

# *Kaya Şevlerinde Devrilme Türündeki Bozulmaların MeUaniği ve Deneysel İrdelenmesi*

Dr.CanerZANBAK(\*)

## ÖZET

*Kaya şevlerinin duraylılığı çalışmalarında üzerinde en fazla durulan bozulma türleri, süreksizlik yüzeyleri, ya da malzemenin kesilmesi ile oluşan eğrisel yüzeyler boyunca ortaya çıkan kaymalardır. Süreksizlikler içeren kaya ortamlar içinde ortaya çıkabilecek kaymalar, kaya bloklarının kinematik koşullarına bağı olarak oluşur. Süreksizlikleri şev içine eğimli olan kaya şevlerinde, kinematik koşullardan ötürü, kayma beklenemez. Ancak, bu tür şevlerde, süreksizliklerle sınırlandırılmış kaya kolonlarının devrilmeleri ile ortaya çıkan şev bozulmaları, duraylılık açısından önem kazanmaktadır.*

*Yazıda, son on yıl öncesine kadar üzerinde yeterince çalışılmış bir bozulma türü olan "Devrilme" terin uygulamada gözlenen bazı örnekleri, şev içinde oluş mekanizmaları, sayısal analizleri için yapılan yaklaşımlar ve devrilmeye etkileyen çeşitli yapısal parametrelerin incelendiği model çalışmalardan elde edilen gözlemlere dayalı yorumlar verilmektedir.*

## ABSTRACT

*In rock slope stability practice, the mostly studied failure modes are sliding along preexisting discontinuities and curved failure planes through the rock or soil material caused by the excess shear stresses. Slides in discontinuous rock masses are controlled by kinematic conditions of the rock blocks besides the mechanical parameters of the rock media. Due to kinematic restrictions, no sliding can be expected in rock slopes with undercutting discontinuities. However, for such slopes, toppling failure of the rock columns bounded by the discontinuities have importance in terms of stability.*

*In this article, a general review of toppling process and approaches for their numerical analysis, along with some field examples, are given. Observations and interpretations of toppling processes under several structural parameters on a two - dimensional model study are presented.*

(\*) İTÜ Maden Fakültesi  
Mühendislik Jeoloji ve Kaya Mekanikliği Bölümü

## 1. GİRİŞ

Mühendislik çalışmalarında şevlerin duraylılığı konusunda en fazla İncelenen bozulma türleri, genellikle süreksizliklerle ya da malzemenin kesilmesi ile oluşan düzlemsel veya eğrisel yüzeyler boyunca ortaya çıkan kaymalardır. Zeminler ya da gelişi güzel (sistematik olmayan) süreksizlikleri İçeren kaya ortamlarda açılan şevler İçin, eğrisel yüzeyler üzerinde kayma kavramı halen geçerlidir. Sistematik süreksizlik takımlarını içeren kaya ortamlar içindeki şevlerin duraylılığı, herseyden önce, ortam İçindeki blokların kinematik koşullarına bağlıdır. Eğer kinematik koşullar blokların kaymasına uygunsa, şev bozulması blokların kaymaya karşı limit dengesi koşulunca denetlenir. Kayma türündeki şev bozulmaları ile ilgili bilgiler bu konuda yayınlanmış çok sayıdaki kaynak yazılarından elde edilebilir (Goodman, 1976; Hendron ve diğerleri, 1971; Hoek ve Bray, 1977; John, 1969; Londe, 1973; Wittke, 1965; Zanbak, 1978).

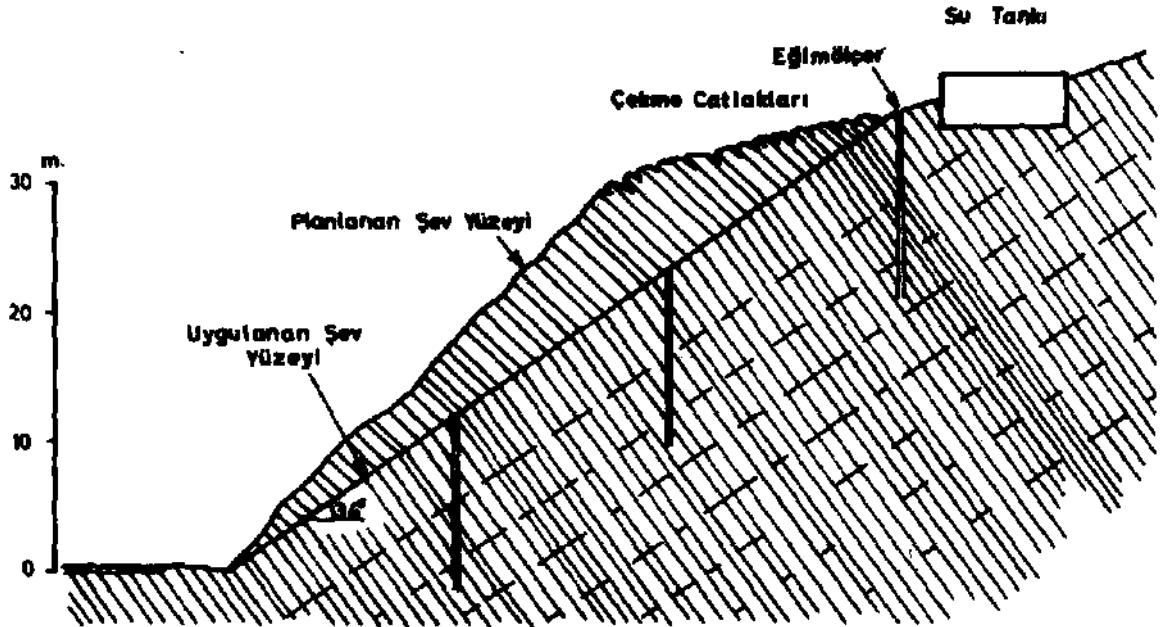
Kaya şevlerinde kayma türü dışındaki bir bozulma türü olan "Devri İme" İere son on yıla kadar yeterince önem verilmemiş ve mühendislik araştırmalarında sadece bir kolonsu kaya bloğunun bir düzlem üzerinde devrilmesi gibi basit bir kavram işlenmiştir. Ancak, daha sonraları, devrilme türündeki şev bozulmalarının doğada gözlenmesi ve mühendislik-

te karşılaşılan örnekleri, bu tür bozulma üzerindeki çalışmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur (de Freitas ve Walters, 1973; Bukovansky ve diğerleri, 1974; Goodman ve Bray, 1976). de Freitas ve Walters (1973) İngiltere'de arazide gözledikleri üç devrilme türü bozulma hakkında çok ayrıntılı bilgiler vermişlerdir. Bukovansky ve diğerleri (1974) İspanya'da devrilme türü bozulma karşısında, bu tür bozulma İçin gerekli mekanik kavramların yetersizliği nedeniyle çok fazla miktarda kazı yapılarak şev eğiminin azaltılması yoluna gidildiğini belirtmişlerdir (Şekil 1).

