

Kaya Mekaniği Bülteni 3

Kasım 1985

Taban Sürtünmeli Model Uygulaması

Maden Kuyusu ve Derin Galerilerde
Tahkimat Basıncının Tespiti

Sürtünmeli Çelik Bağların "NATM"de
Kullanabilme Olanakları

Tünel Tasarımında Kaya Sapmaları

Çimento Enjeksiyonlu Karışımların
Kayma Büyüklükleri

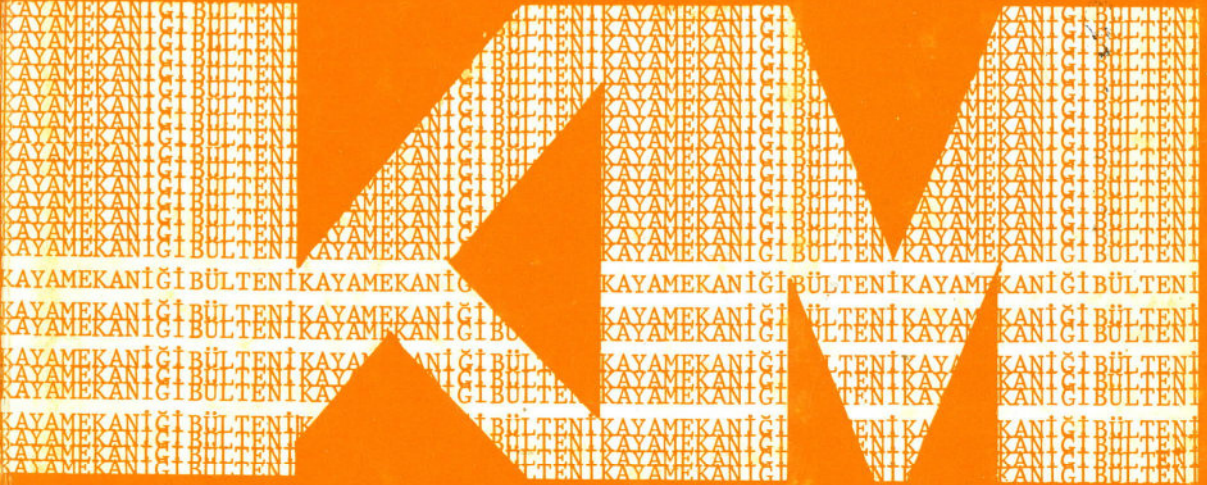
A.ÖZGENOĞLU

Ö.AYDAN
A.ERSEN

M. VARDAR

C.KARPUZ

E. ARIOĞLU



Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği Yayınıdır

Arkin Kitabevi — İstanbul



TÜRK ULUSAL KAYA MEKANİĞİ DERNEĞİ

YÖNETİM KURULU

Başkan	: Prof. Dr. Erdoğan YÜZER	(İ.T.Ü. Maden Fakültesi)
Başkan Yard.	: Doç. Dr. Mahir VARDAR	(İ.T.Ü. Maden Fakültesi)
Genel Sekreter:	Doç. Dr. Erçin KASAPOĞLU	(H.Ü. Mühendislik Fakültesi)
	Doç. Dr. Ergin ARIOĞLU	(İ.T.Ü. Maden Fakültesi)
Sayman	: Güngör UNAY	(E.İ.E. İdaresi - ANKARA)
	Mesut ÇETİNÇELİK	(D.S.İ. OETD - ANKARA)

DENETİM KURULU

Yalçın İRFAN	(O.D.T.Ü. Mühendislik Fakültesi)
Celâl KARPUZ	(O.D.T.Ü. Mühendislik Fakültesi)
Ercan KOŞAR	(E.İ.E. İdaresi - ANKARA)

YAYIN KURULU

Yönetim Kuruludur.

Yazışma Adresleri :

Hacettepe Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Jeoloji Bölümü
Beytepe - ANKARA

İstanbul Teknik Üniversitesi
Maden Fakültesi

Teşvikiye - İSTANBUL

Kaya Mekaniği Bülteni 3
Kasım 1985

Taban Sürtünmeli Model Uygulaması

A.ÖZGENOĞLU

Maden Kuyusu ve Derin Galerilerde
Tahkimat Basıncının Tespiti

Ö.AYDAN
A.ERSEN

Sürtünmeli Çelik Bağların "NATM"de
Kullanabilme Olanakları

M. VARDAR

Tünel Tasarımında Kaya Sapmaları

C.KARPUZ

Çimento Enjeksiyonlu Karışımların
Kayma Büyüklükleri

E. ARIOĞLU

Yazım İlkeleri

"Kaya Mekaniği Bülteni"nde yayımlanması için gönderilecek olan yazılar teorik ve uygulamalı kaya mekaniği dalında özgün (orijinal) araştırmalar, derleme, eleştiri ve tanıtma amaçlı çalışmaları veya çevirileri kapsayabilir.

Yazıların dilbilimi kurallarına ve teknik sözcüklerin 4. bültenimizde sizlere sunacağımız kaya mekaniği terim ve tanımlarına uygun olmasına özen gösterilmelidir.

Yazılar, şekiller, fotoğraflar ve çizelgeler 2 nüsha olarak gönderilmeli, metin 2 satır aralıkla daktilo ile yazılmış olmalıdır.

Başlıklar kısa, konuyu en iyi belirtebilir ve olabilirse 10 sözcüğü geçmeyecek şekilde seçilmelidir.

Şekiller teknik çizim normlarına uygun olarak çini mürekkep ile aydinger kâğıdına veya beyaz kuşe kağıt üzerine çizilmelidir.

Fotoğraflar parlak kartlara siyah-beyaz ve kontrastlı basılmalıdır. Şekil, fotoğraf ve çizelge altları ayrı bir kâğıt üzerine sırasıyla yazılmış olmalıdır.

Yararlanılan kaynaklar alfabetik sıralamayla düzenlenmelidir.

Gönderilen çalışmanın bültende yayımlanabilmesi yayın kurulu'nun olumlu kararına bağlıdır.

TABAN SÜRTÜNMESİ MODELLENMESİNDEN BİR UYGULAMA

Abdurrahim ÖZGENOĞLU *

1. GİRİŞ

Bu çalışma için gereken bilgi ve verilerin büyük bir kısmı, Imperial College (Londra) Kaya Mekaniği master öğrencilerinin her yıl Old Delabole arduvaz taş ocağına yaptıkları arazi çalışmalarına ilişkin raporlardan derlenmiştir. Yazının konusunu oluşturan 1967 yılındaki şev yenilmesi bu öğrencilerin doğrudan çalışma alanı olmamış; fakat, bitişikte bulunan bölgelerinin duraylılığını incelerken 1967 yenilmesinin geriye doğru analizini yapmışlardır. Ne var ki, böyle bir analiz için bilinmesi gerekli olan yenilme mekanizması (failure mechanism) kesinlikle saptanamamıştır. Taban sürtünmesi modellerinin gerçek mekanizmayı ortaya çıkaracağı düşüncesiyle bu çalışma yapılmıştır.

2. OLD DELABOLE ARDUVAZ TAŞ OCAĞI

2.1. Genel

Batı İngiltere'de Cornwall bölgesinde yer alan Old Delabole taş ocağı elips şeklinde olup derinliği 170 m ye varmaktadır. Metamorfizmanın etkileri ocağın her tarafında çok belirgindir. Litoloji bakımından fazla farklılık göstermeyen iki tür arduvaz mevcuttur. Üst Devonian yaşlı bu kayaçlar mavi-gri arduvaz ve yeşil-gri arduvaz olarak adlandırılmaktadır. Ocağın batı yamaçlarında gümüşgrisi Wollgarden" olarak adlandırılan üçüncü bir arduvaz daha gözlenmektedir.

20°-30° derece eğimli dilinimler ocağın her kesiminde belirgindir. Dilinim yüzeyleri oldukça düz ve genellikle yapışık olup, dilinim aralıkları milimetre boyutundadır.

Oakta, çoğu 70° derecenin üzerinde eğim gösteren birçok eklem takımı vardır. Bunların doğrultuları birbirinden farklıdır. Kama eklemleri (bölgede "wrinkles" olarak adlandırılır) ve basamak yüzeylerini oluşturan eklemler (bölgede 'shorters' olarak adlandırılır) sırasıyla ocağın doğu ve batı kesimlerinde yoğunlardır. Eklem takımlarının sürekliliği ve sıklığı ayrıntılı olarak çalışılmamıştır.

Bölgede çoğunlukla birbirine paralel olan fay sistemleri bulunur. Bunlar genellikle dik olup eklem takımlarıyla eşleşmektedir.

Yeraltı su durumu, kaya şevlerinin etkileyen en önemli faktörlerden biri olmasına karşın Old Delabole taş ocağında en az bilinenidir. Bununla beraber, 50 yıl öncesinden başlayan günlük yağış kayıtları, bölgenin yıllık yağış ortalamasının 90 cm ile 140 cm arasında değiştiğini göstermektedir.

2.2. Dayanım Özellikleri

2.2.1. Kaya (Intact Rock Kayaç örnekleri — Taş)

- a. Tek eksenli basınç direnci $22-185 \text{ MN/m}^2$ arasında değişmektedir.
- b. Kesme direnci (İçsel parametreler) numune yönüne ve analiz koşullarına göre büyük farklılık göstermektedir.

2.2.2. Süreksizlik Düzlemleri

Parlatılmış veya ayrılmış dilinim yüzeylerinde yapılan direkt kesme deneyleri aşağıdaki sonuçları vermiştir:

- a. Tepe (peak) dayanımındaki ortalama içsel sürtünme açısı yaklaşık 30° derecedir (yüzey kuru).
- b. Su, yüzeyleri yağlamakta ve içsel sürtünme açısını 20° dereceye düşürmektedir.
- c. Görünür (apparent) kohezyon 0.2 MN/m^2 olarak bulunmuştur.
- d. Litolojinin etkisi önemsizdir.

2.3. 1967 Yenilmesi

4 Mart 1967 tarihinde ocağın batı aynasında, dibe giden ana nakliye yolunu kapatacak şekilde, büyük çapta bir şev yenilmesi (failure) meydana geldi. Yenilme iki yüzeyli bir düzlemsel kayma görünümündeydi. Yaklaşık $70^\circ-75^\circ$ derecelik eğimiyle üstteki yüzey alttakinden (40-45) daha dikti.

Dikkate değer diğer gözlemler ise şöyle idi:

- a- Büyük ve küçük gerilme çatlaklarıyla şev tepesi hareketli bir bölge oluşturmaktadır.
- b- Üst yüzey belirgin olarak düzlemseldir.

c- Alt yüzey üste göre daha pürüzlü olup basamaklı bir görünümü vardır.

d- Alt ve üst yüzeylerin arakesiti çizgisel değildir.

2.3.1. Bölgenin Yapısal Jeolojisi

Yenilmenin meydana geldiği kısma bitişik bölgelerde yapılan çalışmalar, ocağın batı kesiminde yer alan süreksizliklerin ya dilinimleri izlediğini ya da dike yakın bir eğimle daldığını ortaya koymuştur. Aşağıda verilen süreksizlikler bölgenin duraylılığını etkiledikleri için önemlidirler.

A- Eklemler

Hemen hemen tüm eklemlerin 70 dereceden daha dik eğimlere sahip olduğu görülmüştür.

i-I No.lu Eklem Takımı: Doğrultusu yaklaşık şev aynasına paralel olan bu takımın 70 ile 90 derece arasında değişen bir eğimi vardır. Oldukça sürekli olan bu eklem takımına paralel olarak gelişen faylar da bulunmaktadır.

ii-II No.lu Eklem Takımı: I No.lu takımın simetriği görünümünde olup. Bu eklem takımı 85° derecelik eğimle şev içinde dalmaktadır. Yine bu takıma paralel olarak gelişen başka bir fay sistemi de mevcuttur.

iii-III. No.lu Eklem Takımı: Yataya yakın bu takımın eğimi eğim yönleri farklılık göstermektedir. Eklemler seyrek olup, ayrılma dereceleri düşüktür.

B- Dilinim

Genel özelliklerini korumakla birlikte, bölgede eğim açısının azaldığı görülür (yaklaşık 10°).

C- Faylar

Bölgede birbirine dik olarak gelişmiş iki fay sistemi bulunmaktadır. Bunlardan daha belirgin olanı (I No.lu eklem takımına paralel olan) 70° ile 90° derece arasında değişen bir eğimle ve yaklaşık 6 m. lik aralıklarla yer almaktadır. Tüm faylar dolgu malzemesi taşımaktadır.

2.3.2. Litoloji

Ocağın dip kısmındaki gri arduvazlarla üst kısımdaki yeşil arduvazlar arasındaki litolojik sınır, yenilme bölgesinin kuzeyinden geçmektedir. Bu iki birimin mekanik davranışlarının farklı olduğu saptanmıştır.

2.3.3. Yeraltı Su Durumu

Su sızıntı noktaları arasında bir bağıntı kurulmadığı için yeraltı su tablasının konumu saptanamamıştır. Yağış kayıtlarından, yenilme öncesinde olağanüstü bir yağışın bulunmadığı anlaşılmıştır.

2.3.4. Gerilme Çatlağı Ölçümleri ve Önceki Yenilmeler

Şev tepesindeki gerilme çatlaklarının varlığı 1943 yılından daha eskilere dayanmakta ve kayıtlar, 1948 yılından beri ölçümlerin yapıldığını göstermektedir. Bu bilgilerden bölgenin uzun süreden beri duray olmadığı ve burada zamana bağlı bir yenilmenin (progresive failure) söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan ölçümler blok dönmelerini de içeren karmaşık bir yenilme mekanizmasının hüküm sürdüğünü göstermektedir. Taş ocağı müzesindeki fotoğraflar da, batı yamaçlarında 1890 yılından beri hareketlerin süregeldiğini desteklemektedir.

3. ANALİZ

3.1. Giriş

Yenilmeye uğramış şevler, benzer özellikleri olan şevlerin duraylılığının saptanmasında kullanılabilen değerli bilgiler sunarlar. Geriye analiz (Back analysis) yapılarak kaya malzemesinin veya süreksizliğin iç sürtünme açıları (ϕ) ve kohezyonları (C) gibi içsel parametreleri elde edilebilir. Ancak bu parametrelerin gerçek veya gerçeğe yakın değerleri yansıtabilmesi için yenilme mekanizmasının sağlıklı olarak saptanması gerekir.

1967 yenilmesinde, hareket türlerinden herhangi biri lehine kesin kanıt bulunmadığından, tüm olasılıklar arazi gözlemlerinin ve derlenen verilerin ışığı altına ayrı ayrı irdelenmiş ve bu amaçla süreksizlik düzlemlerinin geometrilerine ilişkin belirsizliklerin giderilmesinde taban sürtünmesi modellerinden yararlanılmıştır.

3.2. Olası Yenilme Türleri

Öngörülecek yenilme türünün, yenilme sonrası oluşan şev geometrisi ile uyum içinde olması gerektiği noktasından hareket edilmiştir. 1967 yenilmesinde ortaya çıkan iki yüzeyden üsttekini açıklamak zor değildi. Bu yüzey, meyilli bir gerilme çatlağı

olarak davranan bir 'shorter' (I No.lu eklem) veya bir faydan başka birşey olamazdı. Öte yandan, alt yüzeyin yorumlanması oldukça güçtü. Arazi gözlemleri de dikkate alınarak, analizde, aşağıdaki olasılıklara yer verildi:

- a- Kayma direncinin Kaya malzemesinin kesme direncinin aşılması
- b- Ayrışmanın neden olduğu alttan kesme sonucu duraysızlık
- c- Şu veya bu şekilde oluşacak bir kayma
- d- Devrilme

Kaya kütlelerinin kendi ağırlığından dolayı oluşacak gerilmeler kayanın direnci ile karşılaştırıldığında , kaya malzemesinin (taşın) kayma yenilmesine uğramasının imkânsız olduğu anlaşıldı. Richards tarafından bulunan (20 MN/m^2) en düşük direnç hesaplanan (2 MN/m^2) lik gerilmelerden çok yüksekti.

İlerde ayrıntılı olarak değinilecek olan diğer olasılıklar taban sürtünmesi modelleriyle irdelendi. Ayrıca, kayma türü yenilme için analitik yöntem de başvuruldu. Alttaki kayma yüzeyini oluşturacak büyük çapta bir süreksizliğin bulunmayışı ve bu yüzeyin basamaklı karakteri gözönüne alınarak, dilinim ve 'shorter'ların birleşik (kompozit) bir yenilme yüzeyi yaratabileceği varsayımı düşünüldü (Şekil — 1). Daha küçük ölçekte olsa da, ocağın batı yamacında böyle basamaklı bir yüzeyin gözlenmesi bu varsayımı desteklemekteydi.

Eldeki verilere dayanarak yapılan hesaplar, dilinim ve 'shorter'ların oluşturacağı kompozit yüzey boyunca kayma meydana gelmesi için, dik olarak alınan gerilme çatlağının üçte ikilik kısmının su ile dolu olması gerektiğini ortaya koydu (Görünür kohezyon 0.2 MN/m^2 almıştır). Hernekadar, daha önce de değinildiği gibi, yenilme öncesi olağan üstü bir yağış kaydedilmediyse de, drenaj kanallarının geçirimsiz materyal tarafından bloke edilmesinin yüksek su seviyeleri yaratabileceği düşünülmüştür.

3.3. Laboratuvar Çalışması

Bölüm 3.2 de verilen olası yenilme mekanizmalarından gerçek olanı bulabilmek için bir dizi taban sürtünmesi deneyi yapılmış, bu arada değişik parametrelerin geometresindeki değişimlerin kaya kütlelerinin davranışına nasıl etki ettiği de araştırılmıştır. Ancak, bu ikinci çalışmadan burada bahsedilmeyecektir.

Süreksizlik düzlemleri ve bunların geometrik özellikleri Tablo-1 de verilmiş, ayrıca Şekil - 2 de de gösterilmiştir. I No.lu eklem aralığı ve şev açısı gibi belirsiz parametreler için değişik değerler verilerek bunların şevin davranışına etkileri incelenmiştir.

Tablo 1— Modellerde yer alan süreksizlik düzlemleri ve geometrileri

Süreksizlik Türü	Eğim Açısı	Süreksizlik Aralığı (mm)
I No.lu Eklem	70°	10,25,33,40,50,66
II No.lu Eklem	85°	20, 25, 50
III. No.lu Eklem	50°	40
Dilinim	5°,10°,15° (görünür)	10,20,40
Fay	0°, 30°, 45°, 60° 90°, 45°, 70°	5, 10 (kalınlık)

Ölçek: 1/200

(X) Sayıların üzerindeki Çizgi (—) şev içine doğru eğimi belirtmektedir.

Şev açısına ise 50, 60, 65, 70, ve 75 derecelik değerler verilmiştir.

3.3.1. Taban Sürtünmesi Model Tekniği

Taban sürtünmesi model tekniği ayrıntılı olarak başka yerde anlatılmış olup (2 ve 3), birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (3,4 ve 5). Bu teknik, yerçekiminin sürtünme kuvvetleriyle benzetimi (simulation) esasına dayanır. İki boyutlu olarak yatay bir düzlemde oluşturulduğu için uygulaması kolay, çabuk ve ekonomiktir. Ayrıca zayıf karışımdan, rijit bloklara kadar varan değişik özellikte model malzemesi kullanılarak değişik davranışları simüle etmek olasıdır.

Bu araştırmada kullanılan zayıf karışımın özellikleri aşağıda verilmiştir.

Malzeme	% Ağırlık	
Un	51	
Kum	12	$\phi = 40^\circ - 41^\circ$
Nebati Yağ	13	Kompakt Yoğunluk = 1.33
Ballotini	24	g / cm ³

Not: Karışımı, içsel sürtünme açısını düşürmek için kullanılan, ballotini olmadan da hazırlamak mümkündür.

3.3.2 Uygulama Yöntemi

Yatay bir düzlemdeki zımpara kağıdı üzerine düzgün olarak yayılan model maddesi önce sıkıştırılarak sonra konsolide edilerek 2-2.5 cm kalınlığında kompakt bir tabaka haline getirilmiştir. Bu tabaka içinde oluşturulacak şevdeki süreksizlik yüzeylerinin birbirine yapışmasını önlemek için modelin hazırlanmasında aşağıdaki sıra izlenmiştir:

- i- Şev geometrisi ve süreksizlikler ölçeğe göre tabaka üzerinde hafifçe işaretlenmiştir.
- ii- Şev geometrisi kesilmiştir.
- iii- Süreksizlik takımları sırayla ya şevin tabanından ya da tepesinden başlatarak kesilmiştir.
- iv- Kesilen şev geometrisinin etrafında kalan malzeme temizlenmiştir.

Şevdeki hareketleri saptamak ve karşılaştırma yapmak üzere belirli aralıklarla modelin fotoğrafları çekilmiştir.

Modellerin davranışını arazi gözlemleriyle karşılaştırırken şu kriterler göz önüne alınmıştır:

- a- Yenilme sonrası şev profili.
- b- Şev tepesinde çekme çatlaklarının oluşumu.
- c- Çekme çatlaklarında yapılan ölçümlere göre şev tepesindeki blok hareketleri.

