

'Yerinde' makaslama uğramış süreksiz kayaç kütlelerinde ilerleyici ve gerileyici yenilme⁽¹⁾

Progressive and retrogressive failure in discontinuous rock masses subjected to 'In - Situ' shear ⁽¹⁾

K. ERÇİN KASAPOğLU Yerbilimleri Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara

ÖZ: Bu çalışmanın temel amacı, gerek laboratuvarında gerek 'yerinde' makaslama deneylerinde, makaslama deformasyonu ve makaslama yenilmesinin mekanizmasının anlaşılabilmesi için gerekli bazı verileri elde etmek; ve bu konudaki güçlüklerle, özellikle davranışları doğrusal olmayan izotropik ve anizotropik jeolojik malzemelerde, sınır koşullarının bir fonksiyonu olarak gelişen ilerleyici ve gerileyici yenilmeye ışık tutmak olmuştur.

Soruna, teorik ve deneysel olmak üzere iki ayrı yönden yaklaşılmıştır. Teorik yaklaşımda, belirli süreksizlik düzlemleri içeren bir 'yerinde' makaslama bloku için bir matematiksel (analitik) bilgisayar modeli geliştirilmiş; bu model üzerinde, sonlu-elemanlar yöntemi ile, süreksizlik düzlemlerinin ve değişik sınır koşullarının makaslama blokunun deformasyonu ve yenilme mekanizması üzerindeki etkileri saptanmıştır. Deneysel yaklaşımda ise, teorik çözümlmelerden elde edilen sonuçların güvenilirliklerini ve uygulanabilirliklerini gerçeklemek amacı ile, laboratuvarında benzer koşullar altında, kayaç örnekleri üzerinde, doğrudan makaslama deneyleri yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, değişik sınır koşullarının seçimi, makaslama blokunun yenilme mekanizmasını önemli ölçüde etkilemektedir. Belirli sınır koşulları altında, makaslama bloku içinde oluşan 'çekici zonlar' mekanik açıdan büyük önem taşımaktadır. Bu çekici zonlarda 'ayrılma' şeklinde oluşan yerel yenilmeler, ilerleyici yenilmeyi oluşturmaktadır.

(1) Bu yazının kısa bir şekli 'Proc. of 3rd. Congress of ISRM, 1974'de İngilizce olarak yayımlanmıştır.

A short version of this paper has been published in 'Proc. of 3 rd. Congress of ISRM, 1974' in english.

Belirli sınır koşulları altında, makaslama blokunun son yenilmesi ise, birden fazla kırılma şeklinin bir sonucudur. Doğrusal yenilme zarfları, tek bir (makaslama) yenilmesi şeklinin işareti olarak yorumlanabilirler. Parabolik yenilme zarfları ise, birden fazla yenilme şekline işaret ederler.

Jeolojik malzemeler üzerinde yapılacak 'yerinde' makaslama deneylerinin sonuçları, daha değişik bir terminoloji ile; bir veya birkaç asal gerilimin 'çekilme' şeklinde olduğu homojen olmayan bir gerilim alanı, yaygın bir gerilim reoriyantasyonu, ve birden fazla çatlak ilerlemesi gibi değişebilen birleşik gerilim hallerinin bir sonucu olarak değerlendirilmeli ve yorumlanmalıdır.

'Yerinde' makaslama deneylerindeki makaslama deformasyonu ve yenilme mekanizmasının, sonlu-elemanlar yöntemi ile yapılacak teorik çözümlenmeleri ile bazı deneysel sonuçları öngörebilme olanağı vardır.

ABSTRACT: The purposes of this work have been to obtain some general information on the actual mechanism of deformation and failure in both laboratory and 'in-situ' shear test; and to shed light upon the development of progressive and retrogressive failure under various test conditions.

The study includes extensive laboratory testing and a theoretical approach to progressive deformation. In the latter approach, a computer model of a shear block with certain discontinuities was developed. The method of calculation utilizes finite-element technique for the determination of the state of strain and stress in elastic and/or elastoplastic structures, for an assessment of the mechanical influence of a given discontinuity within the elastic structure, for a systematic evaluation of the effects of type of loading conditions on shear deformation and failure characteristics of the block and to examine the actual mechanism of shear deformation and failure in a test block under direct shear loading. The theoretical program was accompanied by mechanical laboratory tests designed to test the reliability and applicability of conclusions suggested by the theoretical studies.

It has been concluded that choice of boundary conditions exerts an important control on failure mechanism. The tensile zones, which always develop within the test block, are of mechanical importance. Local failure which occurs in these tensile zones, in the 'separation' mode, under certain boundary conditions, leads to progressive failure. Straight-line failure envelopes can be interpreted as representation of a single (shear) failure mode. Parabolic failure envelopes are suggestive of multiple modes of failure.

'In-situ' shear tests on geological materials should be interpreted in more sophisticated terms; i. e., as a consequence of variable combined stress state, involving inhomogeneous stress field; extensive stress reorientation, and multiple crack propagation.

The theoretical approach to the mechanism of deformation and failure characteristics of 'in-situ' shear tests, utilizing finite-element method, appears to be a valid approach for prediction of certain experimental results.

GİRİŞ

Laboratuvarda ve 'yerinde' saha koşulları altında yapılan doğrudan makaslama deneyleri, toprak ve kayaların dayanım parametrelerinin saptanmasında geniş ölçüde yararlı olmaları nedeniyle, hem jeoloji hem mühendislik yönünden büyük önem taşırlar.

Yaygın bir şekilde kullanılmakta olmalarına karşın, bu deneylerdeki deformasyonun fiziki yönü gereğince anlaşılmamıştır. Bu nedenle, makaslama deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmelerinde ve yorumlanmalarında önemli yanlışlıklar yapmak olanaklıdır. Bu çalışmanın temel amacı, gerek laboratuvarda gerek 'yerinde' makaslama deneylerindeki makaslama deformasyonu ve yenilme mekanizmasının anlaşılabilmesi için gerekli bazı genel bilgileri saptamak; ve bu konudaki güçlüklerle, özellikle davranışları doğrusal olmayan izotropik ve anizotropik je-

olojik malzemelerde, sınır koşullarının bir fonksiyonu olarak gelişen ilerleyici ve gerileyici yenilmeye ışık tutmak olmuştur.

Tüm gerilimlerin sıkıştırıcı gerilim şeklinde ve tüm süreksizlikler üzerindeki dikey gerilimlerin büyük olduğu halde, kayaç sistemini elastik bir ortam olarak ele almak gerçekçi bir yöneliş olabilir. Ancak, blok tabanında oluşumu olasılı çekiç gerilimlerin, 'yerinde' makaslama deneylerindeki deformasyon ve yenilme mekanizmasının anlaşılması yönünden çok önemli olduğu öngörülmüştür.

Kayaç kütleli içindeki herhangi bir yerdeğişim, kayaç bloklarının bağıl konumlarını değiştirebileceğinden, bloklar üzerinde yüksek yerel gerilimlere ve sonuç olarak da ayrı ayrı yerel yenilmelere neden olabilir. Bu yenilmeler, çekilme veya makaslama yenilmeleri şeklinde oluşabilirler; ve kayaç sistemi içindeki gerilimler, bu yerel yenilmelerden

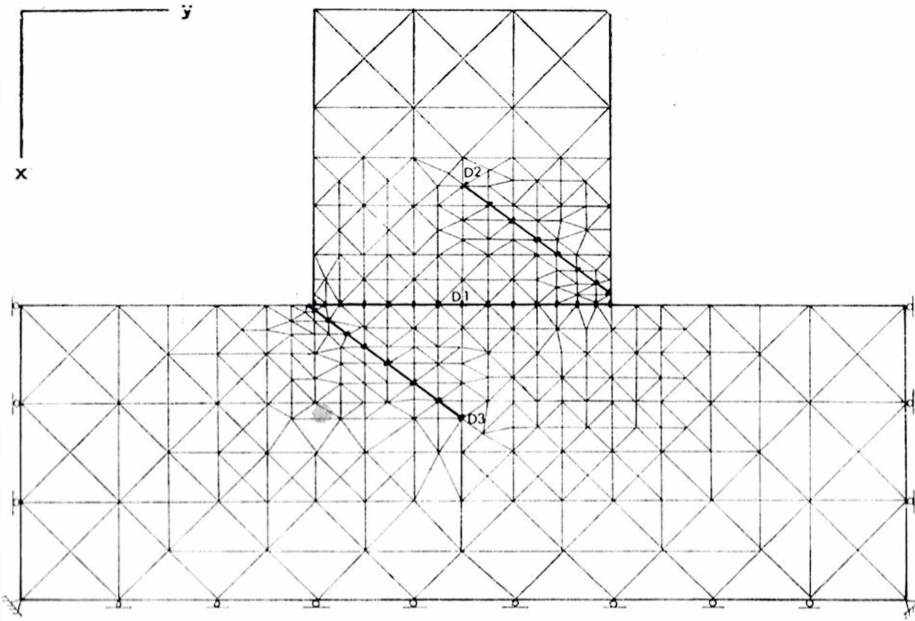
sonra kendi kendilerini yeniden yönlendirebilirler.

Birçok kayaç ve toprak malzemelerde, ilerleyici yenilme pek çok rastlanan bir yenilme türüdür. Bu tür yenilmenin mekanizmasının saptanması, yol köprü, tünel, baraj inşaatları, yer sarsıntıları ve yer kaymaları gibi çeşitli mühendislik jeolojisi çalışmalarında büyük önem taşır. Ancak, bu tür yenilmenin hangi koşullar altında oluştuğu henüz yeterince bilinmemektedir.

TEORİK ÇÖZÜMLEME

Çözümleme Tekniği

Tipik bir 'yerinde' makaslama blokunun uygun ölçekli bir bilgisayar modeli hazırlanmış; bu model üzerinde, düzlem birimdeformasyon koşulları varsayılarak, sonlu-elemanlar yöntemi ile, değişik sınır koşulları altında, gerilim ve

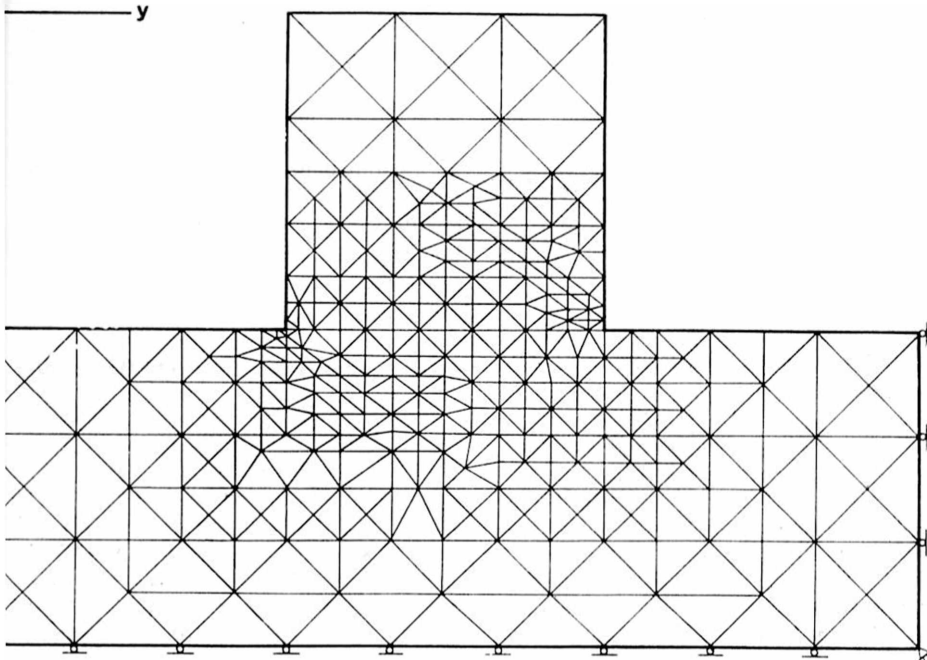


Şekil 1: M1 'yerinde' makaslama bloku modelinin sonlu elemanlara bölünümü.

Figure 1: Finite element idealization of 'in-situ' shear block model M1.

birimdeformasyon çözümleri yapılmıştır. Burada kullanılan, ve daha önce Wang ve Voight (1969) tarafından tanımlanan sonlu - elemanlar yöntemi (SEY), makaslama bloku modelinin, belirli sayıda iki boyutlu üçgen eleman-

lara bölümünü öngörür. Modelde içlenen süreksizlik düzlemleri üzerinde 'Çift köşe noktaları' kullanılmıştır. İlerleyici bir yenilmenin, olası makaslama zonu (Makaslama bloku tabanındaki süreksizlik düzlemi) içinde oluşabileceği dü-



Şekil 2: M2 'yerinde' makaslama bloku modelinin sonlu elemanlara bölünümü.

Figure 2: Finite element idealization of 'in-situ' shear block model M2.

şünülmüş; ve Coulomb - Navier'in 'çekiçi kesim'li yenilme teorisi uygulanmıştır.

Elastik - elastoplastik çözümler için, Dahl (1969) un sonlu - elemanlar programı bazı değişiklikler yapılarak kullanılmıştır. Model malzemesinin elastik ve mükemmel plastik olduğu varsayılmış; çözümler elastik - elastoplastik sayılına göre yapılmıştır.

Plastik çözümlerde, model üzerine uygulanan yüklemde, plastisite teorisinin 'aralıklı artan yük uygulama' yöntemi benimsenmiştir (Dahl, 1969; Dahl and Voigt, 1969; Voigt and Dahl, 1970). Aralıklı uygulanan her yük, birbirinden bağımsız olup; herhangi bir aralıkta oluşan toplam gerilim ve birimdeformasyon, söz konusu aralıkta oluşan gerilim ve birimdeformasyon değerlerine eklenerek hesaplanmıştır.

Model ve Özellikleri

Sonlu - elemanlar yönteminin uygulandığı teorik çözümler için, şekil 1 ve şekil 2'de M1 ve M2 olarak tanımlanan iki ayrı bilgisayar modeli geliştirilmiştir. Bunlardan

M1: D1, D2 ve D3 ile gösterilen üç ayrı süreksizlik düzlemi içermektedir. D1, blok tabanında varsayılan hipotetik makaslama düzlemine; D2 ve D3 ise olası çekilme çatlaklarına karşılıklıdır. Bu çalışmanın büyük bir bölümünü kapsayan elastik çözümlerde bu model kullanılmıştır.

M2: Elastik - elastoplastik çözümlerde kullanılan bu modelin, M1 modelinden tek ayrılığı herhangi bir süreksizlik düzlemi içermemiş olmasıdır.

Gerçek koşullara en iyi yaklaşımı sağlayabilmek amacı ile, her iki model de iki - boyutlu olarak düşünülmüştür.

Teorik çözümler tek bir kayaç tipi (Berea Kumtaşı) üzerinde yapılmıştır. Bunun nedeni, bu kayacın mekanik özelliklerinin teorik çözümlerdeki varsayımlara daha uygun olması, ve mekanik davranışını etkileyen fiziksel özelliklerinin, daha önceki çalışmalardan biliniyor olmasıdır (çizelge 1).

Çizelge 1: Berea Kumtaşının fiziksel özelliklerinin ortalama değerleri (Khair, 1971 den)

Table 1: Nominal values of the physical properties Berea Sandstone (After Khair, 1971)

Fiziksel Özellik:	Değer:
Serbest Sıkışma Dayanımı	9.000 psi
Serbest Çekilme Dayanımı	300 psi
Serbest Makaslama Dayanımı	1.400 psi
Elastisite Modülü (sıkışma halinde)	1.15×10^{10} psi
Elastisite Modülü (çekilme halinde)	0.58×10^{10} psi
Poisson Oranı (sıkışma halinde)	0.2
Poisson Oranı (Çekilme halinde)	0.1
Bağımsız Makaslama Modülü	0.46×10^6 psi

Model malzemesinin fiziksel özellikleri, elastik, homojen ve izotropik ortam için,

$$E = 1.1 \times 10^{10} \text{ psi.}$$

$$\nu = 0.2$$

anizotropik ortam için ise,

$$E_n = 1.1 \times 10^{10} \text{ psi. } E_t = 0.6 \times 10^{10} \text{ psi.}$$

$$\nu_n = 0.2 \quad \nu_t = 0.13$$

$$G = 0.46 \times 10^6 \text{ psi.}$$

olarak alınmıştır.

Sınır Koşulları

Makaslama bloku modeli üzerine şekil 3'de gösterilen sekiz ayrı sınır koşulu uygulanmış; bu koşullar altındaki deformasyon ve yenilme mekanizması saptanmıştır. Bunlar:

L1: Blok tabanına paralel, düzgün dağıtılmış yatay yük.

L2: Blok tabanına paralel, düzgün dağıtılmış yatay yük ve blok tabanına dik, düzgün dağıtılmış düşey yük.

L3: Makaslama blokunun sol kenarının blok tabanına paralel düzgün yerdeğişimi.

L4: Makaslama blokunun sol kenarının blok tabanına paralel düzgün yerdeğişimi ve blok tabanına dik, düzgün dağıtılmış düşey yük.

L5: Makaslama blokunun sol kenarının tabandan itibaren üçte birine yoğunlaştırılmış ve blok tabanına paralel düzgün dağıtılmış yük.

L6: Makaslama blokunun sol kenarının tabandan itibaren üçte

birine yoğunlaştırılmış, blok tabanına paralel düzgün dağıtılmış yük ve blok tabanına dik, düzgün dağıtılmış düşey yük.

L7: Makaslama bloku tabanı ile 20° lik açı yapan, düzgün dağıtılmış eğik yük.

L8: Makaslama bloku tabanı ile 20° lik açı yapan, düzgün dağıtılmış eğik yük ve blok tabanına dik, düzgün dağıtılmış düşey yük.