Goodman ve Bray (1976), devrilmelerin oluşum mekanizmasını malzemenin göre dört ayrı grup içinde değerlendirmişlerdir. Bu sınıflamaya göre, devrilmeler:

1. Bükülme devrilmesi
2. Blok devrilmesi
3. Blok-bükülme devrilmesi
4. İkincil devrilmeler

olarak adlandırılmıştır (Şekil 2 a,b). Bu gruplandırmanın yanı sıra, yazarlar eğilimli bir basamaklı yüzey üzerinde duran rijid kolonların (blokların) devrilme analizine statik bir yaklaşım yapmışlardır. Ancak bu yaklaşım düz bir eğilimli yüzey üzerinde duran rijid kolonların devrilme analizi için geçerli olmamaktadır. Goodman ve Bray (1976)



Bukevantky, Rodriguez, Cedrun (1974)

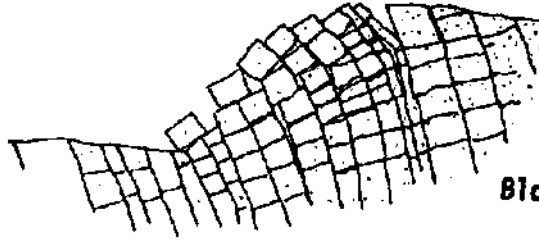
Şekil 1. İspanya'da bir karayolu kazısında ortaya çıkan devrilme türü bozulma



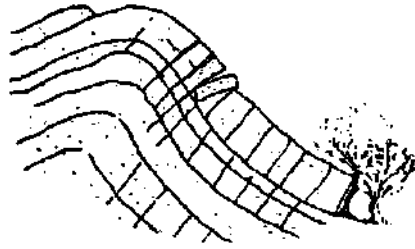
**Bükülme Devrilmesi**



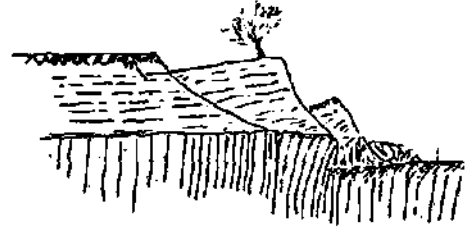
**Blok Devrilmesi**



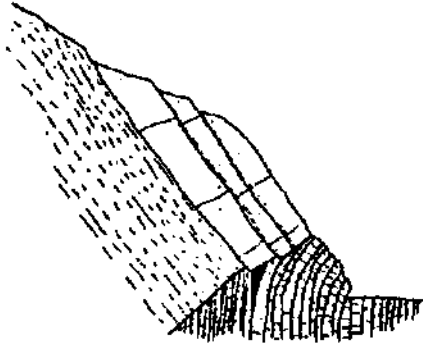
**Blok-Bükülme Devrilmesi**



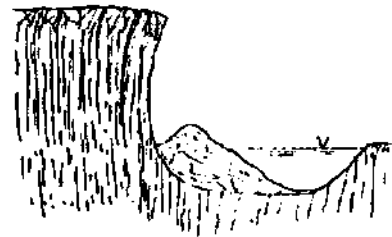
**Kayma Tepesinin Devrilmesi**



**Kayma Tabanı Devrilmesi**

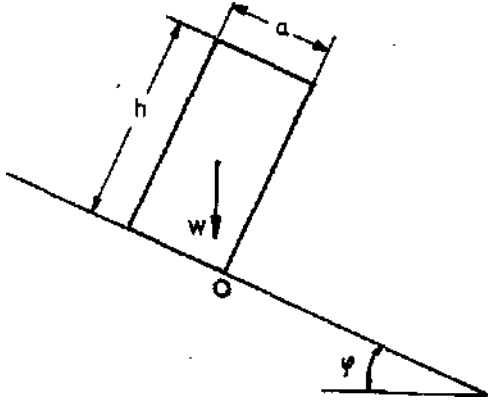


**Kayma Topuğu Devrilmesi**



**Çekme Çatlağı Devrilmesi**

Şekil 2. Devrilme Türleri



Şekil 3. Eğimli bir düzlem Üzerindeki kolonun devrilmeye karşı duraylılığı

tarafından ortaya konan analiz yönteminin esasları ve geçerlilik koşulları ilerideki paragraflarda karşılaştırılacaktır.

## 2. DEVRİLME TÜRÜNDEKİ BOZULMANIN STATİK ANALİZİ

Eğimli bir taban düzlemi üzerinde duran bir bloğun duraylılığı, blok düzlem üzerinde kaymaya karşı duraylı ise, devrilmeye karşı da incelenmelidir. Devrilme, bloğun ağırlık vektörü blok taban dışına çıktığında oluşur. Eğimli bir yüzey üzerindeki bir bloğun devrilmeye karşı güvenlik sayısı 0 noktası etrafındaki momentlerin eşitliğinden (Şekil 3):

$$G_s = \frac{2 \text{ Bloğun devrilmesini önleyen momentler}}{2 \text{ Bloğu devirmeye çalışan momentler}}$$

yani:

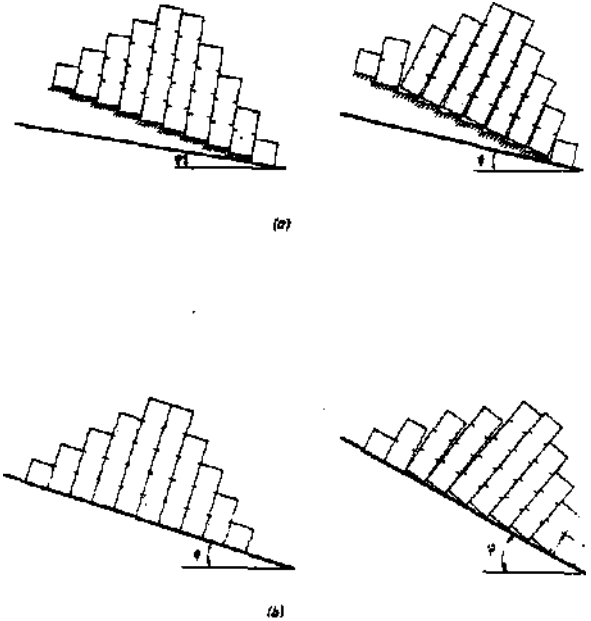
$$G_s = \frac{W \cdot \cos \phi \cdot a/2}{W \sin \phi \cdot h/2} < p$$

olarak bulunabilir.

