düşey kesme yenilmesi

$$W < c.kt + H \tan \theta \quad (14)$$

Yatay kesme yenilmesi

$$H = -\tan \theta + c.kt \quad (15)$$

DURUM 2: Saplamaların ankrajı dayanakları kesiyor

Düşey kesme yenilmesi

$$n > \frac{-(c.kt + H \tan \theta)}{T_b} \quad (16)$$

Yatay kesme yenilmesi

$$n > \frac{H - (-\tan \theta + c.kt)}{T_b} \quad (17)$$

Yukarıdaki ilişkilerde katsayı  $k$  varsayılan gerilme dağılımına bağlıdır.

ü. Süreksizlikte kayma yenilmesi: Kaymanın mümkün olduğu süreksizlik düzlemi, itki eksenini ile en küçük açı yapan ve de kemerin dayanaklarından kaynaklanan bir düzlem olacaktır. Değişik seviyelerde aksel gerilmeye maruz kalan saplamaların sayısı aşağıdaki koldan hesaplanabilir:

$$n = \frac{H}{T_b} \frac{-(\cos(\alpha - \gamma) - \sin(\theta - \gamma)) \tan \theta}{\cos \gamma} \quad (18)$$

$$Y = T_b (\cos \gamma - \tan \theta + \sin \gamma \tan \theta)$$

1.1

itki  $T$ 'nin süreksizlik düzlemi ile kesiştiği noktada yatayla yaptığı açı  $\gamma$  itki ekseninin o noktada türevini almakla şu şekilde elde edilir:

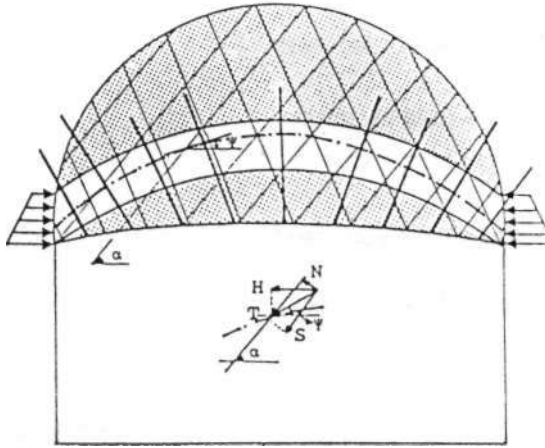
$$\gamma = \arctan \left( \frac{dy}{dx} \right) \quad (19)$$

Kayanın kırılması mümkün değilse sapla-

maların toplam sayısını ve uzunluğunu saptamada aşağıdaki gibi bir yöntem izlenebilir.

Süreksizlik düzleminde etkiyen kuvvetlerin durumu Şekil 6'da gösterildiği gibi düşünülebilir. Kemerin duraylılığı için aşağıdaki eşitsizliğin sağlanması gerekir:

$$\int_0^{\pi} \frac{2H}{\cos y} (\cos(a-y) - \sin(a-y) \tan \phi) dy \leq \sum_{i=1}^n T_i \cos \alpha_i + \sin \alpha_i + T_i \quad (20)$$



Şekil 6. Kemer içindeki bir süreksizlik düzleminde etkiyen yük sistemi

Dolayısıyla zc saplamalar aynı seviyede bir yüklenmeye maruz kaldığı varsayımıyla

$$u = \frac{Wx \cos a (\frac{r_0}{l} - l \cos y_0 \tan \theta) - \sin x (l \cos K + y_0^* \tan \theta)}{2 n T_b (\cos \epsilon - \tan \theta + \sin \epsilon + T_i)} \quad (21)$$

şekline dönüşecektir. Mesnetlerde itki eksen denkleminin türevi aşağıdaki gibi yazılabileceği

$$v_0 = \arctan \left( \frac{v}{x} \right)_{x=0} \quad (22)$$

için x = 0'da aşağıdaki bağıntı elde edilecektir.

$$\frac{v}{x} = \left( \frac{v}{x} \right)_{x=0} \quad (23)$$

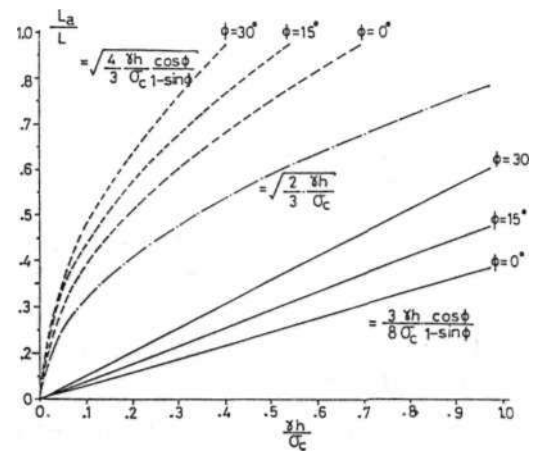
Newton-Raphson öteleme yöntemi kullanılarak varsayılan bir saplama sayısı önce  $\sqrt{x}$

daha sonra ye elde edilir. Dolayısıyla kemerin yüksekliği bundan sonra kolaylıkla bulunabilir.

