

# KAZILARA ÇATLAK ETKİSİNİN KİNEMATİK MODELLERLE ARAŞTIRILMASI

(Kinematic Model Studies for Excavations in Jointed Rock Masses)

A. Kemâl Erguvanlı — Richard« E. Goodman

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi.  
Kalifornia Üniversitesi — Berkeley, Jeoteknik Bölümü.

Öz. — Çeşitli jeolojik ve mühendislik problemlerin kinematik ve deformasyon şekillerini gözlemek amacıyla bir çok tipte model kullanılmaktadır. Kinematik modeller temel jeolojik verilerin yorumlanmasında yararlı olmaktadır. Bunlarla çatlaklı kaya kütlelerinin muhtemel hareket şekilleri gözlenebilmektedir. Bu çalışmada model, özel şekilde hazırlanmış malzemeyle yapılmış ve daire kesitli tünellerde, tünel çapı ile çatlak aralığı arasındaki ilişkiler ve kırılmalar araştırılmıştır.

Abstract. — Several model types are utilized to observe the kinematics of different geological and engineering problems.

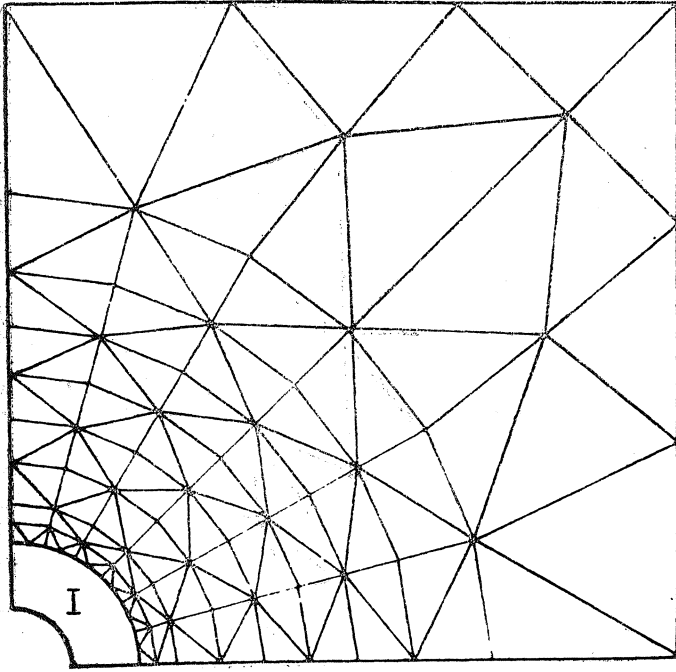
Kinematic models provide an interpretation of the basic geological data, that is to establish the allowable failure modes in jointed rock masses. In this study, models were prepared from a special material. The effect of the pattern of joint systems on the circular tunnels, with varying «diameter joint distance» ratios were investigated\*

## GİRİŞ

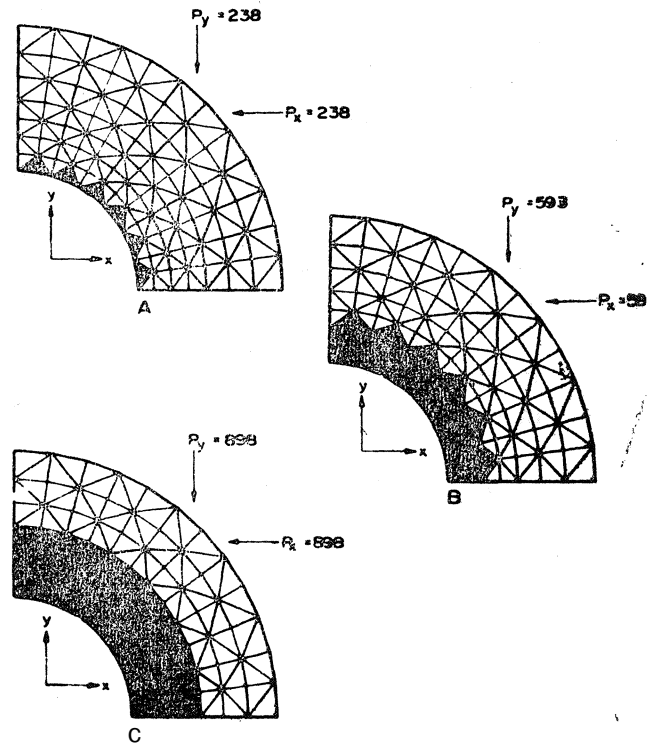
Yeraltında yapılan kazıların stabilitesi, kazıların çeşitli bölgelerin gelen gerilmeler ve bunların oluşturduğu deformasyonların şekilleri, genellikle klasik elastisite teorileri uygulanarak bulunmağa çalışılmaktadır. Halbuki arazide yapılan gözlemler ve yerinde (in-situ) yapılan gerilme dağılışı ölçümleri bu yolla sağlanan çözümlerin hakikate pek uygun olmadığını ve dolayısıyla pek geçerli bulunmadığını göstermektedir. Eğer -kazılar, zayıf ve süreksizlikleri çok kaya ortamlarda yapıyorsa elastisite yoluyla elde edilen çözümlerin yalnız başına yetersiz olduğu da görülmektedir. Bunun nedeni, kaya köftelerinin homojen, izotrop ve sürekli oldukları varsayılarak denge ve déformas-