A. Düzlemsel Kayma Modeli (Şekil – 3)

Aşağıdaki varsayımlar yapıldı:

- i- Şev kurudur.
- ii- Şevde devamlılık gösteren süreksizlikler şunlardır:
 - I No.lu eklem: Ocağı doğru 70° lik eğimle dalar, böylece üst yenilme yüzeyi ile çakışır.
 - III No.lu eklem: Ocağı doğru 40° lik eğimle dalar alt yenilme yüzeyini oluşturur.
 - Dilinim: Şev içine doğru 15° lik görünür dalı vardır.
- iii- Her iki eklem takımı için $\phi = 30^\circ$, $C = 0$ dir.
- iv- Şev açısı 60° dir.

İçsel sürtünme açısı, $\phi = 30^\circ$ olan model maddesi elde edilemediğinden kaymanın yer aldığı yüzey olan III No.lu eklem 40° yerine 50° lik bir eğim verildi. Analitik olarak hesaplanan güvenlik katsayısının bu düzenlem ile büyük ölçüde değişmediği saptandığından bu yola başvuruldu.

Şekil - 3 de görüldüğü gibi III No.lu eklem boyunca yer alan kayma hareketi, arazide gözlenen yenilme sonrası geometriyi vermedi. Dilinim içermeyen başka bir model de aynı şekilde davrandı. Böylelikle dilinimin, daha küçük bloklar oluşturması dışında şevin davranışında etken bir rolü olmadığı anlaşılmıştır.

B. Fay Dolgu Malzemesinin Ayırışması Sonucu Alttan Kesme Modeli (Şekil-5)

Varlığı kesin olarak saptanamayan ve litoloji fayı olarak adlandırılan bir fayın dolgu malzemesinin ayırışmasının alttan kesmeye zemin hazırlayacağı ileri sürüldü. Böylece, Şekil - 4 de görüldüğü gibi, üstte oluşan kama alt kısmı dışa doğru zorlayacak ve 'shorter'larla dilinimin oluşturacakları kompozit bir yüzey boyunca kayma direnci aşıl原因 kayma meydana geleceği düşünülmüştür.

Değişik fay konumları için yapılan modellerden hiç biri öngörülen davranışı göstermedi. Şekil - 5, 45° lik eğimle şev içine yatan fay içeren modelin davranışını resimlemektedir. Görüldüğü gibi, dolgu malzemesinin birkaç aşamada kaldırılmasıyla ayırışması simüle edilmiştir.

C. Devrilme Modeli (Şekil - 7)

Düşey eklemler içeren dik bir şev olması nedeniyle, bu çalışmada, devrilme türü yenilme üzerinde özellikle durulmuştur. Aşağıdaki kanıtlar böyle bir mekanizmanın varlığını destekler nitelikte bulunmuştur:

- i- Devrilmeyi kinematik olarak mümkün kılacak eklem takımının varlığı (II No.lu eklem takımı, ayrıca buna paralel olarak gelişmiş faylar): Bu takım 'shorter'lar kadar sık ve tutarlı olmasa da devrilmeyi oluşturacak niteliktedir.
- ii- Devrilmenin karakteristik özelliği olan basamaklı yenilme yüzeyi (alt yüzey).
- iii- Gerilme çatlaklarında yapılan ölçümlerle belirlenen blok hareketlerine devrilmenin neden olabileceği Şekil - 6 daki gibi bir kamalama etkisiyle devrilme

Devrilme için hazırlanan taban sürtünmesi modellerinde şevler yine kuru olarak varsayıldı. III No.lu eklem takımı modelden çıkarılarak, şev içine doğru 85° lik eğimle dal II No.lu eklem takımına yer verildi. I No.lu eklem takımı ve dilinim sırasıyla 70° ve 5° lik eğimlerle etken süreksizlikler olarak modelde yer aldı. Şev açısı ise 60° olarak kesildi (Şekil - 7, fotoğraf).

Şekil - 7 de devrilmenin kaymayla birlikte yer aldığı görülmektedir. Şevin üst yarısının incelenmesi (fotoğraf b) II No.lu eklem takımının oluşturduğu kolonların hem dönme hem de kayma hareketleri yaptıklarını göstermektedir. Şevin üst kısmında hakim olan bu davranış kaymadır. Baklava dilimi şeklindeki blokların kamalama hareketiyle I No.lu eklem boyunca kaymalar oluşmaktadır. Öte yandan, şevin alt kısmında devrilme hareketi hakim olup, bu kısımda kaya kütlesi kabarmaktadır (dilation). Bu hareketlerin sonucu şev tepesinde II No.lu eklemler boyunca iki gerilim çatlağı meydana gelmiştir. Burada, "x" işaretli bloğun kamalama yaparak kaymasının, arazide gerilme çatlaklarında yapılan ölçümlerle uyum içinde olduğu görülmüştür.

Kayma kütlesinin kabarması devrilmeyle birlikte devam eder, fakat şevin topuk kısmının gösterdiği dirençle bu hareket oldukça yavaştır (fotoğraf c). Devrilmenin sürmesi önce topuktaki dilinim yüzeylerinde açılmalara (fotoğraf d), daha sonra da dilinim ve II No.lu eklemlerin birlikte meydana getirdikleri basamaklı bir kırığın oluşmasına neden olur (fotoğraf e). Bunu takiben devrilme hareketi ivme kazanır ve şev aynasının tamamen göçmesiyle son bulur.

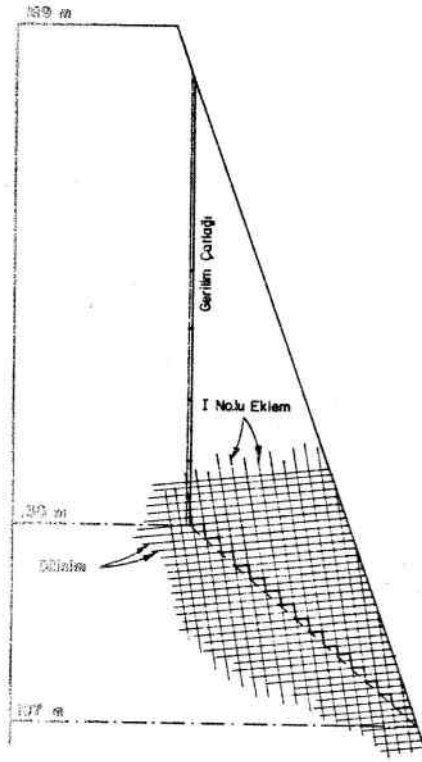
Bu deney, yenilme sonrası arazi durumunun devrilme mekanizmasıyla elde edilebileceğini gösterdi. Çünkü modelde, şev tepesinde gözlenen gerilme çatlakları ve blok hareketleri oluşmuş; basamaklı alt yenilme yüzeyi ile şev profili ortaya çıkmıştı. Farklı olarak, modelde yenilmeye uğrayan kaya kütlesinin hacmi daha büyük ve devrilmenin topuğa kadar yayılmasının sonucu alt yüzey daha uzundu. Bununla beraber, aşağıdaki düzenlemelerle basamaklı yüzeyi arazideki konumunda elde etmek mümkün oldu.

a- Devrilmenin Tekrarlaması (Şekil - 8)

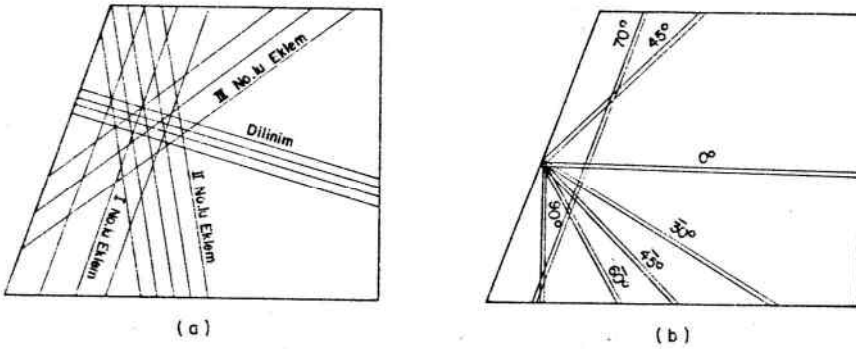
I No.lu eklem takımının meydana getirdiği ilk kolonun devrilmesi sonucu oluşan parçalanmış malzemenin sağladığı yan destek, ikinci kolon devrilmesinin topuğa kadar yayılmasını engelledi. Modeldeki davranış, arazide devrilmenin tabana doğru yayılmasını önleyen bir direncin varolması gereğini ortaya koydu. Şevin aşağı kısımlarını oluşturan gri arduvazların üsttekilere göre daha sağlam olması bu direncin kaynağı olarak düşünülebilir.

b- II No.lu Eklemün Sürekliliğinin Etkisi (Şekil - 9)

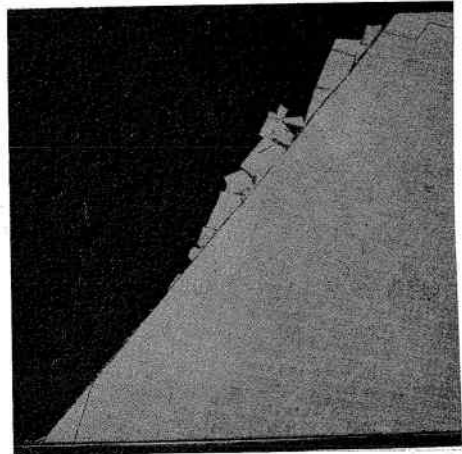
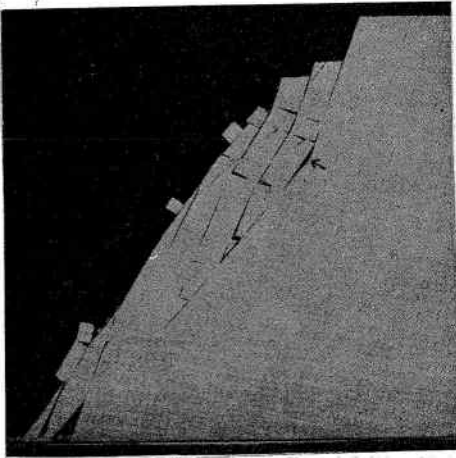
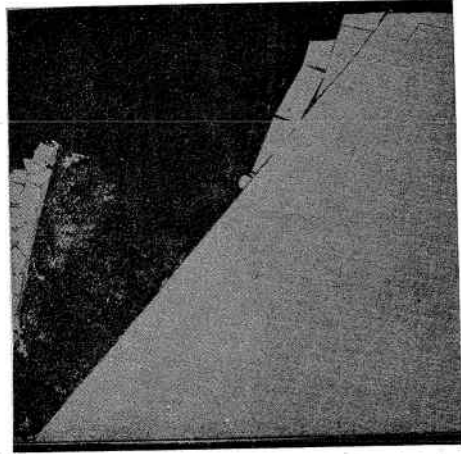
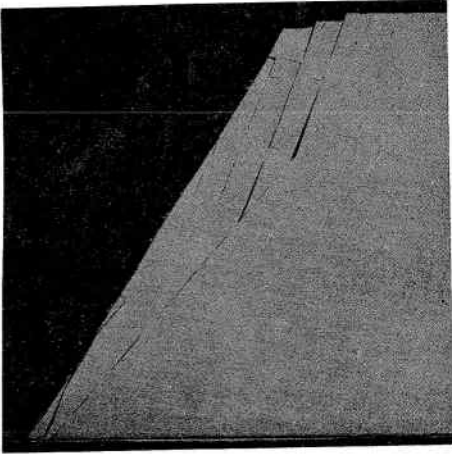
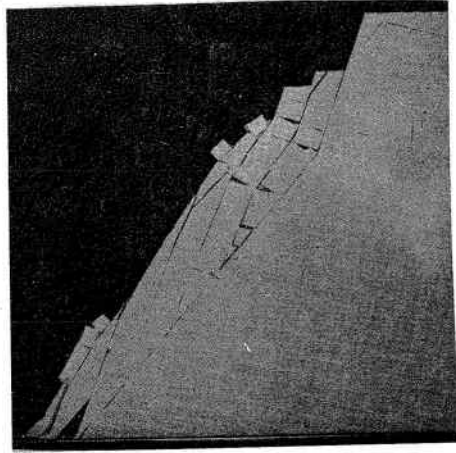
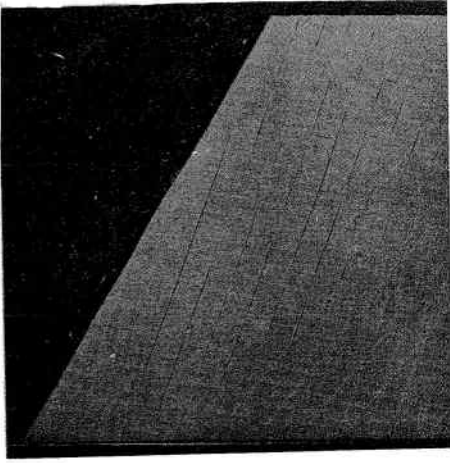
Daha önce bahsedilen olası litoloji fayının II No.lu eklem için bir sınır teşkil edeceği ve devrilmenin tabana yayılmasını önleyeceği düşünüldü. Şekil - 9 da görüldüğü gibi I No.lu eklem (sık aralıklı) ve dilinimlerin oluşturduğu basamaklı yüzey topuğun oldukça yukarısında, fotoğraf (d) de okla gösterilen yerde meydana geldi.



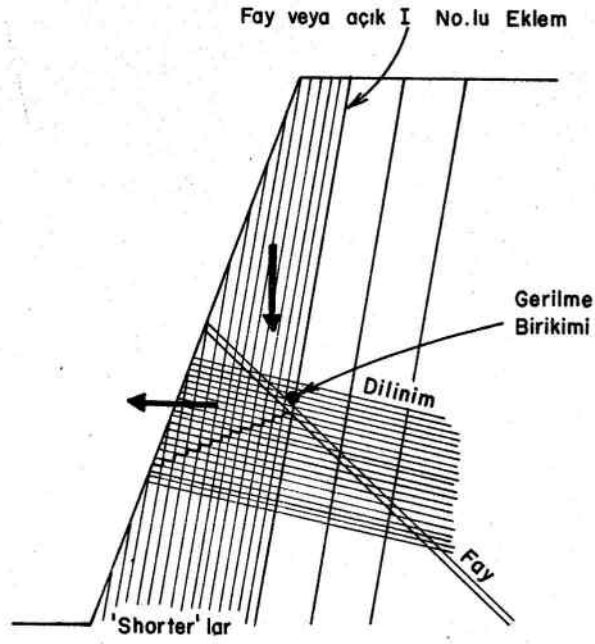
Şekil 1- Analitik yaklaşımda esas alman şev geometrisi



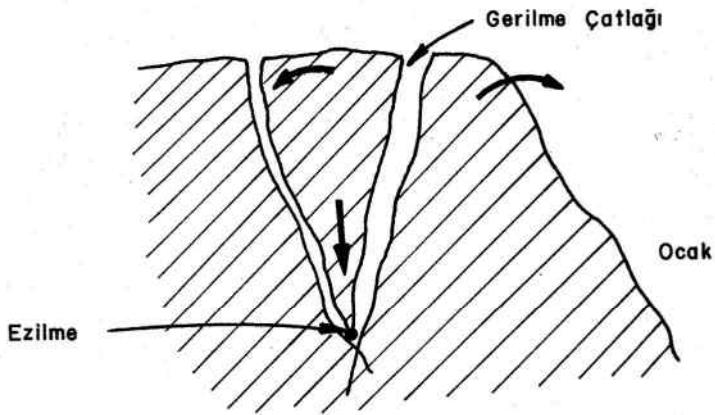
Şekil 2- Modellerde yer alan süreksizlikler: (a) Eklemler ve Dilinim (b) Faylar



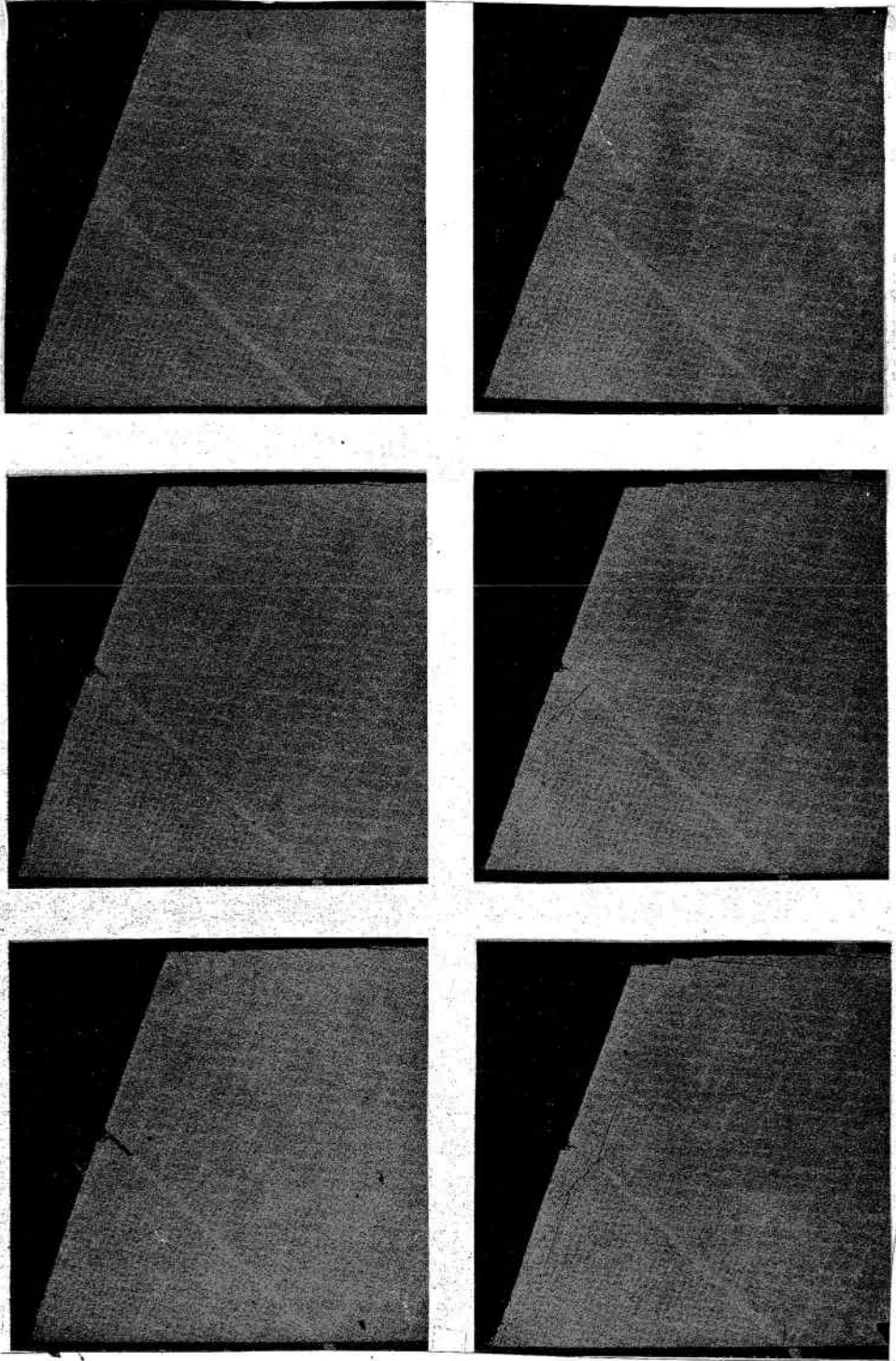
Şekil 3- Düzlemsel Kayma modeli



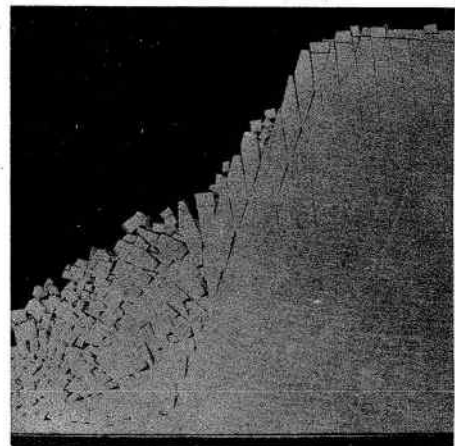
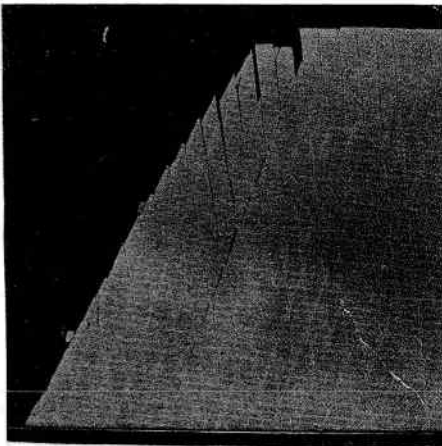
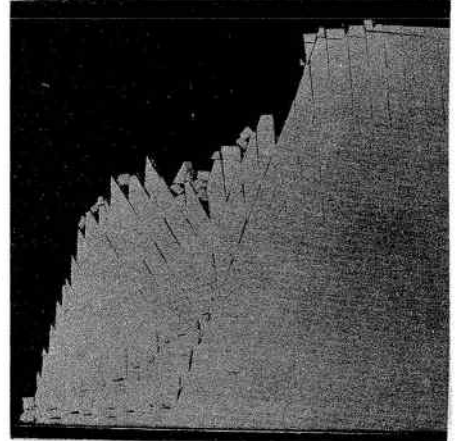
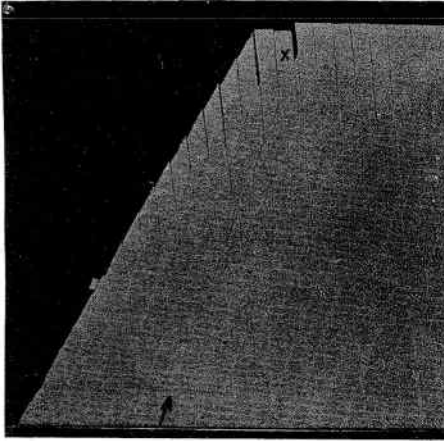
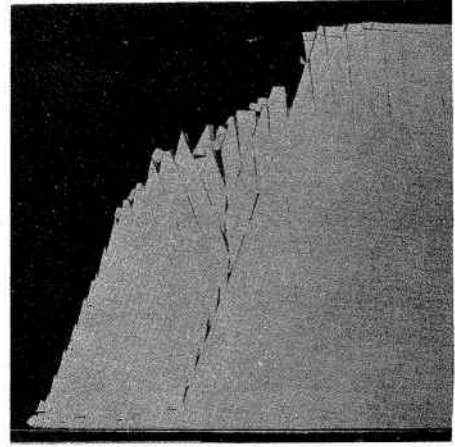
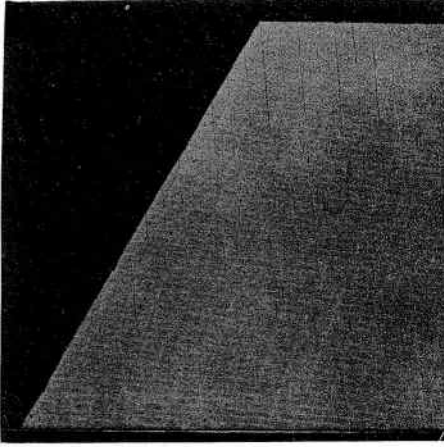
Şekil 4- Alttan kesme yaparak yenilme