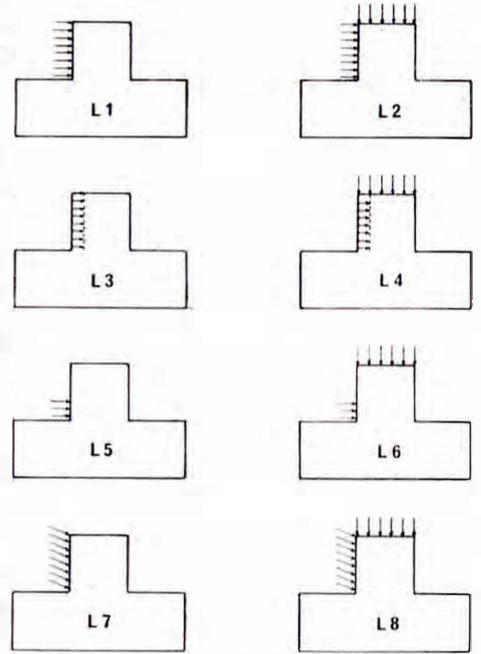
ELASTİK SÜREKLİLİK ÇÖZÜMLERİ

Asal Gerilim Dağılımı

Teorik modelde içerilen her üçgen elemanın merkezinde oluşan en büyük ve en küçük asal gerilimlerin yön ve değerleri analitik olarak saptanmış; elde edilen sonuçlar, (CalComp) bilgisayar yardımı ile grafiksel olarak sunulmuştur. Değişik sınır koşulları için elde edilen tipik izotropik çözümleme sonuçları şekil 4'de gösterilmiştir. Kayaç kütleli içinde heterojen bir şekilde dağılmış olan en büyük ve en küçük asal gerilimlerin yön ve değerleri, blok tabanındaki hipotetik makaslama düzlemi boyunca önemli değişimler göstermiş ve köşe noktalarında önemli gerilim birikimleri oluşturmuşlardır. L1, L2, L3 ve L5 sınır koşulları altındaki modellerde gelişen çekici asal gerilim zonu, özellikle L3 ve L5 sınır koşulları altında daha az gelişmiştir. Asal gerilimlerin yönü, sınır koşullarına bağımlı olarak önemli değişimler göstermiştir. Özellikle, makaslama bloku tabanına dik olarak uygulanan düşey yük, blok tabanında, çekici asal gerilimlerin gelişimini önemli ölçüde önlemiştir.

Birimdeformasyon ve Gerilimlerin Blok Tabanında Dağılımı

Tüm sınır koşulları altında, birimdeformasyonlar ve gerilimler, blok tabanı boyunca düzgün olmayan bir dağılım göstermişlerdir. Blok tabanına dik herhangi bir düşey yükün uygulanmadığı L1, L3, L5, L7 sınır koşulları altında blok tabanının sol tarafındaki birimdeformasyonlar ve gerilimler, genel olarak (+) değerli, yani 'çekici' özelliktedirler. Blok tabanındaki birimdeformasyon ve gerilim dağılımları, sırasıyla şekil 5 ve şekil 6'da gösterilmiştir. Salt



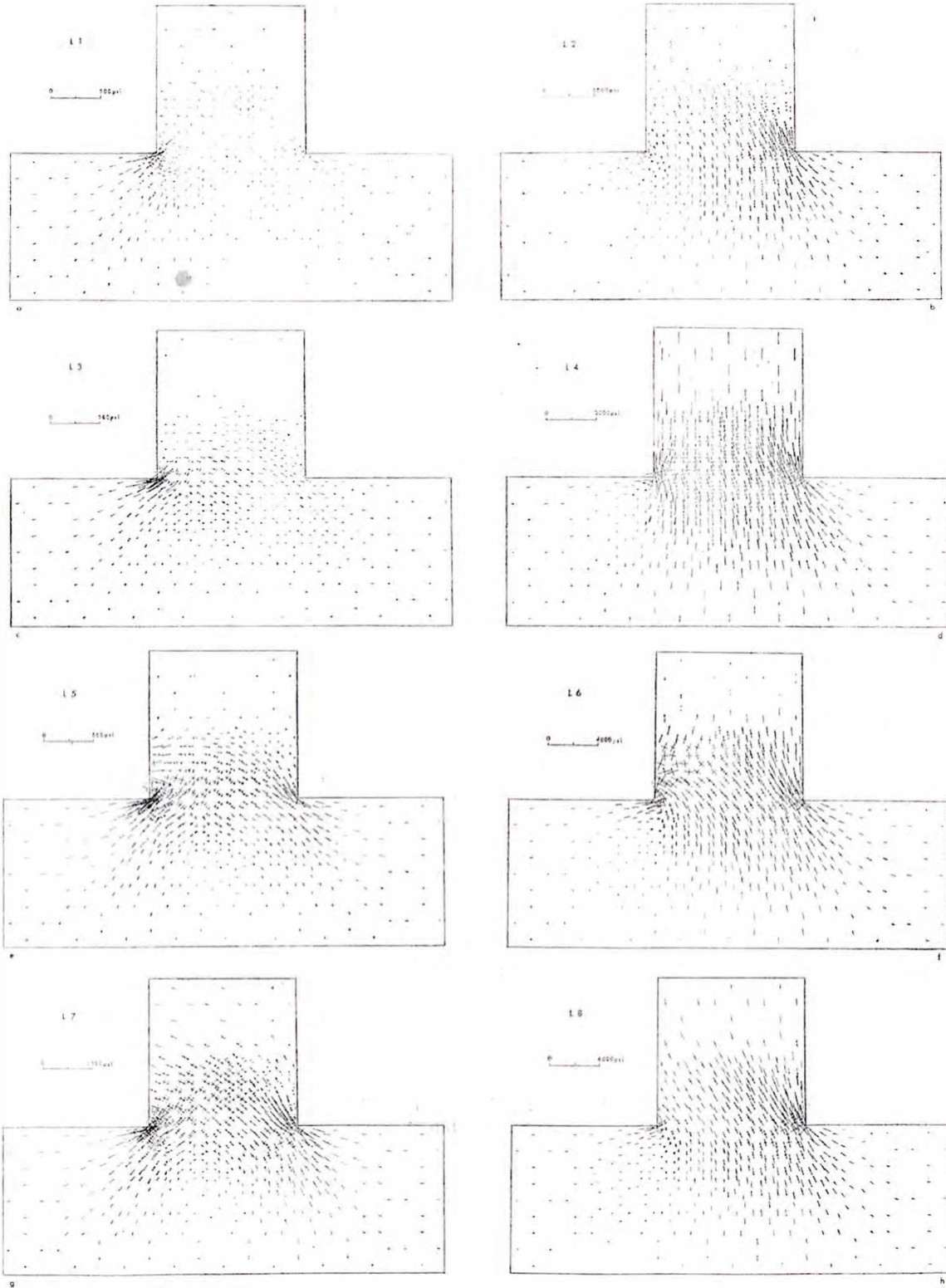
Şekil 3: Sınır koşulları.

Figure 3: Boundary conditions.

L4 ve L6 sınır koşulları altında, blok tabanında oluşan tüm birimdeformasyon ve gerilimler, sıkıştırıcı özelliktedirler. Bu iki sınır koşulu altında, blok tabanında, çekici özellikte birimdeformasyon veya gerilim oluşmamıştır. Bu, gerçekten, önemli bir noktadır. Çünkü, salt bu koşullar altında, blok tabanındaki yenilme, tümüyle makaslama yenilmesi niteliğindedir. Şekil 7'de, L4 sınır koşulu altında, D3 süreksizliği boyunca, yenilmeden hemen önceki birimdeformasyon ve gerilim dağılımı görülmektedir. Blok tabanının sol köşesindeki yüksek çekici gerilim birikimi nedeniyle, makaslama blokunun ilk yenilmesi, D3 süreksizliğinin serbest ucunda, çekilme şeklinde oluşur.

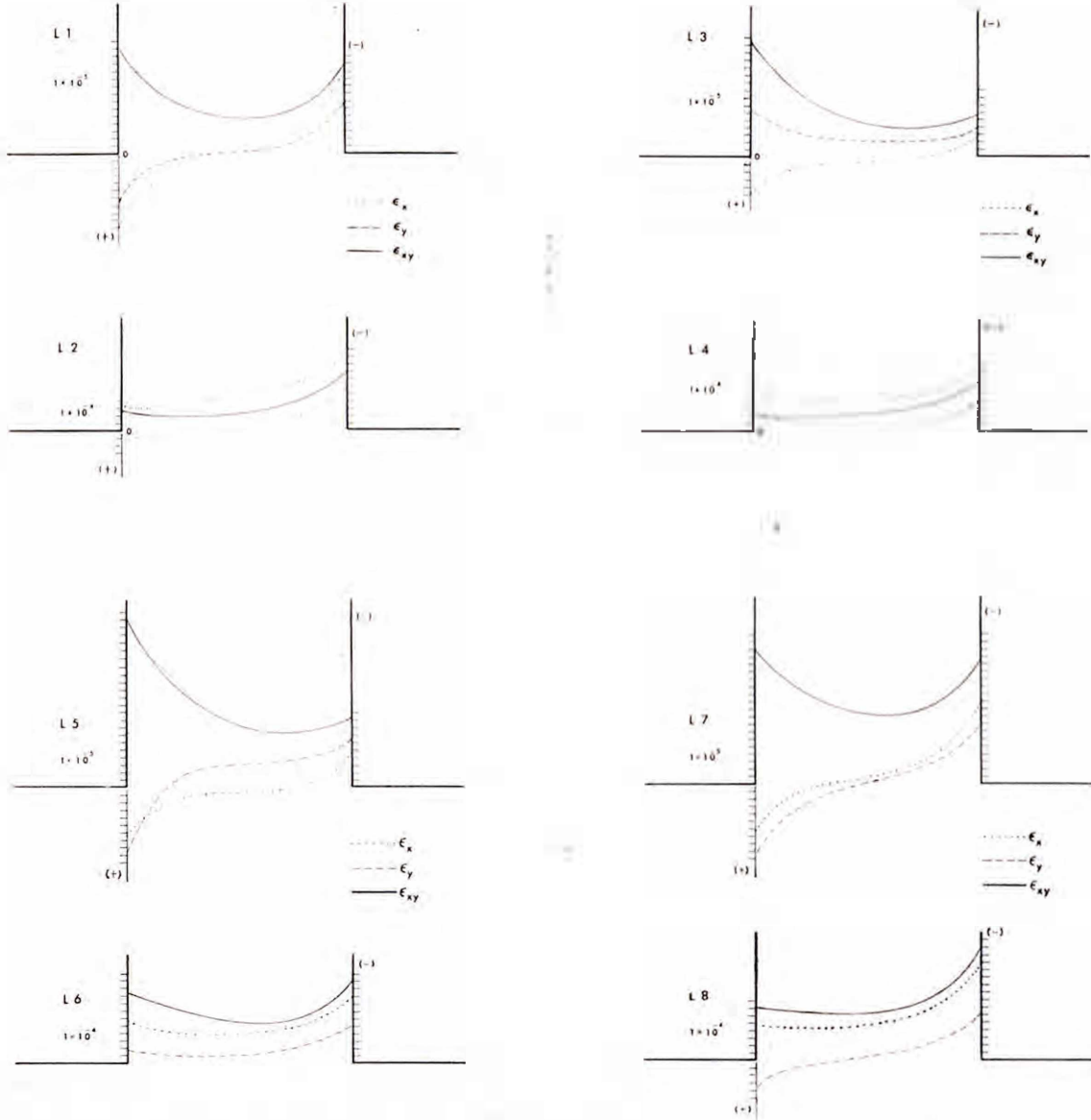
Çekici Zonun Dikey Kuvvete Bağımlılığı

Şekil 8, makaslama blokuna uygulanan düşey kuvvetin yatay kuvvete oranının değişik değerlerine karşın blok tabanında oluşan çekici zonun ilerleyici gelişimini göstermektedir. Uygulanan düşey kuvvetin yatay kuvvete oranı (R) küçüldükçe, çekici zonun yayıldığı alan büyümektedir. $R = \infty$ (veya $F_y = 0$) için, blok tabanında oluşan tüm gerilimler, sıkıştırıcı gerilimlerdir. Diğer bir deyişle, çekici zon oluşmamaktadır. Buna karşın, $R = 0$ (veya $F_x = 0$) için, çekici zon alan en büyüktür.



Şekil 4: M1 makaslama bloku içinde, yenilmeden hemen önceki asal gerilim dağılımları.

Figure 4: Principal stress distributions in the shear block model M1 at incipient yield.



Şekil 5: Yenilmeden hemen önce, makaslama bloku tabanındaki birimdeformasyonların dağılımı.

Figure 5: Distribution of strains at the base of the shear block at incipient yield.

En Büyük Makaslama Gerilimi Eğrileri

Değişik sınır koşulları altında, makaslama blokonun tabanında oluşan en büyük makaslama gerilimi eğrileri şekil 9'da gösterilmiştir. En büyük makaslama gerilimleri, her zaman makaslama bloku taban düzlemi içinde değil, fakat çoğunlukla makaslama bloku tabanının köşe noktalarında birikmektedir. Daha önce Ruiz ve diğerleri (1968) tarafından da belirtilmiş olan bu gerçek, bazı deneylerde, makaslama yenilmesinin blok tabanı dışında oluşumunun nedeni-

ni açıklayıcı niteliktedir (Evdokimov and Sapegin, 1970). En büyük makaslama gerilimi eğrilerinin, makaslama bloku tabanının özellikle sağ köşesinde birikimi, makaslama blokonun dönüsel deformasyonunun, yenilme mekanizması üzerindeki etkisinin bir belirteçidir. L3 ve L4 sınır koşulları altında, bu etkinin en küçük olduğu görülmektedir.

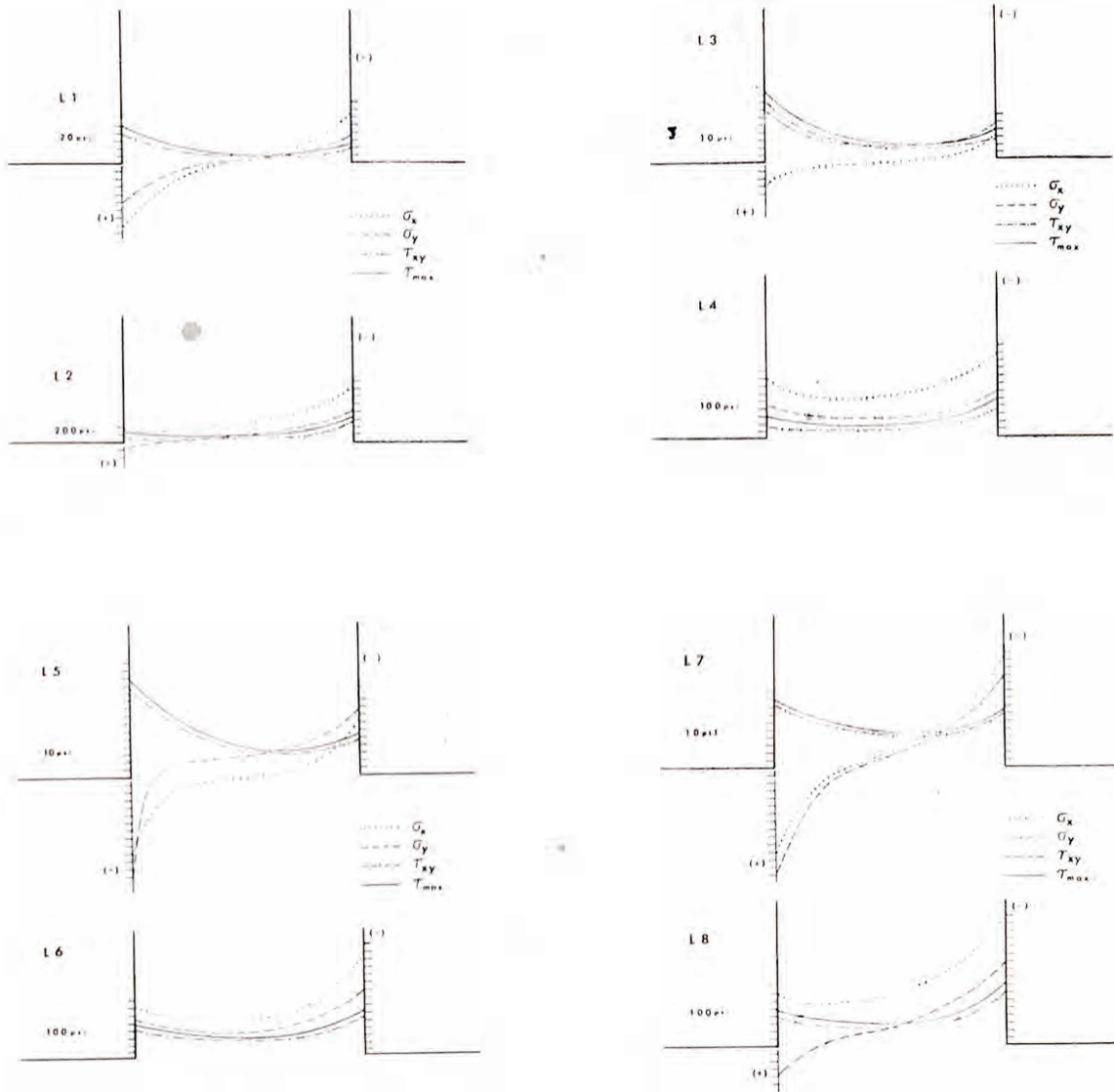
Yerdeğişim Alanı ve Blok Deformasyonu

Değişik sınır koşulları altında, makaslama bloku içindeki üçgen elemanla-

rın köşe noktalarında oluşan toplam yerdeğişimler, bilgisayarda (CalComp) yardımı ile çizilerek şekil 10'da sunulmuştur. Şekil 11 ise, makaslama blokonun bu toplam yerdeğişimlerden sonraki deformasyonunu göstermektedir. Bu sonuçlar, deformasyon şeklinin uygulanan sınır koşullarına bağlı olduğunu kanıtlayıcı niteliktedirler.

SÜREKSİZLİK ÇÖZÜMLERİ

Bir önceki bölümde, makaslama blokuna uygulanan sınır koşullarının ye-



Şekil 8: Yenilmeden hemen önce, makaslama bloku tabanındaki gerilmelerin dağılımı.

Figure 6: Distribution of stresses at the base of the shear block at incipient yield.