yonların hesaplanmasıdır. Halbuki tabiatta homojen, izotrop ve sürekli ideal bir kaya kütlesi bulmak mümkün değildir Dolayısıyla, sürekli ortamlar için geçerli olan matematik formülasyon ve -metodların çatlaklı kayaların stabilitesine uygulanması doğru sonuç vermemektedir» Bundan dolayı son yıllarda başka çözüm yolları aranmağa başlanmıştır.

Bu yollardan biri, 1960 yılından bu yana köprü ve kafes yapı binalara uygulanan «Sonlu Elemanlar Metodu» ve bir diğeri de «Model Deneyleri» dir. Biz burada sonlu elemanlar metodunun ana hatlarını belirten bir iki şekil' verip ilgilenenlerin bibliyografyaya bakmasını önerceğiz, (de Rouvray, 1970; Dahi 1970) (Şekil 1, 2). Burada asıl amacımız, yapmış olduğumuz kinematik (hareketli) model deneyleri üzerindeki çalışmalarımızın ana çizgilerini açıklamak ve elde edilen pratik sonuçları belirtmektir.



Şekil 1 — Dairesel kesitli bir tünel kazısı etrafında gerilme dağılışının sonlu elemanlar ağı ile gösterilişi.

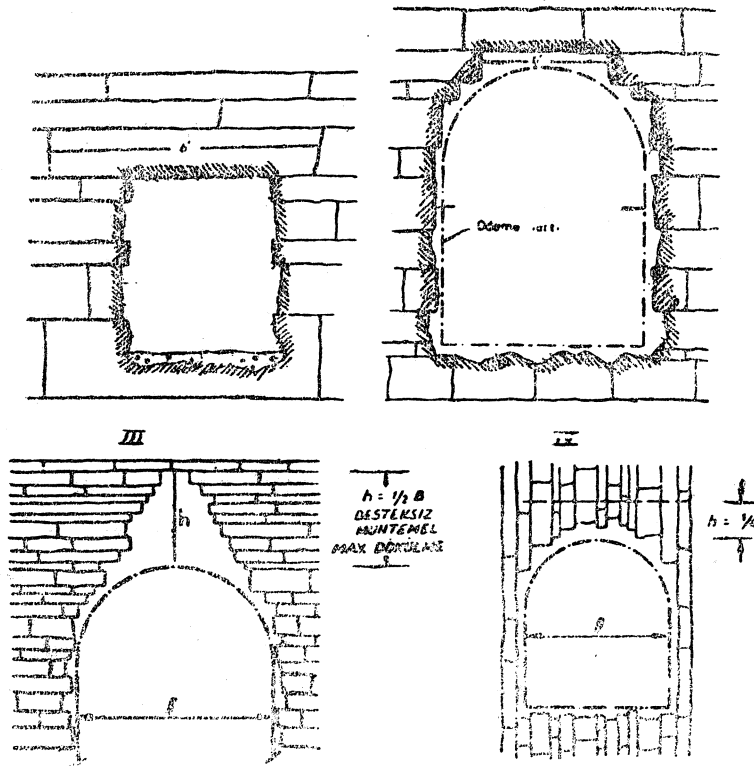


Şekil 2 — Basınç artmasıyla, Daire Kesitli kazı etrafında (Şekil 1, I. kısımda) plastik deformasyonların gelişimi (A, B, C). (Dahl-Voight, 1970 den alınmıştır).

Çatlaklı kayalar üzerinde ve içinde yapılan kazılara ve açılan tünellere çatlakların, daha geniş anlamda, süreksizliklerin etki derecesini araştırmak amacı ile dünyada bir kaç yerde, bu meyanda Berkeley-California Üniversitesi Kaya Mekaniği ve Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarında model deneyleri üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. (Krsmanoviç, 1964) Ölçekli (scaled) modeller eskiden beri bir

çok bilim dalında (baraj, köprü, tünel v.b.)'de -kullanılmasına karşı kinematik (hareketli) model çalışmaları pek azdır. {Hobbs, 1966; Hubbert, 1937} Son yıllarda ayrı bir önem kazanmağa başlamıştır. Yaptığımız bu kinematik model araştırmasının amacı çatlak aralıkları ile tünel boyutları (çapı, veya tünel genişliği ve yüksekliği) arasındaki ilişkileri ortaya koymak, blokların hareketlerini, yer, yön ve biçimlerini modeller üzerinde gözlemektir,.

