

KAYALAR ÜZERİNDE YAPILAN KIRILMA DENEYLERİ HAKKINDA

Erdoğan YÜZER

I.T.Ü. Tatbikî Jeoloji Kürsüsü, istanbul

GİRİŞ

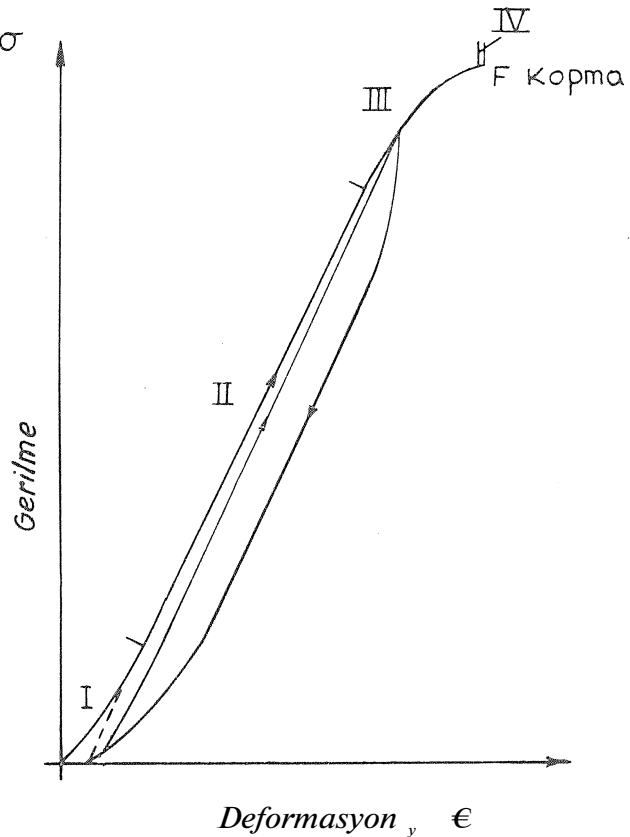
Arz üzerinde geniş alanlar kaplayan tektonik olayların **izlerini**, çeşitli **kırık**, çatlak ve fayları birbirine bağlı olarak arazide gözlemek ve bunları meydana getiren kuvvetlerin mekanizmasını çözmek çoğu zaman mümkün değildir* Yapılan saha araştırmaları genellikle küçük bölgeler içinde sınırlı kalmakta^ dolayısıyla olayların mekaniğini, tesir eden çeşitli **gerilme** (birim alana düşen kuvvet) sistemlerini çözememektedir. Bu güçlüğün **açıklanmasına** ışık tutacak^ onların anlaşılmasında bazı ipuçları verebilecek tektonik deneylerin yapılması 1.5 asır öncesine kadar iner, Başlangıçta sadece killer üzerinde yapılan model çalışmalarına^ 1911 de Von **Karman**'ın kayalar üzerindeki deneyleriyle önemli bir katkıda **bulunulmuştur*** İik deneyler sadece kayaların elastiktik ve plastiklik sınırını izafi olarak izlemeyi gaye edinmiş, bunlarla kırılma ve fayların açıklanması **araştırılmıştır*** Bu konudaki esas güçlük^ kayaların kırılma esasları üzerinde düğümlenmektedir. **Taşların**, çeşitli gerilmeler altındaki çok küçük **deformasyonları** (genellikle % 1 civarında) deneyler esnasında bunları ölçebilen ayrı bir tekniği gerektirir, 15 sene evveline kadar bu gibi tekniklerin yokluğu sebebiyle kayalar üzerindeki çalışmalarda önemli adımlar atılamamıştır, 1950 den bu yana deformasyon ölçme tekniğinin gelişmesine paralel **olarak**, ken* dine kayaların çeşitli gerilmeler altındaki **deformasyonunu incelemeyi** konu edinen «Kaya Mekaniği» adıyla bir ilim kolu **doğmuştur**^ özellikle 1960 tan sonra kendine has **disiplinleriyle** gelişen kaya mekaniğinde çalışan çeşitli orijinden gelme **araştırmacılar**, özel sahalarındaki güçlükler üzerine eğilmişlerdir. Be arada jeolojiyle uğraşanların başlıca çalışma konusu^ kayaların kırılmalarını araştırmak olmuştur. Kayalarla ilgili çeşitli mühendislik dallarında çalışanlar **da**, büyük yeraltı ve yerüstü tesislerinin yapılmasında karşılaşacakları gerilme dağılımlarını önce öğrenmeye^ ölçmeye, sonra güçlük-

leri yenmeye uğraşmaktadır* Külteler içinde mevcut gerilmelerin kültelerin graviteferinln yanısıra^ geçirdikleri tektonik hareketlerden kalan «residual gerilmeler» sonucu oluşu, jeolojiyi kaya mekaniği-nin ayrılmaz bir parçası haline getirmiştir. Bu sebeple arazide ya* pılan kaya mekaniği deneyleri sonuçları, ancak bölgenin tektonik yapısının ışığı altında değerlendirilebilmektedir.

Laboratuvar çalışmalarında da gerek tane ve kristaller arasın-daki ilginin, gerekse tabakalaşma^ foliasyoiij şistiyet vb, gibi süre-sizlik ortamlarının araştırılması yine jeolojinin çeşitli konulan içinde yer alır. Kısaca^ jeoloji hızla gelişmekte olan kaya mekaniğinin en büyük yardımcısı olmaktadır.