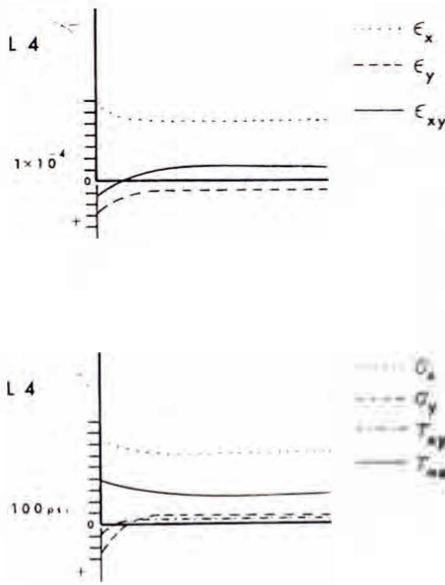
nilmeden hemen önceki kritik değerleri için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Makaslama blokuna uygulanan sınır yüklerinin, bu kritik değerleri aşmaları halinde, modelde içerilen süreksizlik düzlemlerinden (D1, D2, D3) biri üzerinde, 'kayma' veya 'ayrılma' şeklinde, en azından yerel olan, yenilmeler oluşur.

Deformasyon Şekli

Teorik çözümleme sonuçları, deformasyon şeklinin sınır koşullarına ba-

ğımlı olduğunu açık bir şekilde ortaya koymuş olması bakımından ilginçtirler. L4 sınır koşulu dışında, diğer tüm sınır koşulları altında, makaslama blokunun ilk yenilmesi D1 süreksizliği üzerinde sol uçtaki ilk noktada, bloğun tabandan ayrılması (çekilme yenilmesi) şeklinde olmaktadır. Uygulanan makaslama yükünün sürekli olarak artırılması halinde, bloğun ilk yenilmesi ile oluşan çekilme çatlağı, blok tabanı (D1 süreksizliği) boyunca sağa doğru ilerlemekte; bloğun son yenilmesi ise D1 süreksizliği boyunca, makaslama blokunun

tabandan tamamen ayrılması olmaktadır. L4 sınır koşulu altında ise, makaslama blokunun ilk yenilmesi, bu defa D3 süreksizliğinin üst uç kısmında, yine 'ayrılma' (çekilme yenilmesi) şeklinde oluşmakta; ve meydana gelen çekilme çatlağı D3 boyunca ilerlemektedir. Makaslama blokunun D3 süreksizliği boyunca tamamen ayrılmış hali ve o andaki dış deformasyonu şekil 12'de gösterilmiştir. Yenilmenin 'ilk evresi' olarak tanımlanan bu durumdan sonra, uygulanan makaslama yükünün sürekli olarak artırılması halinde, yenilmenin



Şekil 7: Yenilmeden hemen önce, D3 süreksizliği boyunca, birimdeformasyon ve gerilimlerin dağılımı.

Figure 7: Distribution of strains and stresses along discontinuity D3 at incipient yield.

'İkinci evre' si, blok tabanı boyunca, D1 süreksizliğinin sol ucunda, 'kayma' (makaslama yenilmesi) şeklinde oluşmakta ve sağ uca doğru ilerlemektedir. Bu şekilde oluşan makaslama çat-

lağı, D1 uzunluğunun henüz altıdabiri kadar ilerlemişken; yenilmenin üçüncü evresi makaslama blokunun sağ alt köşesinde, D1 üzerinde ve yine bir 'kayma' (makaslama yenilmesi) şeklinde oluşmaktadır. Sağ köşeden geriye (sola) doğru ilerleyen bu makaslama çatlağı, blok tabanının orta kısmında, sol köşeden sağa doğru ilerlemekte olan 'ikinci evre' çatlağı ile birleşerek, deney blokunun tüm yenilmesi ni oluşturmaktadır. (şekil 13).

Yenilme Mekanizması

Gerilim analizlerinden elde edilen sonuçlara göre, çoğunlukla, çekilme gerilimi birikimi makaslama blokunun sol alt köşesinde oluşmaktadır (Şekil 14). Yenilmenin 'ilk evre'si sırasında D3 boyunca oluşan çekilme çatlağının açılması, makaslama blokunun sol alt köşesinde birikmiş olan çekilme gerilimlerinin boşalmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak da, blok içinde yeniden bir gerilim dağılımı oluşmakta (şekil 15) ve bu da, D1 süreksizliği boyunca, yenilmenin 'ikinci' ve 'üçüncü' evreleri sırasında oluşan 'kayma' şeklindeki yenilmelere neden olmaktadır. İkinci evre sırasında, makaslama blokunun sol alt köşesinde oluşan makaslama çatlağının D1 boyunca ilerlemesinin geçici olarak durması veya yavaşlaması; ve karşı köşede, yenilmenin 'üçüncü evre'sinin 'kayma' (makaslama)

yenilmesi şeklinde oluşması da yine birinci ve ikinci evreler sonunda, her defasında yeniden oluşan gerilim dağılımının, makaslama blokunun sağ alt köşesinde neden olduğu büyük makaslama gerilimi birikiminin bir sonucu olarak yorumlanabilir.

Tepe ve Artık Dayanım, ve İlerleyici Yenilme

Teorik modeller üzerinde iki dizi bilgisayar deneyleri yapılmıştır. Birinci dizide, D1 süreksizliği üzerindeki noktalara CF, SS, ve TS dayanım parametrelerinin deneysel olarak saptanmış değişmez tepe değerleri verilmiş (çizelge 2) ve makaslama blokuna ardışık

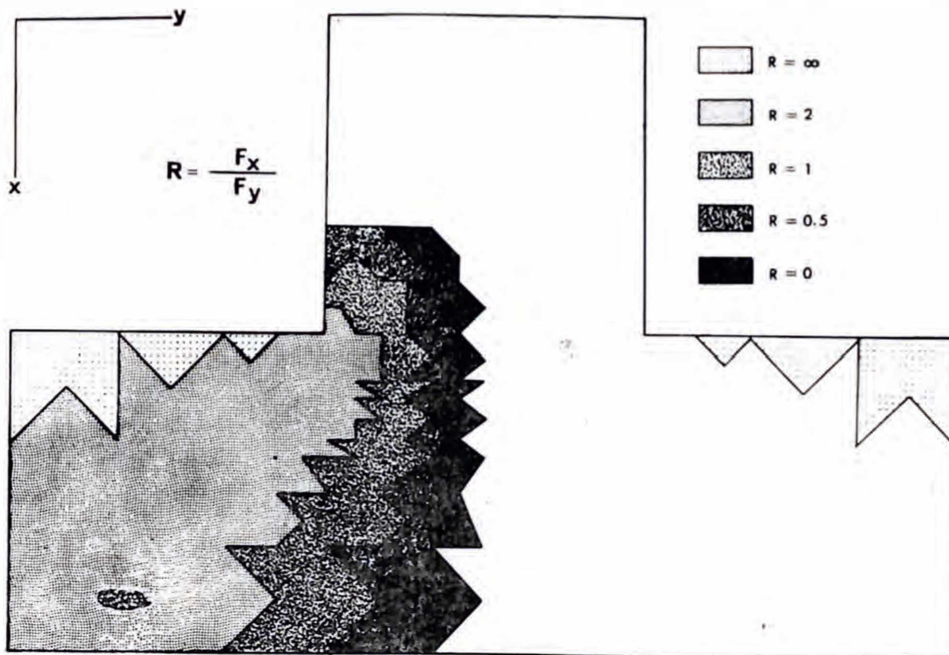
Çizelge 2: D1, D2, D3 süreksizlikleri boyunca varsayılan CF, SS ve TS temel değerleri

Table 2: Fundamental values of CF, SS and TS assumed along the discontinuities D1, D2, D3.

Süreksizlik	CF	SS	TS
D1	0.65 ^a	1200b psi	300 psi
D2	0.976	1800 psi	450 psi
D3	1.30b	2400b psi	600b psi

^a Deneysel olarak, katmanlaşmaya paralel yönde saptanan değerler.

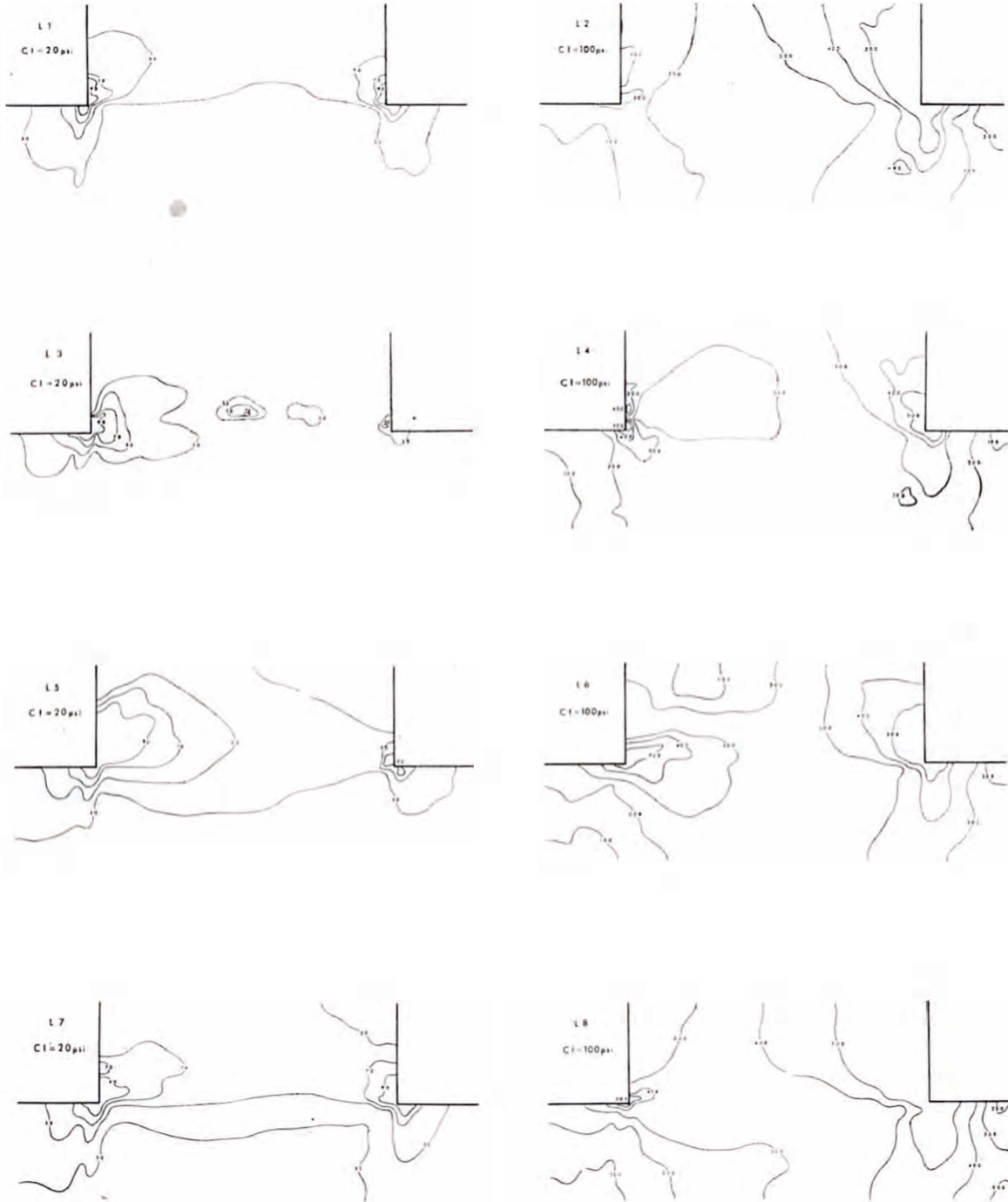
^b Deneysel olarak, katmanlaşmaya dik yönde saptanan değerler.



Şekil 8: Çekici zonun, makaslama bloku içindeki gelişimi.

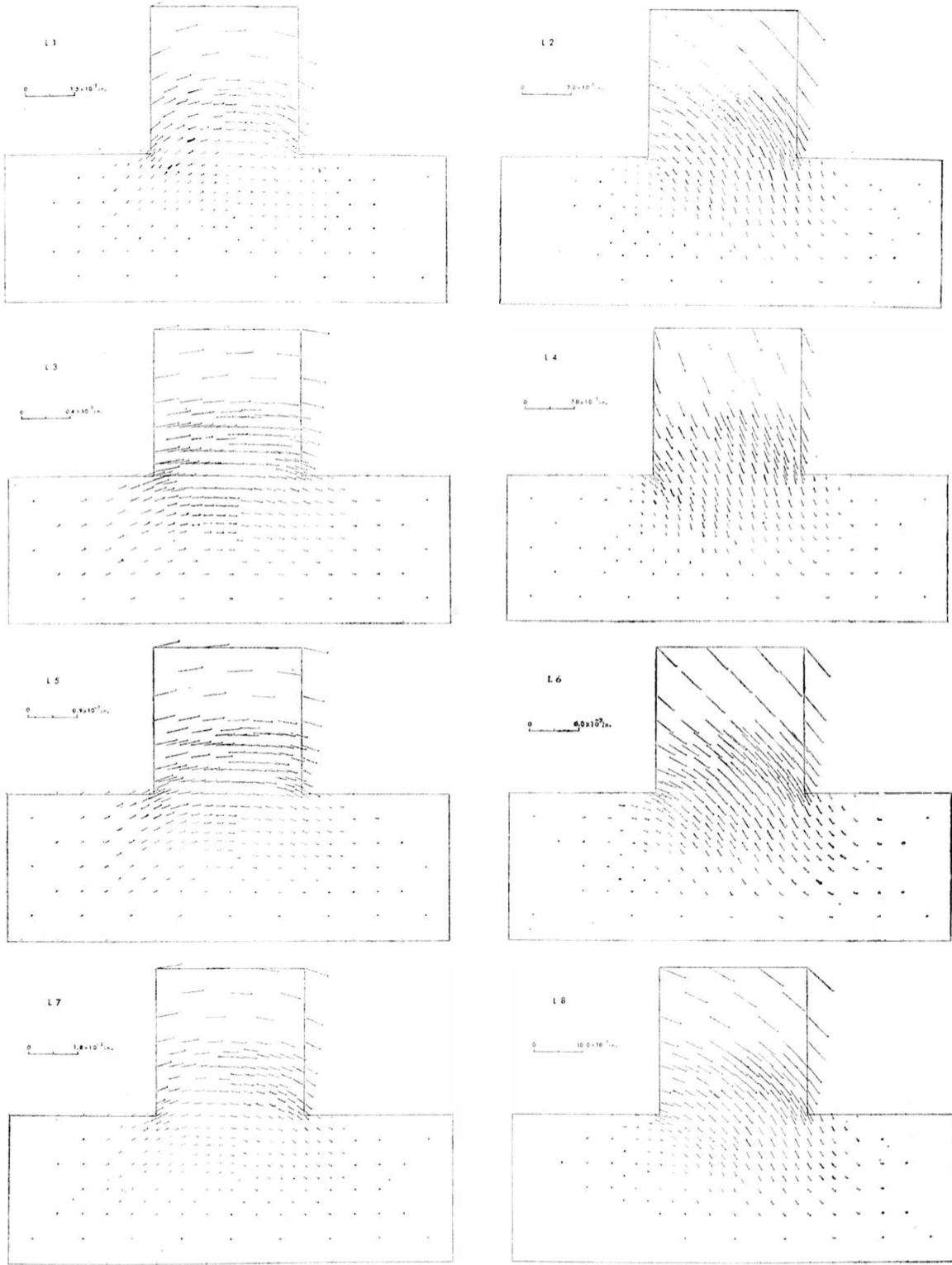
Figure 8: Development of tensile zone in the shear block.

aralıklarla kenar yerdeğişimleri uygulanmıştır. D1 üzerindeki her ardışık noktada 'kayma' şeklinde (makaslama yenilmesi) oluşturulan kenar yerdeğişimi değeri saptanmıştır. İkinci dizide ise, D1 üzerindeki herhangi bir noktadaki en küçük yatay yerdeğişim değeri, o noktada makaslama yenilmesi oluşturacak belirli kritik bir değere ($U_y = 1.0 \times 10^{-4}$ in.) ulaştığında; o nokta için başlangıçta tanımlanmış olan dayanım parametrelerinin değişmez tepe değerleri yerine 'artık' değerleri verilmiş, yenilmenin henüz oluşmadığı diğer noktalarda ise, başlangıçta tanımlanan değerler olduğu gibi korunmuştur. Her ardışık noktada makaslama yenilmesi oluşturmak için gerekli olan kenar yerdeğişim değeri saptanmıştır. Bu deney dizisinde elde edilen sonuçlar da yine şekil 16'da özetlenmiştir. Bu iki dizi bilgisayar deneylerinden elde edilen sonuçlara göre öngörülen makaslama dayanımı yenilme zarfları, SS ve CF nin temel değerlerine göre çizilen 'doğal' tepe ve artık dayanım yenilme zarfları ile birlikte şekil 17'de gösterilmiştir.