Burada W, x ve ye için özel değerler verilmemesine karşın, bu değerler seçilen yüklenme ve tavan şekli için kolaylıkla hesaplanabilir.

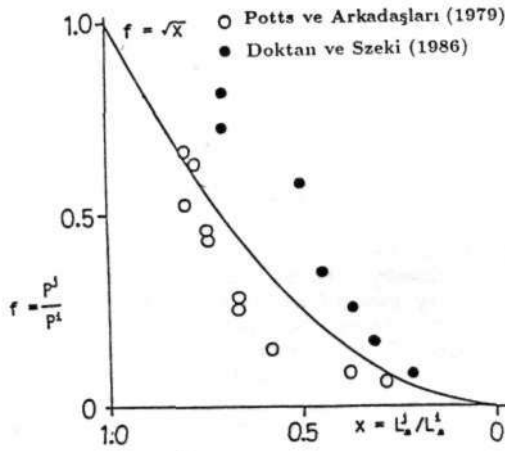
#### 4. UYGULAMALAR

Bir önceki bölümde saplamaların boyutlandırılması üzerine verilen bağıntılardan da anlaşılacağı gibi saplamaların güvenilir bir biçimde boyutlandırılabilmesi için değişik yenilme durumlarının gözönüne alınması gerekmektedir. Bu durumları gözönüne alarak düzgün bir yüklenme fonksiyonu ve düz bir tavan için yapılan analizlerin sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir. Sonuçlar açıklığın genişliği ile normalize edilmiş gerekli kemer yüksekliğinin, değişik parametrelere ve yenilme biçimine bağlı olarak değişimini göstermektedir. Sürekli çizgiler kemerin dayanaklarında düşey kesme yenilmesini gözönüne alan ilişki kullanılarak hesaplanmıştır. Kesikli çizgiler dayanaklarda yatay kesme yenilmesini gözönüne alan ilişkiyi kullanarak hesaplanmıştır. Noktalı kesikli çizgi ise basma tipi yenilme gözönüne alınarak hesaplanmıştır. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi yatay yönde kesme tipi bir yenilmenin oluşma olasılığı oldukça yüksektir. Madencilik ve inşaat mühendisliği alanlarında kullanılan saplama uzunluğu genellikle açıklığın genişliğine olan oranı  $1/4=1/2$  olması nedeniyle kemerler kayacın tek eksenli dayanımının  $1/5=1/20$ 'e kadar olan gerilmelere direnç gösterebilirler.



Şekil 7. Yenilme türüne bağlı olarak elde edilen ilişkilerin karşılaştırılması

Potts ve arkadaşları (1979) ile Doktan ve Szeki (1986)'nin İngiltere'deki kaya tuzu madenlerindeki duraylılık problemi ile ilgili kaya kemerleri üzerine yaptıkları laboratuvar çalışmalarının sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerinin sözü edilen yayınlarda verilmemesi nedeniyle genişliği en az olan kemerin direncine göre normalize edilerek gösterilmiştir. Normalize edilerek verilen sonuçlarla normalize edilen ilişkilerden elde edilen fonksiyonun  $f = \sqrt{x}$  oldukça iyi bir uyum içinde oldukları şekilden de kolaylıkla görülmektedir. Yenilme biçimi ne olursa olsun deneysel sonuçlar kemerlenme olgusunun varlığını açık bir şekilde vurgulamaktadır.