K. Terzaghi, (1946) tünel içine düşen kaya parçalarının kontrolünde, tünel genişlik ve yüksekliğinin etkisini formüle etmeğe ve buradanda tünellerde yapılması gerekli tahkimatı ve kaplama şekil ve kalınlığını bulmağa ve gelen yükleri belirtmeğe çalışmıştır (Şekil 3).



Şekil 3 — Çatlak araştırması, tabaka durumu, tünel genişliği ve kemerlenme arasında ilişki (K- Terzaghi'ye göre)

Bu tarihten sonra tünellere gelen gerilmeler, bunların yayılışları ve hesaplama metodları hakkında pek çok çalışma yapılmıştır. (Obert, 1967)

Son yıllarda Berkley'de R.E. Goodman (1971) ve arkadaşları tarafından problem dinamik olarak ele alınmış, ölçekli modeller ve sonlu elemanlar metodu yoluyla araştırılmıştır, (de Rouvray, 1970)

Bu çalışmalarda, tünellerin, çatlaklı ve çatlaksız kayalarda açılmalarna, çatlak aralıklarının boyutlarına, çatlakların doğrultu ve eğimlerine, dolgu şekli ve türüne, içsel sürtünme ve deformasyon özelliklerine göre değişik her bir hal için, relatif direnç değerleri ve eğrileri, Computer ve ölçekli model çalışmalarından çıkarılmağa çalışılmıştır.

#### MODEL TIPLERİ, MALZEMELERİ VE ÖZELLİKLERİ

Mühendis ve Jeologlar çeşitli jeolojik ve mühendislik olayları göstermek, açıklamak, nedenlerini bulmak ve gerekli çözümleri elde etmek amacı ile çok eskiden beri değişik türde modeller yapmışlardır. (Hail, 1815; Daubrée, 1879; Cloos, 1930; Currie, 1966) Bu modellerde doğal' olaylar, benzetme (simulation) yoluyla laboratuvara getirilmektedir. (Barton, 1969; Fumagalli, 1968)

Model çalışmalarında kullanılacak malzemenin bulunması, araştırmanın en önemli kısmıdır. Bu gün dünyanın bir çok yerinde çeşitli malzeme ile model' çalışmaları yapılmaktadır. Londra Üniversitesi« Imperial College-Kaya Mekaniği Araştırma Merkezi elemanlarından B. Stimpson (1970) dünyada model çalışmalarında kullanılan model malzemeleri hakkında ayrıntılı ve çok güzel bir inceleme yapmış ve bunu yayınlamıştır. Stimpson, deneylerde kullanılan malzemeyi: taneli (kum, silt, çimento) ve tanesiz (bitum, jelatin) diye sınıflandırmış ve bunların mekanik özelliklerini (tek eksenli basınç direnci, çekme direnci, elastisite modülleri, Max. birim deformasyonları) tablolar halinde vermiştir.

Elastik olmayan ortam için de en çok çimento, kurn, su, mum, fnika, kil', barit, plastik macun, kurşun oksit, diatomit, testere tozu, kaolin, mika ve kirecin kullanıldığını saptamıştır. Modellerde çatlakları temsil etmek için de kaba kesme, çok ince kesme, ince mum, pres yağı, talk, kalker tozu, mumlu kağıt, kopya kağıdı, güderi, grafit, veya kil v.b. maddelerle doldurularak benzetmeli çalışmalar yapıldığını belirtmektedir.

1960 dan sonra, bilhassa Malpasset ve Vaiont barajlarının yıkılmasından bu yana üç boyutlu, diğer tip model deneylerinin yapılması düşünülmüş, değişik biçim ve büyüklükte tuğla, veya kesme şeker, alçı bloklarla, 3 - 4 araştırma merkezinde, hareketli model deneyi çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. (Rengers, 1970)

Model deneylerinde kullanılacak malzemede, bir çok özettikler aranır. Bunların en önemlileri şunlardır:

- a) Kolay hazırlanmalı,
- b) Sert ve kesilebilir olmalı,
- c) Tekrar tekrar kullanılabilirmeli,
- d) Ucuz ve zararsız

olmalıdır.

Şimdiye kadar bu tür çalışmalarda A.B.O. de: mum, diyatomit, reçine, jelatin, alçı, çimento, kum, silt ve kil kullanılmaktadır. Biz şimdiye kadar kullanılanlardan farklı, yepyeni bir malzeme kullanarak hareketli model deneyleri yaptık ve aşağıdaki sonuçları aldık.

İlk yaptığımız deneylerde un (100 kısım, ağırlık olarak), bitkisel yağ (30 kısım) ve tuz (3 kısım) karışımı kullanılmıştır.

Bu malzeme, karıştırılır, kompaktlaştırılır ve istenilen şekil ve aralıkta süreksizlikler meydana getirilir ve sonra kazılar (tünel veya şevler) açılır. Bu süreksizliklerin ve kazıların yapılması ayrı bir araştırma yöntemidir.