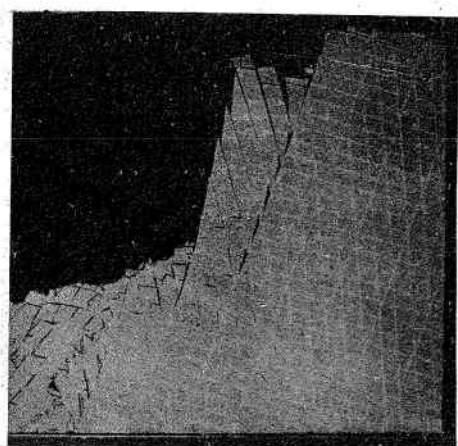
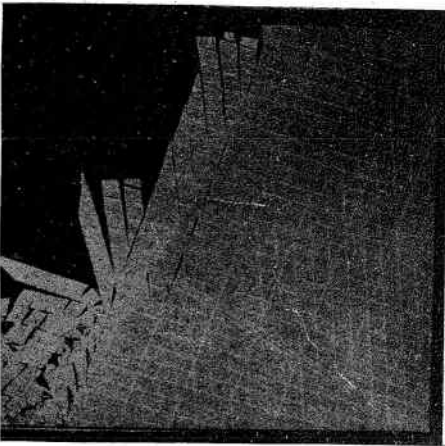
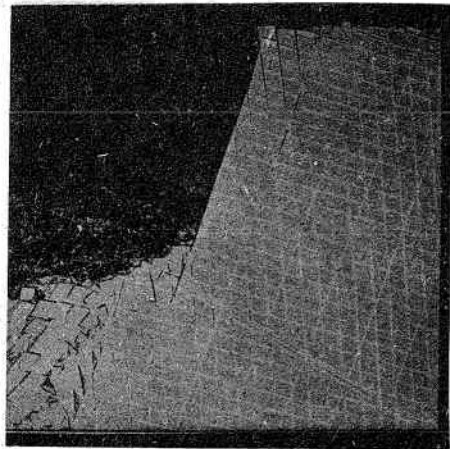
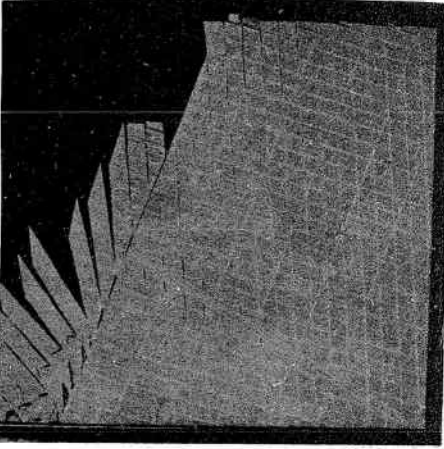
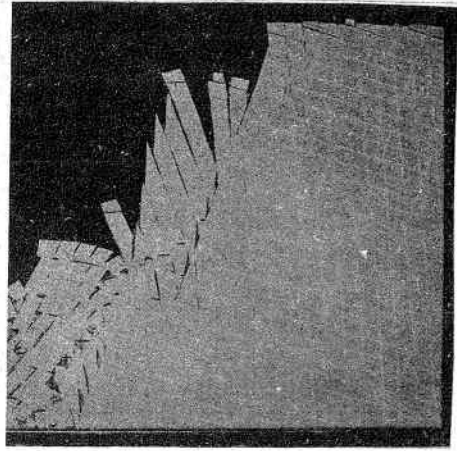
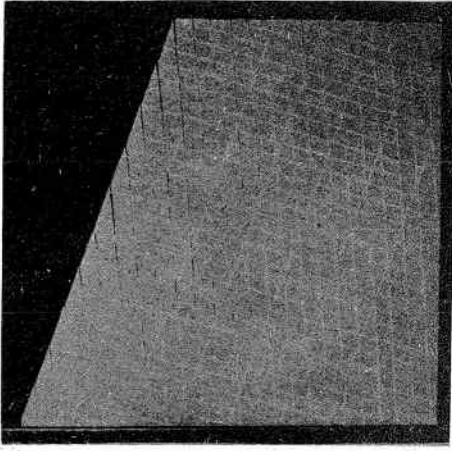


Şekil 6- Şev tepesindeki ölçümlere göre blok hareketleri

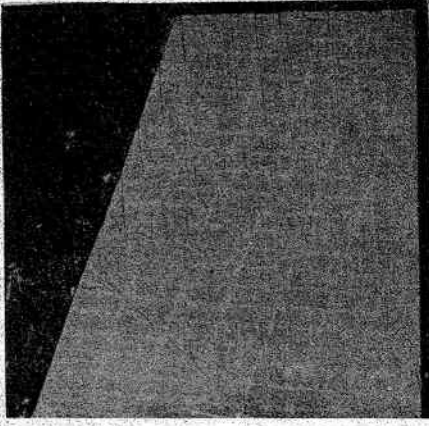


Şekil 5- Altan Kesme modeli

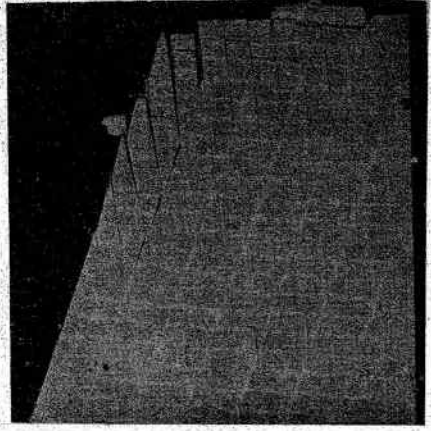




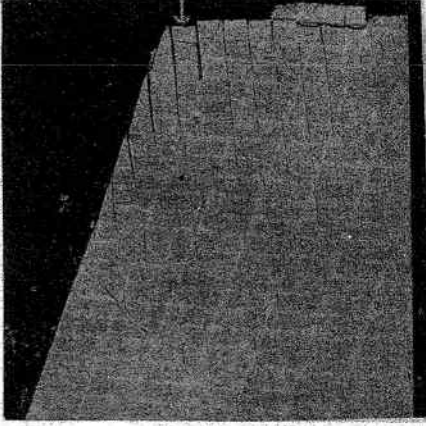
Şekil 8- Tekrarlayan devrilmeyle basamaklı yenilme yüzeyinin uygun konumda oluşması.



a



c



b



d

Şekil 9- II No.lu eklemin sürekliliğine bağlı olarak basamaklı yüzeyin uygun konudma oluşması

4. SONUÇ

Gerçekleştirilen taban sirtünmesi model çalışmalarından aşağıdaki sonuçlar çıkarıldı:

a- 1967 yenilmesi büyük bir olasılıkla devrilme ve kayma etkileşimi içeren karmaşık bir mekanizma ürünüdür. Bu mekanizmada devrilme daha etkindir. Kayma, kamalama hareketleri şeklinde olup, daha çok şevin üst kısmında görülmektedir.

b- Bu mekanizma zamanla gelişen (progressive) ve tekrarlayan bir karakterdedir.

c- Şevin davranışına etki eden süreksizlikler ve bunların yenilme mekanizmasındaki rolleri önem sırasına göre şöyledir:

- i- Devrilme süreksizliği: II No.lu eklem takımı (veya buna paralel olarak gelişen faylar)- devrilmeye olanak tanıyan kaya kolonları oluşturdu.
- ii- Kayma süreksizliği: I No.lu eklem takımı (veya buna paralel olarak gelişen faylar)- II No.lu eklem takımının oluşturduğu kolonları devrilmeye zorlayan aktif kamalar meydana getirdi.
- iii- Dilinim: I No.lu eklemlerle birlikte alt yenilme yüzeyinin oluşmasına yardım etti.
- iv- Litoloji fayı (mevcutsa): Devrilmenin topuğa yayılmasını engelledi.
- v- III No.lu eklem takımı (seyrek): Alt yenilme yüzeyinin oluşmasına katkıda bulundu.
- d- Devrilmeye ilişkin modellerde ve arazide, şev tepesinde bir dizi paralel gerilim çatlağının izlenmiş olması bunların devrilme tipi duraysızlığın bir göstergesi olarak kullanılabileceği sonucunu getirdi.

KAYNAKLAR

1. RICHARDS, L. R. : Strength properties of Delabole slates. Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 22, 27 p. (1973)
2. ERGUVANLI, K. A. ve GOODMAN, R. E. : Applications of models to engineering geology for rock excavations. Bull. of the Assoc. of Eng. Geologist, Vol IX, No. 2. (1972)
3. WHYTE, R.J.: A study of progressive hangingwall caving at Chambishi Coppermine in Zambia using base friction model concept. M.Sc. Thesis, Univ. of London (Imperial College), London, 86p (1973).

4. GOODMAN, R.E. : Geological investigations to evaluate stability. Proc. 2nd symp. of Stability for Open Pit Mining, Vancouver, (1971)
5. HAMMETT, R. D. : A study of the behaviour of discontinous rock masses. Ph. D. Thesis, James Cook Univ. of N. Queensland, Australia. (1975)

* Dr. Müh., O.D.T.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

MADEN KUYUSU (VE DERİN MADEN GALERİSİ) TAHKİMATININ TAŞIYACAĞI BASINCIN TESPİTİ

Ömer AYDAN*
Alpaslan ERSEN*

1. GİRİŞ

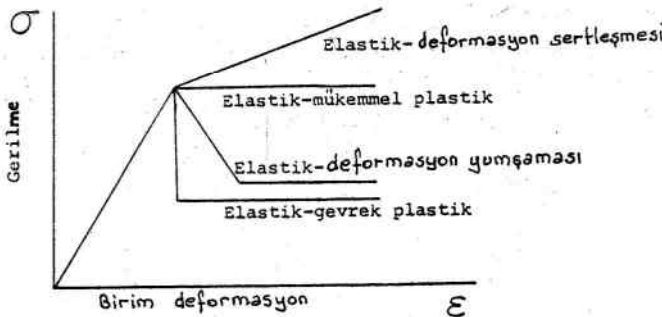
Yeryüzüne yakın, sık maden yataklarının giderek azalması derinlerdeki maden yataklarının işletilmesi için daha derin kuyuların açılmasını zorunlu kılmıştır. Derinlere inildikçe kuyular etrafındaki gerilmeler artmakta ve zaman zaman kuyuyu çevreleyen kayacın dayanımını aşacak seviyelere ulaşabilmektedir. Kayacın yenilmesine müsaade edilmemesi halinde bu basınçlara karşı dayanacak tahkimatın inşası hemen hemen mümkün değildir veya mümkün olsa bile oldukça (yielding) belirli sınırlar içinde izin verilmesi, hem ekonomik hem de emniyet açısından oldukça yararlı olacaktır. Bu da ancak kuyu etrafındaki kütlelerin davranışının etken bir şekilde belirlenmesiyle sağlanır.

Maden kuyularının tasarımı, sadece kuyuyu çevreleyen kütlelerin mühendislik özellikleri ve birincil gerilmelere (initial stresses) göre değil bununla birlikte maden kuyusunun kullanılma ömrüne ve çevre koşullarına da bağlıdır.

2. KUYU ETRAFINDAKİ KÜTLENİN MEKANİK DAVRANIŞI VE TEORİK ÇÖZÜMÜ :

2.1. Kütlelerin Mekanik Davranışı ve Yenilme Kriterleri

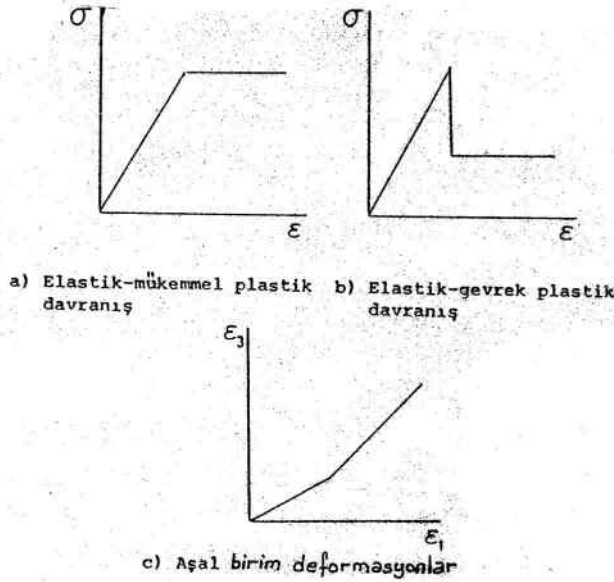
Bir maden kuyusunun kazısı sırasında birbirinden çok farklı özellikte bir çok tabaka ile karşılaşmak mümkündür. Bu tabakalar zemin kil, kum, çakıl veya bunların karışımlarının yanı sıra kaya diye adlandırılan kütlelerden oluşabilir. Kütlelerin mekanik davranışları açısından genelde aşağıdaki gruplardan biriyle temsil edilebilir (Şekil- 1).



Şekil 1. İdealleştirilmiş Malzeme Davranışları

- I. Elastik – mükemmel plastik.
(Elastic – perfectly plastic)
- II. Elastik – deformasyon sertleşmesi.
(Elastic – strain hardening)
- III. Elastik – deformasyon yumuşaması.
(Elastic – strain softening)
- IV. Elastik – gevrek plastik.
(Elastic – brittle plastic)

Gevşek kum veya çakıl, kil, kilaşı bazı ecaporitler v.s. I veya II tipi bir davranış gösterirken kayaların büyük bir kısmı, madenlerde karşılaşılan gerilme ortamında III veya IV tipi bir davranış gösterecektir. Bu yazıda Şekil 2’de gösterilen I ve IV tipi davranışlar göz önüne alınmış ve bu kabule dayanan çözümler sunulmuştur.



Şekil 2. Malzeme Davranışları ve Asal Birim Deformasyonlar.

Kütlelerin yenilme durumlarıyla ilgisi bir çok kriter varolmasına karşın eksenel simetrik veya iki boyutlu problemlerde aşağıda verilen iki yenilme kriteri kütlelerin yenilmesini tanımlamada yeterlidir.

- 1) Tresca kriteri (sürtünmesiz malzemeler için, $\phi = 0$)

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2K \dots \dots \dots (1)$$

$$K = \frac{\sigma_c}{2}$$

- 2) Mohr-Coulomb Kriteri

- a) Kohezyonsuz malzemeler için ($C = 0$)

$$\sigma_1 = q\sigma_3 \dots \dots \dots (2)$$

b) Kohezyonlu ve sürtünmeli malzemeler için (C, ϕ)

$$\sigma_1 - q\sigma_3 + \sigma_c \dots\dots\dots(3)$$

Burada

$$q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

σ_c = Tek eksenli basınç direnç

ϕ = İçsel sürtünme açısı

c = Kohezyon

σ_1 ve σ_3 = Asal gerilmeler

Yukarıdaki kriterlerden Tresca bağıntısı metal, kil, kilitaşı gibi sürtünmesiz malzemeler için oldukça uygun bir kriterdir. Mohr—Coulomb'un özel hali olan 2 no.lu bağıntı taneseli, parçalanmış kütleler yani kum, çakıl veya kırılmış kaya kütleleri için geçerlidir. Kırılmış kaya kütlelerinin az da olsa belirli bir kohezyonu olduğu ileri sürülmektedir. Bu kohezyon büyük bir olasılıkla parçacıkların değişken geometrik şekiller, köşeli ve pürüzlü olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu tür bir kohezyon zahiri bir kohezyondur. Burada verilecek çözümlerde sözü edilen zahiri kohezyonun varlığı gözönüne alınacaktır. Mohr—Coulomb'un kriteri (3 no. lu bağıntı) bir çok kaya kütlelerinin yenilme kriteri olarak oldukça uygun olup, sağlam ve kırılmış (kahçı kohezyonu olan kütle) malzemeler için kullanılabilir.

2.2. Teorik Çözüm

Maden kuyuları etrafında birincil gerilme durumlarının uniform olma olasılığı oldukça yüksektir. Bu nedenle, kuyuların gerilme ve deformasyon analizi eksenel—simetrik bir probleme indirgenebilir. Bu takdirde, denge denklemi, gerilme—deformasyon ilişkileri ve uygunluk (compatibility) denklemi aşağıdaki hali alır.

Denge denklemi :

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0 \dots\dots\dots(4)$$

Gerilme ve deformasyon arasındaki ilişki :

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \epsilon_t = \frac{u}{r} \quad \text{ve} \quad \epsilon_{rt} = 0 \dots\dots\dots(5)$$

Uygunluk denklemi :

$$\frac{\partial \epsilon_t}{\partial r} + \frac{\epsilon_t - \epsilon_r}{r} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ile ifade edilebilir.

Burada :

σ_r ve σ_t	sırasıyla radyal ve teğetsel gerilmeler
ϵ_r, ϵ_t ve ϵ_{rt}	sırasıyla radyal, teğetsel ve kesme birim deformasyonları
u	Deformasyon
r	kuyu eksenine alınan nokta arasındaki radyal mesafe

Elastik bölgede gerilmeler (σ_r^e ve σ_t^e) ve birim deformasyonlar, Lamé'nin bilinen, kalın cidarlı silindirlere için verilen formüllerden, elastik-plastik sınırına σ_{re} gibi bir iç basıncın uygulandığı ve dış çapı sonsuz olduğu kabul edilirse aşağıdaki gibi elde edilir. (daha fazla bilgi için 2, 12 ve 14 no.lu kaynaklara bakınız).

Gerilmeler :

$$\sigma_r^e = \sigma_H - (\sigma_H - \sigma_{re}) \frac{R_2^2}{r^2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma_t^e = \sigma_H + (\sigma_H - \sigma_{re}) \frac{R_2^2}{r^2} \dots\dots\dots (8)$$

Birim deformasyon ve deformasyonlar :

$$U_e = \frac{(1 + \nu)}{E} (\sigma_H - \sigma_{re}) \frac{R_2^2}{r} \dots\dots\dots (9)$$

$$\epsilon_r = \frac{(1 + \nu)}{E} (\sigma_H - \sigma_{re}) \frac{R_2^2}{r^2} \dots\dots\dots (10)$$

$$\epsilon_t = \frac{(1 + \nu)}{E} (\sigma_H - \sigma_{re}) \frac{R_2^2}{r^2} \dots\dots\dots (11)$$

Plastik bölgede değişik yenilme kriterleri ve malzeme davranışları için gerilmelerin elde edilmesi, yazarların konuyla ilgili başka bir çalışmalarında [2] geniş bir şekilde ele alınmış olması nedeniyle burada buna yer verilmeyecektir. Sadece, gerilmelerin elde edilmesi malzemelerin mekanik davranışlarına bağlı olarak kısaca aşağıda gibi özetlenecektir.