KAYA ÜZERİNDE KIRILMA DENEYLERİ

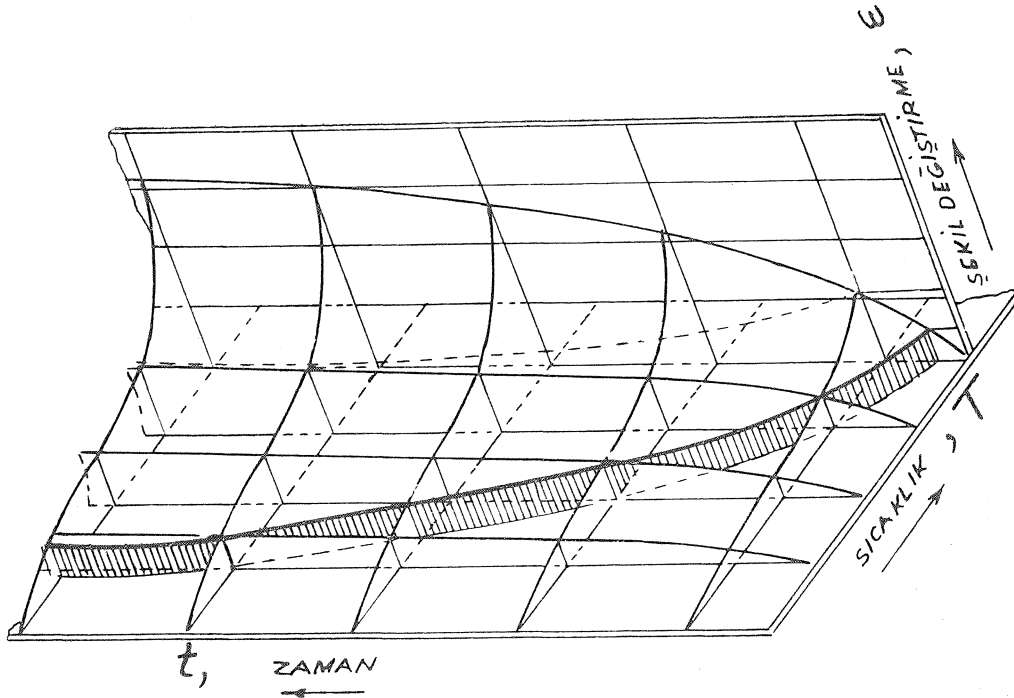
Kayalar üzerinde yapılan çeşitli deneyleri sınıflandırmadan **ön-ce**, gerilme altında tutulan kayalara ait tipik bir gerilme déformas-yon, $O = f(e)$, eğrisini görelim (Şek, 1), Be eğri üzerinde **işaret** edildiği gibi, basınç arttık-ça, **deformasyon** artmakta σ ve bu artış I* ve İL bölge-lerde birbiriyle orantılı ol-maktadır* Başka bir deyim-le, L ve İL bölgelerde ka-yaların davranışı tamamen elastiktir, gerilme kaldırı-lınca deformasyon da orta-dan kalkar, L bölgedeki eğrilik taşın porozitesinin ve küçük fisürlerin mikta-rına göre değişir, Yoğun kayalarda bu doğruya ya-kındır, IIL bölgeye geçilince durum değişir, gerilmeler kaldırılınca devamlı (kalıcı) deformasyondan dolayı bir histerezis elde edilir. Kısa süreli IV* bölgede önemli değişiklikler **olur**, önce ta-neler arasında^ daha sonra



Şek* i - GeYrek (brittle) kayaların basınç altında **tutulmasıyla** elde edilen tipik **gerilme-deformasyon, $\sigma = f(e)$ eğrisi**

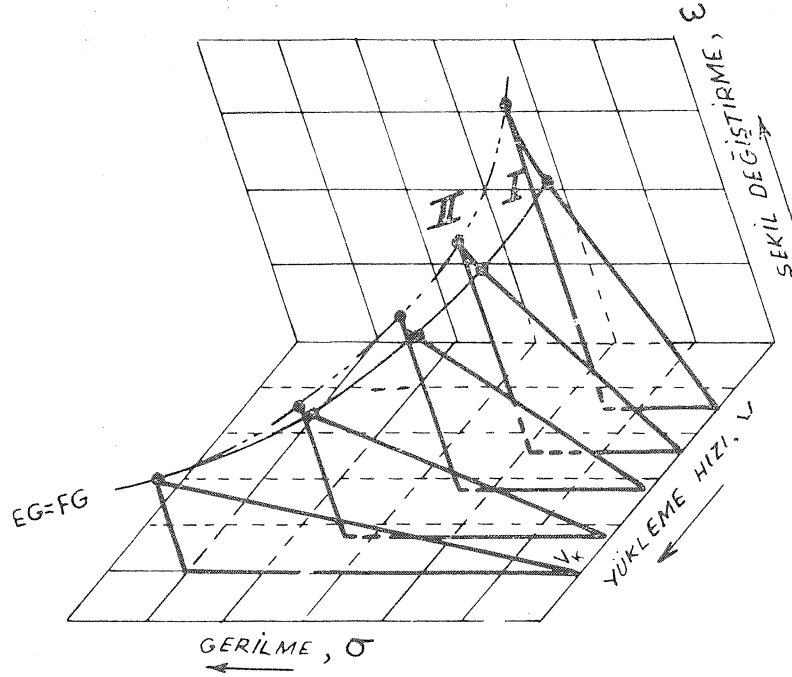
da, görülen **fisür** ve çatlaklar oluşur. Gerilme artırıldıkça ileride açıklanacak şartlara bağlı olarak tansiyon çatlağı veya kesme (shear) şekÜBde bir kırılmayla deney son bulur* 11L **bölge**, yanal basınçlar (σ_3), sıcaklık ve deney süresi^ deformasyon hızı gibi şartlara bağlı olarak genişleyebilir* Be durumda taş elastik veya gevrek (brittle) halden uzaklaşıp^ sünümlü (ductile) hale geçer* Bu arada gevrekliğin herhangi bir taş cinsinin değişmez özeliği olmayıp^ içinde bulunduğu ortam ve şartların bir fonksiyonu olduğunu hatırlamak gerekir* Başka bir **deyimle**, her taş şartlara göre gevrek veya sünümlü olarak davranabilir (Şek. 2, 3),