Kullandığımız model malzemenin mekanik özellikleri şöyledir:

Tek eksenli basınç direnci  $= C_u = 0,17 \text{ kg/cm}^2$ ;

Elastisite Modülü  $= E = 4 \times C_u$  ;

Likit Limiti (LL)  $= 30.5 \%$ ;

Plastik Limit (PL)  $= 28.0 \%$ ;

(ağırlıkça % 28 yağ muhtevalı karışım).

Bu özellikteki malzeme gevrek (brittle) bir davranış gösterir. Kayalardan daha kolay deforme olursada (kayaların E modülü basınç direncinin 500-1000 katı kadardır) kaya (granit) ların kırılışına benzer şekilde kırılır. Kesme sonucu çatlaklarda ufak bir kohezyon oluşur. Çatlakların sürtünme açısı ( $\theta$ )  $36^\circ$  dir. Bu malzemeden yapılan blokların tabii yığılma şev açısı (angle of repose)  $45^\circ$ - $50^\circ$  dir.

Daha sonraki çalışmalarda, bu malzemenin içine, kuvars silti, kumu, iri kum eklenmiş ve değişik incelikte unlar kullanılmıştır.

## -DENEYLERİN. YAPIUŞI.

Deneylede kullanılacak malzeme iyice karıştırılır, özel şekilde saydam pleksiglas'dan yapılmış, 35x35x35 cm. boyutlu kutu içine konur. Tokmaktama ile pekiştirilir. İstenilen sıklık, doğrultu ve eğimde çatlaklar oluşturulur. Değişik çaplarda tüneller açılır (Şekil 4, 5, 6), Burada çatlak aralığı ile tünel çapı arasındaki ilişkiler araştırılmış, blokların kinematik davranışları izlenmiştir. Ayrıca süreksizliklerin doğrultu ve eğimlerinin kazılara etkisi ve tünel çapı ile olan ilişkileri, saptanmağa çalışılmıştır. Tünel çapı  $d$  ve çatlak aralığı  $s$  ile gösterilerek :

$$\frac{d}{s} = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

olmak üzere, tüneller açılarak çatlaklar arasında kalan blokların durumları, varsa hareket yer, yön ve biçimleri incelenmiştir. Hareket olmıyan halinde bunların üzerine ölü yükler koyarak blokların, süreksizlikler boyunca, kırılma ve eğilme yerleri ve yönleri izlenmiştir. Bu çalışmalarda çatlak takımı aralıkları özel bir kesme sistemi ile 2,5 cm (1 inch) yapılmış ve değişik çapta el matkaplarla oyularak 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 ve 15 cm (1-6 inch) çaplı tüneller açılmıştır (Şekil 4-8). Bu çalışmalar sonunda :

Tünel çapı  $d$ , çatlak aralığı  $s$  ile gösterilerek :

$$\frac{d}{s} > 3$$

oldukta, kazı tavanının en zayıf bölge olduğu;

$d$

$s$

halinde çatlakların tünele teğet oldukları yerlerde, önce kırılmaların başladığı ve sonra tünel içine doğru hareket ettiği saptanmıştır, (Şekil 7, 8) Elde edilen veriler ve doneler :

$$\frac{d}{s} = \frac{\text{Tünel çaps}}{\text{Çatlak aralığı}} = \text{Çatlak sıklığı}$$

er =• Modeli göçerten düşey yük (İb).  
Malzemeyi kıran kuvvet

$$J_{rf} = \frac{\text{Malzemeyi kıran kuvvet}}{\text{Modeli göçerten yük}} = \text{Çatlak zayıflatma faktörü.}$$

olmak üzere aşağıdaki tabloda verilmiştir. Bu verileri eğrilerle de göstermek mümkündür.

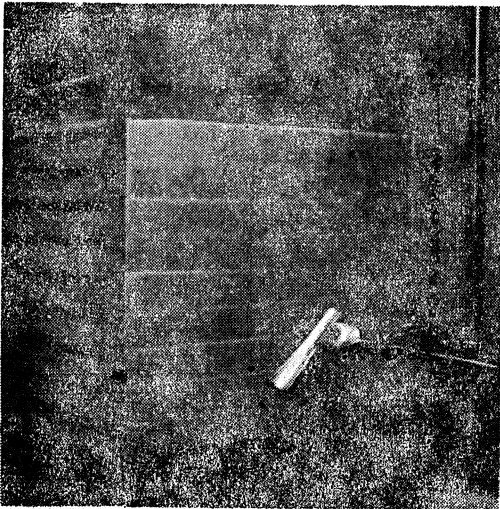
**Tablo 1 — Çatlak sıklığı - Çatlak zayıflatma faktörü ilişkisi**

d/s	$\sigma$ (lb)	$J_{rf}$
1	125	1.0
2	125	1.0
3	125	1.0
4	80	1.6
5	29	4.3
6	17	7.4