A. Malzeme elastik—mükemmel plastik olarak davranıyorsa :

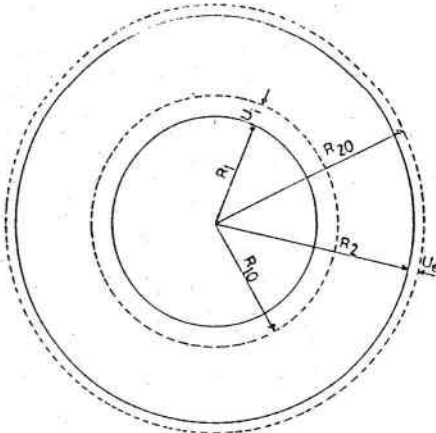
- 1) Kabul edilen yenilme kriteri 4 no. lu denkleme konur ve elde edilen dife-ransiyel denklemin $r = R_1$ 'de (kazı yarıçapı) $P_r = P_1$ gibi bir sınır ko-şulu için entegre edilirse σ_r^p bulunur. Daha sonra σ_r^p yenilme krite-rinde yerine konursa σ_t^p elde edilir. (Eksenel simetrik problemlerde asal gerilmeler σ_r ve σ_t olması nedeniyle $\sigma_1 = \sigma_t$ ve $\sigma_3 = \sigma_r$ olarak alınır.)
- 2) Elastik — plastik sınırdaki ($r = R_1$), $\sigma_r^e = \sigma_r^p$ ve $\sigma_t^e = \sigma_t^p$ koşulunda kaplama-ya gelecek P_1 basıncı σ_H , σ_c , R_2 , R_1 ve q cinsinden elde edilir.

B. Malzeme elastik — gevrek — plastik olarak davranıyorsa :

Sağlam ve kırılmış kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dirençleri (σ_c ve σ_c^*) ile içsel sürtünme açılarının (ϕ ve ϕ^*) farklı olabilme durumu söz ko-nusu olması nedeniyle 4 no.lu denkleme kırık kaya için kabul edilen yenil-me kriteri konur ve bir önceki bölümün ilk maddesindeki gibi bir yol izlene-rek σ_r^p ve σ_t^p elde edilir. σ_r^p ve σ_t^p elde edildikten sonra 8 ile 7 no.lu denklemin farkı alınıp, $r = R_2$ 'de $\sigma_r^p = \sigma_r^e = \sigma_{re}$ eşit olması koşulu kullanılır ve elde edilen denklemden P_1 çekilirse kaplamaya gelecek P_1 basıncı σ_c , σ_c^* , q , q^* , σ_H , R_1 ve R_2 cinsinden bulunur.

Değişik malzeme davranışı ve yenilme kriterleri için σ_r^p ve σ_t^p 'yi veren for-müller Çizelge 1'de ve P_2 , R_2/R_1 ve σ_{re} 'yi veren formüller ise Çizelge 2'de top-luca gösterilmiştir.

Kuyu iç cidarında oluşabilecek deformasyonun elde edilmesi ile ilgili olarak yazar-lar pratik bir çözüm geliştirmişlerdir [2]. Bu çözüm kısaca şu şekilde özetlenebilir. Şayet kaya mükemmel plastik bir malzeme gibi deforme oluyorsa yani hacimsal olarak ne artma ne de azalma oluyorsa, deformasyon öncesi ve sonrası hacimlerin birbirine eşit olması gerekir. Bu taktirde aşağıdaki eşitlik yazılabilir (Şekil 3).



$$\pi (R_2^2 - R_1^2) = \pi (R_{20}^2 - R_{10}^2) \quad (12)$$

Burada

$$R_{20} = R_2 + U_e$$

$$R_{10} = R_1 + U_i$$

ve R_{10} , R_{20} deformasyon öncesi ve R_1 , R_2 ise deformasyon son-rası yarıçapları, U_e elastik—plas-tik sınırın ve U_i ise kuyu iç cida-rının deformasyonlarıdır.

Şekil 3. Deformasyonlarla ilgili Notasyon

R_{20} ve R_{10} 12 no. lu denklemde yerine konular ve bazı sadeleştirmeler yapılar ve U_e ve R_2/R_1 'e bağlı bir A parametresi tanımlanırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$U_1^2 + 2R_1U_1 - R_1^2 A = 0 \dots\dots\dots (13)$$

Bu denklemdeki A parametresi değişik malzeme davranışları ve kullanılan yenilme kriterlerine bağlı olarak Çizelge 2'de daha açık şekilde verilmiştir. 13 no.lu denkleme R 'in değeri olan $(R - U_1)$ konularak elde edilen denklemin kökleri bulunur ve bunun negatif işaretlisi alınırsa kuyu içi radyal deformasyonun (U_1) analitik ifadesi

$$U_1 = R_{10} \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1+A}} \right)$$

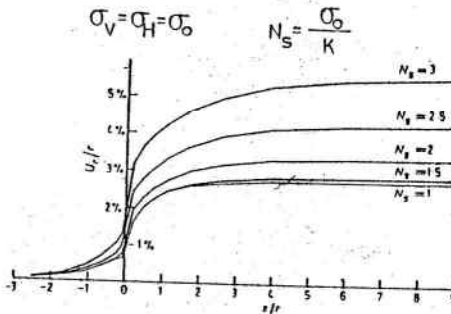
şeklini alır.

Derin maden galerilerinde düşey gerilme σ_v ile yatay gerilme q_1 birbirine eşit hale gelirler (Heim prensibi) [7] . Bu takdirde verilen çözümlerde σ_H 'in yerine q_0 ($= \sigma_H = \sigma_v$) konursa çözümler galeri tahkimatının taşıyacağı basıncın tespitinde kullanılır hale gelirler. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken husus yer çekimi etkisiyle, plastikleşmiş bir kayada açılan galerinin tavanında ek bir basınç oluşacaktır.

3. TAHKİMATIN TAŞIYACAĞI YÜKLERLE İLGİLİ BAZI YORUMLAR VE NÜMERİK UYGULAMALAR

3.1. Tahkimatın Taşıyacağı Yüklerle İlgili Bazı Yorumlar

Bir önceki bölümde verilen formüllerin nümerik uygulamalarına geçmeden önce kuyunun kazılması sırasında ve sonrasında kuyu etrafında ne tür değişikliklerin olduğunu kısaca görmeye çalışalım. Daha önce bir çok araştırmacı tarafından tartışıldığı gibi kazı alını ile civarındaki gerilmeler ve kazı alınından elastik kaya için $3R_1$ ve elastik olmayan kaya için ise $3R_1$ 'den daha büyük mesafelerdeki gerilmeler birbirinden farklı olacaktır (Şekil 4) (5, 7 ve 10). Başka bir deyişle, kuyu cidarına etkiyecek teğetsel gerilmeler



Şekil 4. Elastik Mükemmel Bir Ortamda Açılan Bir Açıklığın Radyal Deformasyonunun Alından Olan Uzaklığa Göre Değişimi ($\phi = 0, C$)

ler 2 boyutlu bir ortamda açılan bir boşluğun cidarına etkiyecek teğetsel gerilmelerden küçüktür. Bu, kuyu dibinin tahkim edici yani DOME ACTION veya FACE EFFECT olarak bilinen bir etmenden dolayıdır. Kuyu dibinin tahkim edici etkisi kuyu derinleştikçe azalmakta, dolayısıyla gözönüne alınan seviyedeki gerilme giderek artmaktadır. Eğer, kayaç bu gerilmeyi taşıyacak dayanıma sahip değilse bir yenilme (yield) zonu oluşur. Literatürde kuyu dibinin tahkim edici etkisi karakteristik eğri (gro-

Çizelge 1. Malzeme davranışı ve yenilme kriterine göre σ_r^P ye σ_t^P yi veren formüller.

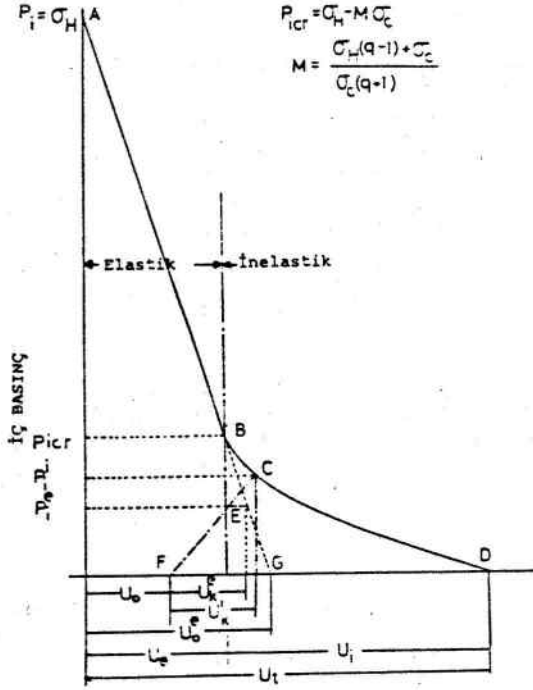
Malzeme davranışı Yenilme kriteri	Radyal gerilme σ_r^P	Teğetsel gerilme σ_t^P
$\sigma_1 - \sigma_3 = 2K$	$= P_1 + 2K \ln \frac{r}{R_1}$	$= P_1 + 2K \left(1 + \ln \frac{r}{R_1}\right)$
$\sigma_1 = q \sigma_3$	$= P_1 \left(\frac{r}{R_1}\right)^{q-1}$	$= P_1 q \left(\frac{r}{R_1}\right)^{q-1}$
$\sigma_1 = q \sigma_3 + \sigma_c$	$= \left(P_1 + \frac{\sigma_c}{q-1}\right) \left(\frac{r}{R_1}\right)^{q-1} - \frac{\sigma_c}{q-1}$	$= q \left(P_1 + \frac{\sigma_c}{q-1}\right) \left(\frac{r}{R_1}\right)^{q-1} - \frac{q \sigma_c}{q-1}$
Sağlam kaya $\sigma_1 = q \sigma_3 + \sigma_c$ Kırılgan kaya $\sigma_1 = q \sigma_3$	$= P_1 \left(\frac{r}{R_1}\right)^{q^*-1}$	$= q^* P_1 \left(\frac{r}{R_1}\right)^{q^*-1}$
Sağlam kaya $\sigma_1 = q \sigma_3 + \sigma_c$ Kırılgan kaya $\sigma_1 = q^* \sigma_3 + \sigma_c^*$	$= q^* \left(P_1 + \frac{\sigma_c^*}{q^*-1}\right) \left(\frac{r}{R_1}\right)^{q^*-1} - \frac{\sigma_c^*}{q^*-1}$	$= q^* \left(P_1 + \frac{\sigma_c^*}{q^*-1}\right) \left(\frac{r}{R_1}\right)^{q^*-1} - \frac{q^* \sigma_c^*}{q^*-1}$

Çizelge 2. Malzeme davranışı yenilme kriterine göre σ_{re} , R_2 / R_1 , A ve P_1 yi veren formüller.

Malzeme Davranışı Yenilme Kriteri	σ_{re}	R_2/R_1	A	Kaplama basıncı P_1
$\sigma_1 - \sigma_3 = 2 K$	$\sigma_H - K$	$\frac{\sigma_H - (P_1 + K)}{2K}$	$\frac{\sigma_H - (P_1 + K)}{K}$ (e) . Ca	$= \sigma_H - K (1 - \frac{R_1}{R_2})$
$\sigma_1 = q \sigma_3$	$\frac{2\sigma_H}{q+1}$	$\left[\frac{2\sigma_H}{(q+1)P_1} \right]^{\frac{1}{q-1}}$	$\left[\frac{2\sigma_H}{P_1(q+1)} \right]^{\frac{1}{q-1}}$. Ca	$= \left(\frac{2\sigma_H}{q+1} \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{q-1}$
$\sigma_1 = q\sigma_3 + \sigma_c$	$\sigma_H - \sigma_c$ M $M = \frac{\sigma_c + (q-1)\sigma_H}{\sigma_c(q+1)}$	$\left[\frac{2}{q+1} \left(\frac{\sigma_H(q-1) + \sigma_c}{\sigma_c + (q-1)P_1} \right) \right]^{\frac{1}{q-1}}$	$\left[\frac{2}{q+1} \left(\frac{\sigma_H(q-1) + \sigma_c}{\sigma_c + (q-1)P_1} \right) \right]^{\frac{2}{q-1}}$. Ca	$= \frac{2}{q+1} \left(\sigma_H + \frac{\sigma_c}{q-1} \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{q-1} - \frac{\sigma_c}{q-1}$
Sağlam kaya $\sigma_1 = q\sigma_3 + \sigma_c$ Kırık kaya $\sigma_1 = q\sigma_3$	"	$\left[\frac{2\sigma_H - \sigma_c}{P_1(q+1)} \right]^{\frac{1}{q-1}}$	$\left[\frac{2\sigma_H - \sigma_c}{P_1(q+1)} \right]^{\frac{1}{q-1}}$	$= \frac{2\sigma_H - \sigma_c}{q+1} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{q-1}$
Sağlam kaya $\sigma_1 = q\sigma_3 + \sigma_c$ Kırık kaya $\sigma_1 = q\sigma_3 + \sigma_c^*$	"	$\left[\frac{2\sigma_H - \sigma_c + \frac{\sigma_c}{c^* - 1} (q+1)}{(q+1)(P_1 + \frac{\sigma_c^*}{q^* - 1})} \right]^{\frac{1}{q^* - 1}}$	$\left[\frac{2\sigma_H - \sigma_c + \frac{\sigma_c^*}{c^* - 1} (q+1)}{(q+1)(P_1 + \frac{\sigma_c^*}{q^* - 1})} \right]^{\frac{2}{q^* - 1}}$. Ca	$= \frac{1}{q+1} \left(2\sigma_H - \sigma_c + \frac{\sigma_c^*}{q^* - 1} (q+1) \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{q^* - 1} - \frac{\sigma_c^*}{q^* - 1}$

$$Ca = \frac{1+\nu}{E} M\sigma_c \left(2 + \frac{1+\nu}{E} M\sigma_c \right)$$

und rection curve veya characteristic curve) diye bilinen bir değişim ile açıklanmaktadır (Şekil 5). Bu değişimde teğetsel gerilmenin yerine radyal iç basıncı kullanılmaktadır. Kuyu açılmadan önce kuyunun tasarlanan yarı çapında $P_i = \sigma_H$ 'lık bir basıncın



Şekil 5. Karakteristik Eğri

uygulandığı kabul edilir ve kazı başladıktan sonra bu giderek azaltılır, neticede sıfıra eşit kılınır. P_i ' büyüklüğünün sıfır olması, kuyu dibinin tahkim edici etkisinin son bulunduğu bir seviyeye eşdeğerdir. Eğer P_i 'nin sıfır olmasından önce kuyu tahkimatının (beton kaplama, çelik hasırlı veya hasırsız püskürtme beton ve kaya civataları gibi) uygulanması halinde tahkimatın deformasyon eğrisi ile karakteristik eğrinin kesiştiği nokta (Şekilde E veya C noktaları olup geometrik yeri malzemenin mekanik davranışına bağlıdır) tahkimatın taşıyacağı yükü belirler. Şekilden de görüleceği üzere tahkimatın taşıyacağı yük kütlenin mekanik davranışına, mühendislik özelliklerine ve müsaade edilen deformasyon'a bağlıdır. Bu nedenle tahkimatın taşıyacağı yükün seçilmesi, tamamen tasarımcının takdiline bağlıdır. Yazarlar burada, kaya kütlesinin sürekli bir ortamdan ziyade süreksizlikleri içeren bir ortam olması nedeniyle kütlenin taşıma kapasitesi yüksek bile olsa püskürtme beton, kaya civataları veya bunların beraber kullanıldığı bir tahkimat elemanının kullanılması, hem kuyu içine düşmesi mümkün kaya bloklarını engellemek, hem de kütlenin sürekli bir ortam olarak deforme olmasını sağlayabilme açısından önerirler.

Karakteristik eğrinin kullanılmasında belli başlı en önemli problem tahkimat konulmadan önce oluşan deformasyonun belirlenmesidir. Bu deformasyonun belirlenmesinde nümerik yöntemlerden ve/veya geçmişteki deneyimlerden yararlanılabilir.

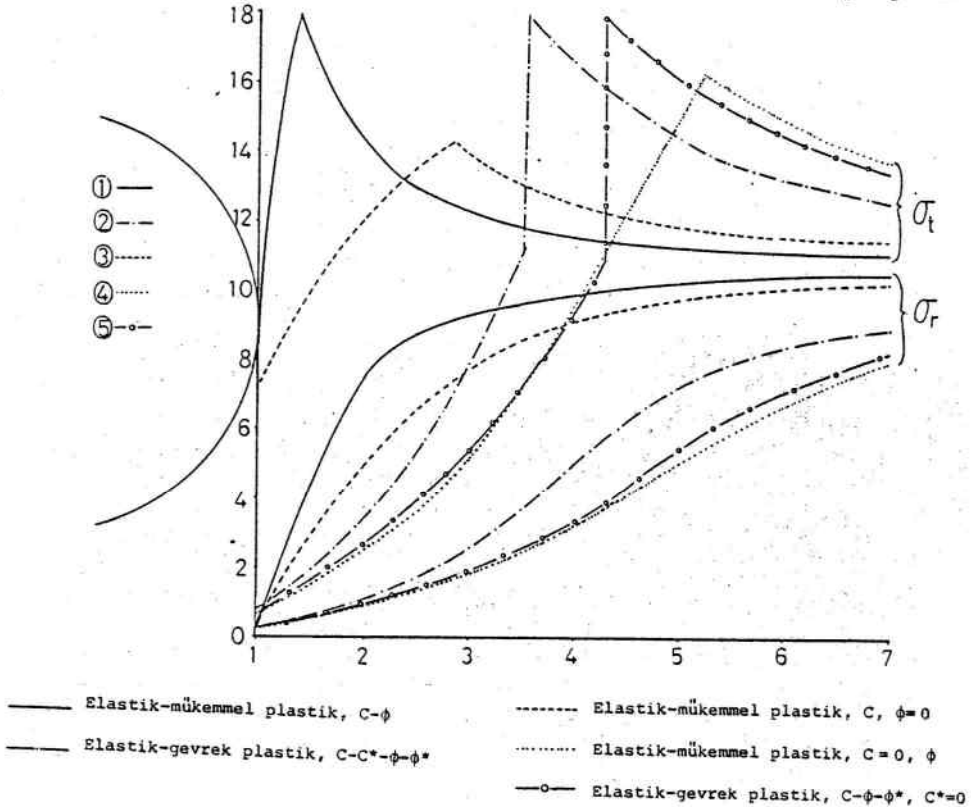
3.2. Nümerik Uygulamalar

Burada verilen örnek uygulamalarda Abel ve arkadaşları [1] tarafından New Mexico'da Mt. Taylor madeninde Şeyl'de açılmış bir kuyu ile ilgili verilmiş verilerden 610 metre derinliğe ait olan değerler kullanılmıştır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Malzemenin Mühendislik Özellikleri

Yatay Gerilme (MPa)	Mühendislik Özellikleri						
	σ_c	σ_c^*	ϕ	ϕ^*	q	q*	E(GPa)
10.8	7.0	0.2	30°	30°	3	3	4.15

Bu çizelgede kullanılan ϕ , ϕ^* , q, q* ve ν 'in değerleri Abel ve arkadaşlarınınkinden biraz farklıdır. Elastik – mükemmel plastik hesaplarda kayanın özellikleri olarak sağlam kayanınkiler dikkate alınmıştır. Kırılgan kaya için, sözü edilen kaynakta herhangi bir veri olmaması nedeniyle ilgili parametreler Wilson'ın sınıflamasından [16] elde



Şekil 6. Değişik Malzeme Davranışları İçin Kuyu Etrafındaki Gerilme Dağılımları.

edilmiştir. Çizelge 3'te verilen verileri malzemenin mekanik davranışı ile yenilme kriterlerine göre çıkarılmış formüllerde kullanıldığında (0,2 MPa'lık bir iç basınç için) kuyu çevresinde teğetsel (σ_t) ve radyal (σ_r) gerilmeleri Şekil 6'da gösterildiği gibi elde edilir. Şekilden de görüleceği gibi kuyu çevresinde oluşabilecek yenilme zonunun büyüklüğü ile malzemenin mekanik davranışı ve yenilme kriteri arasında oldukça önemli bir ilişki vardır.

İç basıncın değişimine bağlı olarak kuyu iç yüzeyinde oluşabilecek deformasyon miktarı ve yenilme zonun büyüklüğü (R_2 / R_1) Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu şekiller bir önceki örnekteki hususun önemini vurgulamaktadır.