Kayalar üzerinde yapılan deneyleri elastik sınırı aşmadan ve **aştıktan** sonra yapılanlar olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Yazımıza konu olan birinci gruptaki deneyler^ kayaların kırılma şartlarını ve şekillerini inceler, ikinci gruptakiler ise, kıvrımlarına mekanizmasının açıklanmasına uğraşır. Zamanımızda kayaların kırılmasını açıklamayı gaye edinen deneyler iki yönde yapılmaktadır. Birincisinde^ mikroskopik yapıdaki kırıklardan ziyade görülen makro kırıklarla ilgilenilmekte^ ikincisinde önce mikroskopik kırıklar üzerinde durulmakta sonra bunlarla **makroskopik kırıkların** ilgisi araştırılmaktadır. Minnesota Üniversitesi Teknoloji Enstitüsünde bulunduğumuz



Şek* 2 - Kayaların, enformasyonun zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değişimini gösteren $\epsilon = f(t, T)$ eğrileri.

Tarama ile gösterilen bölge^ çeşitli zaman, sıcaklık kombinasyonlarında elde edilen eşit büyüklükteki deformaty onları göstermektedir.

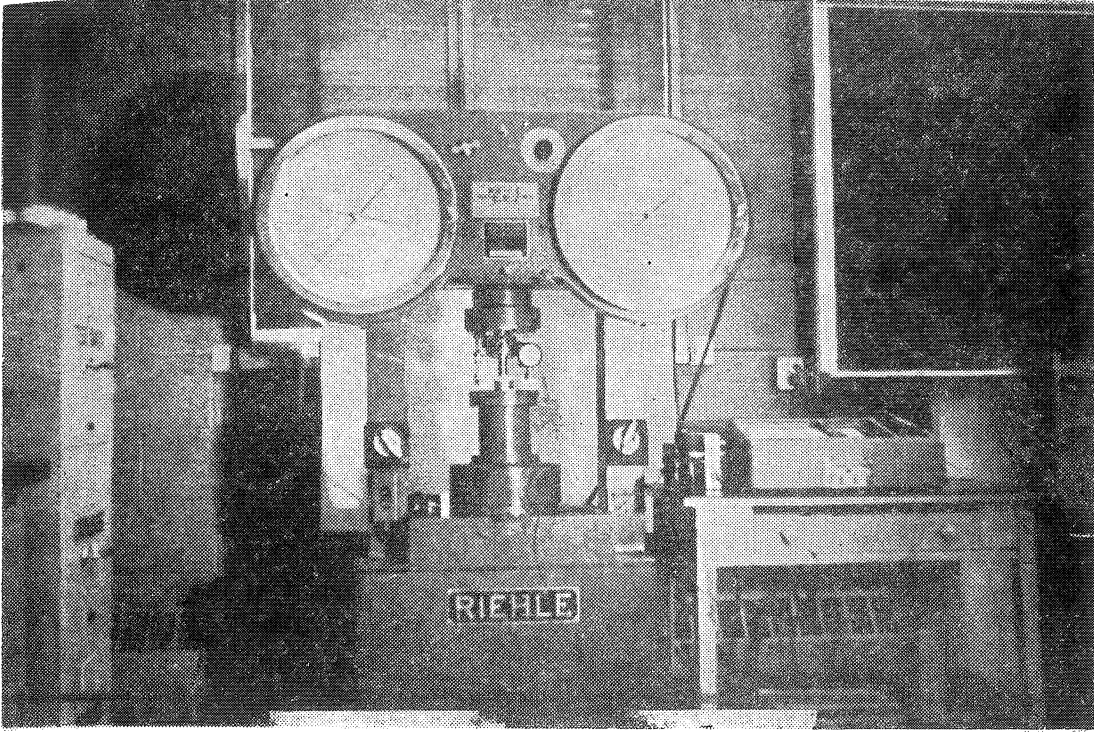


Şekil 3 - Deformasyonun gerilme ve yüklenme veya deformasyon hızına bağlı olarak değişimini gösteren $\dot{\epsilon} = f(t, v)$ eğrileri.

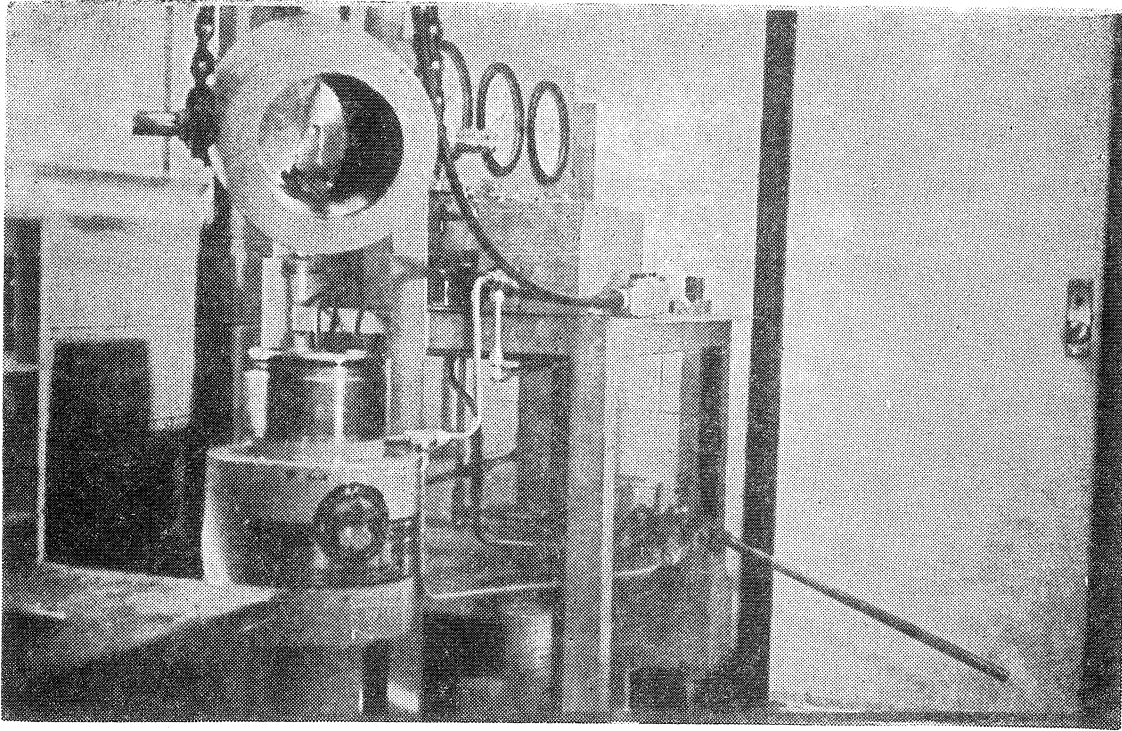
I - Eğrisi elastik deformasyonu; II - Eğrisi elastik deformasyondan uzaklaşarak plastik deformasyona geçişi işaret etmektedir.