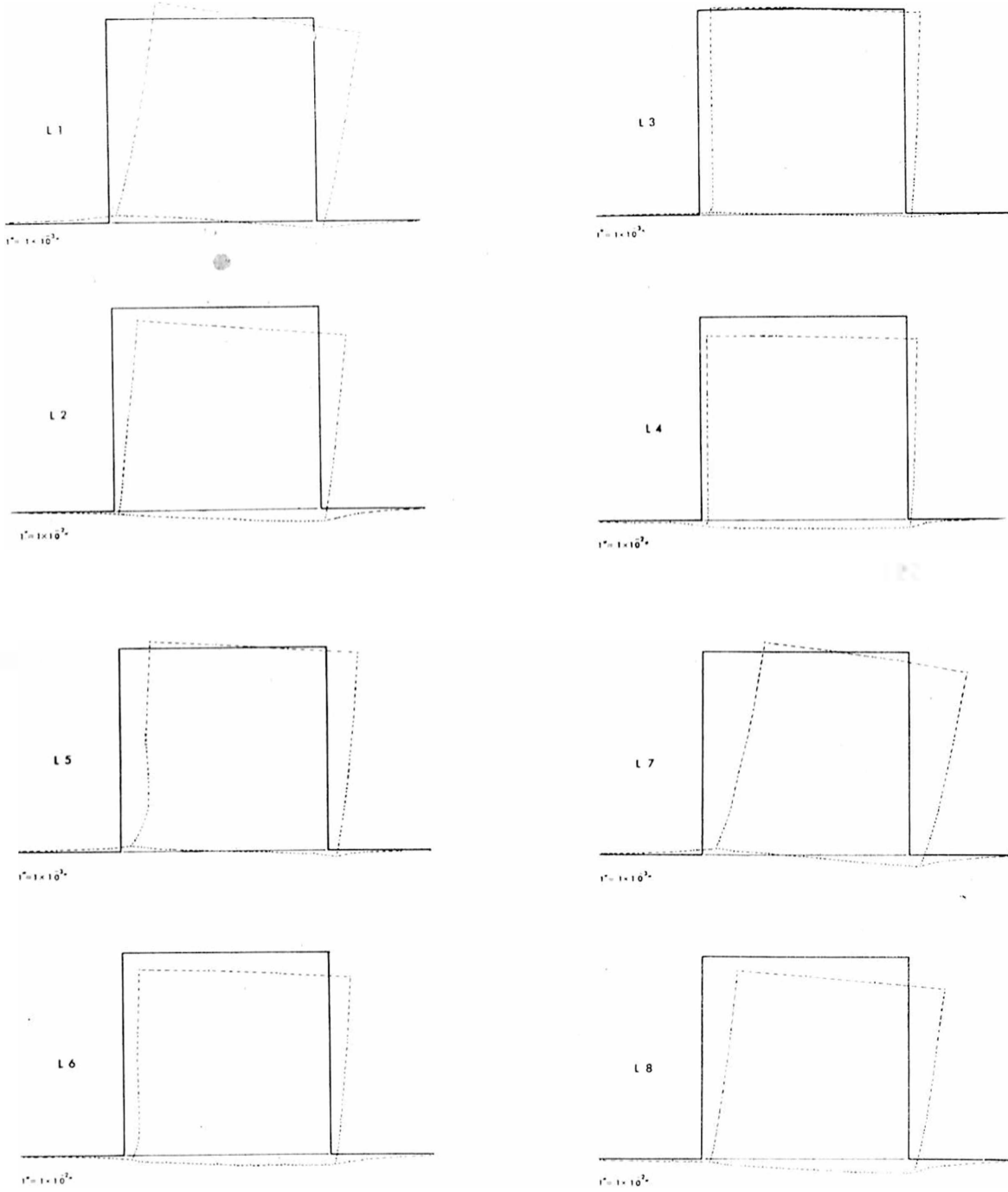
Şekil 9: Makaslama bloku tabanı çevresindeki enbüyük makaslama gerilimi eğrileri.

Figure 9: Contours of maximum shear stresses in the neighborhood of the base of the shear block.



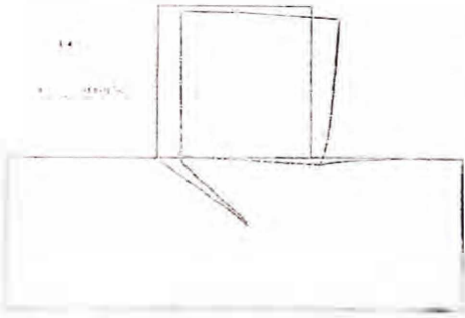
Şekil 10: Yenilmeden hemen önce, makaslama bloku içindeki yerdeğişim alanı.

Figure 10: Displacement field in the shear block at incipient yield.



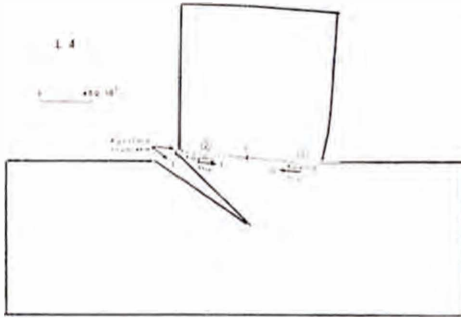
Şekil 11: Yenilmeden hemen önce, makaslama blokundaki dış deformasyon.

Figure 11: External distortion of the shear block at incipient yield.



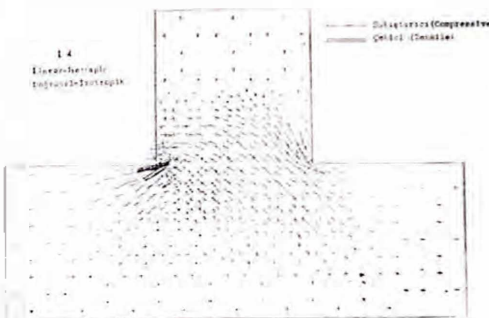
Şekil 12: Makaslama bloğunun D3 süreksizliği boyunca tamamen ayrılmış hali; ve o andaki dış deformasyonu.

Figure 12: Complete opening of D3 and external distortion of the shear block.



Şekil 13: Makaslama bloku yenilmesinin üç ardışık evresi (Oklar, kırık ilerleme yönünü göstermektedir; I, 'ileri yenilme' yi; G, 'geri yenilme' yi belirtmektedir. C, ileri ve geri yenilme kırıklarının birleştiği noktadır. 1, 2, 3 arasında, yenilmenin birinci, ikinci ve üçüncü evrelerini belirtmektedir).

Figure 13: Three consecutive stages of the shear block failure (Arrows, refer to direction of fracture propagation; I, implies 'progressive failure'; G, implies 'retrogressive failure'; C, is the point where progressive and retrogressive failure surfaces meet; 1, 2, 3 refer to the first, second and third stages of failure, respectively).



Şekil 14: Yenilmeden hemen önce, makaslama bloku içindeki asal gerilmelerin dağılımı.

Figure 14: Distribution of the principal stresses in the shear block at the incipient yield.

Bu sonuçlar, SS ve CF nin temel değerleri ile SS' ve CF' nin öngörülen değerleri arasındaki ayrıcalığı; ve TS^R, SS^R ve CF^R nin artık değerlerinin kayacın makaslama dayanımı üzerindeki etkisini açık bir şekilde göstermeleri yönünden ilginçtirler.

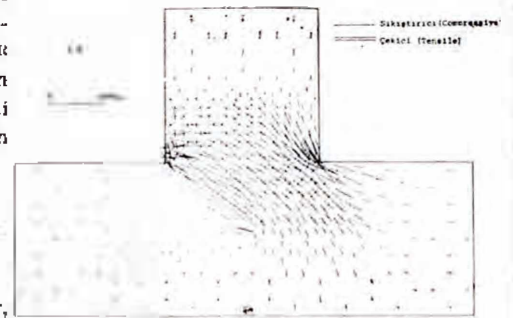
ELASTİK — ELASTOPLASTİK ÇÖZÜMLER

Elastik - elastoplastik çözümler, M2 modeli (Bak şekil 2) üzerinde ve

Çizelge 3: Elastik - Elastoplastik çözümler için kullanılan elastik ve dayanım özellikleri.

Table 3: The elastic and strength properties used for elastic - elastoplastic solutions.

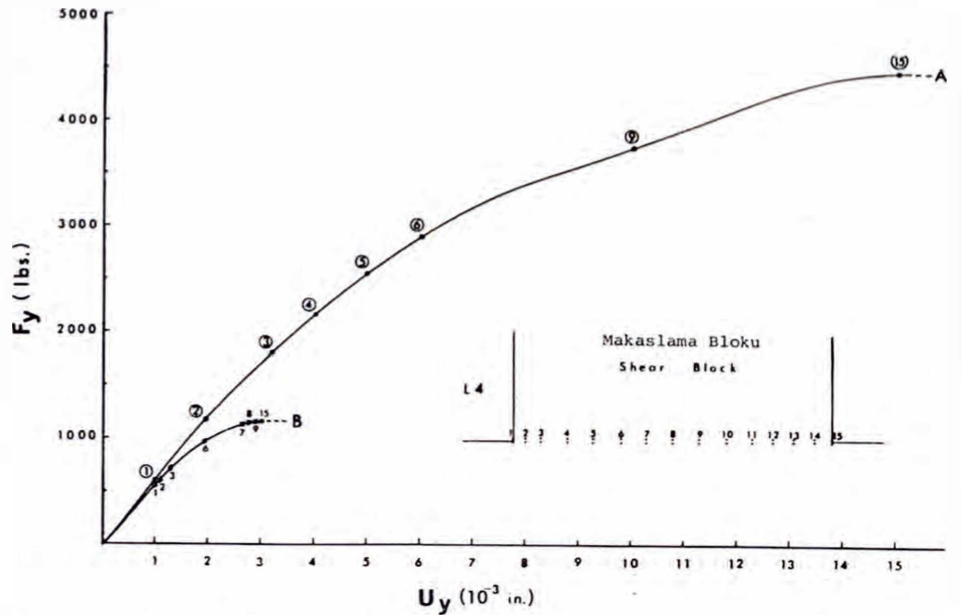
Elastik Özellikler:	Elastik Özellikler:	
	İzotropik Hal	Anizotropik Hal
E ₁	1.1 x 10 ⁶ psi	1.1 x 10 ⁶ psi
E ₂	1.1 x 10 ⁶ psi	0.58 x 10 ⁶ psi
1	0.2	0.2
2	0.2	0.1
G	0.46 x 10 ⁶ psi	0.46 x 10 ⁶ psi
Dayanım Özellikleri		
CS ₁	9 000 psi	10 000 psi
CS ₂	9 000 psi	7 000 psi
TS ₁	300 psi	500 psi
TS ₂	300 psi	200 psi
SS	1 400 psi	1 400 psi



Şekil 15: D3 süreksizliğinin tümüyle açılmasından sonra, makaslama bloku içinde yeniden oluşan asal gerilim dağılımı.

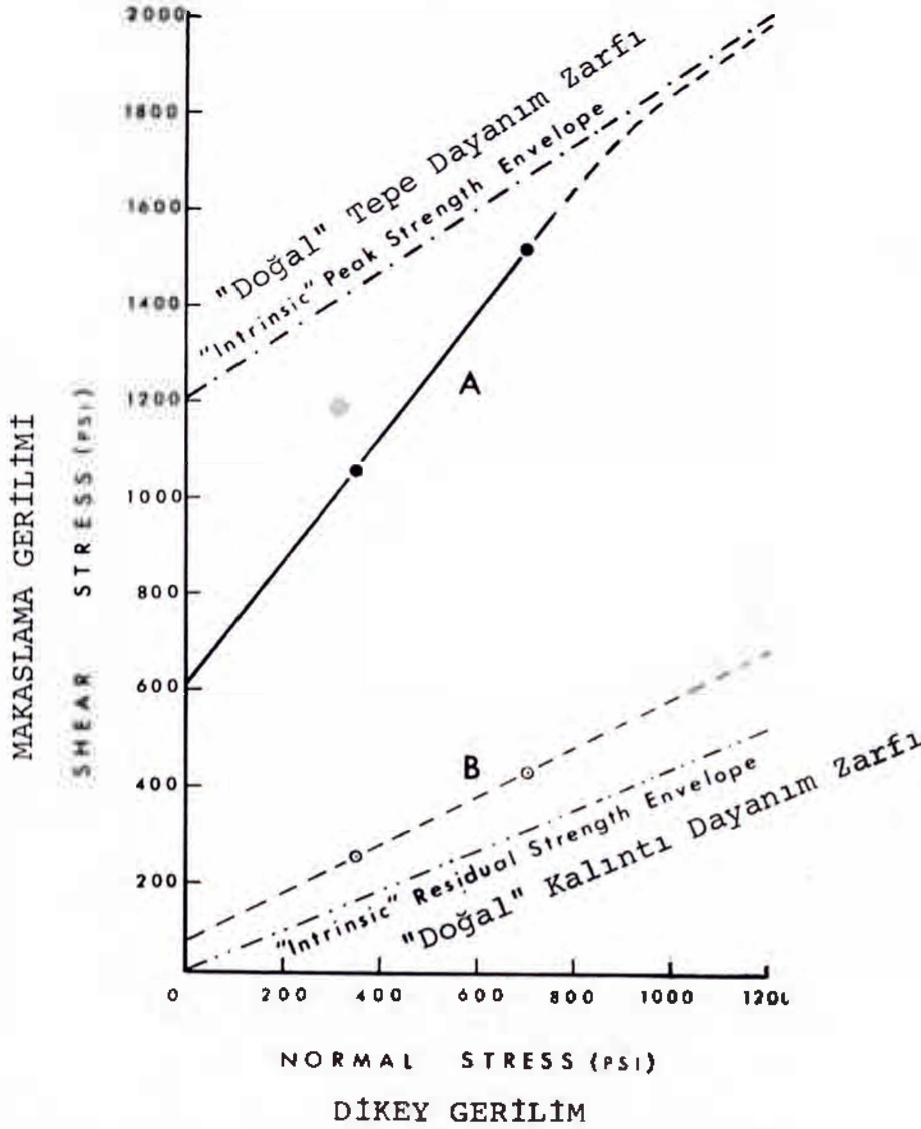
Figure 15: Principal stress distribution in the shear block after complete opening of D3.

salt L2, L3 ve L4 sınır koşulları altında yapılmıştır. Doğrusal (Coulomb) ve eğrisel (Torre) yenilme ölçütleri varsayılarak; deney bloğunun plastik halindeki en büyük ve en küçük asal gerilmelerin blok içindeki dağılımı, bu dağılıma karşıt oluşan plastik yerdeğiştirme alanları, ve ilerleyici yenilme zonları saptanmıştır. Elastik - elastoplastik çözümlerde kullanılan elastik özellikler ve dayanım özellikleri çizelge 3'de verilmiştir.



Şekil 16: İlerleyici yenilmedeki kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri: (A; birinci dizi, B: ikinci dizi bilgisayar deneyleri).

Figure 16: Force-displacement relationships for progressive failure: (A: first series, B: second series of computer experiments).



Sekil 17: 'Doğal' ve 'Doğal' makaslama dayanımı yenilme zarfları.
Figure 17 'Predicted' and 'Intrinsic' shear strength failure envelopes.

Asal Gerilmelerin Dağılımı

Deney blokunun plastik halinde, blok içindeki asal gerilmelerin, çekici veya sıkıştırıcı özellikte olmalarının özellikle, uygulanan sınır koşullarına bağımlı oldukları saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar, izotropik ve doğrusal çözümlerle sonuçları ile karşılaştırıldıklarında, anizotropinin ve kullanılan yenilme fonksiyonunun eğriliğinin, asal gerilmelerin yön ve özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Makaslama blokunun plastik halinde, blok içindeki asal gerilmelerin dağılımı şekil 18'de gösterilmiştir. Çekici özellikteki asal gerilmelerin yer ve yönleri, makaslama blokunun ilk yenilme şekli

üzerinde daha önce yapılan tartışmayı destekleyici niteliktedir.

Yerdeğişim Alanları

Benzer sınır koşulları için, ne kullanılan yenilme fonksiyonunun eğriliğinin, ne de varsayılan anizotropinin, blok içindeki yerdeğişimlerin özellikleri üzerinde önemli bir etkisi görülmemiştir. Sınır koşulları arasındaki ayrıcalık, özellikle yerdeğişim vektörlerinin eğimlerinde belirlidir (şekil 19).

Plastik Zonların Gelişimi

Makaslama bloku modeli içinde oluşan plastik üçgen elemanlar zonu

ri, büyük ölçüde, çekici gerilmelerin gelişimi ile ilgili gözükmemektedir. Büyük sıkıştırıcı gerilmelerin olduğu bölgelerde, plastik elemanlar zonu çok az gelişmiştir. Plastik elemanlar zonu başlangıç noktası ve ilerleme yönü, çekici yenilmenin başlangıç noktası ve ilerleme yönü ile ilginç bir uyum göstermektedir. Makaslama blokuna uygulanan kenar yerdeğişimleri artırıldığında, plastik zon da makaslama bloku tabanı boyunca ilerlemektedir (şekil 20). L4 sınır koşulu altında, makaslama blokunun üst kenarı boyunca gelişen plastik zon, o bölgede gelişen çekici gerilmelerin bir sonucu olarak yorumlanabilir. Söz konusu çekici gerilmeler, makaslama blokunun, kenar yerdeğişimlerinin uygulandığı, sol kenarına dik olarak gelişmektedirler. Oysa böyle bir durum, fiziksel olarak olanaksızdır; ve gerçek deney koşulları altında, blok içinde bu tür bir yenilme olasılığı çok zayıftır.