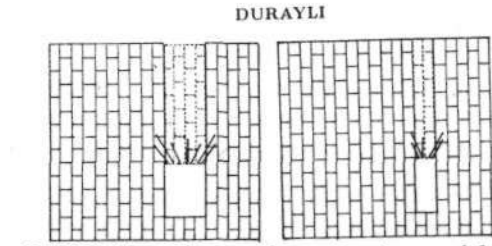
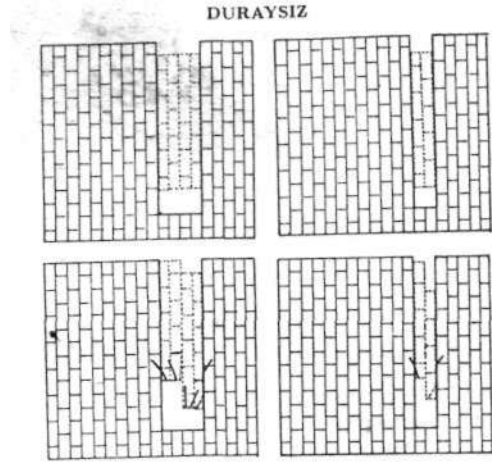
Şekil 8. Kuramsal sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Süreksizlikler içeren bir kaya kütlesi içinde açılan yeraltı açıklıklarında saplamaların kemer oluşturma etkisi üzerine taban sürtünmeli model deney aracını (base friction apparatus) kullanarak bir takım model deneyleri yapılmıştır. Kaya içinde süreksizlik takımları 15 x 30 x 60 mm'lik plastik blokların değişik biçimde düzenlenmesi ile oluşturulmuş, kaya saplamaları olarak 3 mm genişlikte ve duraylı bölgede 30 mm ankraj uzunluğuna sahip ince selo-teyp şeritler kullanılmıştır. Saplamaların yerleştirilme düzeni olarak

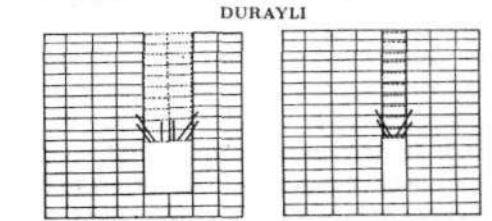
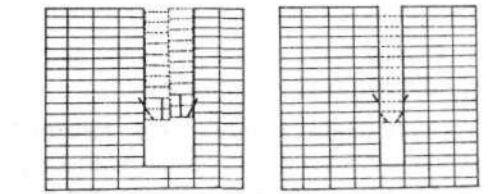
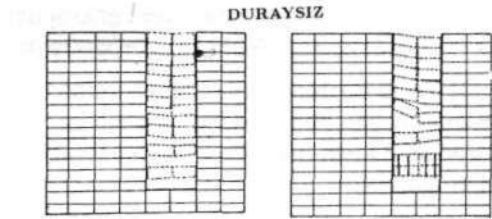
1 - Tavan hattına dik (dayanaklarda çaprazlamasına saplama yok) düzen ve

2- Radyal düzen (dayanaklarda çaprazlamasına saplamalar var) uygulanmıştır.

Saplamaların sayısı açıklıkların duraylılığı sağlanıncaya kadar artırılmıştır. Deney sonuç-

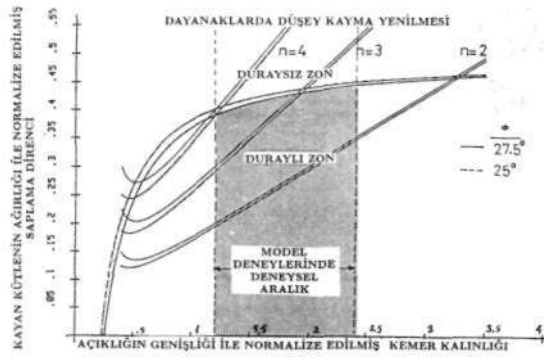


Şekil 9. Kemerlenme olgusu üzerine model deneyleri (kesikli süreksizlik takımları).



Şekil 10. Kemerlerime olgusu üzerine model deneyleri (kesiksiz süreksizlik takımları).

larının bir kısmı Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir. Önceki bölümde sunulan çözümler uygulanmadan önce deneylerde kemerlenme ile ilgili olarak gözlenen birkaç önemli noktanın burada vurgulanmasında yarar bulunmaktadır.



Şekil 11. Kuramsal sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

1- Saplamlar tavana dik olarak düzenlendiğinde ve kaymanın mümkün olduğu süresizlik düzlemlerini kesmediği durumda, kemerlenme olgusu meydana gelmemiştir. Bu durumda kaya saplamlarının sayısının ve uzunluğunun hiç bir etkisi gözlenmemiştir. (Şekil 9 ve 10)

2- Diğer yandan saplamlar radyal olarak düzenlendiğinde ve kayma düzlemlerini kestiği durumda kemerlenme olgusu gözlenmiş ve bu durumda açıklığın duraylılığının saplamların sayısına ve duraylı bölgedeki ankraj uzunluğuna sıkı sıkıya bağlı olduğu görülmüştür.