sırada her iki grup deney üzerinde bir müddet çalışma imkânı bulduk. Aşağıda bu konuda yapılan diğer ilgili çalışmaların sonuçlarını birleştirerek bunları özetlemeye çalışacağız.

Şekil 4 ve 5 üzerinde kaya mekaniğinde kırılma mekanizmasının açıklanması için kullanılan bazı deney aletleri **görülme**tedir. Tek eksenli basınç aletlerinde düşey basınç (c^{\wedge}), aşağıya veya yukarıya doğru hidrolik olarak hareket eden bir pistonun ucundaki yüklenme **tablasıyla** sabit tabla arasında numuneyi sıkıştırmakla elde edilir. Üç eksenli alette yanal basınç (o_3) ise, numune etrafında hidrolik olarak sıkıştırılmış çeşitli sıvılarla meydana getirilir. Deney **esnasında**, her ana tekabül eden gerilme ve deformasyonlar elektriksel **ekstansometreler** (strain gauge) vasıtasıyla dolaylı olarak **ölçülür**, özel aletlerle (X-Y recorder) otomatik olarak $a = f(E)$ eğrisi çizilir. Bu suretle deneyin herhangi bir safhasında numunenin tesiri altında bulunduğu gerilmeleri ve deformasyonu derhal bulmak imkân dahilinde girer*



Şek, 4 « Kayaların kırılma deneylerinin yapıldığı tek eksenli kırılma aleti*



Şek, S - Hidrolik olarak sağlanan yüksek çevre basıncı aâtında kırılma deneylerinin yapıldığı üç eksenli kırılma aleti.

Deney sonuçları çeşitli usul ve grafiklerle ifade edilir, Bunlardan en yaygın ve faydalı olanı «MÖHR» grafik gösterme usulüdür. Be- usulde kırılma anındaki gerilmeler, kırılma açıları kolayca görülür- (Şek. 6), (T) kayma (kesme) gerilmesini (shearing stress), (a) normal gerilmeyi (normal stress) göstermek üzere, T-a koordinat sisteminde, merkezleri apsis ekseninde olan ve kırılma anındaki çeşitli σ_1, σ_3 gerilme çiftine tekabül eden, orijinden itibaren

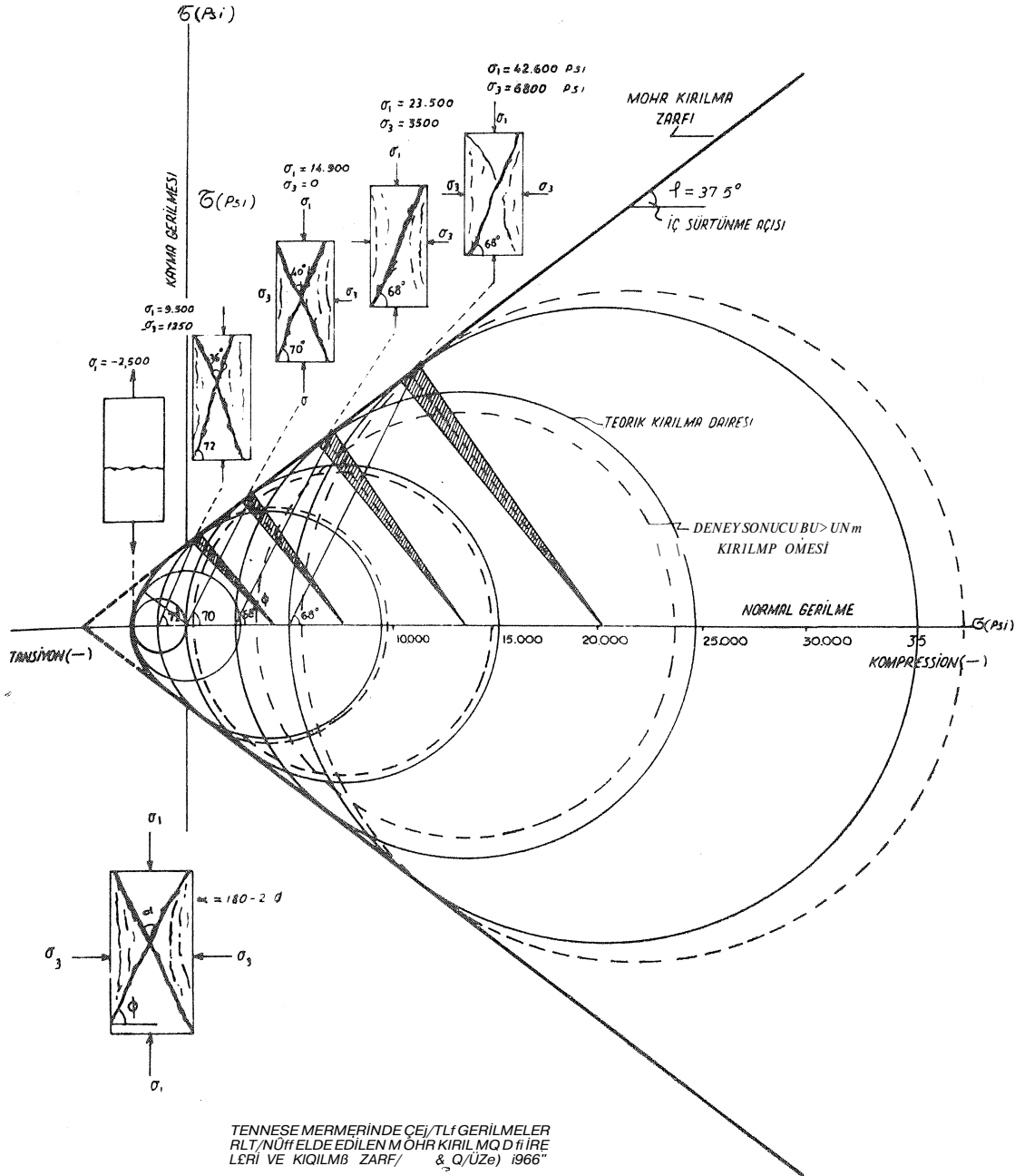
$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ merkezli ve $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ yarıçaplı «MÖHR» gerilme daireleri