Üçüncü örnek uygulamada ise kırıklı kayanın sürtünme açısının önemini vurgulamaktadır. Bilindiği üzere kırıklı kayanın düşük gerilmelerde sürtünme açısı ϕ^* sağlam kayanınkinden büyük olabilmektedir. Literatürde bu konuyla ilgili bir çok yazı bulmak mümkündür [3] [4] [6] [7] [9] ve [11]. Elastik gevrek – plastik davranışla ilgili formülleri kullanarak, kırıklı kayanın $\phi^* 20^\circ$ 'den 45° 'ye kadar değişen içsel sürtünme açıları için iç basınç ile kuyu iç yüzeyi deformasyonu ve yenilme zonunun büyüklüğünün değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Kırıklı kayanın tek eksenli basınç dayanımının 0,2 MPa olmasına karşın sürtünme açısının büyüklüğünün etkisi şekillerden kolaylıkla görülebilir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

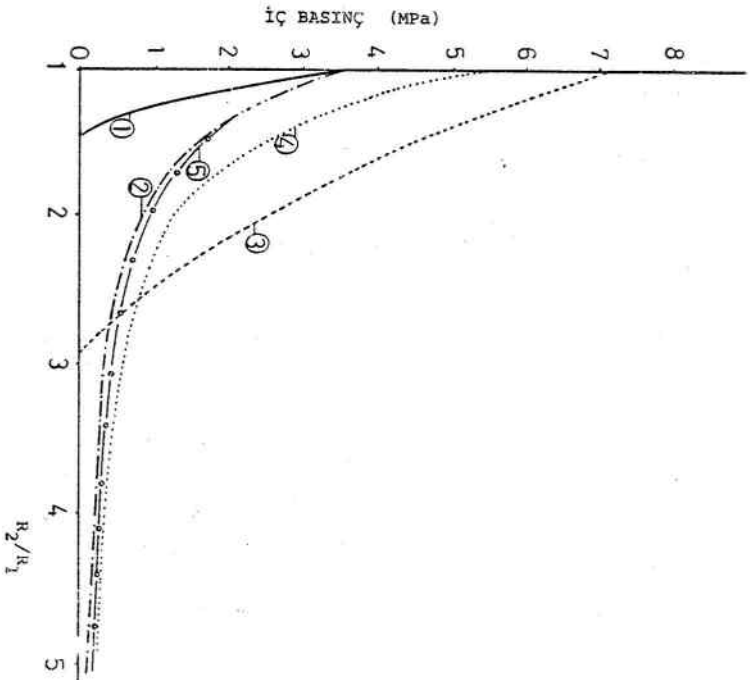
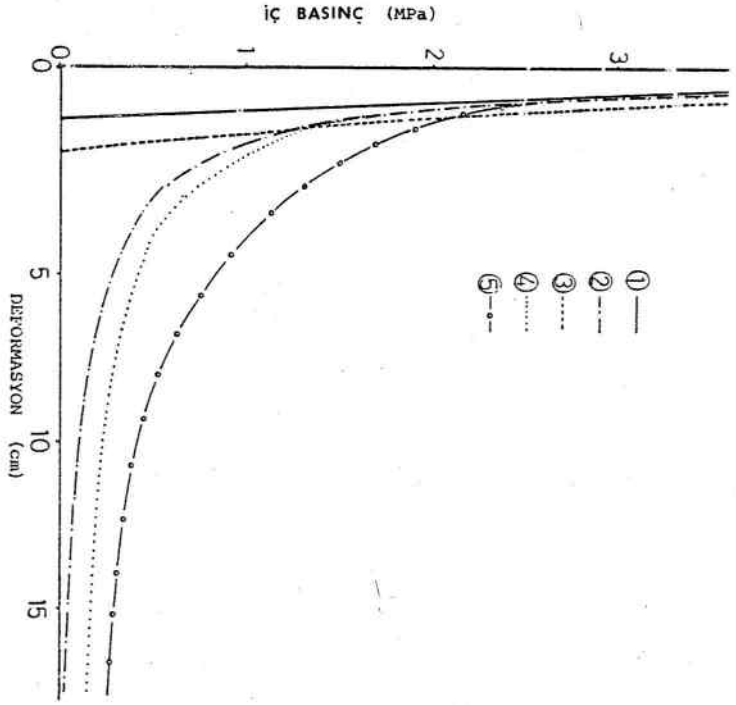
Bu yazıda verilen çözümlerde malzemenin mühendislik özelliklerinin zamana ve çevre koşullarına (su, sıcaklık v.s.) bağlı olarak değişmediği ve kütlelinin izotrop ve homojen olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle burada verilen çözümlerin kullanılması halinde bu hususa dikkat edilmelidir. Wiid, Singh ve Bramford ve Ladanyi [13], [15] ve [8] malzemenin uzun dönem özellikleri için, kısa süreli dayanım testlerinden elde edilen değerlerin kuru ortamdaki koşullarda % 75–80'ini ve sulu ortamda ise %60'ı kadar alınmasını salık vermektedir. Ayrıca, yazarlar hesaplamalarda küçük kaya numuneleri üzerinde yapılmış test neticelerini değil kütlelinin test neticelerinin kullanılmasını önerirler.

Kuyu veya galeri etrafında oluşabilecek yenilme zonlarının büyüklüğü ile açıklık cidarında oluşabilecek deformasyonunun miktarı ve dolayısıyla tahkimatın taşıyacağı yük, açıklığı çevreleyen kütlelinin mekanik davranışına, yenilme öncesi ve sonrası mühendislik özelliklerine, tahkimat yerleştirilmeden önce oluşan deformasyon miktarına ve tahkimatın esnekliğine sıkı sıkıya bağlıdır.

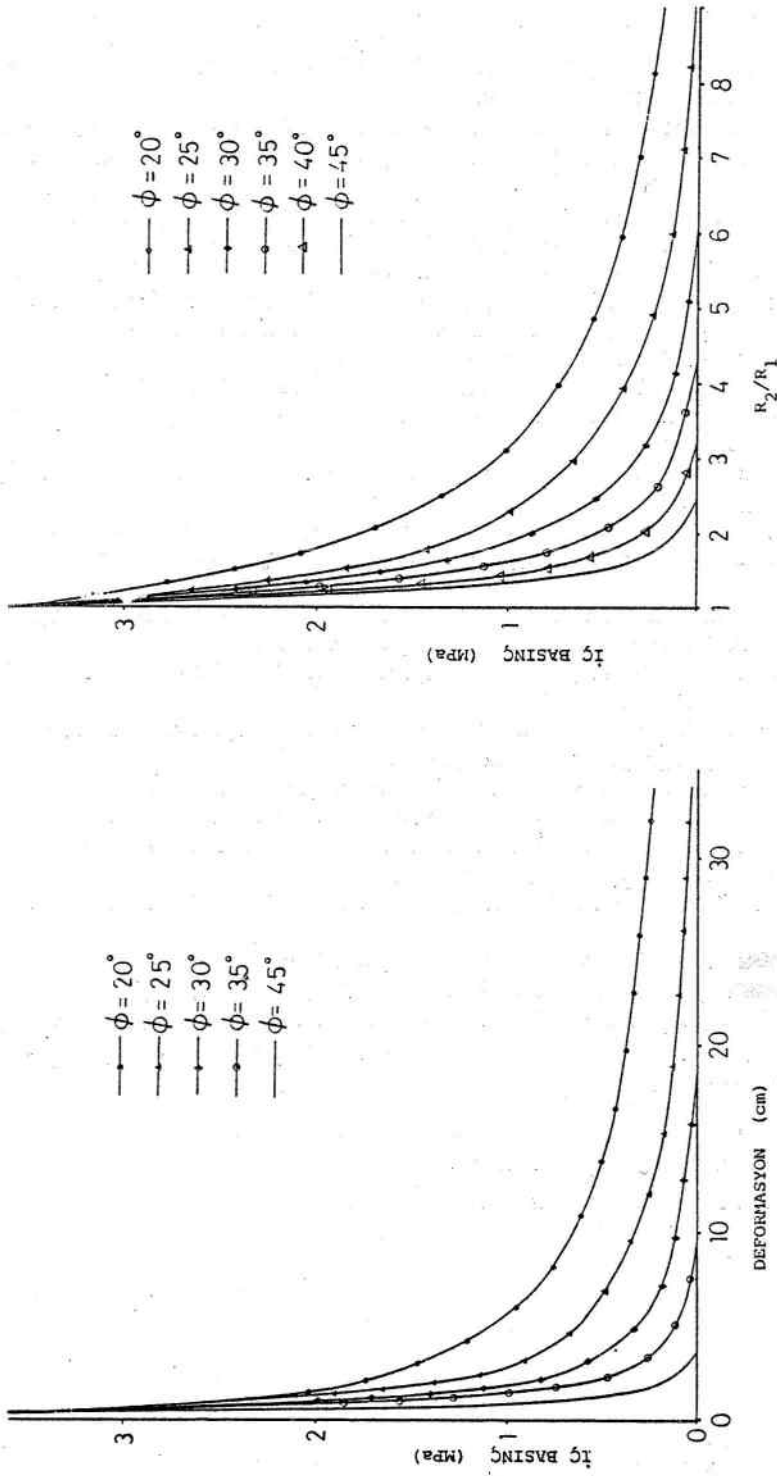
Verilen nümerik uygulamalardan ve önceki bölümlerden de anlaşılacağı üzere kuyu ve galeri tahkimatının taşıyacağı basıncın tesbiti malzemenin mekanik davranışı ile mühendislik özelliklerinin yanısıra tasarımcının seçimine (takdirine) de bağlı olduğu görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar Nagoya Üniversitesi Kaya Mekaniği bölümü başkanı Prof Dr. Toshikazu KAWAMOTO ile araştırma asistanı Yasuaki ICHIKAWA'ya gösterdikleri yakın ilgi ve yardımlar için teşekkür ederler.



Şekil 7 Değişik malzeme davranışları için iç basınç ile kuyu içi radyal deformasyonu ve yenilme zon oranının değişimi



Şekil 8 Kırık kayanın sürtünme açısının kuyu içi radyal deformasyonu ile yenilme zonu yüküne etkisi.

KAYNAKLAR :

1. ABEL, J., DOWIS, J. E. and RICHARDS, D. D., Concrete Shaft Lining, 20 th U.S. Symp, Rock Mechs., Austin, Texas, June, 1979.
2. AYDAN, Ö. ve ERSEN, A., Maden Kuyularının Üzerine Gelebilecek basınçların ve kaplama Kalınlığının Hesabı, Madencilik Dergisine sunulacak yazı, Maden Müh. Odası, Ankara, 1985.
3. BROWN, E. T. and TROLLOGE D. H., Strength of a Model of Jointed Rock, J. Soil Mech. of Foundations Divisions, Procs. of ASCE, March, 1970.
4. DAEMEN, J. J. K. and FAIRHURSTIC, Influence of Failed Rock Properties on Tunnel Stabilitiy, Procs. 12 th U. S. Symp. Rock Mechs., AIME, New York, 1971.
5. DESCOEDRES, F., Analyse tridimensionnelle de la stabilite' d' un tunnel au voi sinage de front de taille dans une roche elasto - plastique.
6. EINSTEIN, H. H., NELSON, R. A., BRAUHN R. W. and HIRSCFELD R. C., model Studies of jointed Rock Behavior. Procs. 11 th U. S. Symp. Rock Mechs., AIME, New York, 1970.
7. HOEK, E. and BROWN, E. T., Underground Excavations in Rock, Inst. Mining and Metallurgy, London, 1980.
8. LADANYI, B., Use of Long-term Strength Concept in the Determination of Ground Pressure on Tunnel Linings, Procs, 3 rd Int. Congr., ISRM, Denver, 1974, Part B.
9. LADANYI, B. and ARCHAMBAULT, G., Evaluation de la Resistance au Cisaillement d'un Massif Rocheux Fragmenté', 24 th IGC Section 13, 1972.
10. PANET, M., GUENOT, Analysis of Convergence Behind the Face of a Tunnel, 82 Tunnelling Symp. Brighton, 1982.
11. ROSEGREN, K. S., and JAEGER, C., The Mechanical Properties of an Interlaced Low Porosity Aggregate, Geotechnique, Vol. 18, 1968.
12. SAVIN, GN., Stress Concentration Around Holes, Pergamon Press, 1961.
13. SING, O. P. and BAMPORD, W. E., The Prediction and Measurement of the Long-term Strength of Rock, Procs. 1 st Australia - New Zeland Conf. on Geomechanics, Metbourne, Vol 1, pp 37 - 44, 1971.
14. TIMOSHENKO, and GOODIER, Theory of Elasticity, 3 rd Ed., Mc Graw- Hill Int Book Co., 1970.
15. WIID, The Influence of Moisture on the Prerupture Fracturing of two Rock Types, Procs. 2 nd Congr. Int. Soc. Rock. Mechs., Beograd, Vol. 2, pp 239-250, 1970.
16. WILSON, A. H., A method of Estimating the Closure and Strength of Lining Required in Drivages Surrounded by a Yielding Zone, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 17, 1970.

(*) Y. Müh., Doktorant, Nagoya Universitesi, JAPONYA

(**) Y. Müh. TKİ Genel Müdürlüğü Etüd Dairesi, ANKARA

SÜRTÜNMELİ ÇELİK BAĞLARIN YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİNDE NATM KULLANILABİLME OLANAKLARI

Mahir VARDAR *

I- Giriş

Tünel yapımında, seçilen kazı yöntemi kadar, açım sırası ve sonrasındaki sağlamlaştırma işlem ve önlemleri de süreli ve kalıcı duraylık (stabilite) açısından önem taşımaktadır. Burada, bir sağlamlaştırma önlemi olarak sürtünmeli çelik bağlardan yararlanılabilme olanakları incelenmekte ve bunların Yeni Avusturya Tünel yapım yöntemi içindeki yerinin ne olabileceği üzerinde durulmaktadır.

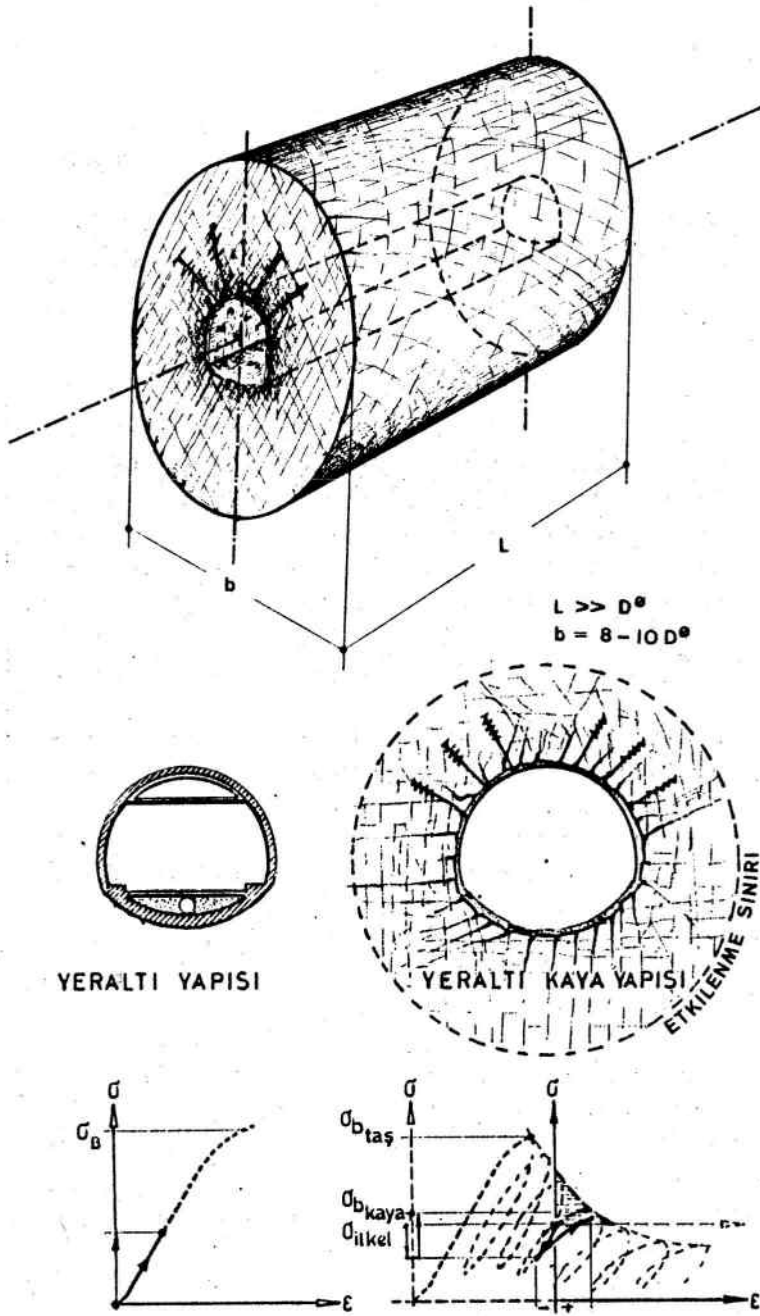
2- YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ

Yeni Avusturya Yöntemi; "Tünel" adı altında yeraltında oluşturulan iki ucu açık, boyu eninden fazla, eğimi 30° 'den az, kalınlığı boşluk duvarından etkilenme sınırına kadar ulaşan ve ana malzemesi kaya olan çok kalın cidarlı silindirik bir yeraltı kaya yapısını tanımlamaktadır (Şekil . 1). Bu tünel açma yönteminde ana ilke; en uygun kazı ve sağlamlaştırma yöntemlerinin seçilerek kazı sonrasında oluşan ikincil gerilme ve deformasyonların, kaya yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlamlığını olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendisini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturmasını sağlamaktır (Müller, 1978; Vardar, 1979).

Yöntemin amacı, kazı sonrasında oluşan dağ basıncına, mutlak rijit sistemlerin tepkime kuvvetleri ile karşı koymak değildir. Bu nedenle, rijit tahkimat elemanları ve kalın kaplamalar kullanmak istenmez. Bunlar ancak, yöntemin yeterli hız ve titizlikle uygulanmadığı ve dolayısıyla, kayanın taşıma niteliklerinin tümüyle yitirildiği veya aşırı derinliklerdeki, ya da yüksek tektonik gerilmelerin etkili olduğu latent plastik ortamlarda zorunlu olarak devreye girer.

Yöntemin başarılı olabilmesi için:

- a) Kayanın mekanik davranışlarının
- b) Çevre etmenlerinin (primer gerilmeler, su durumu v.s.) ve
- c) Teknik girişimin boyut, biçim ve türünün belirlenmiş olması.



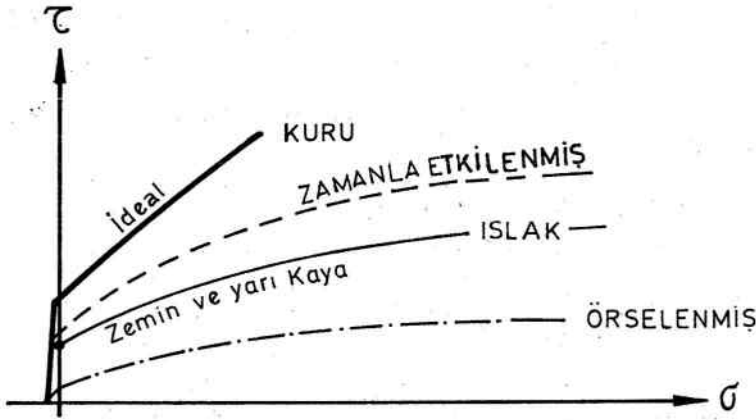
Şekil 1. Kaya yapıları mekaniği anlayışında "TÜNEL"

açım sırasında ikincil deformasyon ve gerilmelerin yeterli ölçüm ve gözlemlerle izlenerek açım çalışmalarının denetlenmesi ve yönlendirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmalar sırasında:

1) Davranışı önceden bilinen ve tahmin edilen kayanın "ideal yenilme koşulu" (Mohr Zarfı) (Şekil . 2).

- Yeraltı suyunun drenajı
- Aşırı örselenmeyi engelleme (patlayıcıdan olabildiğince kaçınma)
- Gevşemeleri ve sökülme önleme ve
- Zamanı yeterince kısa tutma gibi önlemlerle korunmalıdır.



Şekil 2- Mohr zarflarında su, zaman ve örselenme etkisiyle oluşan olumsuz değişimler.

2) Kazı sonrasında oluşan "ikincil gerilme durumu"

- Gerilme yoğunlaşmalarını engelleyecek (yuvarlatılmış kazı yüzeyleri)
- Tek eksenli gerilme ortamını yaratmayacak püskürtme beton ve ankraj),
- Kaya yapısında çekme gerilmeleri oluşmayacak şekilde uygun kesit şekli, ön konsolidasyon) denetlenmelidir.

3) "İkincil deformasyonlar"

- Gevşemelere izin vermeyecek kadar küçük
- Tünel cidarını plastikleştirerek ve gerilme kemerini (Wiesmann-Trompeter Zonu) dağın içersine kaydıracak kadar büyük
- Zamanla sınımlenecek kadar kontrollü tutulmalıdır.

3. YENİ AVUSTURYA YÖNTEMİNİN UYGULAMASINDA BAŞLICA GÖRÜŞLER

Tünel çevresinde oluşan ikincil gerilme şiddeti, tünelin duraylılığını (stabilitesini) belirleyen ana etmendir. Kazı sonrasında oluşan bu gerilmelerin kayanın kritik taşıma direncinden az olması halinde, ani veya gecikmeli elastik deformasyonlar ile pekleşme deformasyonları görülmekte, tünelin duraylılığı duvarlarla yoğunlaşan gerilmelerle kısa bir süre sonra sağlanmaktadır (Şekil. 3 a)

Kritik taşıma direncini aşan gerilme şiddetleri ise, ya zamanla ya da hemen, plastik bir koruma zonu gerisinde gerilme kemeri oluşturmaktadır (Şekil. 3 b) . Bu sağlamlaştırmasız süre uzatılacak olursa, plastikleşme zonu gevşeyerek bir dom halinde tüneli yüklemekte ve aşırı büyük deformasyonlar ve gerilmelerle zorlanan kaya yapısını tutabilmek ve kayaya kendi kendini taşıtabilmek büyük bir sorun olmaktadır (Şekil. 3 c).