Özellikle bu deneysel çalışma kemerlenme olgusunun oluşabilmesi için gerekli ve yeterli aşağıdaki 2 koşulun önemini iyi bir şekilde vurgulamaktadır:

- Kemer içinde bloklar arası kaymadan kaynaklanan yer değiştirmeler engellenmeli,
- Bloklar arası dönmenin belirli bir miktar oluşturulmasına izin verilmelidir.

Yapılan model deneylerinde, tahkimatsız durumda açıklığın yan duvarlarından kaynaklanan iki süresizlik düzlemi boyunca kayma gözlenmiştir. Bu nedenle olması mümkün yenilme şekli olan düşey kayma ile ilgili formüller kullanılarak saplamların kemer oluşturma etkisi incelenmiştir. Şekil 11, kayan kütleliğin ağırlığı ile normalize edilmiş gerekli saplama direnci ile kayma düzlemlerini kesen ve duraylı bölgeye ankraj edilmiş saplamların sayısının 2,3 ve 4 olduğu durumlarda saplamların sağladığı dirençleri göstermektedir. Saplamların sayısı 2 olduğunda hesaplar açıklıkların duraylı olamayacağını göstermekte ve yapılan deneylerde bunu doğrulamaktadır. Diğer yandan saplama sayısı 4 olduğunda açıklıkların

duraylı olması gerekmekte ve bu durum deneylerde de doğrulanmaktadır.

## 5. SONUÇLAR

Saplamların kaya kemeri oluşturma etkisi, saplamların yerleştirilme düzeni kemerlenmenin olabilmesi için gerekli ortamı oluşturacak şekilde ve yeterli bir direnç sağladığı takdirde mümkündür. Kemer oluşturma etkisi ile ilgili olarak saplamlar açıklığın geometrik şekli ve kaya kütlelerinin fiziksel özellikleri ile Jeolojik durumuna bağlı olarak olması mümkün yenilme şeklini gözönüne alarak boyutlandırılmalıdır.

Saplamların kemer oluşturma etkisi ile ilgili olarak değişik yenilme biçimlerini gözönüne alarak elde edilen çözümler, elde edilmesinde varsayılan durumlar için doğrulukları sınanmış olup güvenle pratikte saplamların boyutlandırılmasında kullanılabilirler.

## KAYNAKLAR

- AYDAN, Ö., 1987; "Trap Door Experimental Study on the Stability of Tunnel Headings in Granular or Heavily Jointed Rock Mass", Int. Rep. Dep. of Geotech. Engng., Nagoya University.
- COATES, D.F., 1967; "Rock Mechanics Principles", Dept. of Energ., Mines and Resources.
- DOKTAN, M., ve SZEKI, A., 1986; "Yeraltı Açıklıklarında jüzlemsel Kemer Yapısı ve Özellikleri, Procs. 1st National Rock Mechanics Symp., Ankara, TSRM s. 19-32
- EGGER, P., 1973; "Rock Stabilisation", Rock Mechanics, Courses and Lectures, Udine.
- EVANS, W.M., 1960; "Roof Bolting and the Stabilisation of Natural Arches of Roadways", Colliery Engng., July.
- GALEZYNSKI, S., DUDEK, J., 1978; "Optimierung des Ausbaues in Untertägigen Hohlräumen Beispiel: Ankerbau", Rock Mechanics, Suppl.
- POTTS, E.L.J., SZEKI, A., WATSON, S.H., ve MOTTACHED P., 1979; "The Evaluation of the Design Criteria for an Underground Roof Strata Considered as a Linear arch Structure", Procs. of the 4th Int. Conf. Rock Mechs. ISRM. Montreux.
- PROTODYA, KONO., 1973; "The Art of Tunneling by K. Szeki, Akademiai Kiado, Budapest.
- RABCEWIEZ, L., 1961; "Spritzbeton und Ankerung als Hilfsmittel zum Vortrieb und Al Endgültiger Tunnel-ausbau," Berg und Hüttenmännische Monatshefte. H 5-6 Vol. 106.
- STRAKA, J., 1963; "Support of Underground Excavations by Roof bolting", Inzenyrske, Praha. Vol. 6
- ŞENYUR, G., 1983; "Statics and Dynamics", MAD 221-20 Lecture notes, Beytepe, Ankara.
- TROLLOPE, 1966; "The Stability of Trapezoidal Openings in Rock Masses", Rock Mechs. and Engng. Geology, Vol.4, No. 3.