çizilir* Bu dairelerin ortak **zarfı**, deneyin yapıldığı numunede hangi σ_1, σ_3 çiftinin kırılmayı sonuçlayabileceğini açıklar, zarfa, teğet olan veya kesen G_1, G_3 daireleri kırılmayı **kesmeyenler** de halen kırılmanın mevcut olmadığını gösterir.

Zarf nispeten küçük G_3 gerilmeleri altında doğru^ büyük σ_3 gerilmeleri için bir parabol şeklindedir.

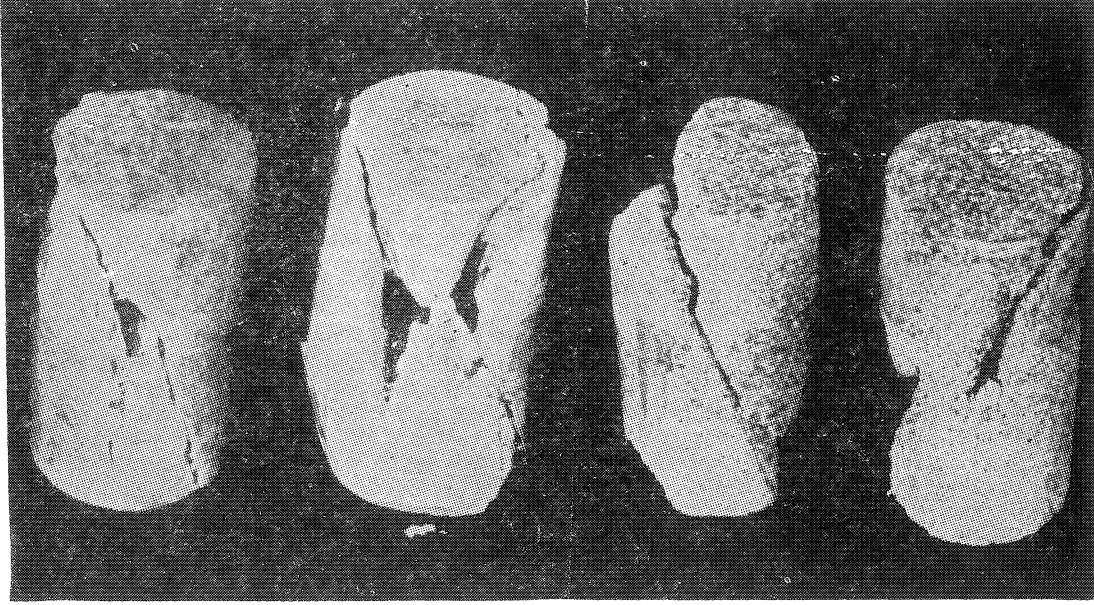
Gerilme daireleri ve kırılma zarfı çizildikten sonra, bunlar yardımıyla. **kırılma düzlemleri arasında** meydana gelen **açıyı**, kırılma veya kesme yüzünde kırılma anındaki normal ve kayma **gerilmelerini**, iç sürtünme açısını bulmak mümkündür (Şek. 6),

Çalışmalarımız sırasında deney için. küçük kristalli Tennessee mermerinden alınan katotlardan 1 inç çapında ve 2 inç yüksekliğinde **silindirik ve uçları 0*001" inç mertebesinde • paralelleştirilmiş; numuneler** hazırlanmıştır. **Bunlar**, tansiyon **gerilmesi**, bir eksenli basınç gerilmesi ve üç eksenli basınç gerilmeleri altında **tutulmuş've-meydana gelen kırıkların'mekanizması** incelenmiştir, -Tansiyon gerilmeleri altında tutulan numunelerde gerilme eksenine dik* temiz yüzeyli tek bir **tansiyon** kırığı meydana gelmiştir (tension Joint), Bir eksenli gerilme halinde ise, birbirini kesen iki yüzey boyunca kayma meydana gelmiştir (shear joints) (Şek, 7), Üç eksenli basınç deneylerinde düşük yanal gerilme (σ_2) değerleri için. iki kayma (kesme) yüzey i, (σ_3) değerleri büyüdükçe bir kayma yüzeyi elde edilmiştir. Aynı zamanda, yanal gerilmelerin **artmasıyla** kayma düzlemleri arasındaki açı da büyümektedir,. Yanal **basınçların** artması hali tabiatta yeryüzünden itibaren' derinlik artmasına tekabül ettiğine göre, deney sırasında soldan sağa doğru meydana gelen **değişmeleri**, tabiatta düşey doğrultuda beklemek gerekir. **Nitekim**, Muehlberger, **Appalaşlar** üzerinde yaptığı arazi gözlemlerinde! çeşitli kırık ve kayma yüzleri arasında bu ilgileri **izlemiştir**«