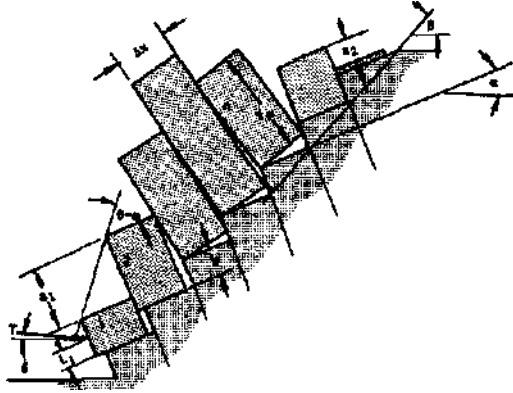
Ancak kolonsu yapılı (süreksizlikleri birbirine paralel) bir kaya ortamda kazılan bir şevde ortaya çıkan devrilme mekanizması, bir kolonun devri I-mesindeki kadar basit değildir. Şev içindeki kolonların duraylılığı, devrilen kolonların birbirlerine ilettikleri kuvvetlerin karşılıklı ilişkilerinin

bir ürünüdür. Devrilen kolonların birbirleri üzerinde yerdeğiştirmesi sırasında kolonların değme yüzeylerinde ortaya çıkan kayma dirençleri sevin tüm duraylılığı üzerinde önemli rol oynarlar.

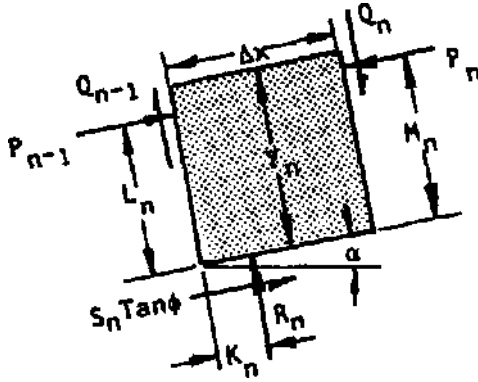
Bükülme devrilmesi, devrilen kolonlar üzerine etkileyen kuvvetlerin etkisi altında kolonlarda oluşan şekil değiştirme ve kırılmalar sonucu ortaya çıkar. Bu tür devrilmenin analizine sonlu elemanlar yöntemi ile bir yaklaşım yapılabilir. Halen bu konu üzerinde çalışılmaktadır (Goodman ve Bray, 1976). Özellikle sağlam kaya ortamlardaki kolonsu yapılarda, düşük gerilmeler artında, kolonların rijit olduğu varsayımı ile, devrilme analizi limit denge yöntemleri ile incelenebilir. İleride de belirtileceği gibi, kolonların oturduğu eğimli taban yüzeyi düz ise limit denge analizi daha karmaşık olur ve problem statik olarak belirsiz hale gelir. Ancak, kolonların oturduğu eğimli taban yüzeyi basamaklı ise Ümit denge analizi basitleşir. Eğimli taban yüzeyinin düzlem ve basamaklı olması halinde, devrilme mekanizmalarındaki farklılıklar Şekil 4 a,b'de görülmektedir.



Şekil 4. Eğimli taban düzlemi üzerinde oluşabilen devrilmeler için farklı statik koşullar  
a. Basamaklı taban düzlemi  
b. Düz taban düzlemi



Şekil 5. Basamaklı taban düzlemi Üzerindeki kolonların devrilmesi



Şekil 6. Basamaklı bir taban düzlemi üzerindeki n inci bir bloğun üzerine etkileyen kuvvetler

## 2.1. BASAMAKLI BİR EĞİLİM DÜZLEM ÜZERİNDEKİ KOLONLARIN DURAYLILICI

Şekil 4 a ve Şekil 5'de görüldüğü gibi kaymaya karşı duraylı olan basamaklı bir eğimli düzlem üzerindeki kolonlardan oluşan bir şev ele alalım. Şevin tepesindeki kısa kolonlar devrilmeye karşı duraylı olduğundan, şevin bu kısımlarında herhangi bir bozulma olmayacaktır. Ancak devrilmeye karşı güvenli olmayan kolonlar eğim aşağıdaki alt köşeleri etrafında devrilecek ve eğim aşağı yanındaki kolona yaşlanacaktır. Diğer kolonlarda da devrilmeler olacak ve kolonların dokanak noktalarında yerdeğiştirmeden ötürü sürtünme kuvvetleri ortaya çıkacaktır. Şev topuğuna doğru inildikçe (kolon boylan kısaltıkça) kolonların devrilmeye teatı güvenlikleri artacağından dolayı bu kolonlar-

da devrilen kolonların itkileri nedeni He devrilme yerine taban üzerinde kaymalar görülecektir. Tüm şevin duraylılığı, devrilmeye karşı güvenli olan şev topuğundaki kolonların, devrilen kolonların uyguladıkları itki kuvvetleri etkisi altında, kaymaya karşı dirençleri ile denetlenecektir.

Goodman ve Bray (1976) tarafından geliştirilen analitik limit denge yaklaşımında devrilme analizi statik olarak belirli hale dönüştürmek için yapılan varsayımlar aşağıda verilmiştir.

- Kolonların oturduğu taban basamaklı bir eğimli düzlemdir.
- Kolonların değme noktalarında ortaya çıkan kesme direnci» değme düzlemlerinde etkileyen normal kuvvetler ve bu düzlemler arasındaki sürtünme katsayısı ile orantılıdır.
- Şev bozulması, devrilen kolonlar tarafından uygulanan itki kuvvetleri altında şev topuğundaki kolonların kayması ile oluşur.
- Kolonlar rijittir.