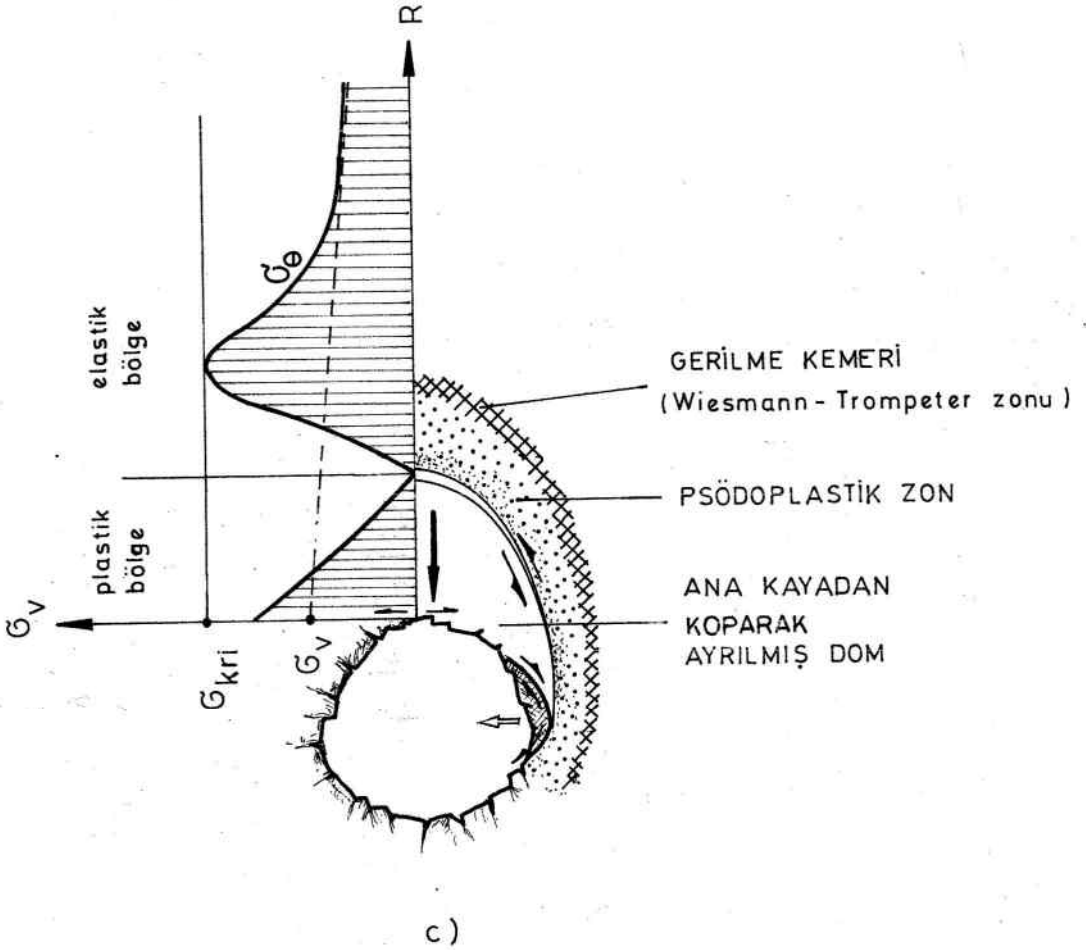
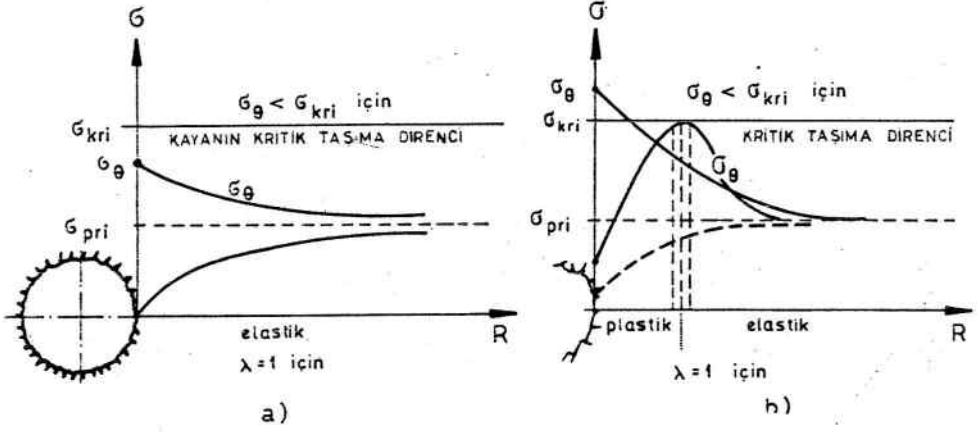
Yeni Avusturya yönteminin uygulanması sırasında iki farklı görüşten yararlanmak mümkündür. Bunlar:

1) Yüzey oturmalarını (subsidans'ı) ve tünel içi deformasyonlarını (konverjans'ı) olabildiğince küçük tutabilmek için "deformasyon önleyici" açım.

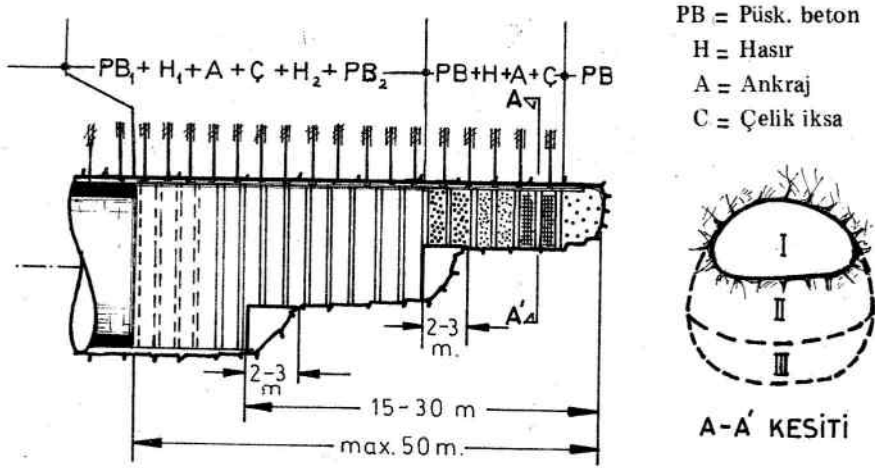
2) Deformasyonlara olanak tanıyarak dağ içinde koruyucu zon oluşumunu sağlayan "plastikleştirici" açım türleridir.

Birinci görüş, kazı ve sağlamlaştırma işlemlerinin çok hızlı yürütülmesini ve en kısa zamanda arının hemen gerisinde (en fazla 15-30 m.) radyenin kapanmasını sağlayacak şekilde çok iyi organize edilmiş çalışmaları gerektirir. Düşük dayanımlı kayalarda, örtü kalınlığının 3-4 D Ø'den daha az olduğu, yerleşim bölgelerinin altından geçen tünellerde, tünellerin portallerinde ve girişten itibaren ilk 50-100 m.'lik kesimlerinde, metrolarda, kaplama arkasından su akımı olasılığı bulunan enerji tünelleri, cebri tüneller (şaftlar), denge bacaları, su alma yapıları, derivasyon tünelleri ve barajların enjeksiyon perdesi gerisindeki kontrol ve drenaj galerilerinde özellikle uygulanır. Deformasyonları durdurmak için seçilen sağlamlaştırma kuvvetleri (ankrajlardaki ön gergi kuvvetleri) büyük, püskürtme beton kalitesi yüksek (B 300 ve daha fazla) çelik hasır dokusu sık (< 10 cm)'tir. Çelik iksa rijittir ve çoğun yakın aralıklarla (<100 cm.) yerleştirilir.

Açım sırasında genellikle üst yarı (kalot), orta kesim (üst stros) ve taban (alt stros) olmak üzere üç kademeli kazı yapılır. Kazı profilleri en kesitlerde ve boy kesitte köşesizdir (Şekil. 4).



Şekil 3. Tünel çevresinde farklı gerilme dağılımları



Şekil 4- Kademeli kazı ve sağlamlaştırma işlemleri

Uygulanan sağlamlaştırma önlemleri ve kullanılan duraylık süreleri için kabul edilen kaya kalitesi, gerçek durumdan en az bir kaya kalitesi sınıfı kadar daha düşüktür.

Deformasyonları önlemeyi ve durdurmayı amaçlayan bu görüş; kullanılan teknik kadronun üstün nitelikli ve teknolojinin en ileri düzeyde olmasını gerektirdiği için, ortaya pahalı ve zor uygulanabilir bir yöntem çıkarmaktadır.

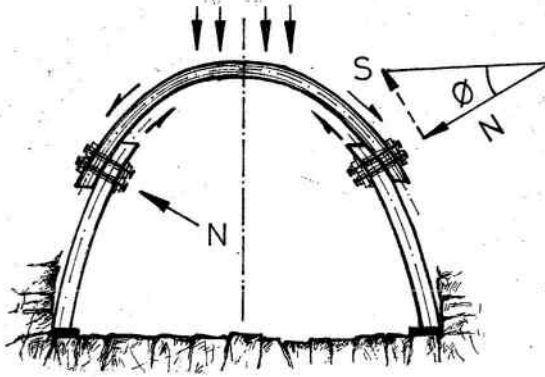
İkinci görüş; deformasyonları durdurmak yerine, denetleyerek ikincil gerilmelerin şiddetini azaltmayı ve tüneli çevreleyen kesime psödoplastik özellikler kazandırarak, gerilme yoğunlaşmalarını dağın içine doğru kaydırmayı amaçlamaktadır. Böylece sağlamlaştırma giderlerinde önemli ölçüde azalma sağlanabilmektedir. Bu anlayışla açılan tünellerin üzerinde ve yüzeyinde önemli, fakat zararsız çökmeler ve tünel çapında büyük ölçüde azalmalar gözlenirse de, aşırı gevşemelere izin verilmediği için kaya dokusu (teknik fasiyes) yöntemin ilkelerine ters düşecek oranda bozulmaz. Sağlamlaştırma öğeleri ince ve sünektir. Püskürtme beton kalınlığı çoğun 3-5 cm. ve kalitesi B 200 dür. Hasır dokusu gevşek (10-20 cm) ve çelik bağlar eğilmeksizin çalışacak özelliktedir. Bağ aralıkları genellikle 1.5-3 m. arasında seçilir. Yöntem, örtü kalınlığının fazla, yüzey oturmalarının (tasman) önemsiz olduğu boş araziden geçen ve su sirkülasyonunun bulunmadığı yerlerdeki, özellikle demiryolu ve karayolu ulaşım tünellerinde başarıyla kullanılmaktadır.

Kuşkusuz; eh doğru olan tünel açma anlayışı, yerine göre ilk veya ikinci görüşü ağırlıklı olarak kullanabilen anlayıştır. Örneğin; tünel giriş ve çıkışlarında deformasyon durdurucu yöntem uygulanabilir ve kaya kalitesi elverdiği sürece, içerilerde deformasyon kontrollü açma gidilebilir. Buna karar verebilmek için deformasyon

hızlarının ve gerilme değişimlerinin ölçülmesi ve denetlenmesi kaçınılmazdır. Yeni Avusturya anlayışında bu nedenle, arazi deneyleri, ölçüm ve gözlemleri yöntemin en önemli belirteçleri arasında bulunmaktadır.

4- SÜRTÜNMELİ ÇELİK BAĞLARIN ÇALIŞMA İLKESİ

Çelik bağlardan beklenen, yay üzerine binen yükü sürtünme kuvvetleriyle karşılayarak ayaklara iletmek, böylece kaya yapısının duraylılığını korumak ve sağlamak için gerekli olan iksa direncini kazı yüzeyine uygulamaktadır (Şekil. 5).

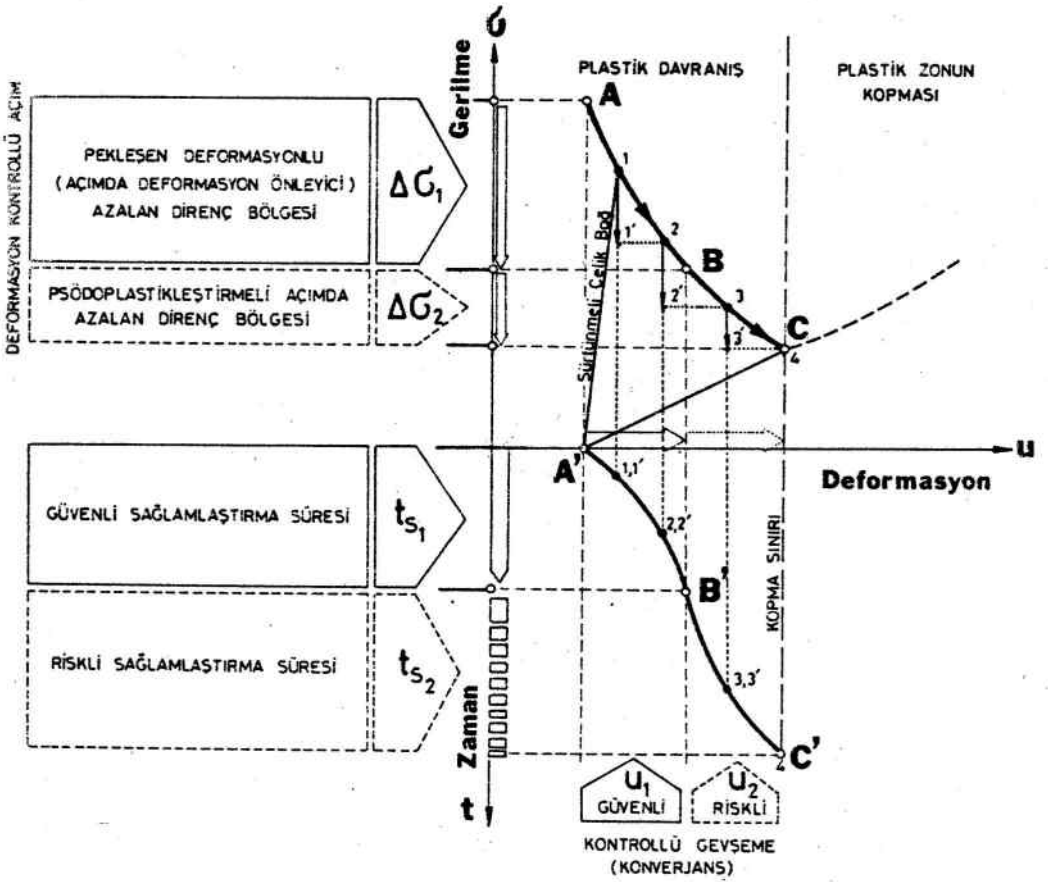


Şekil 5- Sürtünmeli çelik bağlarda oluşan sürtünme kuvvetleri

Sürtünmeli çelik bağların rijit iksalara göre önemli bir yararı, en düşük iksa basıncını gerektiren deformasyon miktarını ve sağlamlaştırma süresini de saptamaya yardımcı olabilmeleridir.

Bağ kenetlerindeki civataların sıkılması ile deformasyonları durdurabilmek ve civataları yavaş yavaş gevşetip optimal yükte yeniden sıkarak çelik bağı yeterli güvenliği sağlayacak rijit bağ şekline sokmak mümkündür. Civataların optimal yüke ulaştıktan sonra biraz daha gevşetilmesi, plastikleşme zonundaki gevşemeler sonucunda oluşan ölü yükü arttırarak gerilme kemerini optimal bölgeden uzaklaştıracığı için, son sıkma işleminin en uygun anda yapılmasına özen gösterilmelidir (Şekil .6)

Tünel açıklığını çevreleyen, psödoplastik davranışlı zon zamanın fonksiyonu olarak gelişir. (RABCEWICZ, 1960) Hiçbir önlem alınmaksızın açıklık kendi haline bırakılacak olursa, deformasyonlardaki artışla ters orantılı olarak radyal basınçlar önemli ölçüde düşer. (PACHER 1964) Bu süre içinde radyal yükleri karşılamaya yönelik sağlamlaştırma (iksa) önlemleri için daha ince, daha hafif ve daha sürdürülebilir malzeme kullanılabildiğinden uygulamada ucuzluk ve kolaylık sağlanır. Sürtünmeli çelik bağlar kullanıldığında ölçülen konverjans değerleri henüz azalan deformasyonlar (HÖFER, 1955) evresinde iken iksa basıncının uygulanabilmiş ve statik dengenin kalıcı duraylık



Şekil 6- Zamanla azalan radyal basınçların sürtünmeli çelik bağlarla durdurulması

sağlanacak şekilde kurulmuş olması gerekir. Bu amaçla, radyal basınçlara ancak karşı koyabilen bağ (1 den 1'ye doğru) gevşetilerek, dağın (1' den 2 ye doğru) deformasyonu-na izin verilir (Şekil 6). Bu deformasyonlar, dağ basıncının bağların iksa direncine eşit olmasına kadar devam eder. Bu şekilde tekrarlanan gevşetmeler ve deformasyonların azalan bölge içinde bulunup bulunmadığının araştırılması ile dağdan gelebilecek en düşük basınç değerine ulaşılmaya çalışılır (4 noktası). Daha sonra civatalar yeniden sıkılarak gerekli güvenlik sağlanır.

Tünelciliğin zor ve karmaşık çalışma koşullarında bu işlemlerin tüm bağlara teker teker uygulanması mümkün olmadığı için, tünel mühendisinin değişen ortam koşullarında zaman zaman ve belirli aralıklarla bu denetim ve yönlendirme çalışmalarını sürdürmesi çoğun yeterli olur.

Bağların sürtünme dirençleri veya rijitlikleri optimal basınçları karşılamak için yeterli olamazsa, bu kez deformasyonlar artan dağ basınçları ile birlikte kararlı veya hızlanmalı akma evresine girerek, çok rijit, masif ve pahalı sağlamlaştırma önlemlerini zorunlu kılar. Bu aşama; hem deformasyonlarda hem de gerilmelerde artış meydana geldiği için, azalan basınç- artan deformasyon aşamasından ancak gerilme ve deformasyon ölçümlerinin birlikte yürütülebildiği durumlarda ayırt edilebilmektedir. Dolayısıyla kontrollü bağların düzenlendiği tünel kesitleri, aynı zamanda bir ölçüm ve gözlem kesiti de olmak zorundadırlar.

Sonuç olarak sürtünmeli çelik bağlar kontrollü gerdirmenin uygulanabileceği kaya ankrajlarına benzer şekilde davrandıkları için optimal sağlamlaştırmada önemli yararlar sağlayabilirler.

"Sürtünmeli Çelik Bağların Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde Kullanılabilme Olanakları" makalesinin şekil altyazıları

1. MÜLLER, L. : Der Felsbau, Dritter Band: Tunnelbau
Ferdinand Enke Verlag Stuttgart (1978)
2. MÜLLER, L., G. SAUER, M. VARDAR: Dreidimensionale Spannungsumlagerungsprozesse im Bereich der Ortsbrust
Rode Mechanics, Suppl. 7, (1978)
3. PACHER, F. : Deformationsmessungen in Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues Felsmech. und Ing. Geol. Supl. 1, 149 - 161 (1964)
4. RABCEWICZ, L.v. : Spritzbeton und Ankerung als Hilfsmittel zum Vortrieb und als endgültiger Tunnelausbau. Berg - und Hüttenmannische Monatshefte 106. H. 5/6 (1960)

5. VARDAR, M. : Yeraltı Kaya Yapıları Mekanikinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) nin Ana ilkeleri, Ankrajlar ve Boyutlandırılması, DSİ Yayını Jeoteknik 2. Ankara (1979)
6. VARDAR, M. : Kayanın Zamana Bağlı Kurulma Davranışlarının Madenlerdeki Kaya Yapılarının Stabilesine olan etkisi Türkiye VII. Madencilik Kongresi, 85-100, Ankara (1981)

* Doç. Dr. Müh., İ.T.Ü. Maden Fakültesi, İstanbul

TUNEL TAHKİMAT TASARIMINDA ÇELİK BAĞ YERİNE KAYA SAPLAMASI UYGULAMANIN YARARLARIYLA İLGİLİ BİR ÖNERİ

Celal KARPUZ *

1. GİRİŞ

Dünyada, metal madenciliğinde de, kaya saplamalarının kullanımı gittikçe yoğunlaşarak klasik çelik bağ tahkimatının yerini de almaktadır. Bir an için kaya saplaması gibi daha hafif bir tahkimat sisteminin, ağır çelik bağların görevini nasıl yerine getireceği akla gelebilir. Ancak, dünyada çelik bağların bile ezilip kırıldıkları maden galerilerinde çimentolanmış basit kaya saplamalarının işlev gördüğü saptanmıştır. (1) Diğer taraftan, artan çelik fiyatları ve çelik bağın üretimi ve galerilere yerleştirilmesindeki yüksek işçilik giderleri tasarımcı mühendisleri alternatif tahkimat sistemi araştırmaya zorlamaktadır. Kaya saplamaları, çelik hasır veya püskürtme beton tahkimat sistemleri, bu arayışın çözümüne aday tahkimatlar olarak gelişmektedirler. Kaldı ki, tahkimat tasarımında temel ilke ve amaç; kaya kütlelerinin kendi kendisinin tutmasını (taşımaları) sağlamaktır.