Şekil i « Tennessee mermerinden hazırlanmış silindirik numunelerin tek ve üç eksenli basınç deneyleri sonucunda elde edilen kırılma gerilme-
 rimin MÖHE daireleriyle gösterilmesi »

Şunu hemen belirtmek yerinde olur ki, kırılma yüzeylerinin çeşit ve sayısını kontrol eden yegâne faktör gerilme sistemleri değildir. Kayaların iç yapısının da bunlar üzerindeki rolü çok büyük*
 tüm Örneğin^ yoğun ve ince dokulu litografya kalkerini^ süks veya tek kristal numuneleri üzerinde yapılan bir eksenli basınç deney-

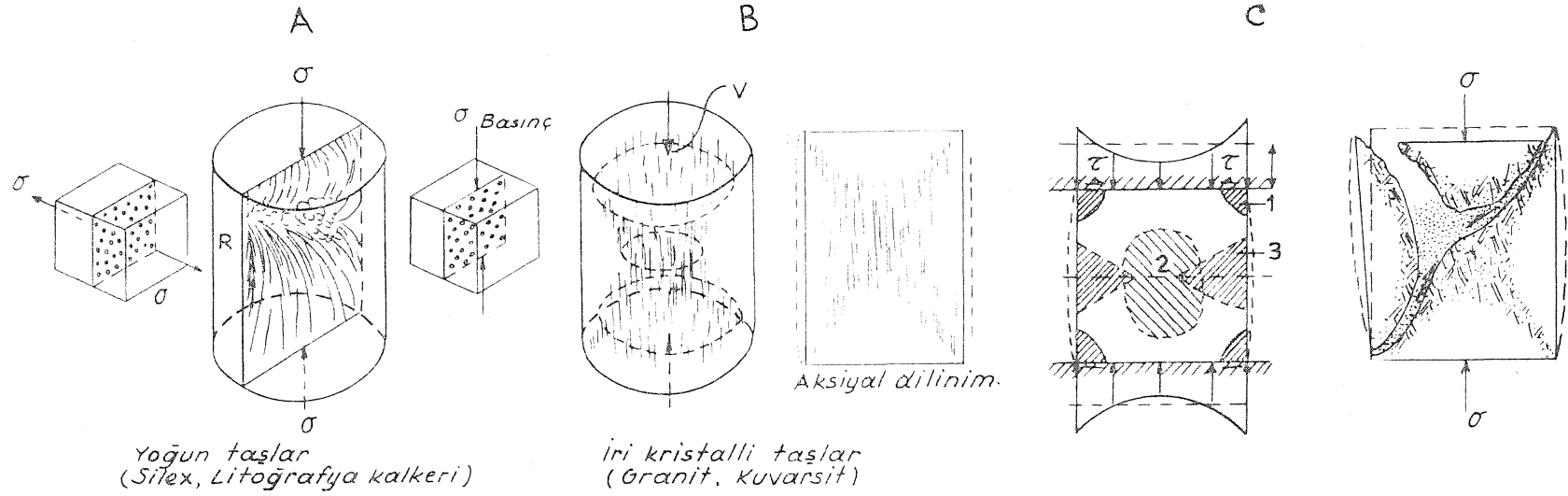


Şek. 7 - Tennessee

mermeri ve Wisconsin kumlu kalkeri üzerinde yapılan tek eksenli kırılma deneyi sonucunda elde edilen kırılma yüzleri.

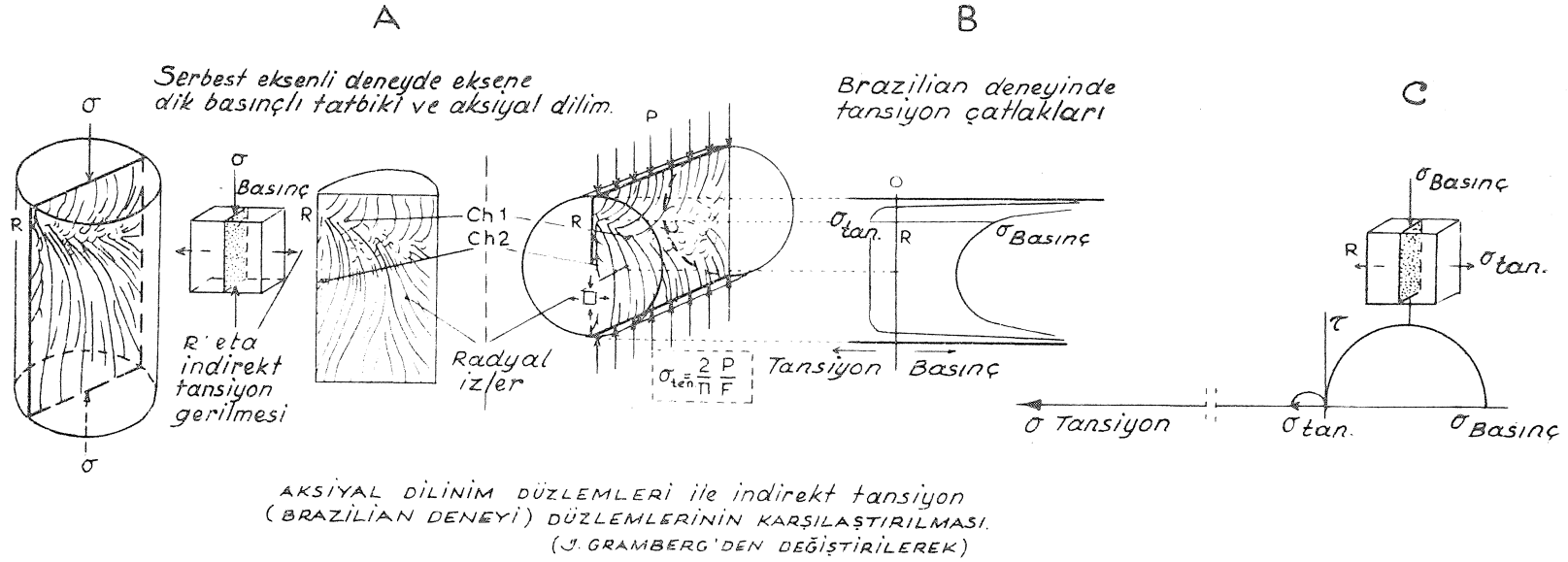
lerinde koni şeklinde kırılma gösteren iki kesme yüzeyi yerine, temiz ufalanma izi olmayan tek bir düşey kırık meydana gelmiştir (Gramberg), Buna karşılık yaptığımız deneyler sonucunda da görüldüğü üzere! mermer[^] kuarsit, granit gibi numunelerde kırılma birbirini kesen kayma yüzeyleri boyunca oluşmuştur.