Kolonların devrilmeleri tabanlanndaki bir dayanma çizgisi üzerinde dönme şeklinde ortaya çıktığından, devrilme analizi için kolonlar üzerine etkileyen kuvvetlerin bu dayanma çizgilerine olan moment kollarının bilinmesi gerekir. Devrilen kolonların eğim aşağıdaki komşu kolonlara değme noktalan kolon geometrisinde bulunabilir. Şekil 4 a' daki n inci kolonun devrilme sonucu n-1 inci kolona uyguladığı kuvvet hesaplanabilir. Kolonların aralarındaki sürtünme açıları da bilinirse n İnci kolon üzerine etkileyen kuvvetler Şekil 6'da görüldüğü gibi olacaktır. Limit denge durumunda, devrilmeler nedeni ile blokların birbirlerine ilettikleri kuvvetler n inci bloklar için (Şekil 7 a):

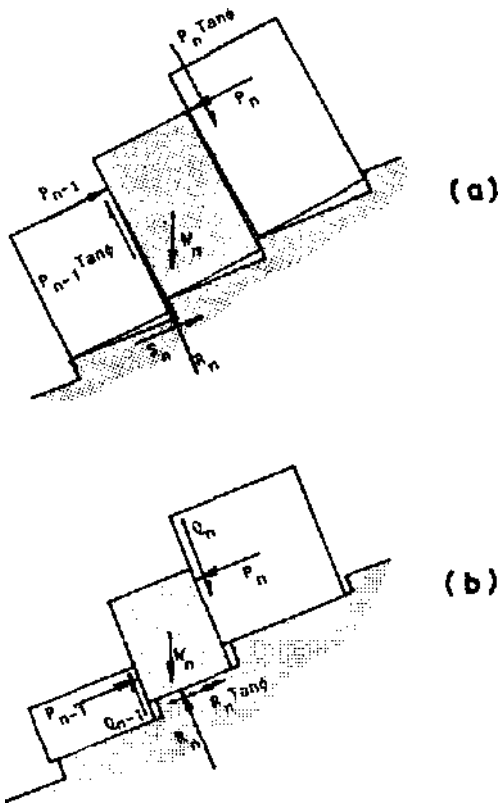
$$P_{n-1} = \frac{P_n \cos \alpha - W_n \sin \alpha}{1 - \tan \alpha \tan \phi}$$

olacaktır.

Şev topuğundaki kayan blokların limit denge durumunda birbirlerine ilettikleri kuvvetler n inci blok için (Şekil 7 b):

$$P_{n-1} = P_n \frac{W_n (\tan \phi \cos \alpha - \sin \alpha)}{1 - \tan^2 \alpha}$$

olarak bulunabilir.



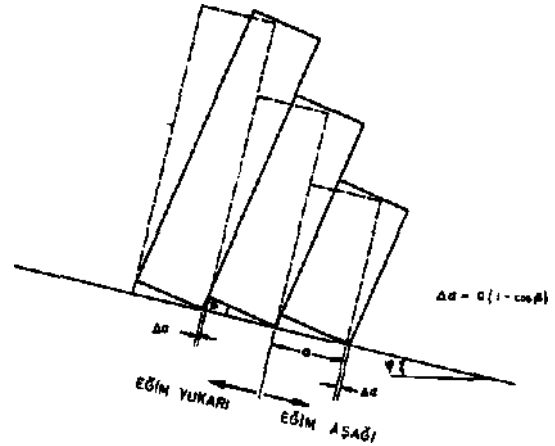
Şekil 7. Basamaklı bir taban düzlemi üzerindeki kolonların limit denge durumları  
a. n. inci kolonun devrilmesi  
b. Şev topuğundaki n. İnci kolonun kayması

Devrilen kolonlardan oluşan bir şevin duraylılığı şev dibindeki kolonun (kolonların) duraylılığına bağlı olarak tanımlanabilir. Buna göre, eğer şev topuğundaki kolon (lar) devrilen kolonlar tarafından iletilen itki kuvvetleri altında kaymaz ise, tüm şev du raylı olmaktadır. Bu irdelemeden, devrilen kolonlardan oluşan bu tür bir şevin duraylılığının artırılması için topuk kısmının sağlamlaştırılmasının yeterli olduğu görülmektedir.

## 2.2. DÜZ BİR EĞİK DÜZLEM ÜZERİNDEKİ KOLONLARIN DURAYLIĞI

Goodman ve Bray (1976) tarafından verilen devrilme analiz yöntemi kolonların oturduğu yüzey düz olunce geçerliliğini kaybetmektedir. Basamaklı taban yüzeyi halinde devrilen kolonlar belirli noktalarda birbirlerine değerklerken, düzlem taban yüzeyi hafinde devrilme sırasında kolonlar birbirlerine ile

düzlenler boyunca değerkler. Düz taban yüzeyi halinde, her kolonun devri lebilmesi için gerekli kinematik koşullardan ötürü, kolonların devrilmeleri başladığında, şevin bir kısmındaki kolonlar eğim aşağıya diğer kısmındaki kolonlar da eğim yukarıya doğru taban üzerinde kayarlar (dilatans) (Şekil 8). Bunun yanısıra, devrilme sırasında kolonlar arasında oluşan açılmaların (çekme çatlakları) konumları da taban yüzeyinin basamaklı ya da düz olmasına göre değışir (Şekil 4 a,b).



Şekil 8. Düz bir taban düzlemi üzerinde devrilen kolonlardan oluşan dilatans

Düz bir taban yüzeyi üzerindeki bir n. İnci kolon üzerine devrilme sırasında uygulanan kuvvetler Şekil 9'da görülmektedir, n'inci kolonun limit denge durumunda üzerine etkiyen  $P_{n+1}$  ve  $P_n$  kuvvetlerinin hesaplanması, kuvvetlerin değme noktaları üzerindeki konumları bilinmediğinden ötürü, problemin çözümü statik açıdan belirsizdir. Bu nedenle çözüme, ancak deneysel bir çalışma sonucu yaklaşılabilir.

Yukarıda da belirtildiği gibi, kolonların birbirlerine yan yüzeyleri boyunca değerek devrilmeleri sonucu, kolonlar taban üzerindeki değme noktaları üzerinde eğim aşağıya ve eğim yukarıya kayarlar. Bu kaymalar, ancak kolonların dönme noktalarında oluşan kayma dirençleri yenildiğinde ortaya çıkar. Eğer şevin eğik düzlem üzerindeki iki ucu serbest ise, devrilme sırasında, kolonlar eğim aşağı ve eğim yukarı kayar (kolonlar birbirine değmekte) ve şevde bir bozulma görülür. Şev içindeki kolonlar hem eğim aşağı hem de eğim yukarı hareket ettiklerine göre, şev içinde bir hareketsiz noktanın bulunması gereklidir. Bu noktadaki eğim aşağı ve eğim yukarı

kayma dirençleri eşit olacaktır.