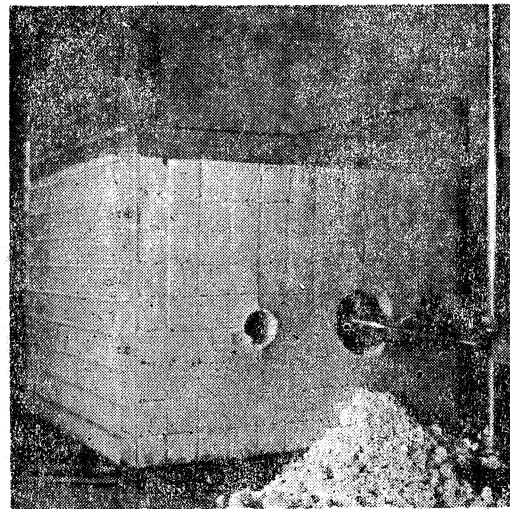
$$d/s = \frac{\text{Çatlak aralığı}}{\text{Tünel çapı}} = \text{Çatlak sıklığı}$$

$$\sigma = \text{Modeli göçerten düşey yük (lb)}$$

$$J_{rf} = \frac{\text{Malzemeyi kıran kuvvet}}{\text{Modeli göçerten yük}} = \text{Çatlak zayıflatma faktörü}$$



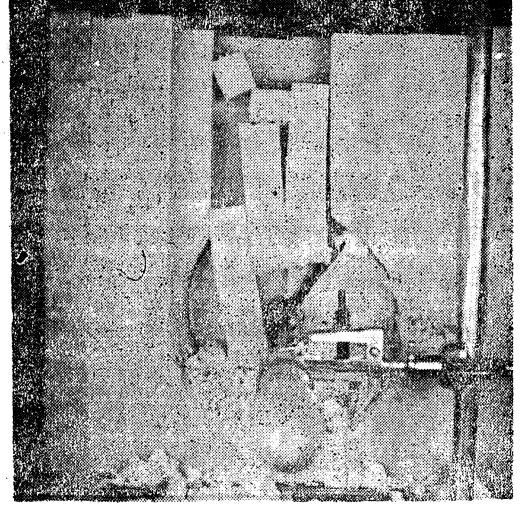
Şekil 4 — Deney kutusunda kesilerek çatlak sistemleri oluşturulmuş, homojen ve sıkı malzemede tünel açılması.



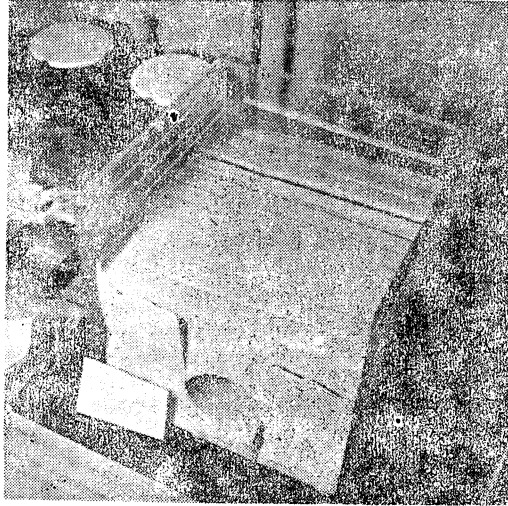
Şekil 5 — Küçük çaplı ( $d = 1$ ,  $d = 2$ ) tünellerin açılışı.



Şekil 6 — Büyük çaplı ( $d = 4$ ) tünelin açılışı ve bloklarda hareketin başlayışı.



Şekil 7 — Büyük çaplı ( $d = 6$ ) tünelde blokların hareket mekanizması.



Şekil 8 — Bloklarda hareket olmıyan ufak çaplı ( $d = 3$ ) tünel açıldıktan sonra, tünel üzerine ölü yük konulması ve meydana gelen kırılmalar.