Son zamanlarda kayaların kırılma mekanizmalarının analizinde çalışanların üzerine eğildiği en önemli konulardan biri de aksiyal dilinimdir. Bir grup araştırmacı[^] kayaların bir eksenli, hatta küçük yanıl gerilmeli üç eksenli basınç deneyleri sonucunda meydana gelen koni şeklindeki kırılma yüzeylerini «deney hatalarının» doğurduğu yanıltıcı yüzler olarak nitelemektedir, ileri sürülenlere göre, «Gerilme tatbiki esnasında gerek uygun şekilde numuneler kullanılmadığından numunelerde[^] gerekse basınç aletlerinde gerilme konsantrasyonunun meydana geldiği bazı kısımlar mevcuttur (Şek. 8). Kırılmanın tam başladığı anda buralarda anî enerji boşalması kırılma yüzeylerinin şeklini ve yapısını değiştirmektedir. Aslında, uygun numune şekli ve alet tipi seçilirse basınç gerilmeleri altında, maksimum basınç eksenine paralel kırılmalar (aksiyal dilinme) olur.» Bu görüşü doğrulayan- birçok arazi ve laboratuvar gözlemleri mevcuttur, Gramberg litografya kalkerinin serbest basınç deneyi sonucunda gerilme eksenine paralel düşey dilinimlerin meydana geldiği



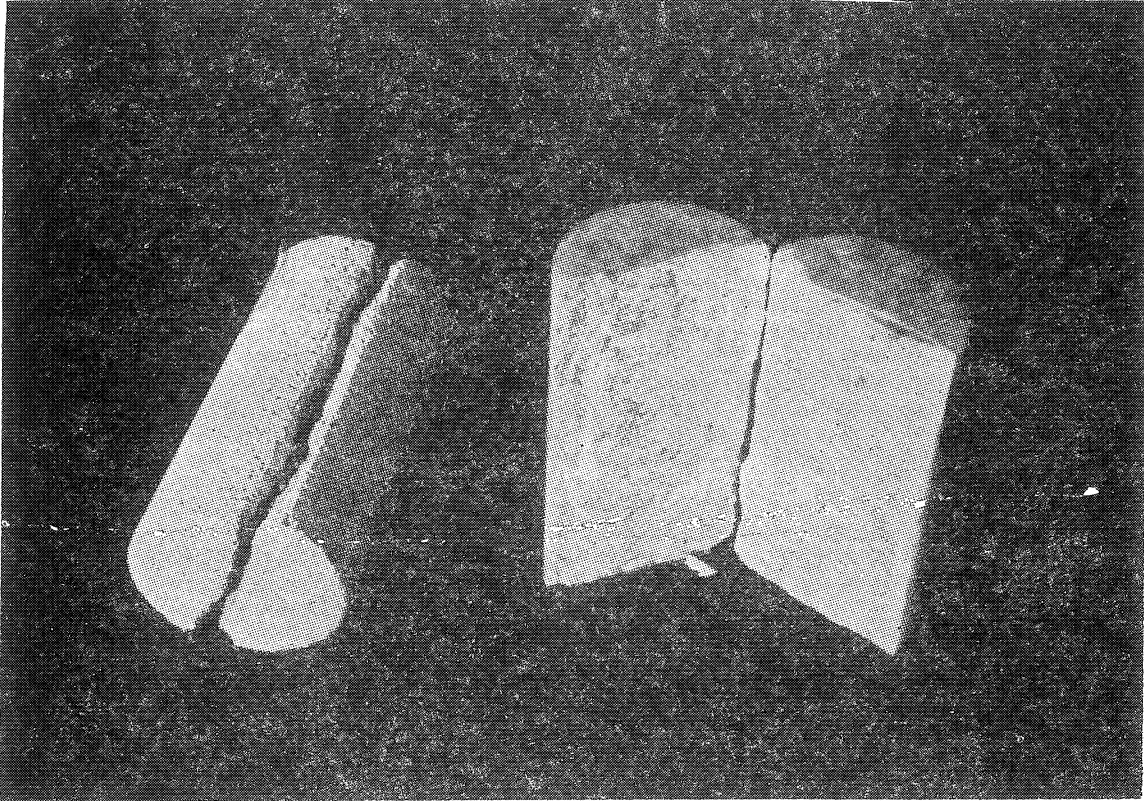
Şek. 8 - Tek eksenli basınç deneylerinde kırılma mekanizması (Gramberg'den değiştirilerek).

A - İnce dokulu yoğun taşlarda, gerilme eksenine paralel (aksiyal) bir çatlakın meydana gelişi; B - İri kristalli çatlaklarda, gerilme eksenine paralel gelişen mikro çatlaklar; C - Bu çatlakların heterogen gerilme dağılımı sebebiyle birleşerek kesme çatlakını doğurması.