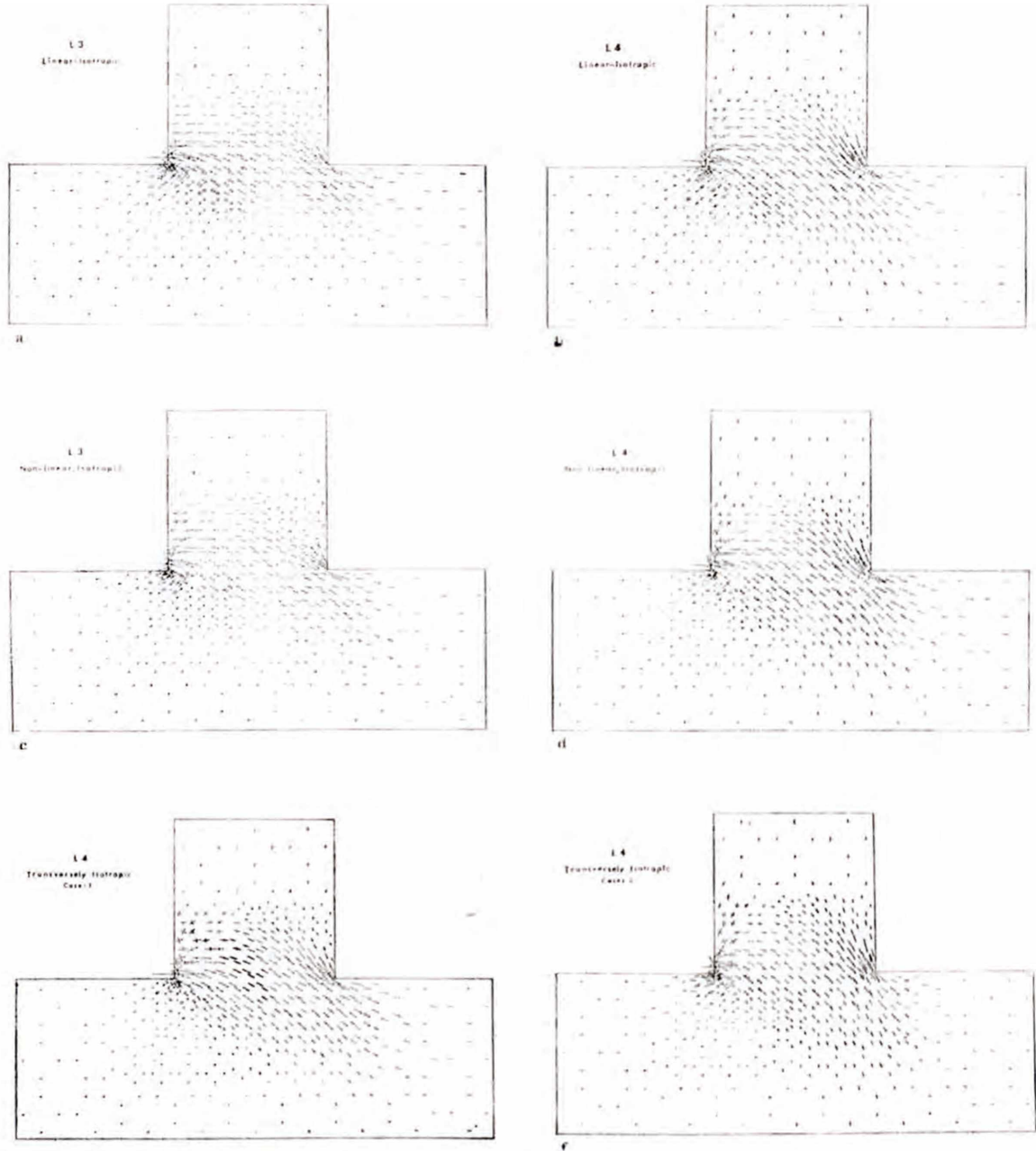
DENEYSEL ÇÖZÜMLEME

Deney Örnekleri

Deneyel çözümlerinde de, teorik çözümlerle bölümlenmiş açıklanan nedenden ötürü, yine tek bir kayaç tipi (Berea kumtaşı) kullanılmıştır. Toplam 135 kumtaşı örneği üzerinde doğrudan makaslama deneyleri yapılmıştır. Deney örneklerinin hepsi, birbirine paralel katmanlaşma düzlemleri içermiştir. Bu katmanlaşma düzlemlerinin, kayaç blokunun deformasyon ve yenilme mekanizması üzerindeki etkilerinin saptanabilmesi amacıyla; kayaç örneklerinin bazıları, katmanlaşma düzlemleri makaslama bloku tabanına paralel; diğerleri ise, blok tabanına dik olacak şekilde hazırlanmıştır (levha I, şekil 1 a, b). Tüm kayaç örnekleri, denemeden önce otuz gün süre ile, oda sıcaklığında, kuruma bırakılmışlardır. Kayaç örneklerinin fiziksel özellikleri çizelge 2'de özetlenmiştir.

Deney Aleti

Deneyel çözümlerinde, Birleşik Devletler Maden Bürosu, Pittsburgh Madencilik ve Emniyet Araştırma Merkezi, Malzeme Laboratuvarı (U.S. Bureau of Mines, Pittsburgh Mining and Safety Research Center, Materials Laboratory) nda bulunan, ve levha I, şekil 2'de fotoğrafı görülen, büyük ölçekli doğrudan makaslama makinası kullanılmıştır. Bu



Sekil 18: Makaslama blokunun plastik halindeki asal gerilim dağılımı.

Figure 18: Distribution of principal stresses in the plastic stage of the shear block.

makinanın makaslama kutusu, bu araştırmada kullanılan kayaç örneklerinin geometrisi ve boyutlarına uyacak şekilde değiştirilmiştir. Söz konusu değişiklik için gerekli olan parçalar, Pennsylvania State Üniversitesi, Yer ve Mineral Bilimleri Koleji, Makina Atölyesi (Pennsylvania State University, College of Earth and Mineral Sciences, Machine Shop) nde yapılmıştır (levha I, şekil 3 a, b).

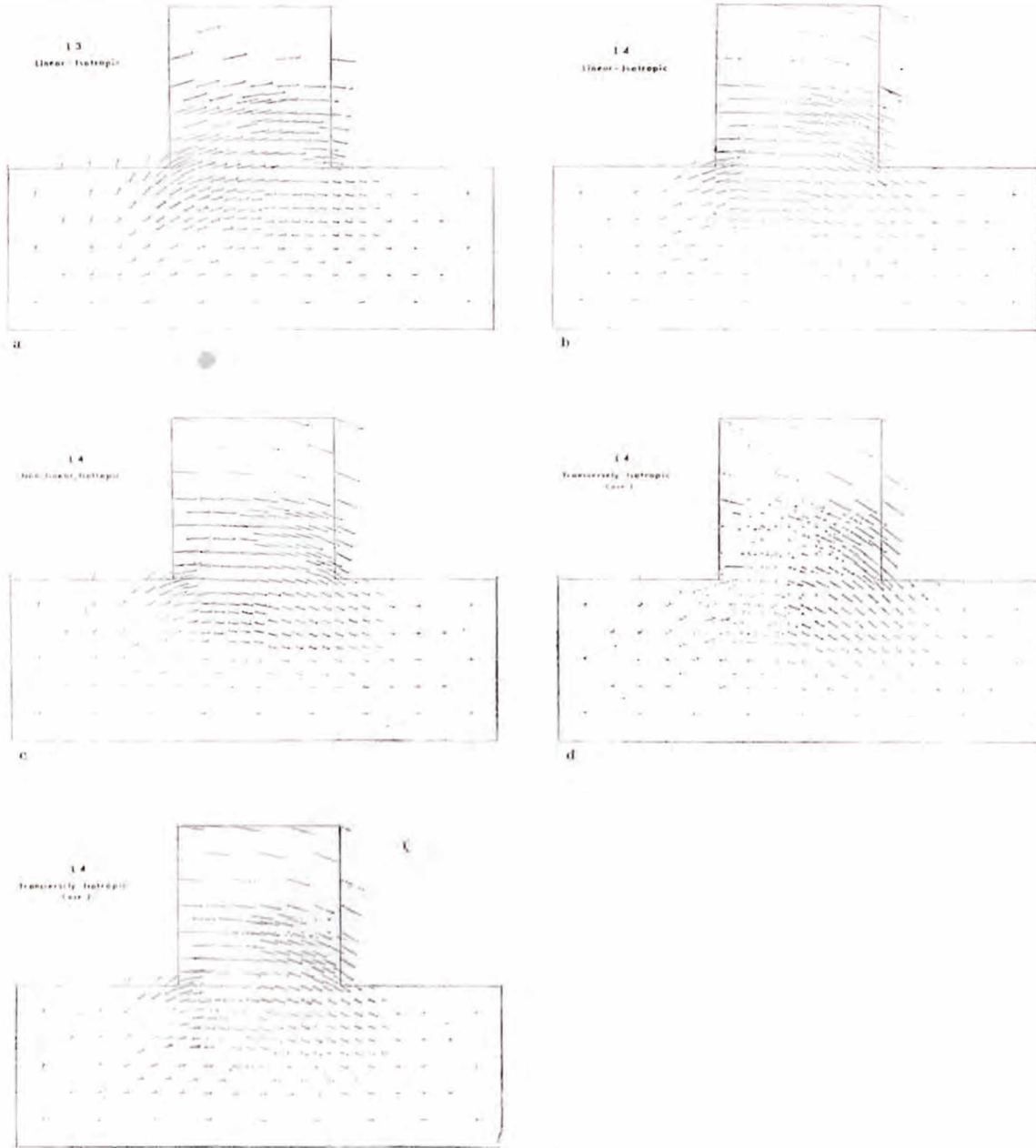
Değişiklik yapılan makaslama kutusunun bir yanının orta bölümünde, deneyler sırasında, kayaç blokunda oluşan deformasyon ve yenilmeyi doğrudan izleyebilmek ve fotoğraf çekebilmek amacıyla ile, 2in. x 3in. boyutlarında bir pencere açılmış; bu pencerenin alt ve üst yarısına 1in. kalınlığında plexiglass yerleştirilmiştir.

Bu araştırmada öngörülen değişik yük uygulama şekilleri için gerekli olan

diğer ek parçalar (levha II, şekil 1) ise, yazar tarafından dizayn edilmiştir ve kullanılmıştır (Kasapoğlu, 1973).

Yükleme Şekilleri

Teorik çözümlerlerdeki bilgisayar modeline uygulanan sınır koşullarına paralel olarak, deneysel çözümlerinde kullanılan kayaç örnekleri üzerine levha II, şekil 2 a, b ve levha II, şekil 3



Şekil 19: Makaslama bloku içindeki plastik yerdeğişim alanı.

Figure 19: Plastic displacement field in the shear block.

a, b'de gösterilen yükleme şekilleri uygulanmıştır.

DENEY SÜRECİ

Makaslama Dayanımı Deneyleri

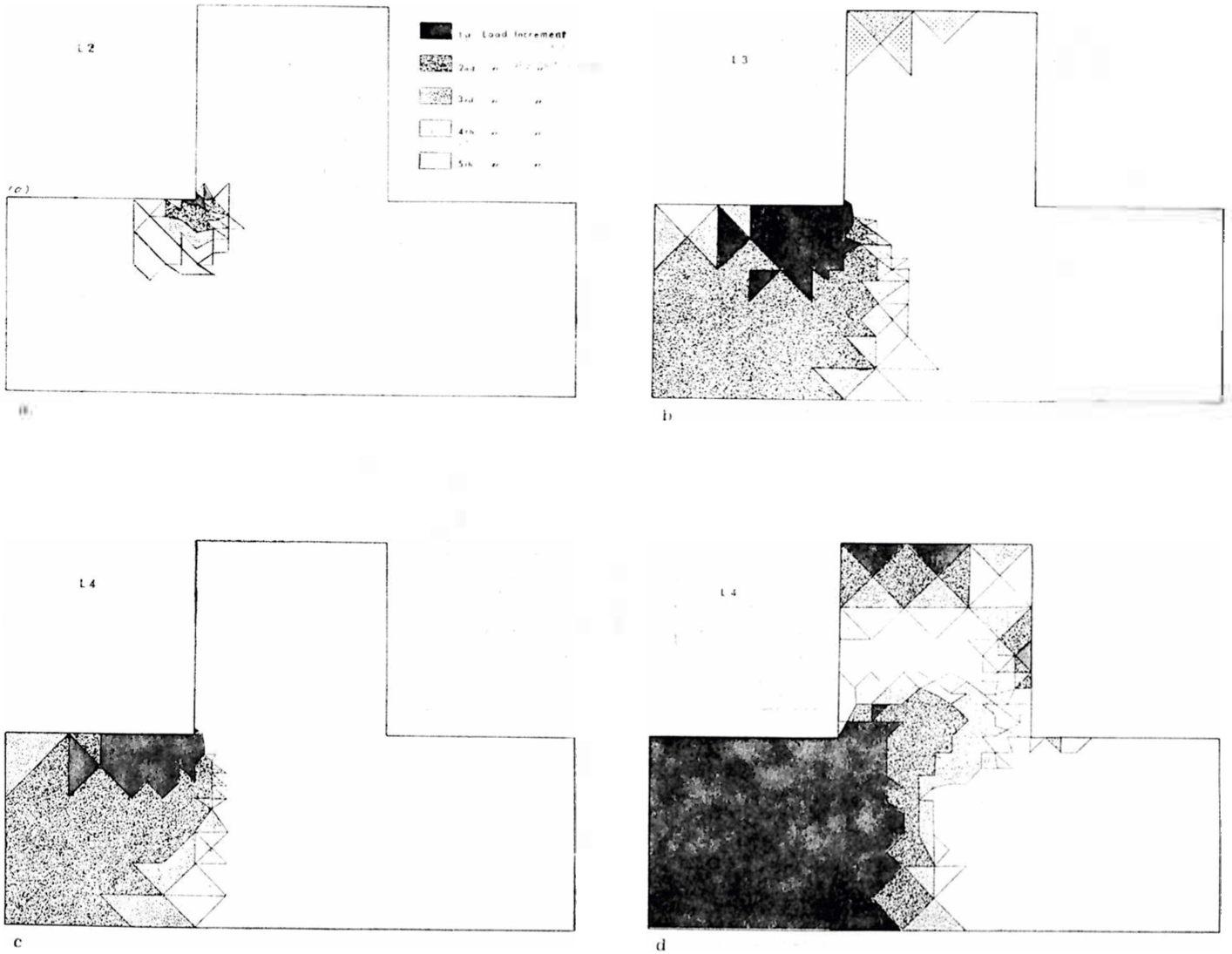
Bu çalışmada öngörülen bir dizi doğru- dan makaslama deneyinde kayaç örnek- ler üzerine değişik dikey yükler (N) uygulanmış; her dikey yük altında, kayaç

blokunda yenilmeyi oluşturan en büyük makaslama kuvveti (T), ve uygulanan makaslama kuvvet yönünde oluşan yatay yerdeğişimler (U_y) saptanmıştır.

Değişmez dikey yük altında, ma- kaslama-kutusu ile yükleme halinde el- de edilen tipik bir makaslama kuvveti- yatay yerdeğişim eğrisi, levha II, şekil 3 a, b'de gösterilmiştir. Bu kuvvet- yer- değişim eğrisinin tepe değeri (T_p), ka- yacın en büyük makaslama direncini

belirler (tepe makaslama dayanımı, τ_p). Blok içindeki yerdeğişimler sürekli ola- rak arttığında, makaslama dayanımı azalır ve 'kalıntı makaslama direnci' olarak tanımlanan, hemen hemen yatay asimtotik bir değere ulaşır. Bu 'kalıntı' değer, gerçekte, kayaç içinde oluşan en büyük yerdeğişim değerine bağlıdır.

Aynı deney dizisi, değişik dikey yükler altında tekrarlandığında, elde edilen sonuçlar, 'ortalama makaslama



Sekil 20: Değişik sınır koşulları altında, makaslama bloku içindeki plastik yenilme zonlarının ilerleyişi.

Figure 20: Progression of plastic yield zones in the shear block for various boundary conditions.

gerilim-ortalama dikey gerilim' doğrusu üzerinde gösterilmiştir. Değişik dikey yükler altındaki, iki makaslama direnci değeri (tepe ve kalıntı dayanımlar) şekil 21'de gösterilmiştir.

Kayma Direnci Deneyleri

Doğal kırılma yüzeyleri, testere ile kesilmiş yüzeyler, ve parlatılmış yüzeyler üzerinde olmak üzere üç tür kayma direnci deneyi yapılmıştır.

Doğal kırılma yüzeyleri üzerindeki kayma direnci deneyleri, gerçekte, makaslama dayanımı deneylerinin devamıdır. Kayacın yenilmesinden sonra da, yatay yük uygulanmasına devam edil-

miş; ve kayacın, son derece pürüzlü ve engebeli olan doğal kırılma yüzeyi boyunca gösterdiği kayma direnci ölçülmüştür.

İkinci tür kayma direnci deneylerinde, makaslama bloku, tabanından elmas bıçaklı testere ile kesilmiş, ve üst blok alt blok üzerinde, bu kesilme yüzeyi boyunca kaydırılmıştır (levha III, şekil 1 a, b).

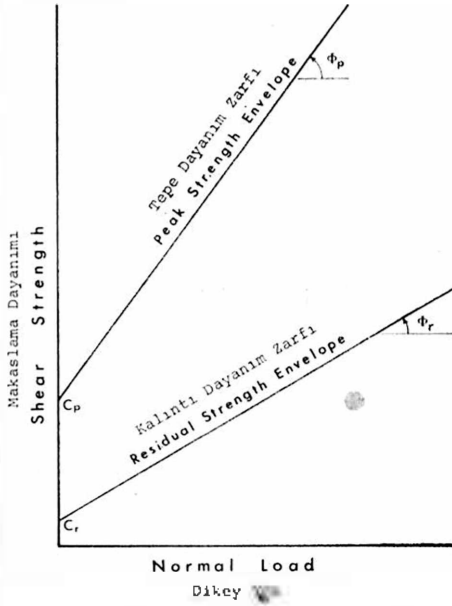
Üçüncü tür deneylerde ise, testere ile kesilmiş yüzeyler, karborundum taşı ve emery tozu ile düzlenmiş ve parlatılmıştır (levha III, şekil 2 a, b).

Bu hazırlanmış yüzeyler üzerinde yapılan kayma direnci deneylerinden el-

de edilen veriler, kayacın temel sürtünme özelliklerini; ve sürtünme yüzeylerindeki pürüzlülüğün, kayma direncine olan etkisini açıklayıcı niteliktedirler.

Kayma direnci deneyleri, makaslama dayanımı deneylerinde kullanılan alet ile yapılmıştır.

Kayma yüzeylerinin alanı, 3 in. x 1 in. = 3 in. ² olup; her deney, kayma düzlemi boyunca en az 1 in. lik bir yatay yerdeğişim oluncaya dek sürdürülmüştür. Kayma direnci deneyleri, değişik dikey yükler altında tekrarlanmış; uygulanan her dikey yüke karşılık, kaymayı oluşturan yatay makaslama gerilimi değeri saptanmıştır.



Şekil 21: Makaslama dayanımı zarfları.

Figure 21: Shear strength envelopes.

Makaslama Kuvveti - Yerdeğişim İlişkisi

Makaslama-kutusu ile yükleme koşulu altında denenen iki tür kayaç blokuna ilişkin, tipik bir makaslama kuvveti-yerdeğişim eğrisi, şekil 22'de gösterilmiştir.

Yatay-tabakalı örneklerde, son yenilme, yaklaşık olarak 0.09 - 0.15 in. lık bir yatay yerdeğişim sonunda oluşmaktadır. Düşey-tabakalı bloklarda ise, son yenilmenin oluşması için, genellikle, daha fazla bir yerdeğişim (0.20 in.) gerekmektedir. Diğer bir deyişle, son yenilmenin oluşması için gerekli yatay yerdeğişim değeri, yatay ve düşey-katmanlı kayaç blokları için aynı değildir.

Makaslama kuvveti ile ortalama düşey yerdeğişim arasındaki ilişki de yine şekil 22'de gösterilmiştir. Düşey yerdeğişimler, blok üst yüzeyinin salt orta noktasında ölçüldüğünden, makaslama blokundaki 'dönme' şekil 22'deki eğride yansımamıştır. Ancak, makaslama yüklemesi sırasında deney blokundaki genel yükselme, şekil 22'de açıkça görülebilmektedir.