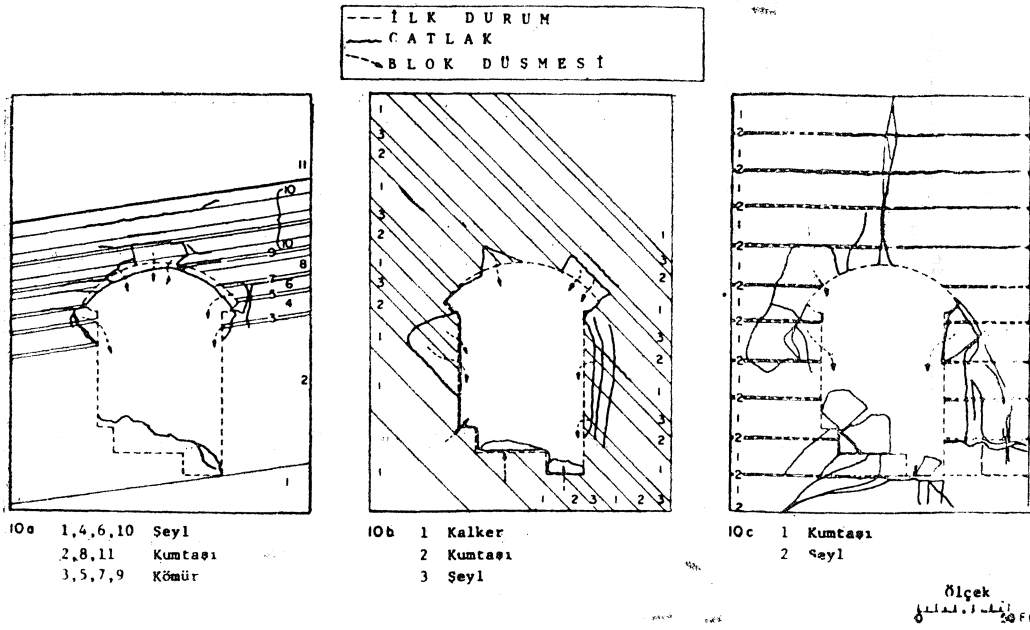
## SONUÇ

Bu çalışmada birbirine dik iki tip çatlak takımlı bir ortamdan değişik çaplarda tüneller açılarak, blokların serbestliği, hareket şekilleri, yönleri ve bölgeleri incelenmiştir.

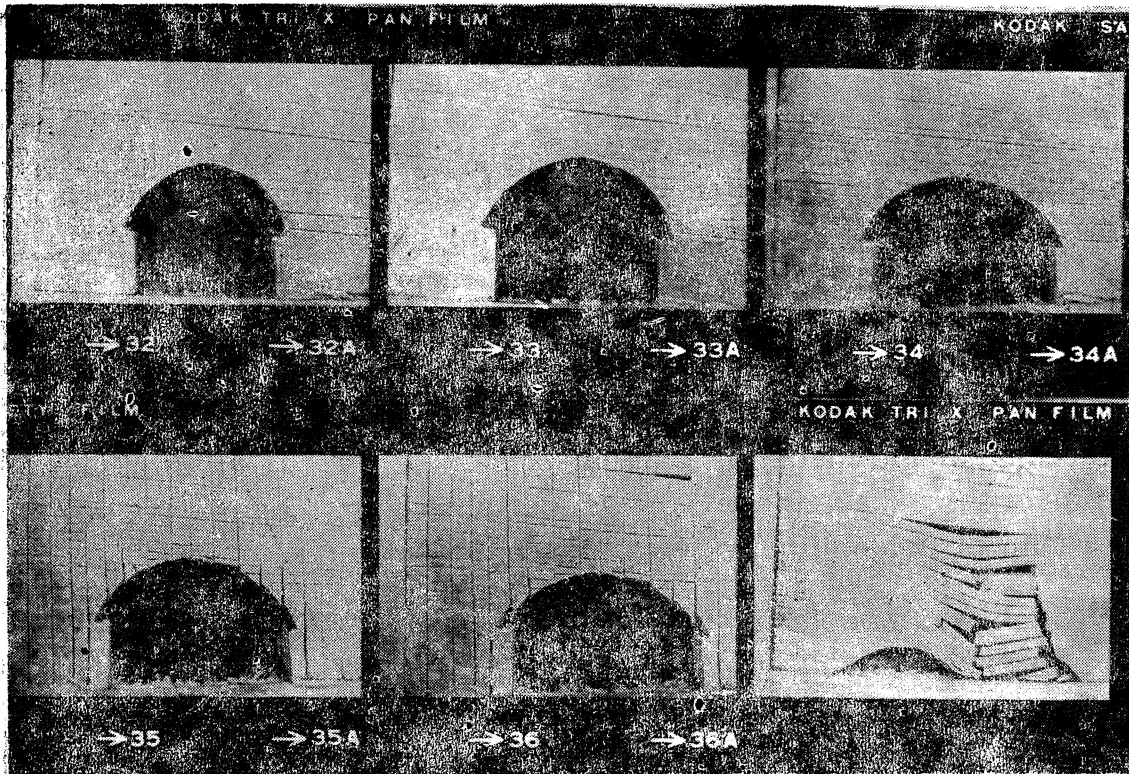
Bu çalışmadan :

a) Elde edilen veriler, 1967 - 70 yılları arasında, California-Berkeley Kaya Mekaniği laboratuvarında yapılan ve sonuçları tarafımdan derlenen ölçekli model çalışmalarında (Şekil 9-10) elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve çatlak gelişimi bölgelerinde ve çatlak yayılışlarında benzerliklerin bulunduğu saptanmıştır.





Şekil 9 — Değişik tabaka durumlu, ölçekli model deneyinde, açılan bir tünelde çatlak bölgeleri ve gelişmeleri.