Şek. 9 - Tek eksenli basınç deneyinde silindirik numunelerin uzun eksen boyunca (A), uzun eksene dik (B) yüklenmeleriyle gelişen çatlaklar ve bunlara ait gerilme dağılımları (C).

ve bu yüzlerin tamamen tansiyon çatlakları özeliğini taşıdığını görmüştür, O halde bu kırılmaları meydana getiren gerilme, basınç gerilmelerinin **endirekt olarak** doğurduğu tansiyon gerilmeleridir. Bu noktadan hareket ederek birçok deney yapılmıştır, Basınç gerilmelerinin katı cisimlerin mikroskopik yapısında, **tansiyon** gerilmelerini doğurduğu konusu yemi değildir ve 19.20 de Griffith tarafından ortaya atılmıştır, **Griffiths** göre **katı** ve gevrek cisimlerle içinde küçük elips şekli mikro çatlaklar **mevcuttur**. Basınç veya tansiyon gerilmesi altında bırakılan bir katı cisimde, **bu** mikro çatlakların uç noktalarında tansiyon gerilmeleri doğmakta ve taşın **kırılması** bunlar **sonuçlamaktadır**. Griffith teorisi üzerinde bugün kaya mekaniği **laboratuvarlarında** çeşitli deneyler yapılmaktadır. Fakat halen münakaşa götürmez bir sonuç alınamamıştır. Bilinen bir nokta varsa, o da hakikaten basınç gerilmeleri sonucunda tıpkı tansiyon gerilmeleriyle meydana gelen çatlaklar özeliğinde çatlakların oluştuğudur. Şekil 9 ve 10 da gösterildiği **gibi**, silindirik şeklindeki taş numunelerine iki ucundan çekme veya uzun eksen yönünde basınç gerilmesi tatbik **edildiğinde**, aynı özellikte çatlaklar meydana gelmektedir,



Şekil 10 Tennessee mermerinden hazırlanan silindirik numunelerin uzun eksen olarak tek eksenli basınç aletinde yüklenmesiyle elde edilen temiz yüzlü tek çatlak (Brasilia deaeyî).

Bu iki ayrı tıp gerilme altında tutulan taşların her iki hal için tansiyon **mukavemetleri** birbirine çok yakın **bulunmaktadır**. **Bu uyğuiluk**, kırıkların tansiyon kuvvetleri sonucunda meydana geldiğini gösteren diğer bîr delildir.

Burada kısaca bahsedilen deneyler de göstermektedir ki, kayaların kırılma mekanizmasının açıklanması pek basit değildir. Hele tabiattaki düzensizlikler dolayısıyla kayaların artan anizotropik özellikleri de düşünülürse^ problemin karışıklığı daha açık ortaya çıkar. Bununla beraber^ kırılma mekanizmalarını açıklamak için halen **bulunan** ipuçlarına, teorik ve deneysel yönden girişilen yoğun çalışmalara dayanarak yakın bir gelecekte elle tutulur sonuçlar alınacağına ümitle bakılabilir. Taşları elastik sınırlar içinde alarak **kırılmayı** açıklamaya gayret eden bu deneylerin yam **sıra**, yüksek basmç, düşük defermasyon hızı **ısı**, tane ve çatlak aralarındaki sıvı **basıncını**, uzun deney zamanını da göz önüne alarak, plastik halde yapılan bazı deneylerle kırılmanın da açıklanmasına uğraşmaktadır. Bulunacak **sonuçlarla**, güçlük çektiğimiz birçok tektonik problemin çözülmesinin kolaylaşacağı muhakkaktır.

B İ B L İ Y O G R A F Y A

- 1 ~ **BAIDYUK3 V. B.** (1967) : Mechanical properties of rocks at high temperatures and pressures. *Consultants Bureau, New York*«
- 2 — **BRACEs W, F_s** (1964) : Brittle fracture of rock. State of stress in the Earth's crust, *Elsevier Publishing Co,*
- 3 — **CLAUSING, D. P.** (1959) : Comparison of Griffith's theory with **Mohr's** failure criteria. *Quart, Colo* School of Mines, 5A^ no. 3, s. 285-297.*
- 4 — **GRAMBERG^ J*** (1965) : Axial cleavage fracturing^ a significant process in mining and geology* *Engineering Geology^ vol. 1, no. 1, s, 31-71**
- 5 — **GRIFFITH^ A, A,** (1924) : The theory of rupture, *Proc» Intern. Congr. Appl. Mechanics* s. 55-63.*
- 6 _ **GRIGSS5 D. T*** (İ951) : Deformation of Yule marble« *Bull. GeoU Soc. of Amer,* no. 62, s. 1385-1406.
- 7 — **HANDIN, J. & FAIRBAIRN, H. W,** (1955) : Experimental deformation of Hasmark dolomite, *Bull. GeoL Soc. Am.* vol. 66
- 8 — **HEARBs C* H.** (1960) : Transition from brittle fracture to ductile flow in **Solenhof en** limestone as a function of **temperature**, confining pressure

and interstitial pressure. Rock Deformation. *The Geol Soc, of America, Memoir 79*, s. 193-226,

- 9 ~ KVAPILO R* (1963) : Tectonic experiments on natural rocks. *Int. J. Rock Mech* Mining Sci.*, vol. I, s. 17-30,
- 10 — MAZANTI, B. B. & SOWERS, G. F. (1966) : Laboratory testing of rock strength, *ASTM, STP» 402*,
- 11 — SCHWARTZ, A. E. (1964) : Failure of rock In the triaxial shear test. *Proceedings^ 6th Symposium on Rock Mechanics, University of Missouri^ Rotta* Mö.*
- 12 — YÜZER, E. (1967) : Kaya mekaniği ve jeolojisi, *LT.Ü« Dergisi*, cilt 25, no. 2,