Önerilen tahkimat sisteminin de özen gösterilmesi gereken bazı uygulama koşulları vardır. Örneğin, kaya saplamaları için; galeri etrafında beklenen maximum deformasyon oluştuğundan sonra kaya saplaması kurulursa, diğer bir deyişle tahkimatın kurulması gecikirse, o zaman, kaya kütlesi deformasyon'a devam edecek ve hiç tahkimat yokmuşçasına tabana yıkılacak, kaya saplaması işlev görmeyecektir. Bu nedenle, kaya saplaması mümkün olan en kısa zamanda, hatta mümkünse pasa atımı sırasında kurulmaya çalışılmalıdır.

Benzer şekilde, özellikle patlatma ile açılan galerinin düzensiz kesitinden dolayı, çelik bağın yük taşıyacak şekilde kaya ile temasının sağlanması için sıkıştırılması (kamalanması veya takozlanması) da bu sistemin verimini etkilemektedir.

Bilindiği gibi çelik bağlar üniform yük taşıma özelliğine sahip olduklarından; özellikle dik ve dik'e yakın süreksizlik takımlarının hakim olduğu ve patlatma ile açılan galerilerde, hemen oluşacak kama tipi yenilmelerden dolayı, bu işlevini tam olarak yerine getirememesi riski vardır. Kaldı ki bu durum, tünel açma makinası ile açılan galeriler için de geçerlidir ve sıkıştırılma işlevi tam olarak yerine getirildiğinde de bu zaman alıcı ve pahalı olmaktadır. Dolayısıyla özellikle süreksizlik içeren kaya kütleleri için, sıklığı ve boyları iyi tesbit edilmiş kaya saplamaları en uygun tahkimat sistemi olarak görülmektedir.

Kaya saplamalarının boyları ise, beklenen yenilme tipine göre seçilmelidir. Blok düşme şeklinde yenilme beklenen sığ derinlerde açılan maden galerilerinde, kaya saplamasının boyu geometrik analizlerle bulunan maksimum blok boyutundan daha uzun olmalıdır. Diğer taraftan, plastik deformasyonların beklendiği derinde açılan maden galerilerinde ise nümerik yöntemlerle (özellikle kaya - tahkimat etkileşimi analizi yöntemi) bulunan kırılma zonunun boyundan fazla seçilmelidir ki saplamanın ucu orijinal (kırılmamış) kaya kütesine ankre edilebilsin.

Ayrıca kaya saplamalarının esnek uygulama koşulları da vardır. Örneğin, normal arazi gerilmelerinin bulunduğu koşullarda, yan duvarlar için gerekli tahkimat basıncı tavana göre az olacağı için; bu kesimlerde kaya saplamalarının boylarının azaltılarak veya aralıklarının artırılarak daha da ekonomi elde etmek mümkündür. Veya fazla tahkimat basıncı isteyen durumlarda, kaya saplaması aralığını azaltmak yerine, ikinci bir tahkimatla beraber (Örneğin püskürtme beton veya çelik hasır) kullanılarak tahkimat etkenliği artırılabilir.

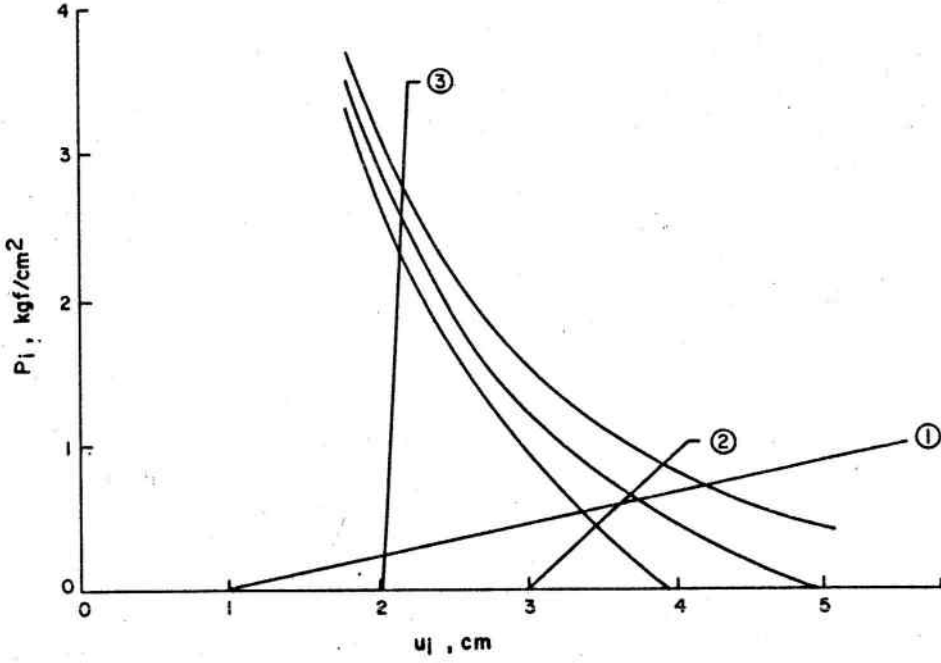
Bu çalışmada, bir metal madeninde ana nakliyat galerisi olarak kullanılacak olan bir galerinin tahkimat gereksinimi için kaya - tahkimat etkileşimi analizi yapılmıştır. Analizde yenilme durumu blok düşmelerinden ziyade galeri etrafında oluşan gerilme dağılımının, kaya biriminin dayanımından fazla olması ile bir kırılma zonunun oluştuğu koşulların varsayıldığında yapılmıştır. B-14 kesitinde ve 185 m. derinde (50 kg/cm² düşey gerilme) arjillit (siyah şeyl) formasyonu içerisinde açılması planlanan bu galerinin kaya-tahkimat etkileşimi analizi sonuçları Şekil 1. de verilmiştir.

Analize göre seçilen tahkimat sistemlerinin karakteristikleri Şekil 1.de görülmekle birlikte, tahkimat sistemlerinin uygulanmasında aşağıdaki hususlar gözönüne alınmıştır.

Bunlar;

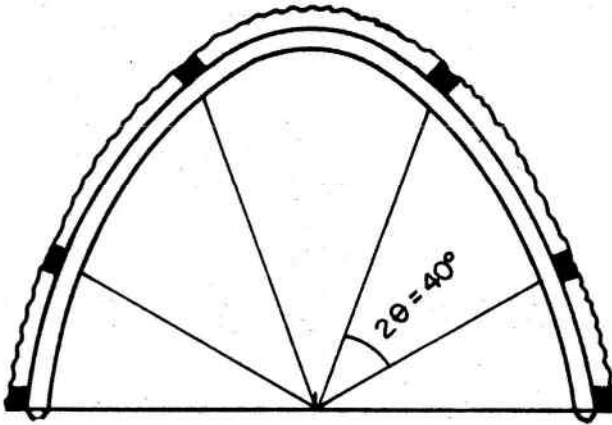
- 1- Kaya saplaması ve blok düşmelerini önlemek için 100x100 mm aralıklı, 7,7 mm kalınlığında çelik hasıra ilaveten; arjilitin nem kaybından dolayı dayanımında oluşabilecek değişikliği önlemek için 25 mm kalınlığında püskürtme beton uygulamasının maliyete katılması,
- 2- Demirbağ için, kaya - tahkimat analizinde önerilen sıkıştırma takozları yerine, ülkemizde yaygın olarak kullanılan kamalama ve fırçalama tekniğinin maliyet analizi.

Ancak, şunu hemen belirtmek gerekir ki, bütün ön tasarımlarda olduğu gibi, kaya tahkimat etkileşimi analizi de çok genel anlamda olup, bir çok varsayım yapılmıştır. Bu varsayımların tümünün arazideki durumu yansıttığı söylenemez. Örneğin,



- 1 - Çimentolu kaya saplaması , 1.5 x 1.5 m aralıklı 25 mm çaplı 2.0 m uzunluğunda
 2 - I 16 , Demirbağ 1.5 m aralıklı yumuşak blok $2\theta = 40^\circ$ (Şekil 2)
 3 - 50 mm kalınlığında püskürtme beton

Şekil 1 : Kaya tahkimat etkileşimi analizi sonuçları



Şekil 2 : Sıkıştırma tokozları konumu

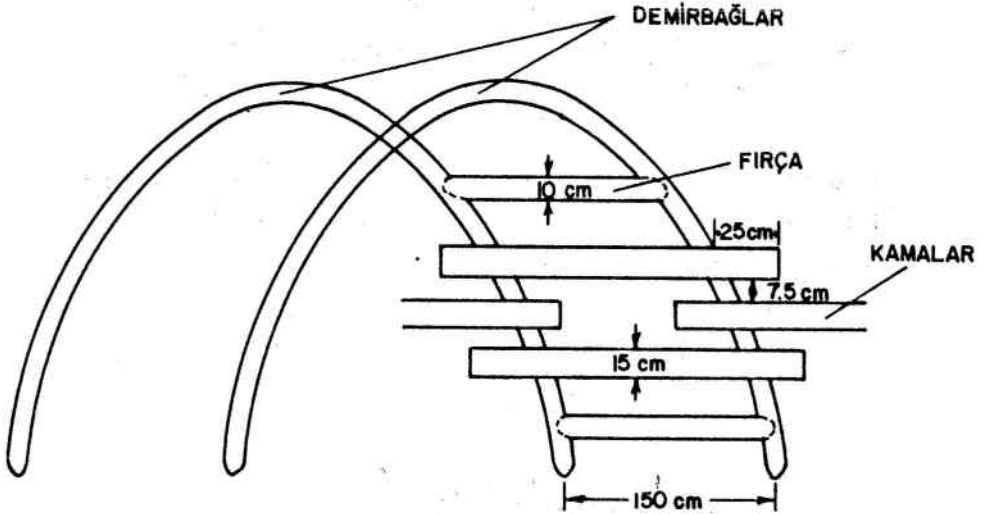
galeri kesitinin dairesel kabul edilmesi, yan arazi basıncının düşey basınca eşit alınması, malzeme özelliklerinin, özellikle galeri etrafındaki ezik, kırılmış kütlelerin özelliklerinin, arazideki durumu tam olarak yansıtacak şekilde alınmaması gibi.

2. MALİYET ANALİZLERİ

2.1. Kullanılan Malzeme Miktarı:

— Demirbağ için,

Bir adet B-14 kesitinde I 16 Çelik bağ ve bu kesit için Şekil 3. de görülen ahşap giderler (3).



Şekil 3. Demirbağ, fırça ve kamaların konumu

Fırça tutarı (Şekil 3)

10 adet fırça (150 cm boy x 10 cm çap)

$$10 \text{ adet} \times 1,5 \times \frac{\pi}{4} \times (0,10)^2 = 0,1177 \text{ m}^3$$

Kama tutarı: kama sayısı x kama hacmi

$$\text{Kama sayısı} = \frac{\text{Çevre}}{\text{Kama eni} \times 3} = \frac{10.31 \text{ m}}{0.15 \text{ m} \times 3} = 23 \text{ kama}$$

$$\text{kama hacmi} = \frac{\pi d^2}{4} h/2 = \frac{\pi}{4} (0.50 \text{ m})^2 \cdot 2\text{m}/2 = 0.0177 \text{ m}^3$$

$$23 \text{ kama} \times 0.0177 \text{ m}^3 = 0.407 \text{ m}^3$$

Toplam ahşap gideri:

$$0.407 \text{ m}^3 + 0.1177 \text{ m}^3 = 0.525 \text{ m}^3$$

• Püskürtme beton için.

10.31 m x 1.5 m x 0.05 m = 0.774 m³ beton ve bir adet püskürtme beton makinası.

• Kaya saplaması için:

Bir adet demirbağ 1.5 m uzunluğunda, B-14 kesitinde (çevresi 10.31 m) bir galeri kısmını tahkim edeceğinden, tahkim edilen alan:

$$10.31 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} = 15.53 \text{ m}^2$$

Bu alanı tahkim edecek kaya saplaması sayısı:

$$\frac{\text{tahkim edilecek alan}}{\text{bir kaya saplamasının tahkim ettiği alan}} =$$

$$\frac{15.53 \text{ m}}{1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}} = 6.9 \cong 7 \text{ saplama}$$

Çelik hasır tutarı : 15.53 m

2.2. Fiyatlandırma

a. Demirbağ için:

• Malzeme tutarı:

Bir adet demirbağın maliyeti: 101923 TL

• Harcanan ahşap tutarı:

$$0.525 \text{ m}^3 \times 28600 \text{ TL/m}^3 = 15015 \text{ TL.}$$

. İşçilik (3)

Beş işçi (iki usta, iki yedek, bir düz işçi günde üç vardiye çalışarak ayda 60 m ilerleme yaptıkları ve tahkimatını (40 demirbağ) da kurdukları; günde iki vardiya ilerleme (delme — patlama — pasa atımı vs.) bir vardiya tahkimat yaptıkları kabul edilirse, bir bağ için işçilik tutarı:

$$5 \text{ işçi} \times 0.125 (*) \times 6000 \text{ TL} / \text{gün} \times 3 \text{ vardiya} / 1.5 \text{ bağ gün} = 7500 \text{ TL/bağ}$$

Toplam demirbağ maliyeti:

$$101923 \text{ TL} + 15015 \text{ TL} + 7500 \text{ TL} = 124438 \text{ TL/bağ}$$

b. Püskürtme Beton için:

Bir adet püskürtme beton makinasının fiyatı 5.10^6 TL. dir. 25000 m³ lük ömrü olduğu varsayılırsa,

$5.000.000 \text{ TL} / 25.000 \text{ m}^3 = 200 \text{ TL/m}^3$ yatırım tutarıdır. Bir m³ püskürtme betonun kum, çimento, taşıma, doldurma, boşaltma ve işçilik giderleri dahil maliyeti: 12865 TL'dir.

Bir m³ püskürtme betonun toplam maliyeti:

$12865 \text{ TL} + 200 \text{ TL} + 300 \text{ TL (Conta gideri)} = 13365 \text{ TL} / \text{m}^3 = 0.774 \text{ m}^3 \text{ püs-}$
kürtme beton kullanılacağına göre;

$$0.774 \text{ m}^3 \times 13365 \text{ TL} / \text{m}^3 = 10344 \text{ TL 'dır.}$$

c. Kaya saplama için:

Kaya saplama makinesinin ekonomik ömrünü amorti edecek bir galeri tahkimi işi için , bir adet kaya saplama yerleştirme makinesi satın alınırsa, fiyatı 210.000 dolar'dır.

$$210.000 \text{ dolar} \times 450 \text{ TL} / \text{dolar} = 94.5.10^6 \text{ TL.}$$

Bu aracın beş yıl ömrü olduğu, yılda 13000 saplama yerleştirdiği ve % 80 verimle çalıştığı düşünülürse (2).

$$13000 \times 5 \times 0.80 = 52000 \text{ saplama yerleştirilir.}$$

$$94.5.10^6 \text{ TL} / 52.10^3 \text{ saplama} = 1817 \text{ TL/saplama}$$

(*) Toplam işçiliğin % 12.5'inin tahkimatın kurulması için harcadığı kabul edilmiştir.

Bir saplamanın yerleştirilmesi için gerekli işletme giderleri (işçilik — saplama — beton — delme v.s) 4500 TL.dir. Böylece bir saplama için toplam maliyet:

$$4500 \text{ TL} + 1817 \text{ TL} = 6317 \text{ TL. dir.}$$

$$6317 \text{ TL} / \text{saplama} \times 7 \text{ saplama} = 44219 \text{ TL}$$

Çelik hasır maliyeti:

$$15.53 \text{ m}^2 \times 268 \text{ TL/m}^2 = 4.162 \text{ TL.}$$

Eğer 25 mm kalınlığında püskürtme betonla kaplanırsa;

$$0.025 \text{ m} \times 15.53 \text{ m}^2 \times 13365 \text{ TL/m}^3 = 5189 \text{ TL.}$$

Toplam maliyet:

$$44219 \text{ TL} + 4162 \text{ TL} + 5189 \text{ TL} = 53570 \text{ TL}$$

olarak bulunur.

3. SONUÇ

Hesaplamalardan görüleceği üzere, aynı emniyet koşullarında; bir demirbağın maliyet 124438 TL olurken, kaya saplaması, çelik hasır — püskürtme betonun toplam maliyeti 53.570 TL olmaktadır. Bu, yaklaşık bir hesaplama, çelik bağın kaya saplamasına kıyasla iki katından daha pahalıya mal olması demektir. Bu karşılaştırma, aynı formasyon için, Terzaghi kriterine göre 1.15 m olarak bulunan bağ aralığı esas olarak alınarak yapıldığında; kaya saplamasının maliyeti daha da düşük olmaktadır. Bu oran 2.5 misline ulaşmaktadır.

Yapılan bu basit ekonomik analize ilave olarak, aşağıdaki bazı hususların önemini bir kez daha vurgulamakta fayda vardır. Bunlar:

- Patlatmanın iyi yapılmadığı zamanlarda (kesitin düzgün olmadığı durumlar) çelik bağ etkili bir taşıyıcılık gösteremeyeceği gibi, bağ ile tavan veya yan duvarlar arasındaki boşluğun doldurulması da ilave maliyet getirecek ve duraysızlığa yol açması
- Kaya saplamasının püskürtme betonla birlikte uygulanmasının arjillit gibi kil içeren formasyonların nem kaybını önlemesi,
- Sürtünme kayıplarının azalması nedeniyle, kaya saplaması ile tahkim edilen galerilerin daha ekonomik havalandırması gibi.

Hernekadar püskürtme beton (50 mm) tek başına yeterli bir tahkimat sistemi gibi görünüyorsa da, galeri kesitinin düzgün olmadığı durumlarda (patlatma yapıldığında) kullanılmamalıdır. Çünkü püskürtme beton tabakası içerisindeki gerilme dağılımının ideal durumdan farklı olmasından dolayı köşelerde çatlamlar olacak ve durum tahkimatı yenilgiye götürecektir.

KAYNAKLAR

1. Hoek E., Brown E.T.: Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980
2. Rock Bolting, Tomrock News, Vol 1, 1984
3. A. Dicle ile şahsi görüşme

* Doç. Dr. Müh. O.D.T.Ü Maden Mühendisliği Bölümü, -Ankara

ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLEN DOLGU KARIŞIMLARININ (MERMER AGREGASI – ARTIK) KAYMA BÜYÜKLÜKLERİ (*)

Ergin ARIÖĞLU (**)

1. GİRİŞ

Granüler dolguda kayma direncini büyük ölçüde denetleyen büyüklük, içsel sürtünme açısıdır. Söz konusu büyüklük, dolgunun sıkıştırılmasıyla daha açık bir deyişle, daneleri birbirine daha yakın konuma getirmek suretiyle artırılabilir. Hidrostatik gerilme koşullarında dolgunun maksimum yoğunlukta yerleştirilmesi taşıma gücü açısından yeterli olabilir. Diğer taraftan, sığ derinlikde yapılan bir üç boyutlu üretim çalışmalarında yanal gerilmenin şiddeti çok az hatta pratik bakımdan sıfır mertebesinde kabul edilebileceğinden, bu koşullarda sadece vibrasyon ile sıkıştırılmış granüler dolgu malzemesinin karakteristiği istenen taşıyıcılık isteklerine cevap vermiyebilir. Kısaca, yukarıda belirtilen gerilme ve çalışma koşullarında dolgunun mutlaka kimyasal şekilde örneğin, çimento stabilizasyonu ile taşıma gücünün artırılması gerekir.

Bu çalışmada, mermer agregası ve artıktan oluşturulan çimentolu karışımların 28 günlük kür sonucunda kazandıkları basınç ve çekme dirençlerinden belirlenen kayma büyüklükleri rapor edilmiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar dolgu tasarımı açısından değerlendirilmiştir.

2. KULLANILAN MALZEME VE DENEYSEL ÇALIŞMA

Üretilen çimentolu dolgu karışımlarında ince agregası olarak Etibank Uludağ Volfram Konsantre tesisinin artığı kullanılmıştır. İri agregası (mermer) ise dekapaj örtüsünden temin edilmiştir. Karışımlarda yüksek kompasitenin elde edilmesi açısından maksimum yoğunluğu veya minimum boşluk oranını belirleyen (% 60 iri agregası – % 40 ince agregası) bileşimi tüm deney programı boyunca uygulanmıştır. Bu agregası bileşimine karşı gelen gevşek yoğunluk, boşluk oranı ve uniformluk sayısı sırasıyla 1.978 gr/cm³, 0.413 ve 49'dur.

* Bu çalışma, TÜBİTAK'ça desteklenen (MAG-579, 1983) araştırma projesinin bir parçasıdır.