Şekil 10'da görüldüğü gibi, düz bir yüzey üzerindeki kolonlar ile yapılan model çalışmalarının sonuçlarına göre, en yüksek kolonun eğim aşağı tarafındaki kolonlar, topuktaki kolon hariç, yan yüzeyleri üzerinde birbirlerine değler. En yüksek kolonun eğim yukarı tarafındaki kolon da devrilme gösterir, ancak etrafındaki kolonlarla noktasal dokanagi vardır. Bu kolonun eğim yukarıdaki kolonlar devrilmeye karşı, kendi duraylılıkları nedeni ile, bir dönme göstermezler. Devrilme sırasında ortaya çıkan bu farklı dönmeler nedeni ile kolonlar arasında bir takım açılmalar oluşur (Çekme çatlakları). Yüzeysel dokanagi olmayan kolonlar devrilme sırasında taban noktalarında bir açılma göstermeyeceklerinden dolayı, bu tür kolonlardan oluşan bir bölge içinde taban noktalarında yerdeğiştirme (dilatans) oluşmayacaktır. Devrilen kolonların aralarında açılmaların oluştuğu bölge "**Çekme Çatlaktan Bölgesi**" olarak adlandırılacaktır (Şekil 10). Eğim yukarı en yüksek kolon şev içinde çekme çatlaklarının başladığı bölge ile yüzeysel dokanıklı devrilmelerin oluştuğu bölge arasındaki sınırı belirler.

Daha önce de belirtildiği gibi, devrilme sırasında birbirleri ile yüzeysel dokanakları bulunan kolonların limit denge analizi için, statikçe belirsiz olduğundan ötürü sayısal bir yaklaşım yapılamamaktadır. İteriki bölümlerde açıklanacak olan model çalışması sonuçları üzerine kurulacak olan analiz yaklaşımı üzerinde çalışmalar halen ilerlemektedir. Bundan sonrası bölüm, yapılmış olan model çalışmasından elde edilen bilgilerin, statik yaklaşımda yararlanılacak olan yorumlarını kapsayacaktır.

### 3. DEVRİLME TÜRÜNDEKİ BOZULMALARIN MODEL ÇALIŞMALARI İLE ANALİZİ

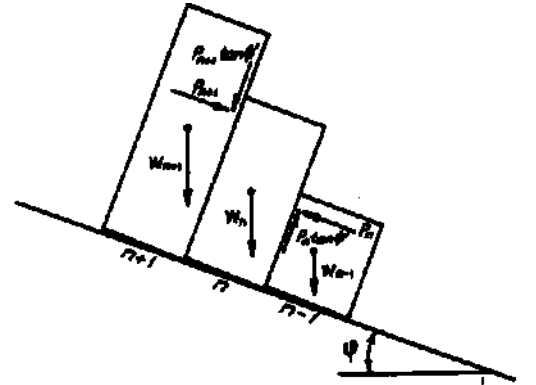
Eğik bir taban düzlemi üzerinde dizilmiş kolonlardan oluşan bir şev modeli üzerinde, taban düzleminin eğim açısı artırılarak oluşturulan devrilme bozulmasının mekanizmasını araştırmak üzere bir seri model çalışmalar yapılmıştır (Zanbak, 1978). Kolonları oluşturan model malzemesi olarak 10 cm'lik özel alçı kübler; taban düzlemi olarak, özel alçı ile hazırlanmış düzlem levha kullanılmıştır. Taban düzleminin eğim açısı özel bir deney düzeni ile

yavaş olarak artırılmıştır. Rijit kolonlar, küblerin birbirlerine yan yüzeyleri üzerinde bağlanması ile elde edilmiştir. Basamaklı taban düzeyi üzerinde yapılan deneyler için 1.25 cm yükseklik farkı, aynı özel alçı malzemesinden yapılmış basamaklar kullanılmıştır. Eğim açısının artırılması esnasında ortaya çıkan blok ve kolonlarda ki yerdeğiştirmeler sürekli olarak gözlenmiştir. Deneyler sırasında ortaya çıkan blok hareketlerinin yorumunu yapabilmek için kolonların buldukları konumunu sayısal olarak tariflenmesi gerekmiştir. Bu amaçla eğik düzlem üzerindeki model şevin bulunduğu taban eğim açısı için kaymaya karşı güvenlik sayısı değerleri kullanılmıştır. Yani, herhangi bir eğim açısında ( $\alpha$ ) oluşan bir yerdeğiştirme için şevin o konumdaki güvenlik sayısı:

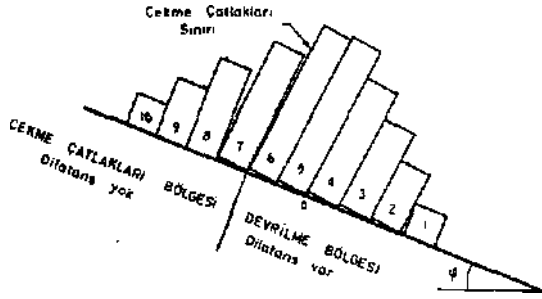
$$G_s = \frac{\tan \alpha}{\tan \phi}$$

olarak tanımlanmaktadır ( $\phi < \alpha$  bloklarla süreksizlik yüzeyi arasındaki sürtünme açısıdır).

Eğimli yüzey üzerindeki şev kitesinin tek parçalı (bloksuz, kolonsuz) olması halinde kayma anındaki güvenlik sayısı 1.0 olacaktır. Ancak, şev kitesi parçalı olduğundan ve bozulma mekanizması kayma türünde olmadığından, şevlerin bozulma anındaki güvenlik sayıları 1.0'dan büyük olmaktadır. Do lay t s ile herhangi bir bozulma anında hesaplanan güvenlik sayısının büyüklüğü bozulma mekanizmasının şevin duraylılığına etkisinin büyüklüğünü belirtir.



Şekil 9. Düz bir taban düzlemi üzerindeki n inci bir kolon üzerine devrilme esnasında uygulanan kuvvetler



Şekil 10. Düz bir taban düzlemi üzerindeki kolonların devrilmesi ile oluşan şekil değişimleri

### 3.1. ŞEV MODELLERİ

Devrilme bozulması mekanizmasının incelenmesi amacıyla girişilen deney programında beş ayrı grup şev modeli üzerinde deney yapılmıştır.

Gruplardaki model şevlerin özellikleri:

1. Basamaklı bir eğimli yüzey üzerinde, rijit kolonlu
2. Basamaklı bir eğimli yüzey üzerinde, ayrık bloklu
3. Düz bir eğimli yüzey üzerinde, rijit kolonlu
  - a. Şev üstü serbest
  - b. Şev üstü hareketsiz
4. Düz bir eğimli yüzey üzerinde, ayrık bloklu

olarak seçilmiştir. Aşağıdaki paragraflarda, beş grup şev modeli üzerinde yapılan deneylerden elde edilen gözlemler ve yorumları özetle verilecektir (Zanbak, 1978). Deneyler sırasında gözlenen şekil değiştirme durumları için parantezler içinde yazılan  $G_s$  değerleri, tüm şevin kaymaya karşı güvenlik sayıdır.