Deney sonuçlarına göre, değişik yükleme şekilleri ve uygulanan değişik

dikey yük değerleri, makaslama kuvveti-yerdeğişim ilişkisini, her iki tür kayaç blokunda da, etkilememiştir. Son yenilmeyi oluşturan ortalama yatay yerdeğişim değeri, her iki tür kayaç bloku için de hemen hemen aynıdır (şekil 23).

Bu durum, yerdeğişim ölçütünün, laboratuvar veya 'yerinde' makaslama bloku yenilme koşullarını saptamakta, geçerli bir ölçüt olabilme olasılığını ortaya koymaktadır.

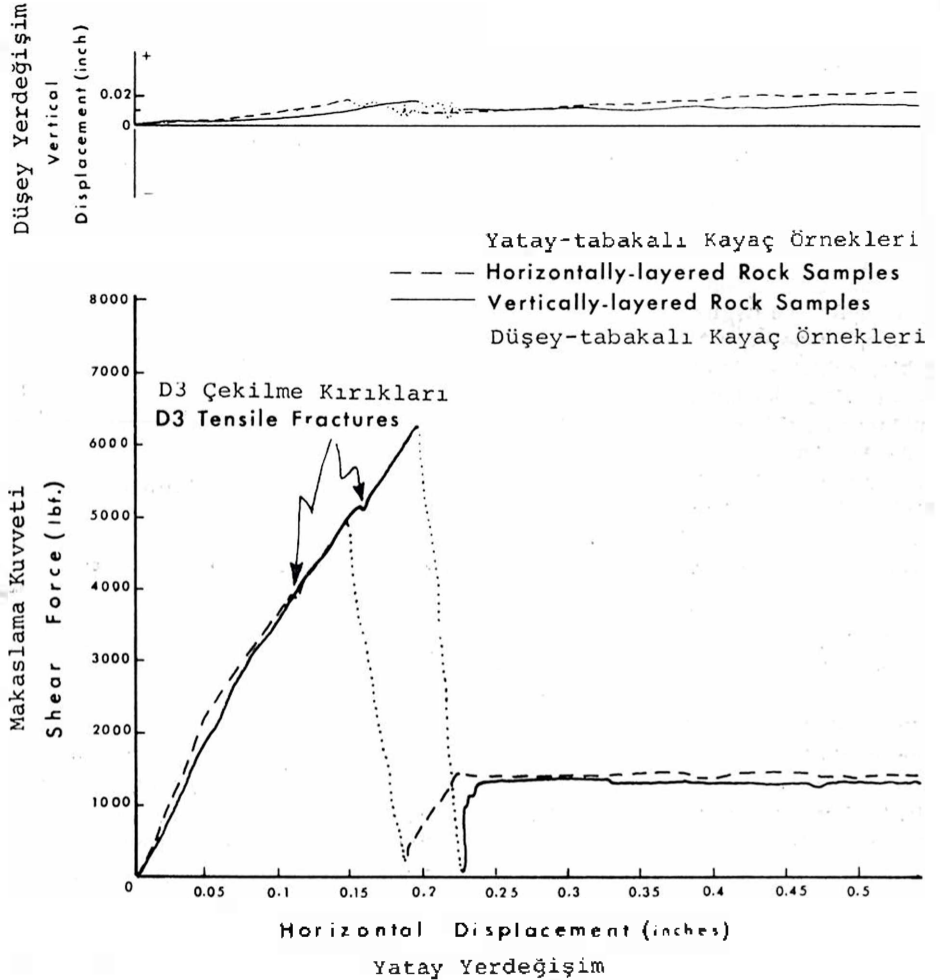
Teorik model çözümlerinde, D3 süreksizliği boyunca olduğu öngörülen ilk çekiç kırılmanın, doğrudan makaslama deneylerinde, makaslama-kutusu ile yükleme koşulu ve tüm dikey yükler altında, her iki tür kayaç blokunda ay-

nen oluşması ilginçtir. Son makaslama yenilmesinden hemen önce, D3 süreksizliği boyunca oluşan çekiç kırılmalar, şekil 22'deki kuvvet-yerdeğişim eğrisi üzerinde, uygulanan makaslama kuvvetindeki değışmeler (zig-zag'lar) şeklindeki kendini belli etmektedir.

Yenilme Zarfları

Değişik sınır koşulları altında elde edilen makaslama kesimi(1) değerlerinin güvenilirliğini araştırmak amacı ile yapılan doğrudan makaslama deneylerinin sonuçları şekil 24 ve 25'de özetlenmiştir.

Teorik olarak, bir kayaçın makaslama kesimi değerinin, o kayaçın sıfır



Şekil 22: Tipik makaslama kuvveti-yerdeğişim eğrileri.

Figure 22: Typical shear force-displacement curves.

(1) Bir kayaçın dayanım zarfını belirlemek için, iç sürtünme açısının yanısıra kullanılan diğer bir parametre de, kayaçın 'doğal makaslama dayanımı' veya 'kohezyon'udur. Bu, basit anlamı ile, dayanım zarfının makaslama dayanımı eksenini kestiği noktanın, orijin noktasına olan uzaklığıdır. Burada, 'makaslama kesimi' terimi bu anlamda kullanılmıştır.

düsey yük altındaki makaslama dayanımına eşit olması gerekir. Oysa, 'Berea' kumtaşı örnekleri üzerinde, sıfır düsey yük altında yapılan doğrudan makaslama deneylerinden elde edilen makaslama dayanımı değerlerinin; aynı kayacın, daha büyük düsey yükler altındaki makaslama dayanımlarının, doğrusal extrapolasyonu ile elde edilen makaslama kesimi değerlerinden çok daha küçük oldukları görülmüştür.

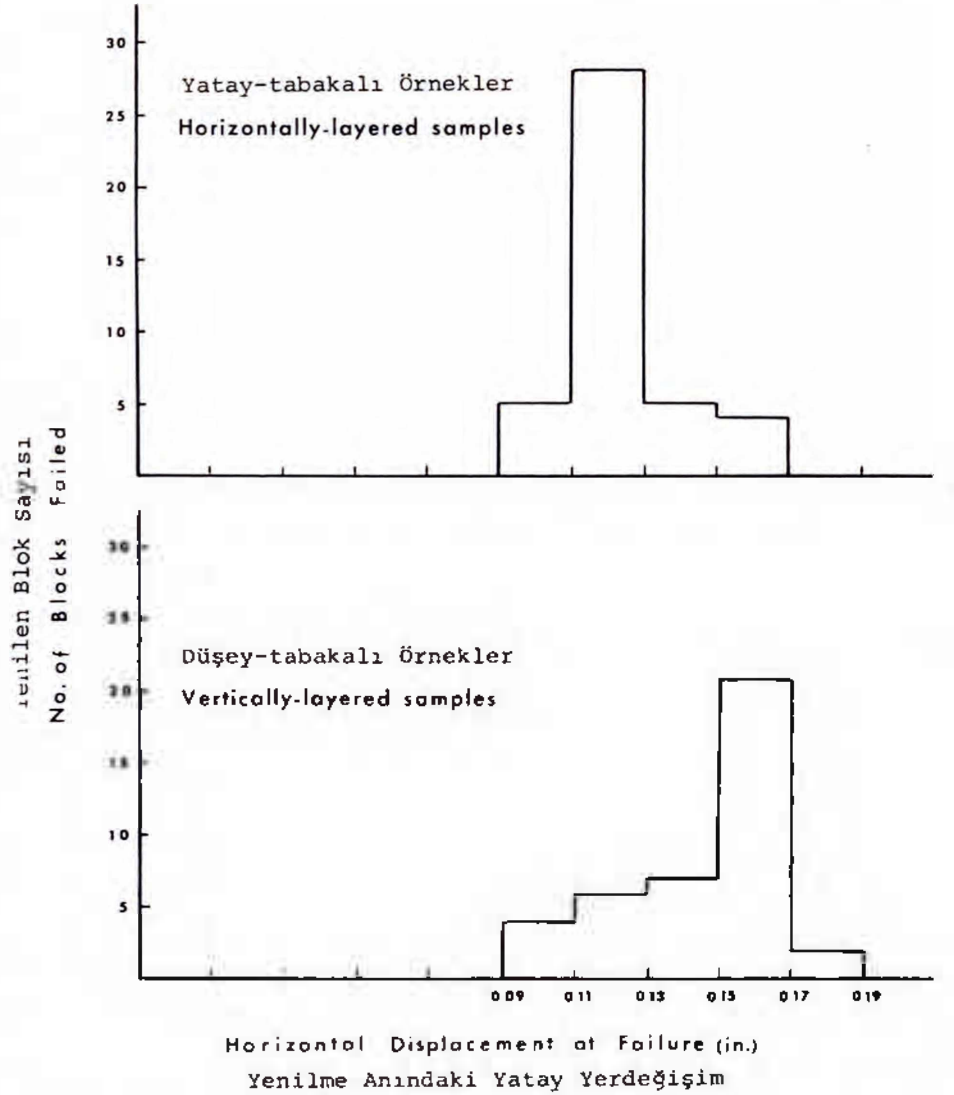
Yüksek düsey gerilimler için özellikle daha uygun gözükken 'doğrusal' yenilme zarfları, tek bir makaslama yenilme şeklinin işareti olarak yorumlanabilirler. Düşük düsey gerilimler için daha uygun olan 'parabolik' yenilme zarfları ise, birden fazla yenilme şekline işaret ederler.

Doğrusal yenilme zarflarının makaslama kesimleri ile parabolik yenilme zarflarının makaslama kesimleri arasındaki ayrıcalık, sözkonusu kayacın makaslama ve çekilme dayanımları arasındaki ayrıcalık kadar önemlidir.

Doğrusal yenilme zarfları, uygulayıcı mühendislere, sözkonusu kayacın, sıfır düsey yük altında, yeterli makaslama dayanımına sahip olduğu izlenimini verebilir; ve uygulayıcının amacı açısından, bu değer yeterli olabilir. Gerçekte, çekici kırılmalar önlenerek, kayacın salt makaslama yenilmesi oluşturulduğunda, elde edilen değer, doğru bir değerdir. Ancak, gerçek yenilme mekanizmasının anlaşılabilmesi yönünden, birden fazla yenilme şeklini yansıtan 'parabolik' (eğri) yenilme zarfları daha uygun gözükmemektedir.

İç sürtünme açısı (ϕ) ve makaslama kesimi (C) nin ortalama değerleri ile, sıfır düsey yük altında ölçülen makaslama dayanımı (C') değeri, 'en küçük kareler' yöntemi ile hesaplanmış; ve her iki tip kayacın örneği için elde edilen yenilme zarfları şekil 26'da gösterilmiştir. Sözkonusu yenilme zarfları ile ϕ , C, C' değerleri karşılaştırıldığında görülen ayrıcalık, 'Berea' kumtaşının dayanım anizotropisini yansıtmaktadır. Düsey-katmanlı örnekler için elde edilen C ve C' değerleri, yatay-katmanlı örnekler için elde edilen aynı değerlerden daha büyüktürler. Düsey-katmanlı örnekler için elde edilen iç sürtünme açısı değeri ise, yatay-katmanlı örnek değerinden çok az büyüktür (Bak Çizelge 4).

Şekil 24 ve 25'de sunulan deneysel verilere göre, uygulanan yükleme koşulları ile bu koşullar altında elde edilen



Şekil 23: Son yenilme anındaki ortalama yerdeğişim ile yenilen blok sayısını arasındaki ilişki.

Figure 23: Relationship between average horizontal displacement at ultimate failure and the number of blocks failed.

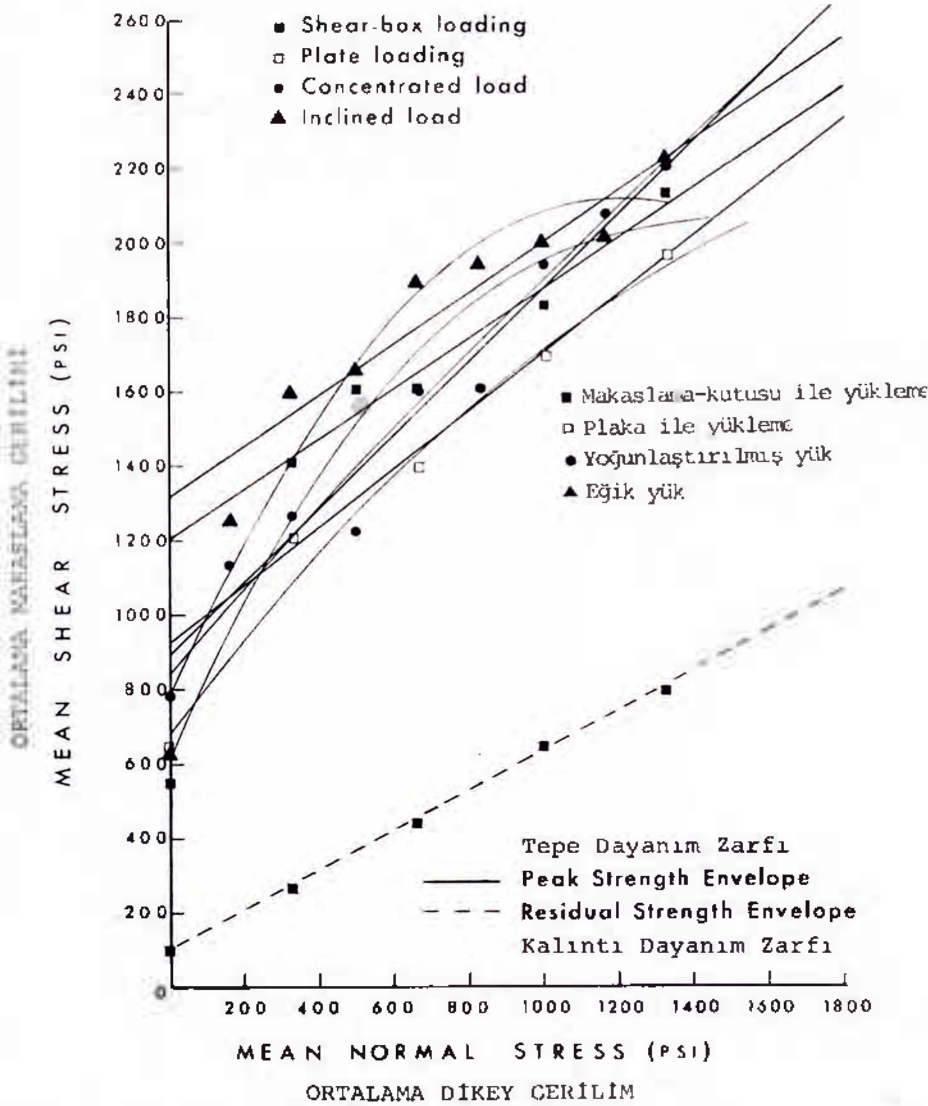
makaslama kesimi değerleri arasında belirli bir ilişki vardır. Makaslama-kutusu ile yüklemeye elde edilen değerler, diğer yükleme koşulları altında elde edilen değerlerden daha büyüktürler. Eğik yükleme koşulu, genellikle, yatay-katmanlı örneklerde en büyük; düsey-katmanlı örneklerde ise, en küçük makaslama kesimi değerini vermektedir.

Kalıntı Makaslama Dayanımı

Kalıntı makaslama dayanımı, büyük yerdeğişimlerden ve yenilmeden sonra, kayacın içinde kalan makaslama direncidir. Bir kayacın kalıntı makaslama da-

yanımını ve kalıntı yenilme zarfını elde etmek için, kayacın örneğinin nasıl hazırlanması gerektiği sorunu, henüz çözülmemiş bir sorundur. Bazı araştırmacılar, kalıntı yenilme zarfını, makaslama dayanımı hemen hemen değişmez bir değere ulaşıncaya dek sürdürülen doğrudan-makaslama deneylerinden elde etmektedirler (Henkel et al, 1964). Diğer bazı araştırmacılar ise, testere ile kesilmiş pürüzlü yüzeyler veya parlatılmış yüzeyler kullanmaktadırlar (Skempton, 1964).

Burada sunulan araştırmada, kalıntı makaslama dayanımlarının elde edilmesinde, yukarıda belirtilen üç ayrı yön-



Şekil 24: Yatay-katmanlı Berea kumtaşı örnekleri için yenilme zarfları.

Figure 24: Failure envelopes for the horizontally-layered Berea sandstone samples.

Çizelge 4: Deneysel çözümlenme dayanım sonuçlarının özeti.

Table 4: Summary of the strength results of experimental analysis.

Tip	Yatay Katmanlı Kayaç Blokları		Düsey-Katmanlı Kayaç Blokları	
	C	φ	C	φ
Tepe	1085 psi	37° 5'	1325 psi	38° 5'
Kalıntı	100 psi	28°	160 psi	29°
Testere-				
Kesiml	10 psi	23°	15 psi	27°
Parlatılmış	50a psi	21°	50 psi	22°

(a) "En küçük kareler" yöntemi ile saptanmıştır.

temin her biri, ayrı ayrı kullanılmış; ve sonuçlar şekil 24 ve 25'de özetlenmiştir.

Tepe makaslama dayanımı zarfının makaslama kesimine karşın, kalıntı dayanım zarfının makaslama kesimi, sıfır düsey yük altında elde edilen kalıcı makaslama dayanımı değerleri ile uyumludur. Bu, yenilme şeklinin, tümüyle makaslama yenilmesi şeklinde olduğuna işaret eder. Bu nedenle, kalıntı makaslama kesimi değerleri, bir kayacın kalıntı makaslama dayanımını saptamakta, daha güvenilir değerler olarak kabul edilebilir.

Kayma Direnci

Testere ile kesilmiş, ve parlatılmış yüzeyler üzerinde yapılan kayma direnci deneylerinden elde edilen sonuçlar, doğal kırılma yüzeyleri üzerinde elde edilen sonuçlar ile birlikte şekil 27'de gösterilmiştir.