Şekil 10 — Aynı şekildeki tünelin kinematik model malzemesi ile yapılması ve hareket mekanizması.

b) Çatlaklı kayalarda açılan tünellerin davranışlarının, kısmen blokların serbestliğine ve kinematiğine, kısmen de kayanın direncine ve çatlak karakterine bağlı olduğu bulunmuştur.

cî Kinematik modellerde :

— —  $>3$  oldukça, kazı tavanının en zayıf bölge olduğu,

s

d

— —  $<3$  halinde ise çatlakların tünele teğet oldukları yerlerde

s

geliştiği saptanmıştır;

d

d) — —  $=7, 8,9,10...<$  olmak üzere yapılacak büyük boyutlu çalışma

s

malardan elde edilecek sonuçların çatlaklı kaya farda ki uygulamalara ışık tutacağı kanısına varılmıştır.

e) Kullanılan bu yeni deney malzemesinin bu tür model çalışmaları için elverişli olduğu görülmüştür.

## SUMMARY

The kinematic model provides an interpretation of the basic geological data to establish allowable failure modes in jointed rock masses. Each of the enormous number of blocks defined by sets of discontinuities can, theoretically, slide on any one or two of its faces» rotate about one of its edges, or rotate and slide simultaneously in a number of complex modes (Goodman and Taylor, 1966); because of mutual interference in a real excavation, in fact only a small fraction of the imaginable modes are actually possible. As the orientation and shapes of the excavation are varied, certain failure modes pass beyond the realm of possibility as new ones enter into it.

Kinematic models reinforce stability analyses since the first step in performing a stability analysis must be the selection of the failure surface. To a certain extent, trial and error determination of the slip surface is feasible, as in the slip circle approach of soil mechanics. But so many slip modes are kinematically unacceptable by virtue of block shapes and arrangements that, it is worthwhile to consider reducing the degree of trial freedom by a separate kinematic analysis» This can be done by a combination of stereographic projection and orthographic projection (Heuzé and Goodman, 1971) or by special

kinematic model studies. Fig. 4 shows a kinematic modelling box developed at Berkeley to consider possible failure modes for the spillway excavation planned at Auburn dam site (California).

For a kinematic study a material combining easy cuttability and rigidity is compacted in the box and the network of discontinuities is cut with a knife or rigid sheet of metal held in position and orientation by a jig. The sides of the box are removable to allow making cuts that intersect the sides. After introducing the network of Joints, faults and bedding plane, one can excavate to a trial design and observe which blocks are free at various stages. A water tank attached to the model provides water seepage toward the excavation and is useful qualitatively, in calling attention to crucial flow paths.

it was hard to find a good modelling mixture as cuttability and rigidity are mutually exclusive in most materials. Also, we wanted the preparation to be quick and the mixture to be innocuous, reusable (or cheap), and stable.

Various combinations of the following constituents were tried: wax, diatomite (cellite), resin, basalt silt, portland cement, flour, salt, gelatin, water and vegetable oil. The selected mixture is as follows (parts by weight): 100 parts flour; 30 parts vegetable oil; 3 parts salt. A mixture of flour and oil has a liquid limit of 30.5 % oil, and a plastic limit of 28.0 %. This mixture, with oil content of 23 %, is below its plastic limit and displays brittle behavior. The unconfined compressive strength is of the order of  $0.17 \text{ kg/cm}^2$  and the modulus of elasticity is about four times greater. Though this material is relatively more deformable than rock (the modulus of elasticity of rock is 500 to 1000 times the compressive strength) it fails much like rock. The angle of friction of joints cut in the mixture is  $36^\circ$ , with a small cohesion depending on the way the cut is made. Cubical blocks formed from the material by cutting a pattern of joints develop an angle of repose of  $45^\circ - 50^\circ$ .

As an example of a kinematic model study, consider the effect of tunnel size in jointed rock. Terzaghi pointed out the influence of the width and height of the tunnel in controlling the volume of rock fallout, (Fig. 3) and consequently the load on tunnel supports or

lining. A detailed study of this problem, by dynamically scaled models\* and finite element analysis, was undertaken by de Rouvray, Goodman, et al (1970). Curves of relative strength for jointed and unjointed tunnels were prepared from computer and model studies for varying spacing, frictional and deformational properties, and orientation of joint sets. The behavior of the tunnel was found to be controlled partly by kinematics and partly by rock strength. When the ratio of tunnel diameter (d) to joint spacing (s) is greater than 3 the roof is the weakest region. When d/s is less than 3, the walls crush first behind slivers of rock where joints are tangent to the tunnel as they do, the roof span is effectively increased until an integral number of joint blocks is free to drop into the opening. The kinematic model apparatus described above can be used easily to give a quick appreciation of the modes of behavior in a problem such as this. A series of models were made with  $d/s = 1, 2, 3, 4, 5,$  and 6, and dead load was applied to produce failure. The tunnels were «driven» by turning a hand auger (Fig. 4-6). The mode of failure was as described above resulting in collapse of an integral number of blocks in the roof. The degree of weakening of the joint system on tunnels of different size, expressed as the ratio of failure load with joints to failure load without joints, is presented in Table 1. Only one pattern of joints and one shape of tunnel was studied in this example. The numbers are less important than the observations of behavior modes and freedoms which paralleled those made in the more complete study mentioned earlier (de Rouvray, Goodman, et al). The point is, that a kinematic model study like this can quickly point out particular geological influences on specific works.