#### 3.1.1. Basamaklı Bir Eğimli Düzlem Üzerindeki Rijit Kolonlu Şev Model Deneyleri

Deneyel çalışma sonuçlarına göre, Goodman ve Bray tarafından verilen analiz yöntemi ile tanımlanan şev konumunda ( $G_s = 2.80$ ) şevde önemli bir şekil değiştirme elde edilmiştir (Şekil 11). Ancak, bazı kolonların bu hareketi sonucunda, şev içindeki bütün kolonlar tamamen devriliş şevin tümden yıkılmasını doğrumamıştır. Kolonlar, dönme sonucu aldıkları yeni konumlarında birbirlerine ilettikleri sürtünme kuvvetleri ile, kenetlenerek

eğik düzlem üzerinde tek parçalı bir kitle olarak davranmışlardır. Tüm şevin bozulması, taban düzleminin eğim açısı sürtünme açısına ulaştığında, kayma türünde ortaya çıkmıştır ( $G_s = 1.00$ ).

#### 3.1.2. Basamaklı Bir Eğimli Düzlem Üzerindeki Bloklu Şev Model Deneyleri

Bu deney grubunda, bir önceki gruba göre, kolonların rijit olmaması halinde şevin davranışındaki farklılıklar incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, bloklu kolonlar rijit kolonlarda gözlenen şekil değiştirmeye benzer bir davranış göstermişler ve Goodman ve Bray (1976) tarafından verilen analiz yönteminin tanımladığı bir konumda ( $G_s = 2.60$ ) ani bir devrilme göstermişlerdir (Şekil 12 a). Bu devrilme sonucunda kolonlar halinde dizili bloklarda ayrılmalar gözlenmiştir, fakat blokların birbirleri ile kenetlenmelerinden dolayı tüm şevde bir yıkılma (düşme) sürülmemiştir. Taban düzleminin eğim açısı artırıldığında bloklarda daha da artan dönmeler ortaya çıkmıştır. Tüm şev için  $G_s = 1.50$  olan konuma ulaşıldığında şev yüzeyindeki blokların bir kısmında düşmeler gözlenmiştir (Şekil 12 b). Şevin geri kalan kısmının tüm bozulması, taban düzleminin eğim açısı sürtünme açısına ulaştığında, kayma türünde ortaya çıkmıştır ( $G_j = 1.00$ ).



Şekil 11. Basamaklı bir taban düzlemi üzerindeki rijit kolonların devrilmesi ile akışan ani deformasyon başlangıcı ( $G_s = 2.80$ )

#### 3.1.3. Düz Bir Eğimli Yüzey Üzerindeki Rijit Kolonlu Şev Modeli Üzerinde Yapılan Deneyler

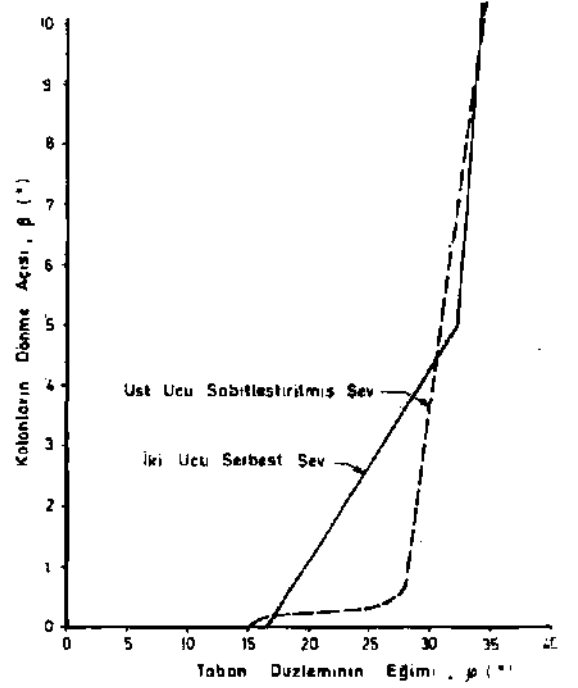
Bu tür deneyler, kolonların devrilme esnasında eğimli düzlem üzerinde yerdeğışürmesinin (dilatans) bozulma mekanizması üzerindeki etkisini araştırma amacıyla iki ayrı grupta yapılmıştır.



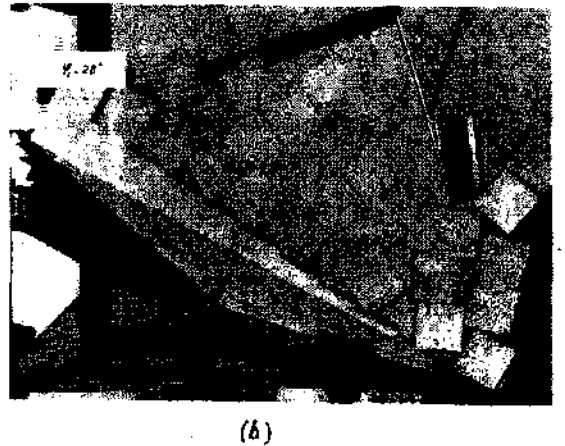
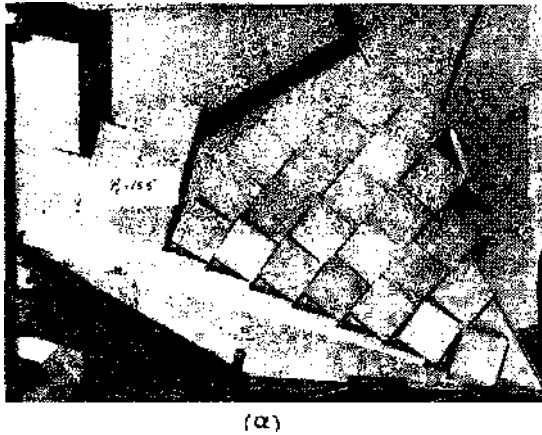
- a. Şevin eğimli yüzey üzerindeki uçları serbest  
b. Şevin eğimli yüzey üzerindeki üst ucu eğimli yüzeye sabitleştirilmiş

Eğimli bir düzlem üzerindeki rijit kolonlu şev modeli üzerinde yapılan deneylerde, düzlemin eğim açısı ( $\varphi$ ) artırıldığında en yüksek kolonun bulunduğu bölge içindeki kolonlarda dönmeler gözlenmiştir. Kolonların dönme açıları ( $\beta$ ) eğim açıları arttıkça büyüme göstermiştir. Dönme açılarının taban düzleminin eğim açıları ile birlikte değişimi Şekil 13'de verilmiştir.  $G_s = 2.00$  konumu için kolonlarda gözlenen dönmeler Şekil 14'de görülmektedir.