Yatay-katmanlı örnekler için, kalıntı sürtünme açısı, beklendiği gibi, testere-kesimi ve parlatılmış yüzeyler üzerinde elde edilen kayma sürtünme açısından daha büyük çıkmıştır. Parlatılmış yüzeyler üzerinde elde edilen kayma sürtünme açısı ise, testere-kesimi yüzeyler üzerinde elde edilen aynı değerden çok az küçüktür. Düsey-katmanlı örnekler için de benzer ilişkiler elde edilmiştir. Ancak, testere-kesimi yüzeyler için elde edilen kayma sürtünme açısı, parlatılmış yüzeyler için elde edilen değerden çok daha büyüktür. Sürtünme açısı değerlerinde görülen tüm bu değişimler, doğrudan doğruya, kayma yüzeylerinin özellikleri ile ilgilidirler. Genel olarak, özellikle büyük düsey yükler altında, doğal kırılma yüzeyleri, hazırlanmış yüzeylere oranla daha pürüzlüdürler. Doğal kırılma yüzeylerinin pürüzlülük derecesi, yenilme şekline göre değişmekle beraber; yatay-katmanlı kayaç örneklerinde yenilme, çoğunlukla katmanlaşma yüzeyleri boyunca olduğundan, yatay-katmanlı örneklerde elde edilen doğal kırılma yüzeyleri, düsey-katmanlı örneklerden elde edilen yüzeylere oranla daha az pürüzlüdürler (levha IV, şekil 1, 2).

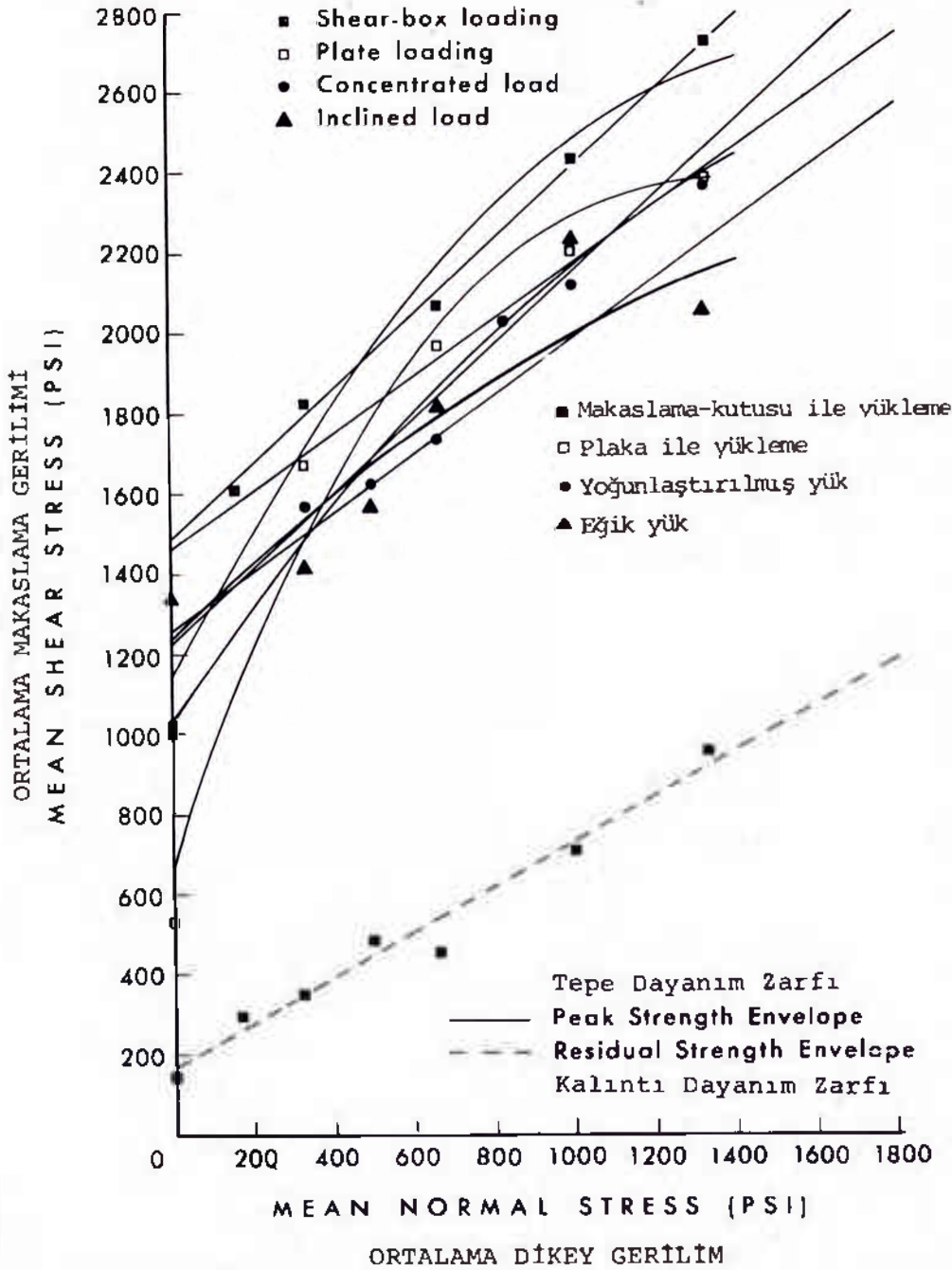
YENİLME ŞEKİLLERİ

'Berea' kumtaşı örnekleri üzerinde yapılan doğrudan-makaslama deneyleri sırasında, kayaç örneği içinde, üç yenilme evresi gözlenmiştir. Bunlar:

1. Çekici kırık
2. İlerleyici makaslama kırığı
3. Gerileyici makaslama kırığı

Salt makaslama-kutusu ile yüklenme koşulu altında ve örnek üzerine düsey yük uygulandığı halde oluşan çekici kırık, hemen daima, makaslama bloku tabanının sol köşesinden başlayıp, teorik modeldeki D3 süreksizliği boyunca, blok tabanına verev olarak ilerlemektedir. Bu çekici kırığın, blok tabanı ile yaptığı açı 30° ile 40° arasında değişmekle beraber, çoğunlukla 36° civarındadır.

İlerleyici ve gerileyici makaslama kırıkları ise, uygulanan makaslama kuv-



Şekil 25: Düşey-kutmanlı Berea kumtaşı örnekleri için yenilme zarfları.

Figure 25: Failure envelopes for the vertically-layered Berea sandstone samples.

vetine paralel olarak ve makaslama bloku tabanı boyunca oluşmuşlardır.

Doğrudan-makaslama deneylerinde, gerek 'çekici', gerek 'makaslama' şeklindeki değişik yenilme şekillerinin oluşumu, daha önce bazı araştırmacılar tarafından da açıklanmıştır (Rosenblad, 1970; Lajtai, 1968). Ancak, bu her iki araştırmacı da, yazılarında, sözkonusu

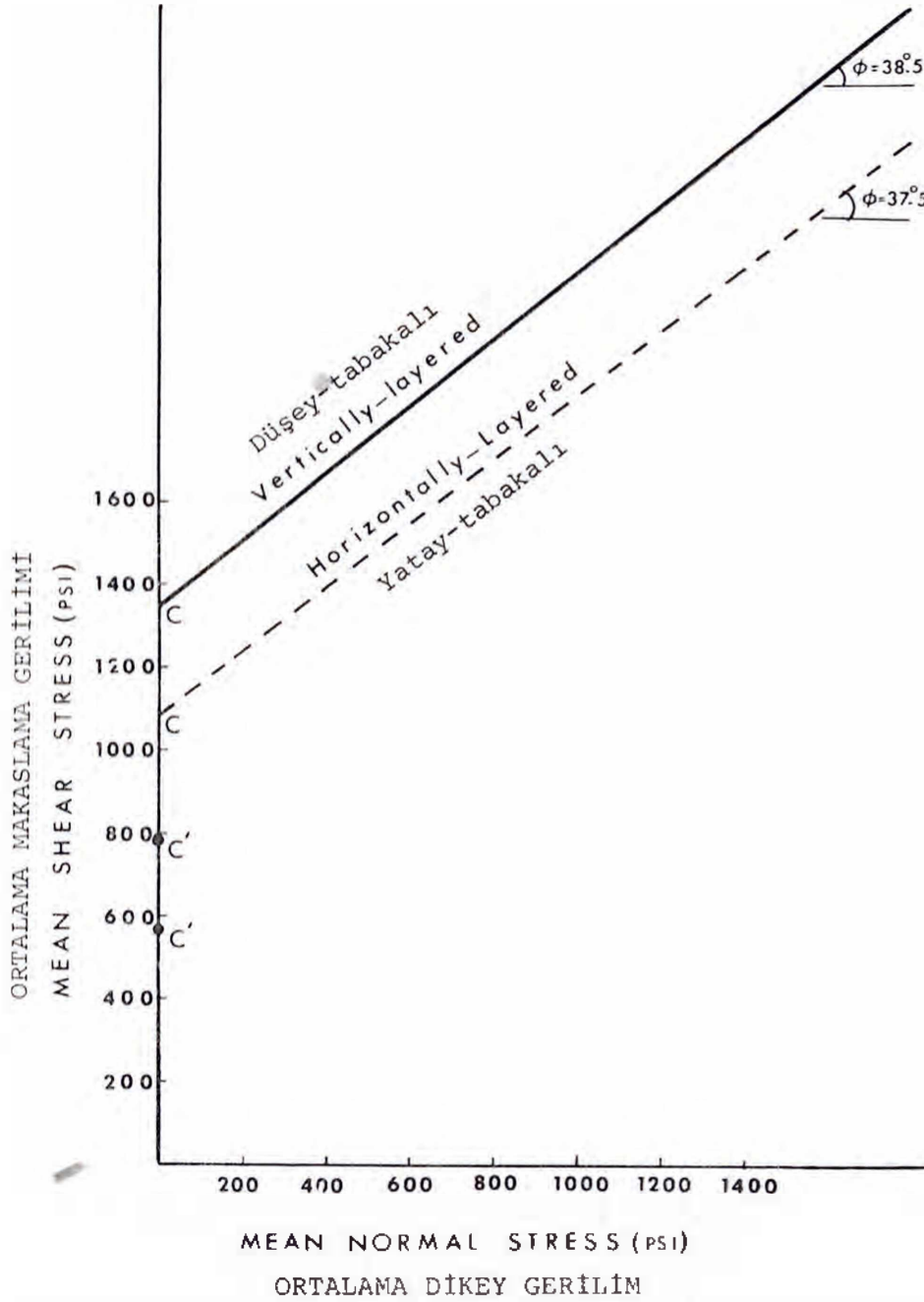
yenilmeleri oluşturan kırılmaların ne zaman ve nasıl oluştuğunu belirtmemektedirler. Çünkü, bu araştırmacılar, yenilme sırasında oluşan bu kırılmaları, deney sırasında gözleyememişlerdir. Rosenblad (1970) a göre, değişik yenilme şekillerinin hepsi aynı anda oluşmaktadır. Lajtai (1968) e göre ise, makaslama kırılmaları, çekilme kırılmalarından

sonra oluşmaktadır. Ancak, Lajtai (1968) nin yazısında, bu sonucu kanıtlayıcı herhangi bir veri yoktur.

Burada sunulan çalışmada ise, sözkonusu değişik yenilme şekilleri, deneyler sırasında, yüksek-hızlı sinematografi ile izlenebilmiştir. Bu amaç için, hızı saniyede 8 poz'dan 64 poz'a kadar değişebilen, Bolex H-16 film kamerası kullanılmıştır. Deneyler sırasında, hızlı çekim yapılmış; böylece, kaynaç örneği içinde, son yenilmeden hemen önce oluşan kırılmaların herbiri, perdede yavaş çekim olarak izlenebilmiştir.

Deneylerin çoğunda, daima ilk oluşan kırılma, blok tabanına verev oluşan D3 çekilme kırığıdır. Bu kırığın, D3 boyunca ilerlemesi, blok üzerine uygulanan düşey yükün bir fonksiyonu olarak gelişmektedir. Düşük düşey yükler altında, verev çekilme kırığı, çoğunlukla, blok tabanına kadar ilerliyerek, örneği iki ayrı parçaya bölmektedir. Bazı hallerde ise, sözkonusu çekilme kırığı, ilerleyişi sırasında, zayıf tabakalanma düzlemlerinden birine rastladığında, yön değiştirmekte ve bu düzlem boyunca sağa doğru, blok kenarına kadar ilerlemektedir. Yüksek düşey gerilmeler altında ise, sözkonusu verev çekilme kırığının ilerlemesi, alt bloğun ortalarında bir yerde, yavaşlamakta ve durmaktadır.

Yenilmenin ikinci evresi, genel olarak, makaslama bloku tabanında, makaslama kuvveti yönünde, daha büyük yerdeğişimlere gereksinime göstermektedir. İkinci evredeki makaslama kırığı, ilk çekilme kırığından sonra, blok içinde yeniden oluşan gerilim alanının bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Bu makaslama kırığı da, makaslama bloku tabanının sol kenarından başlamakta ve blok tabanı boyunca, uygulanan makaslama kuvveti yönünde, sağa doğru ilerlemektedir. Yenilmenin bu ikinci evresi 'ilerleyici makaslama kırığı' olarak tanımlanır. Bu ilerleyici makaslama kırığı, makaslama bloğunun sağ kenarına erişmeden önce; üçüncü bir yenilme şekli, makaslama bloku tabanının sağ köşesinde başlamakta, ve yine makaslama bloku tabanı boyunca, fakt bu defa ters yönde, sol doğru ilerlemektedir. Yenilmenin son evresini oluşturan bu üçüncü yenilme şekli ise 'gerileyici makaslama kırığı' olarak tanımlanır. Makaslama bloğunun son yenilmesi, bu gerileyici makaslama kırığı ile, ikinci evredeki ilerleyici makaslama kırığının birbiri ile birleştiği anda oluşur.



Şekil 26: Yatay - ve düşey-katmanlı Berea kumtaşı örnekleri için ortalama yenilme zarfları.

Figure 26: Average failure envelopes for the horizontally- and vertically-layered samples of Berea sandstone.

Şekil 28, makaslama-kutusu ile yükleme koşulu altında ve örnek üzerine düşey yük uygulandığı halde dene- nen yatay-tabakalı örneklerde oluşan, ve yukarıda tanımlanan üç yenilme ev- resinin fotoğraflarını göstermektedir. Benzer koşullar altında, aynı yenilme şekilleri, düşey-tabakalı kayaç örnekle- rinde de aynen gözlenmiştir.

Yukarıda tanımlanan birden fazla yenilme şekli, salt makaslama-kutusu ile yükleme koşulu altında geçerli gö- zülmektedir. Diğer yükleme koşulları altında ise, makaslama blokunun yenil- mesi, hemen daima makaslama bloku tabanında oluşur.

Yenilmenin ikinci evresinde, makas- lama bloku tabanı boyunca oluşan kı-

rılmanın, 'çekici' kırılma mı? yoksa 'makaslama' kırılması mı? olduğu, yük- sek hızla çekilen filimlerde de açıkça ayırt edilememekle beraber; hızlı çekim- li filimler, yavaş olarak perdeye yansı- tıldıklarında, makaslama blokunun sol alt köşesinde izlenen 'ani yükselme', kı- rılmanın ikinci evresinin, başlangıçta 'çekici' kırılma şeklinde olması olasılığı- na işaret eder.

SONUÇLAR

Bu çalışmadan, aşağıdaki genel so- nuçlar elde edilmiştir:

1. Sınır koşullarının seçimi, defor- masyon ve yenilme mekanizmasını geniş ölçüde etkilemektedir.

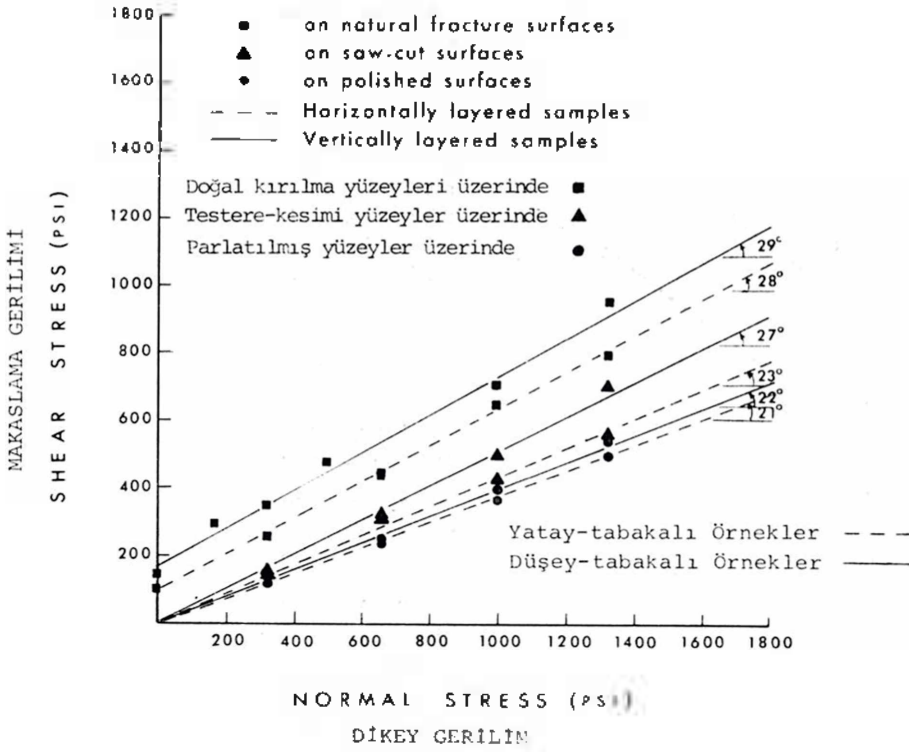
2. Deney bloku üzerine uygulanan makaslama kuvvetine karşılık blok için- de oluşan 'çekici zonlar' mekanik açıdan büyük önem taşımaktadırlar. Yerel ye- nilmeler, bu çekici zonlar içinde oluş-makta, ve ilerleyici yenilmeye neden ol- maktadırlar.

3. L4 sınır koşulu altında, deney blokunun son yenilmesi, birden fazla kı- rılma çeklinin bir sonucu olarak oluş-makta; ve bu kırılmalar, hemen daima aşağıdaki sırayı izlemektedirler:

- i) Çekilme yenilmesi (ayrılma)
- ii) İlerleyici makaslama yenilmesi (kayma)
- iii) Gerileyici makaslama yenilme- si (kayma)

4. 'Yerinde' makaslama blokunun, gerek mekanik davranışı gerek dayanı- mı, salt bazı temel makaslama dayanımı parametreleri ile açıklanamaz. Kayaçla- rın, çok düşük olduğu bilinen çekilme dayanımının, çekici gerilimlere karşı di- renci çok az olan süreksizlik düzlemlerinin, ve bunların kuvvet-yerdeğişim ilişkileri üzerindeki önemli etkilerinin de hesaba katılması zorunludur.