Another example of kinematic modelling is made of slope behavior in a jointed rock with two sets of joints. The angle between the joint sets is  $60^\circ$  and the slope is vertical. When one set of joints is steeper than the friction angle,  $\theta$ , the largest triangular wedge possible slips first, followed by the next larger wedge when the first hits the bottom. Eventually the upper part of the moving mass buckles causing the sliding mass to suffer substitution of point contacts for face

SIZE EFFECT - CIRCULAR TUNNELS IN A ROCK MASS  
WITH A CUBIC JOINT PATTERN

---

Joint Frequency (d/s) Tunnel diameter -4- Joint spacing	Vertical load on model at failure (pounds)	Joint reduction factor Material failure load-? Model failure load
1	125*	1
2	125*	1
3	125*	1
4	80	1.6
5	29	4.3
6	17	7.4

(\*) Failure load depends on position of tunnel within rock mass for  $d/s < 3$   
(see de Rouvray, Goodman, et al, 1970)

contacts between blocks, with joint openings and interblock cavities»  
The process continues until the rubble and the cliff reach a limiting  
safe surface. However, when both sets are inclined less steeply  
than  $0$ , the only effect is a «pop out» of an isolated wedge under  
tangential stress.

### BİBLİYOGRAFYA

- Barton, N., 1968, A Low Strength Material for Simulation of the Mechanical Properties of Intact Rock Mechanics Models: Imperial College Rock Mechs. Progress Report, no. 38-T1,
- Côos, H., 1680, Zur Experimentellen Tectonic: Die Naturwissenschaften<sup>^</sup> vol. 18, 741-747.
- Currie, J.B., 1986, Experimental Structural Geology: Earth Sei. Rev., Vol. X no. 1, 51-67.
- Dahl, D.** - Voight, B., 1970, Isotropic and Anisotropic Plastic Yield Associated With Cylindrical Underground Excavations.  
Large Permanent Underground Openings: Symp. Proceed. 106-110.
- Daubree, A., 1879, Etude Synthétique de géologie expérimentale, Dunod, Paris-
- de Rouvray, A., Goodman, R.J.E., Drozd, K., **Heuze, F.E.**, Brekke; T-L.,  
Analysis and Model Studies of Underground Openings in Jointed  
Rock: U.S. Army Corps of Engineers, Omaha District, Technical Report-

- éé Sitter, L.U., lööö, Structural Geology\* Chapter-», Mc-Graw-Hill, London.
- jFumagiHb E., JôflS, Model Simulation of Rock Mechanics: Problems in Rock iMech. In Eng. Practice, Zienkiewics and Stagg, ed., J. Wiley and Sons, New York.
- «Goodman, RE., and Heuze, RE., 1971, Thrfeè-Dimensional Stability Analysis of Rock Cuts for the Lieft Spillway of Auburn Dam, Final report to U.S. Bureau of Reclamation, 2 Vols., Denver, Colorado, Contract ,14-O6-]»6900.
- Hall, J. 1S15, On the Vertical Position and Convolution of Certain Strata and Their Relation with Granite: Trans. Royal Society, Edinburgh vol. 7, T9-1084
- iHbbbsi, D.W., 1966, Scale odel Studies of Strata Movements Around Mine Roadways, Apparatus, Techniques and Some Preliminary Results: Int. J. Rock. Mech. Min. Sei., Vol. 3, 101-127-
- Hubbert, M.K., 1937, Theory of Scale Models as Applied to the Study of Geologic Structures: Bull. Geol Soc Afru Vol. 4», 14B9-1112D.
- Krsmanovic, D. and Milic, S. 1964, Model Experiments on the Pressure Distribution in Some Cases of a Discontinuity: Rock. Mech. and Eng. Geol. Suppl I;
- Obert, L. and Duvall, W.I. 1967, Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock: Chapter 10, J. Wiley and Sons, New York.
- Rengers, N. and Müller, L. 1970, Kinematische Versuche an Geomechanischen Modellen: Rock Mechanics, Supplementum I, -20-31,
- Stimpson, B. 1970, Modelling Materials for Engineering Rock Mechanics: Int. J. Rock Mech. Min. Sei, Vol. 7, 77-121, London.
- Terzaghi, K. 1946, Introduction to Tunnel Geology: Proctor and White, Rock Tunneling with Steel Supports, Commercial Shearing and Stamping Co., Ohio. \*\*\*\*\*