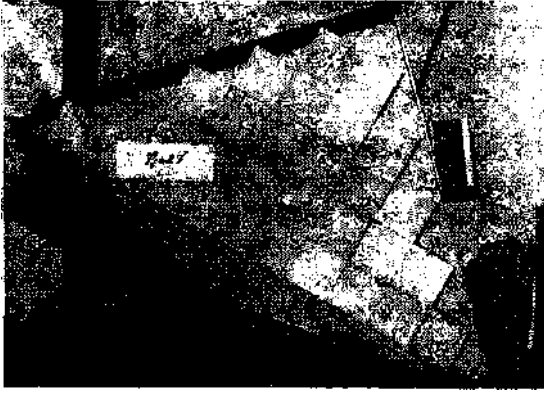
Şevin eğimli yüzey üzerindeki alt ve üst uçlarının serbest olduğu deneylerde dört önemli şekil değiştirme olayı gözlenmiştir. Şevin kaymava karşı güvenlik sayısı 2.0 iken kolonlar ani bir dönme ile devrilerek Şekil 15'deki konuma gelmişlerdir. Bu durumda 6-7, 7-8 ve 8-9 Nolu kolonlar arasında açıklıklar oluşmuş ve kolonlar noktasal olarak birbirlerine değer duruma gelmişlerdir. 1 No'lu kolon kaymış ve 1 ve 2 No'lu kolonlar arasında da açılma olmuş ve bu kolonlar da noktasal olarak birbirlerine değer duruma gelmişlerdir. 2-3, 3-4, 4-5 ve 5-6 No'lu kolonlar arasında dönme sonucu yüzeysel değme bozulmamıştır. Bu ani dönme olayı *şekil değiştirme başlangıcı* olarak adlandırılmıştır. Bu konumda, 9 ve 10 No'lu kolonlarda, devrilmeye karşı kendi güvenlikleri yeterli olduğundan dolayı, bir devrilme önlenmemiştir.



Şekil 13. Düz bir eğimli taban düzlemi üzerindeki rijit kolonlardan devrilme esnasında oluşan dönme açıları ( $\beta$ ) ile taban düzlemi eğim açısı ( $\varphi$ ) arasındaki bağımlılıklar.



Şekil 12. Basamaklı bir taban düzlemi üzerindeki rijit olmayan (bloklu) kolonların devrilmesi ile oluşan şekil değiştirmeler: a. Deformasyon başlangıcı ( $G_s = 2.60$ ), b. Şev yüzünden blok düşmeler ( $G_s = 1.50$ )



Şekil 14. Düz bir eğimli taban düzlemi üzerindeki rijit kolonlarda devrilme esnasında oluşan dönme açıları ( $\theta$ ) ile taban düzlemi eğim açısı ( $\alpha$ ) arasındaki bağıntılar

Şevin  $G_s = 1.50$  olduğu konumda 2 ve 3 No'lu kolonların değme yüzeylerinde bir açılma gözlenmiş ve bu açılma sonucu 2-3 Nolu kolonlar arasındaki dokanak noktası 2 No'lu kolonun şev yukarı üst kösesine kaymıştır. Bu *ikinci önemli şekil değiştirme olayı* olarak adlandırılmıştır.

Şevin  $G_s = 1.25$  olduğu konumda, geri kalan şev kitlesi yerinde dururken 1 ve 2 Nolu kolonların devrilerek düştüğü gözlenmiştir. Şekil 15'de görüldüğü gibi, şevin geri kalan kısmındaki topuğunda bulunan kolonlar devrilmeden yerinde durmaktadır. Bu durum, *üçüncü önemli şekil değiştirme olayı* olarak adlandırılmıştır.

Şevin geri kalan kısmı, kolonlar arası kenetlenmeden (sürtünde dirençleri nedeniyle) dolayı, tabanın eğim açısı kayma değerine ulaşana kadar bozulma göstermemiş ve şev  $G_s = 1.00$  olduğundan kayarak bozulmuştur.

Düz bir eğimli yüzey üzerindeki rijit kolonlu şevde kolonların devrilmeleri esnasında oluşan dilatans'ın şevin davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, şevin üst kısmındaki bloklar sabitleştirilerek bir seri deney yapılmıştır. Taban düzleminin eğim açısı artırıldığında kolonlarda oluşan dönme açıları ( $\theta$ ) Şekil 13'de verilmiştir. Diyagramdan da görüleceği gibi, şev üstünün sabitleştirilmesi halinde, kolonların devrilme sırasındaki dönme açıları eğim açısı ( $\alpha$ ) ile artma hızı, önceki deneye göre çok azalmıştır. Serbest uçlu deneylerde  $G_s = 2.0$ 'da görülen şekil değiştirme başlangıcı bu tür deneylerde  $G_s = 1.30$ 'da ortaya çıkmıştır. Sabit-

leştirilmiş uçlu model şevlerin taban düzleminin daha büyük eğim açılanındaki davranışı serbest uçlu deneydeki lerin aynı olarak gözlenmiştir.

### 3.1.4. Düz Bir Eğimli Yüzey Üzerindeki Bloklı Şev Model Deneyleri

Kolonları rijit olmayan bir şev modeli üzerinde yapılan deneylerde taban düzleminin eğim açısının artması halinde,  $G_s = 1.50$  olana dek ölçülebilir bir şekil değiştirme görülmemiştir. Taban düzlemi eğim açısı ( $\alpha$ ) artırılmış ve şevin  $G_s = 1.50$  konumunda bloklarda dönmeler ve küçük kaymalar gözlenmiştir (Şekil 16). Taban düzleminin eğim açısı daha da artırıldığında şevin  $G_s = 1.16$  konumunda şevin tüm bozulması ortaya çıkmıştır. Tüm şevin bozulması bazı blokların yerlerinden oynayıp düşmesi ve düşerken de diğer bloklara da çarpıp onları da devirmesi şeklinde olmuştur.