5. Coulomb-Navier yenilme ölçütü- nün kullanıldığı teorik çözümlmelerden elde edilen sonuçların, deneysel sonuçlar- la dikkate değer bir uyum göstermiş ol- ması, bu ölçütün, büyük çekici gerilim- lerin oluşumunu ölemek koşulu ile, 'yerinde' makaslama blokunun yenilme koşullarının saptanmasında ve açıklan- masında kullanılabileceğine işaret et- mektedir.



Şekil 27: Kayma direnci deneyleri sonuçları.

Figure 27: Results of sliding resistance tests.

6. Makaslama bloğunun düşey sol kenarının, blok tabanına paralel olarak, düzgün yerdeğişimi şeklinde uygulanan sınır koşulları (L3 ve L4), teorik deneylerde, en kararlı sonuçları vermiştir. Bu nedenle, bu iki sınır koşulu, gerek laboratuvar gerek 'yerinde' makaslama deneylerinde, standart makaslama kuvveti uygulama şekli olarak önerilebilir.

7. Süreksiz modeller üzerinde yapılan elastik çözümler, yerel yenilmelerin ve yenilme mekanizmasının ilerleyici özelliğinin öngörülebilmesini olanaklı kılmaktadır. Diğer taraftan, yüksek gerilim birikimi noktalarını çevre-

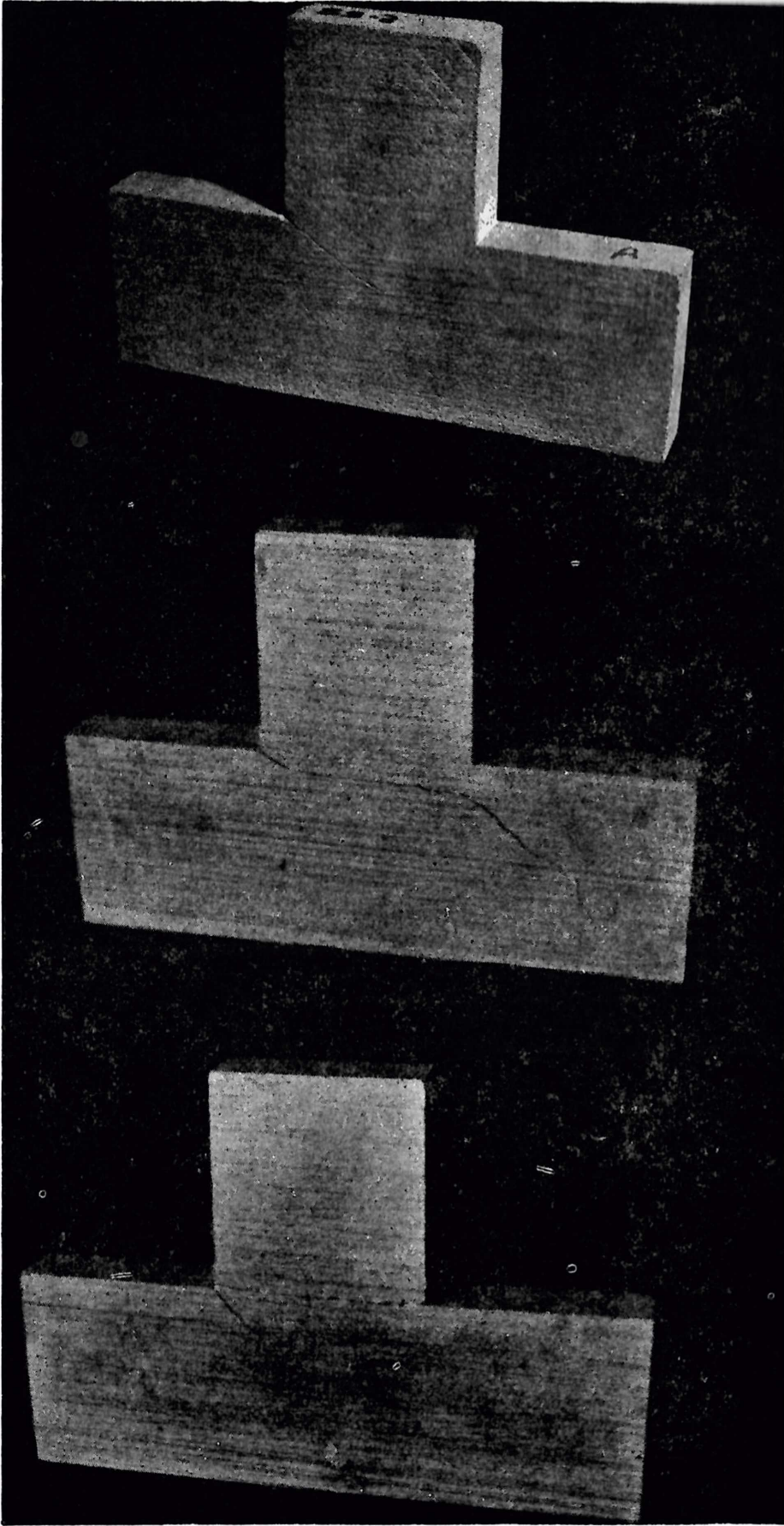
sinde oluşan yenilme zonlarının gelişiminin saptanmasında, elastik-elastoplastik çözümler, daha uygun gözükmektedir.

8. 'Yerinde' makaslama bloğunun deformasyon ve yenilme mekanizmasına, 'sonlu-elemanlar yöntemi' ile yapılan teorik yaklaşım, makaslama bloğunun deformasyon şeklinin, ilk yenilmenin yerinin, ve çatlak ilerleme yönünün saptanması gibi bazı deneysel sonuçların öngörülebilmesine olanak sağlamaktadır.

Yayıma verildiği tarih: Mayıs, 1975

DEĞİNİLEN BELGELER:

- Dahl, H.D., 1969, A finite element model for anisotropic yielding in gravity loaded rock; Ph. D. Thesis, The Pennsylvania State University, 155 s.
- Dahl, H.D. ve Voight, B., 1969, Isotropic and anisotropic plastic yield associated with cylindrical underground excavations: Proc. Int. Symp. on Large Permanent Underground Openings, Oslo, Norway, 105-110.
- Evdokimov, P.D. ve Sapegin, D.D., 1970, A large scale field shear test on rock; Proc. 2nd Conf. Int. Soc. Rock Mech., Belgrade, Yugoslavia, 2, paper 3-17, 5 s.
- Henkel, D.J., Kull, J.L., Lloyd, D.G. ve Skempton, A.W., 1964, Stability of the foundation of Monar Dam; Int. Congr. Large Dams, 8th, Edinburgh.
- Kasapoğlu, K.E., 1973, Progressive failure in discontinuous rock masses subjected to shear deformation; Ph. D. Thesis, Pennsylvania State University, 165 s.
- Khair, A.W., 1971, A study of the mechanical properties of Berea sandstone for use in the A.G.A. large model studies: The Pennsylvania State University, Internal Report RMLIR/71-20.
- Lajtal, E.Z., 1968, Shear strength of weakness planes in rock; Int. Symp. on Rock Mech., Madrid, 499-515.
- Rosenblad, J.L., 1970, Failure modes of models of jointed rock masses; Proc. 2nd Conf. Int. Soc. Rock Mech., Belgrade, Yugoslavia, paper 3-11.
- Ruiz, M.D., Camargo, F.P. ve Nieble, C.M., 1968, Some considerations regarding the shear strength of rock masses; Int. Symp. on Rock Mech., Madrid, 159-161.
- Skempton, A.W., 1964, Long-term stability of clay slopes; Geotechnique, 4, 2, 75-102.
- Voight, B. ve Dahl, H.D., 1970, Numerical continuum approaches to analysis of nonlinear rock deformation; Can. Jour. Earth Sci., 7, 1, 814-830.
- Wang, Y.J. ve Voight, B., 1969, A discrete element stress analysis model for discontinuous materials; Proc. Int. Symp. on Large Permanent Underground Openings, Oslo, Norway, 11-115.



Şekil 28: Yenilmenin üç evresini gösteren deney örnekleri.
Figure 28: Test specimens displaying the three stages of failure.

LEVHA I

Şekil 1: Tipik kayaç örnekleri: (a) yatay-katmanlı, (b) dişey-katmanlı.

Şekil 2: Doğrudan-ınakaslama makinasının genel görünümü.

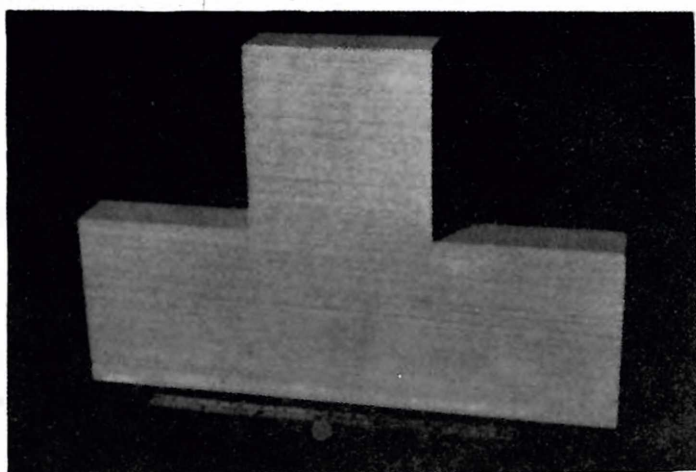
Şekil 3: Makaslama kutusundaki değişiklik için kullanılan parçalar.

PLATE I

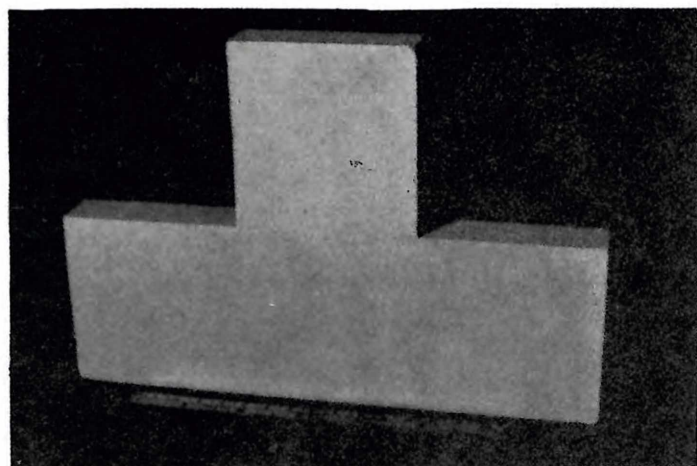
Figure 1: Typical rock samples: (a) horizontally-layered, (b) vertically-layered.

Figure 2: The overall view of the direct-shear machine

Figure 3: Parts used for modification of the shear box.

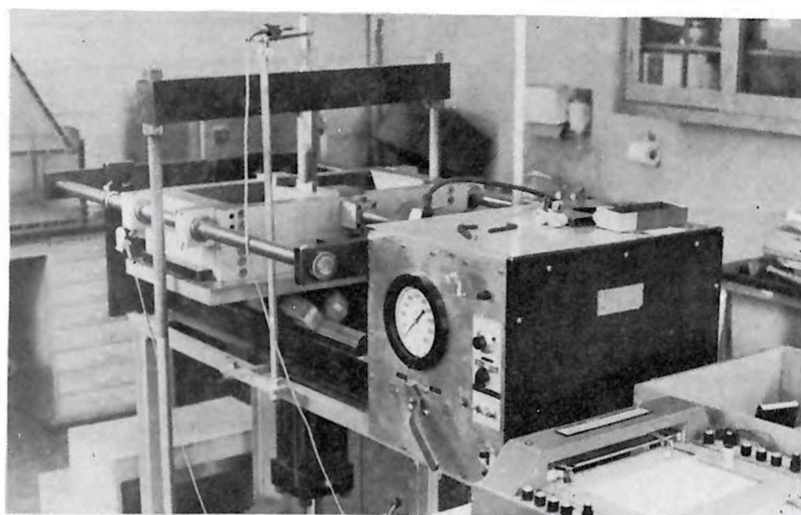


a

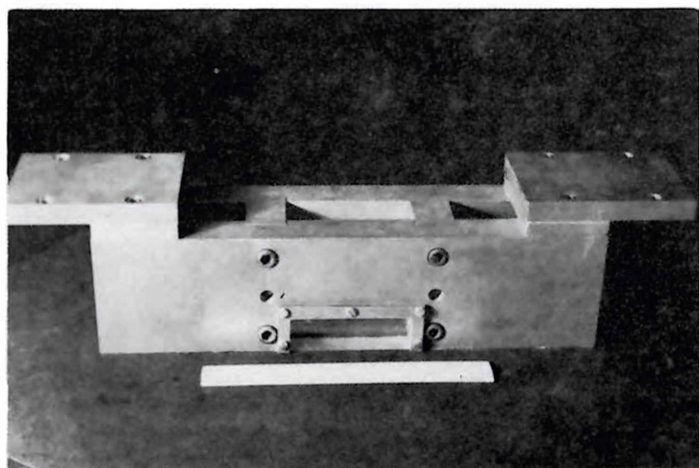


b

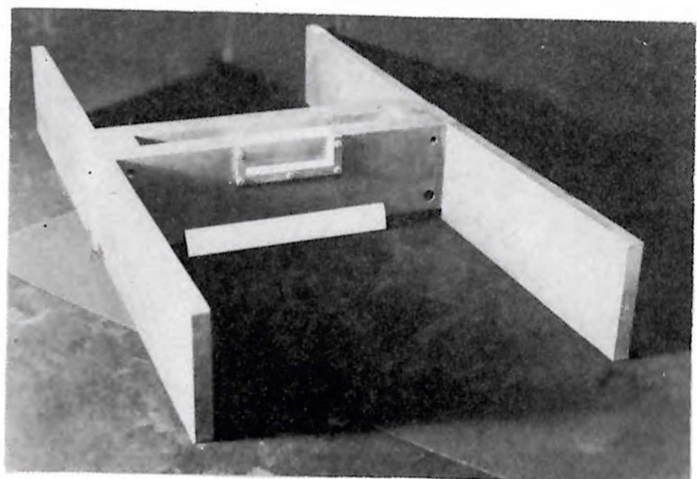
1



2



a



b

3

LEVHA II

Şekil 1: Yükleme parçaları.

Şekil 2: Örnek yükleme şekilleri: (a) makaslama-kutusu ile yükleme koşulu; (b) plaka ile yükleme koşulu.

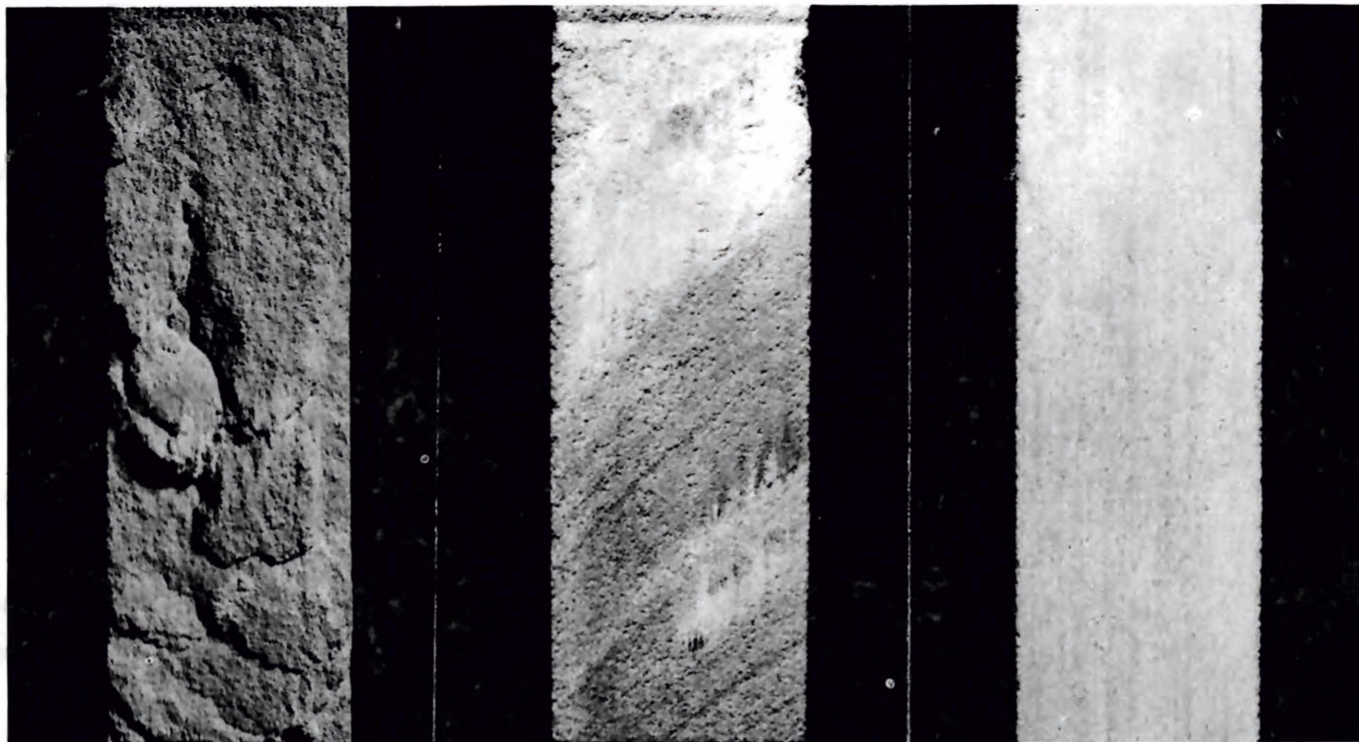
Şekil 3: Örnek yükleme şekilleri: (a) yoğunlaştırılmış yük koşulu; (b) eğik yük koşulu.

PLATE II

Figure 1: The loading parts.

Figure 2: Sample loading configurations: (a) shear-box loading condition; (b) plate loading condition.

Figure 3: Sample loading configurations: (a) concentrated load condition; (b) inclined load condition.



2



1