Çimento miktarının artımıyla mekanik büyüklüklerde gözlenecek değişimlerin araştırılması için (toplam agregâ (*) / çimento) oranı 5/1, 10/1, 20/1 olan karışımlar üretilmiş, bunların 28 günlük basınç ve çekme dirençleri standart deneylerle belirlenmiştir.

Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları Tablo 1 'de gösterilmiştir.

Tablo — 1 : Karışımların Bileşimi

Karışım bileşenleri (Kg/m ³)	Toplam agregâ / çimento oranı		
	5/1	10/1	20/1
Mermer + artık	1761	1751	2062
Çimento	352	195	103
Su	256	238	228
α : Su/Çimento	0,728	1.224	2.218

Karışımın hazırlanmasında önce çimento, agregâ ile birlikte betoniyere konulmuş, uniform bir görünüş elde edinceye kadar 3 dakika süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyu ilave edilerek tekrar 3 dakika karışması sağlanmıştır. Üretilen dolgu karışımı bekletilmeden 15 cm çap, 30 cm yüksekliğinde silindirik çelik kalıplara eşit üç tabaka halinde sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Örnekler, katılaşmanın temini için üç gün kalıp içersinde bekletilmiş, daha sonra kalıplarından çıkartılarak 28 güne kadar plastik torba içersinde küre tabi tutulmuştur.

Her deney grubunda 15 cm çap, 30 cm yüksekliğinde 4 adet örnek basınç direnci için, 15 cm çap, 10 cm yüksekliğinde 6 adet örnek ise çekme direnci için kullanılmıştır. Basınç ve çekme deneyleri 200 ton kapasiteli hidrolik preste gerçekleştirilmiş ve yükleme hızı 2 kg/cm² sn düzeyinde tutulmaya çalışılmıştır. Çekme ve basınç deneylerinde gözlenen tipik kırılma modları Şekil -1'de görülmektedir (1)



Şekil 1: Deneylerde Gözlenen Tipik Kırılma Modları

3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. Basıncı ve Çekme Dirençleri

Çeşitli (toplam agrega/çimento) oranları için elde edilen 28 günlük basınç ve çekme deneylerine ait sonuçların istatistiksel büyüklükleri Tablo 2'de topluca sunulmuştur (1). Beklenildiği gibi, azalan agrega/çimento oranı ile başka bir anlatımla artan çimento dozajı ile basınç ve çekme direnci önemli ölçüde artmaktadır. Örneğin, çimento miktarı iki kat artırıldığında basınç direnci 2.63 kat artmaktadır.

Mekanik büyüklükler arasında, çıkartılan korelasyon bağıntıları (1,2) kaynaklarında ayrıntılı şekilde rapor edilmiştir. Bu nedenle, bu konuya burada tekrar değinilmeyecektir.

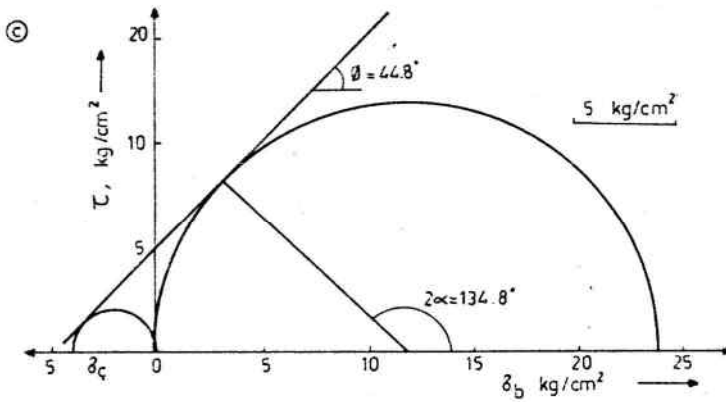
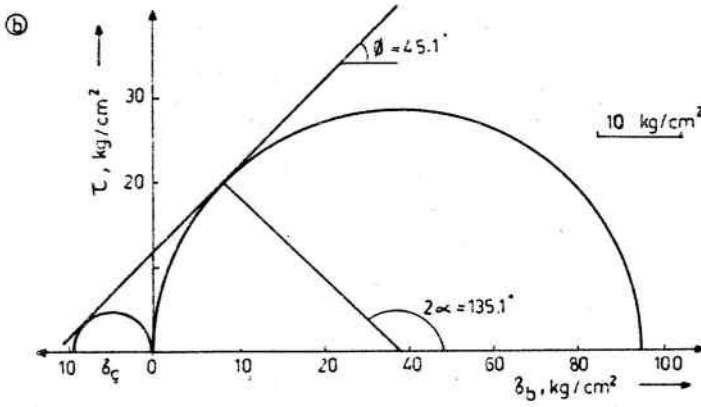
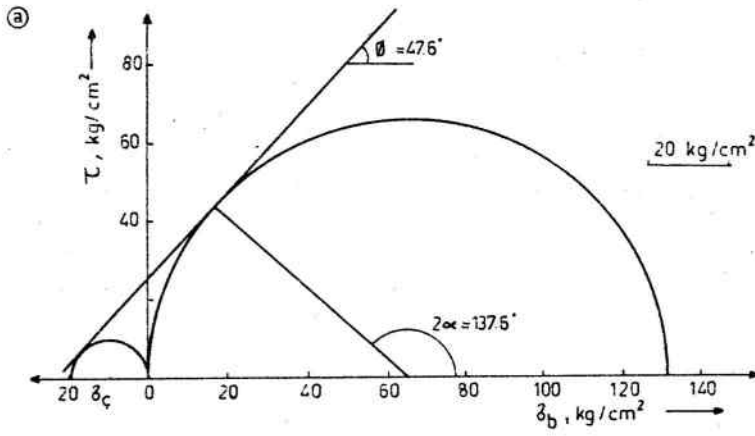
3.2 Hesaplanan Kayma Büyüklükleri

Karışımların 28 günlük kayma büyüklükleri (hoşeyyon ve içsel sürtünme açısı) ölçülen basınç ve çekme dirençlerinin bilinmesiyle;

Tablo — 2 : 28 günlük Basınç ve Çekme Direnci Değerlerine Ait İstatistiksel Büyüklükler

Agrega/ Çimento oranı	Numune sayısı n	Ortalama $\bar{X}$. (kg / cm ²)	Standart sapma (kg / cm ²) σ	Değişim Katsayısı V (%)	Student Sayısı t	Güven aralığı (*) (kg / cm ²) $\bar{X} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}$
Basınç direnci:						
5/1	4	131.77	3.562	2.70	3.182	131.770 — 6.544
10/1	4	57.961	3.701	6.39	3.182	57.961 — 6.799
20/1	4	23.779	3.301	12.70	3.182	23.779 — 5.568
Çekme direnci :						
5/1	6	19.771	1.057	5.35	2.571	19.771 — 1.215
10/1	6	9.848	1.363	13.84	2.571	9.848 — 1.567
20/1	6	4.118	0.681	16.50	2.571	4.118 — 0.783

(*) Çift taraflı, % 95 güven aralığı için.



İşaretler

①.....	$\frac{\text{Toplam agregası}}{\text{Çimento}} = \frac{5}{1}$
②.....	$\frac{\text{Toplam agregası}}{\text{Çimento}} = \frac{10}{1}$
③.....	$\frac{\text{Toplam agregası}}{\text{Çimento}} = \frac{20}{1}$

Şekil 2 : Çeşitli (Agrega / çimento) oranlarında hazırlanmış numunelere ait Mohr daire-
rleri ve kırılma zarfları

$$C = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_b \sigma_c} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) = \sqrt{\frac{\sigma_c}{\sigma_b}} \quad (2)$$

formüllerinden hesaplanmıştır (3,4). İfadelerde kullanılan sembollerin anlamları makalenin sonunda toplu halde açıklanmıştır. Karışımların kırılma zarfını tarifleyen parametreler Tablo 3 de verilmiştir. Şekil 2'de ise sırasıyla 5/1, 10/1, 20/1 oranlarına

Tablo 3: Karışımların Kırılma Zarfına Ait Büyüklükler

Toplam agrega Kohezyon çimento (kg/cm ²)	İçsel sürtünme açısı (°)	Kırıl- ma açı- sı (°)	Normal gerilme (kg/cm ²)	Kayma direnci (kg/cm ²)	Kırılma Zarfı $\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$
5/1	25.52	47.65	68.8	17.23	44.30
10/1	11.97	45.1	67.5	8.48	20.45
20/1	4.95	44.8	67.4	3.51	8.42

karşı gelen Mohr daireleri ve kırılma zarfları çizilmiştir (1). Tablo ve şekilden artan çimento miktarı ile kohezyonun ve buna bağlı olarak da kayma direncinin arttığı gözlenmektedir. Sayısal olarak sonuçlar değerlendirilirse, Örneğin, 20/1'lik bir karışımından 10/1 karışımına geçildiğinde diğer kelimelerle, çimento miktarı % 190 dolayında artılırsa kohezyon ve kayma direncinde elde edilen artış oranı sırasıyla % 142 ve % 143 mertebelerindedir. Buna karşın, içsel sürtünme açısında değişim pratik olarak gözlenmemiştir.

3.3. Sonuçların Değerlendirilmesi

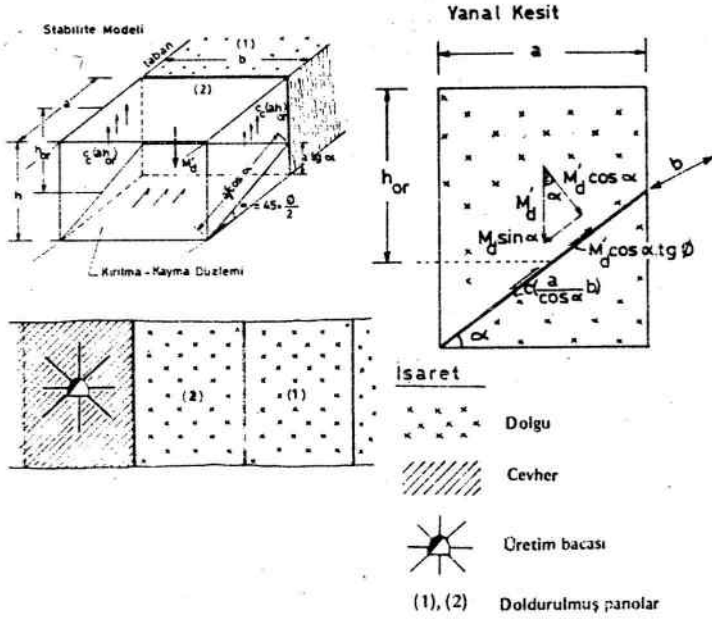
Dolgu tasarımı, belirli bir emniyet katsayısı için verilen geometrik boyutlardaki (Şekil 3) dolgu bloğunu yerinde stabil şekilde tutacak basınç direncinin bilinmesi istenir. Dolgu bloğunun genel stabilite şartından, gerekli dolgu karışım basınç direnci,

$$\sigma = \frac{\gamma b (h_{or} \sin 2\alpha) (F \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \phi)}{2 M [\operatorname{tg} \alpha + (F \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \phi) (h_{or} \sin 2\alpha)]} \quad (3)$$

$$h_{or} = h - \frac{1}{2} a \cdot \tan \alpha \quad (4)$$

$$\alpha = 45 + \frac{\phi}{2}$$

ile verilmektedir. (5,6)



Şekil 3 : Dolgu Bloğunun Stabilite Analizi

Örneğin; toplam agrega / çimento oranı 20/1 olan karışımın 28 günlük basınç direnci ($\sigma_b = 237 \text{ t/m}^2$) ($a = 15 \text{ m}$, $b = 100 \text{ m}$, $h = 30 \text{ m}$)'lik bir dolgu bloğunu 7 gibi yüksek bir emniyet katsayısı ile "stabil" şekilde yerinde tutmaktadır. Tasarımda emniyet katsayısının "F" seçimi çok kritik bir problemdir. Teorik analizde yapılan kabullerin belirsizlikleri ve üretim faaliyeti için patlatılan lağımın neden olduğu dinamik etkileri de gözönünde tutarak en az 3-5 gibi oldukça yüksek emniyet katsayısının alınması tavsiye edilir. Pano içi deneyimi arttıkça, malzeme ekonomisi yönünden mutlaka emniyet katsayısı üzerinde gerekli düzeltmeler yapılmalıdır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada incelenen konulardan çıkartılan ana sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

(Mermer + artık) ile üretilen stabilizasyon karışımlarının mekanik büyüklükleri hassas bir şekilde (toplam agrega / çimento) oranına bağlıdır. Tüm mekanik büyüklükler artan çimento veya azalan toplam (agrega / çimento) oranı ile artmaktadır (1).

Karışımın kayma parametreleri-kohezyon, kayma direnci) de artan çimento miktarı ile büyük ölçüde artmaktadır. (Tablo 3 ve Şekil 2). Dolgu teknolojisinde, stabilite şartı açısından gerekli dolgu kapasiteleri "Çimento Stabilizasyonu" ile geniş bir limit içinde karşılanabilir (Tablo 2).

SEMBOLLER:

- a : Dolgu bloğunun genişliği,
- b : Dolgu bloğunun uzunluğu,
- c : Kohezyon,
- F : Emniyet katsayısı
- h : Dolgu bloğunun yüksekliği,
- h_{or} : Ortalama dolgu yüksekliği,
- M : (Kohezyon - basınç direnci) ilintisine ait istatistiksel parametre, $M = 0.18$ (1)
- σ_b : Dolgu malzemesinin 28 günlük basınç direnci
- σ_c : Dolgu malzemesinin 28 günlük çekme direnci
- α : Malzemenin kırılma açısı
- ρ : Dolgu karışımının yoğunluğu
- ϕ : Çimentolu dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı

KAYNAKLAR

1. ARIOGLU, E. : Properties of Engineering Materials to Used in the Stopes for Uludağ Mine of Etibank (in Turkish), MAG: 579, Turkish Scientific and Technical Research Council (TUBITAK), Ankara, 1982, p., 248
2. ARIOGLU, E. : Engineering Properties of Cemented Agregate Fill for Uludağ Tungsten Mine of Turkey. Proceedings of the International Symposium on Mining with Backfill, Lulea University of Technology, Lulea, June 1983, A.A. Balkema, Rotterdam, 1983, pp. 3-8
3. KEZDI, A. : Stabilisierte Erdstrassen, VEB Verlag für Bauesen, Berlin Akademie Kidao Budapest, 1973.

4. ARIÖĞLU, E. Ocak Dolgu Malzemesi Olarak Uludağ Volfram Artığının İnce-
lenmesi, Doçentlik Tezi, İTÜ Maden Faköltesi, s. 185, Mart 1982.
5. ARIÖĞLU, E. : Engineering properties of stabilized tailingcement mixtures with
Uludağ tungsten tailing (in Turkish), DoĖa Bilim Dergisi: Müh.
Çev., TUBİTAK, 7 (1983), 121-127.
6. ARIÖĞLU, E. : Design Aspects of Cemented Aggregate Fill Mixes For Tungsten
Stoping Operations, Mining Science and Technology, 1(1984),
209-214

EGEMETAL MADENCİLİK A.Ş.

kromit / manganez / barit / antimuan
cevheri / krom konsantre / antimuan
trioksit / antimuan metal

chromite ore and concentrate / man-
ganese ore / barite / antimony ore /
antimony tri-oxide / antimony metal

Merkez / Head Office : Cumhuriyet Cad. 349/10
Harbiye - İSTANBUL
Tel : 148 41 74 - 146 10 33
Tlx : 22471 mege tr
22407 mto tr
Şube / Branch : ANKARA, İran Cad. 47/3
Kavaklıdere
Tel : 26 60 84
Tlx : 42547 frsn
İSKENDERUN,
Liman Sahası
Tel : 11 618 - 12 688
Tlx : 68215 emem
MERSİN
Tel : 12 678 - 150 45
BURSA, Orhanlı
Tel : 22 - 52

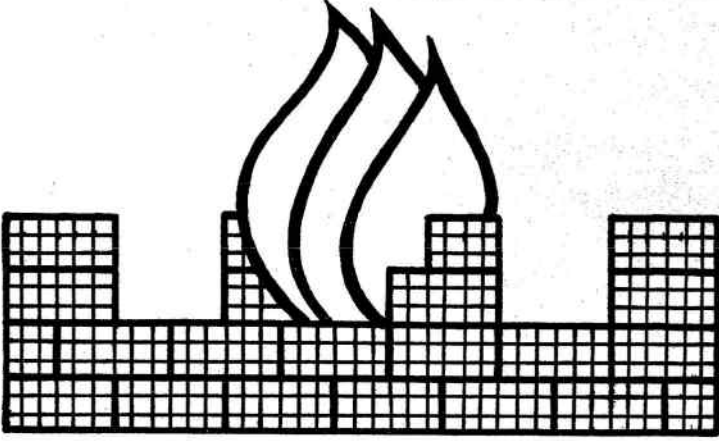
MATAŞ MADENCİLİK VE TİCARET LTD. ŞTİ.

madencilik / turizm / inşaat taahhüt /
tünelcilik / tünel teçhizatları ve muh-
telif makina imalatları / ihracat / itha-
lat

mining / tourism / contracting servi-
ces for tunnelling / manufacturing of
tunnelling equipment and various
machinery / export / import

TÜNELCİLİKTE 12 YIL

Merkez / Head Office : Ergin Sok. 28/4-5
Tandoğan - ANKARA
Tel : 23 76 88 - 22 34 24
Tlx : 43485 mda tr
Atölye / Work Shop : OSTİM 100.yıl Blv.
56. Sok. 65 ANKARA



katopsan

KALE TOPRAK SANAYİİ KOM. ŞTİ.

MEHMET ARPACI ve ORTAKLARI

BLOK TUĞLA FABRİKASI ÇANAKKALE

İNŞAATINI ZEVLKLE YAPANLARIN TUĞLASI

Işıklar Köyü Karşıyaka Kırklar Mevkii

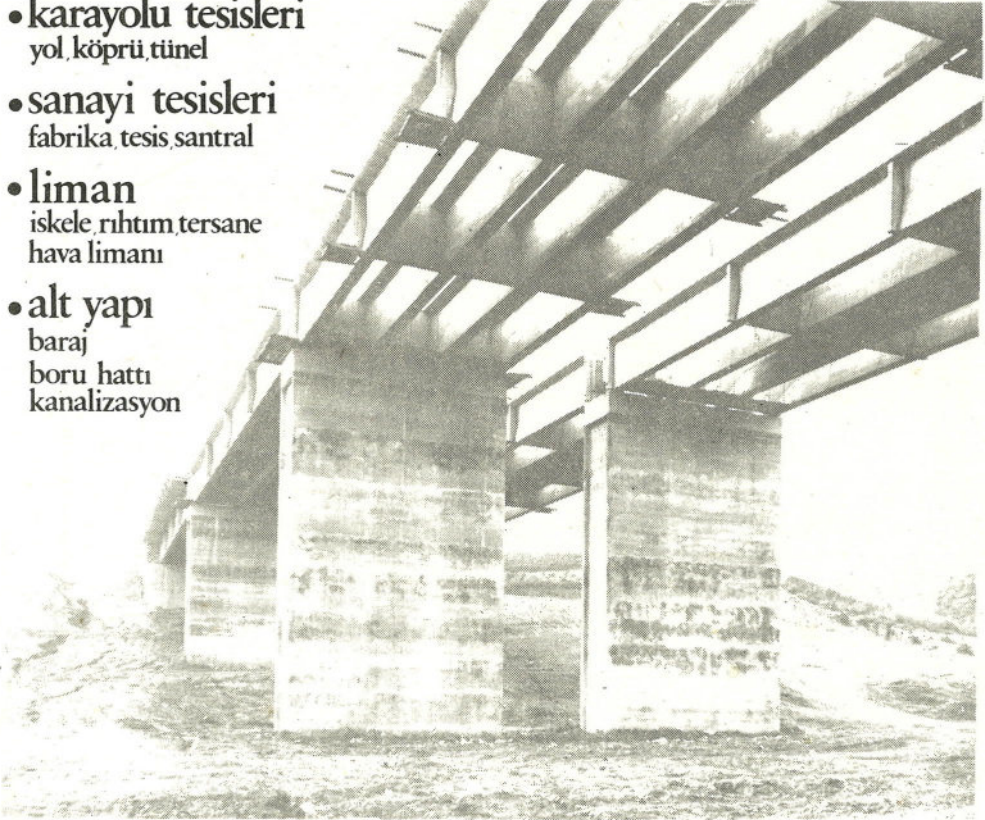
Tel: Fabrika: 33 77 Çanakkale

Baskı :
KURTIŞ MATBAASI
Tel: 520 19 15

ENKA

İNSAAT VE SANAYİ A.Ş.

- karayolu tesisleri
yol, köprü, tünel
- sanayi tesisleri
fabrika, tesis, santral
- liman
iskele, rıhtım, tersane
hava limanı
- alt yapı
baraj
boru hattı
kanalizasyon



ANADOLU OTOYOLU HEREKE VIYADÜKLERİ İNŞAATI

Enka Hanı, Balmumcu Mahallesi, Bestekâr Şevki Bey Sokak, Beşiktaş-İstanbul Telf : 66 22 15 - 6 - 7 - 8 - 9

Telg : Enka Anonim Teleks : Pima Tr İst. 26 139