Şekil 15. Düz eğimli bir taban düzlemi üzerindeki rijit kolonlarda devrilme esnasında gözlenen dönmeler ( $G_s = 2.00$ )



Şekil 16. Düz bir eğimli taban düzlemi üzerindeki rijit kolonlarda devrilmeler nedeni ile toptaki kolonların bozulması ( $C_s = 1.25$ )

#### 4. SONUÇLAR

Bir şev kitlesi içindeki kolonların devrilme türündeki bozulması, kolonlarının herb irin in devrilmesinin İncelenmesi İle açıklanamayacak bir olaydır. Tüm şevin duraylılığı, bozulma esnasında devrilebilen kolonların birbirlerine etkileri itki kuvvetleri ve değme yüzeylerindeki sürtünme dirençlerinin karşılıklı ilişkilerinin sonucu olarak ortaya çıkar.

Eğimli bir taban düzlemi üzerine dizilmiş kolonsu yapıdaki iki boyutlu bir şev modeli üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve bunların uygulamadaki önemleri aşağıdaki paragraflarda özetlenmektedir.

Kolonların rijitliği ve taban düzleminin basamaklı ya da düz olmasının şev içinde ortaya çıkan devrilme mekanizması üzerinde önemli etkilerinin olduğu saptanmıştır.

Düz bir eğimli taban yüzeyi üzerindeki bloklu (rijit olmayan) kolonlardan oluşan bir şevde devrilme olayı gelişirken, yukarıda belirtilen diğer tür şevlere göre, daha az deformasyon ortaya çıkmaktadır.

Deneysel çalışmalar sonucunda şevin üstünde çekme çatlakları oluşmamasına karşın blokların dizilişinde gevşemeler, blok aralarında açılmalar saptanmıştır. Bu tür şevlerde kaya düşmelerine karşı önlem alınması uygun olacaktır.

Düz ve basamaklı taban düzlemi üzerindeki rijit kolonlu şevler ve basamaklı taban düzlemi üzerindeki rijit olmayan (bloklu) kolonlu şevler, devrilme işlemi esnasında oldukça önemli deformasyonlar göstermektedir. Bu tür şevlerde deformasyon sonucu olarak şev üstünde derin çekme çatlakları oluşmaktadır.

Basamaklı taban düzlemi Üzerinde rijit ve rijit olmayan (bloklu) kolonlardan oluşan şevler devrilme İşlemi başlangıcında benzer davranış göstermektedir. Bu tür şevlerde tepe noktası dolayında çekme çatlakları görülmemektedir. Ancak, rijit olmayan kolonlu şevlerde tepe noktasındaki ve şev yüzündeki bloklarda Ötelenmeler ortaya çıkmaktadır.

Düz taban düzlemi üzerindeki rijit olmayan kolonlu şevler hariç olmak üzere, diğer tüm şev modellerinde devrilme işlemi sonucunda topuktaki blokların kaydığı gözlenmiştir.

Şevin tüm bozulması (deformasyonlar hariç) gözününe alınırsa, düz taban düzlemi üzerinde rijit olmayan kolonlu şevler diğer şev türlerine göre daha az duraylıdır.

Düz taban düzlemi üzerindeki rijit kolonlu şevlerde, devri lebi le n kolonların taban düzlemi üzerindeki üst ucu sab eleştirildiğinde, devrilme esnasında kolonlarda ortaya çıkabilecek dönmeler şevin kaymaya karşı belirli bir güvenlik sayısı değerine kadar önenebilir. Ancak bu güvenlik sayısından küçük değerlerden sonra devrilme işlemi hızlı olarak gelişmektedir. Şev Üstünün sab üleştir İlmesinin sağladığı bu önlem, diğer şev türleri için, kolonlar arasındaki di Uttansın oluşmaması nedeni ile ger çeri i değildir.

Basamaklı taban düzlemi üzerindeki rijit ve rijit olmayan (bloklu) kolonlu şev modellerinde gelişen devrilme olayları karşılaştırıldığında, rijitliğin şekil değiştirme başlangıcı üzerinde bir etkisinin olmadığı saptanmıştır.

Basamaklı taban düzlemi üzerindeki rijit ve rijit olmayan (bloklu) kolonlu şev modelleri üzerinde yapılan deneylerle, Goodman ve Bray (1976) tarafından verilen duraylılık analizinin devrilme başlangıcının saptanmasında geçerli olduğu saptanmıştır. Ancak, şevde gözlenen bu ilk ve ani deformasyondan sonra şevde tüm bir bozulma oluşmamaktadır. Ani devrilme olayından sonra kolonların birbirleri ile olan değme koşulları değiştiğinden problem tekrar statikçe belirsiz konuma girmektedir.

#### KAYNAKLAR

1. BUKOVANSKY, M. - RODRIGUEZ, M.A. - CEDRUN, G. (1974), Three Rock Slides in Stratified and Jointed Rocks, Proc. 3rd Cong. Int. Soc. Rock Mech. Denver, V.II-B, pp. 854-858.
2. de FREITAS, M.H. - WATTERS, R.J. (1973), Some Field Examples of Toppling Failure, Geotechnique, V. 23, N. 4, pp 459-514
3. GOODMAN, R.E. (1976), Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Co., p. 472.
4. GOODMAN, R.E. - BRAY, J. (1976), Toppling of Rock Slopes, Rock Engineering for Founda-

- tions and Slopes, Proc. Spec. Conf. Univ. of Colorado. Vol. II, pp. 201-235.
5. HENDRON, A.J. - CORDING, E.J. - AIYER, A.K. (1971), Analytical and Graphical Methods for the Analysis of Slopes in Rock Masses, Technical Report, N. 36, p. 162, USA.
  6. HOEK, E. - BRAY, J. (1976), Rock Slope Engineering, Institution of Mining and Metallurgy, London, p. 402.
  7. JOHN, K.W. (1968), Graphical Stability Analysis of Slopes in Jointed Rock, J-Soil Mechs. and Found. Div., A.S.C.E. V. 94, N. SM2.
  8. LONDE, P.L. (1973), Analysis of the Stability of Rock Slopes, Quart. J.Engng. Geo I., V. 6, N. 1, pp. 93-124.
  9. WITTKE, W. (1965), Methods to Analyze the Stability of Rock Slopes with and Without Additional Loading, Rock Mechs. and Engng. Geol. Supp. II, pp. 52-79, (German).
  10. ZANBAK, C. (1978), Experimental Evaluation of Stability Analysis Methods for Some Rock Slopes by a Physical Model, Ph. D. Thesis, Univ. of Illinois, p. 150, January.
  11. ZANBAK, C. (1978), Mühendislik Jeolojisi-Yerüstü Kaya Mekaniği İlişkisi, 1. Mühendislik Jeolojisi Simpozyumu, Ankara, Sayfa 23-28.