

## ANKARA ANDEZİTİ, KİREÇTAŞI YE BAZI TRAVERTENLERİN YORULMA KARAKTERİSTİKLERİ

Seçkin İNCEEFE\*

### özet

Zamana bağlı yorulma olayının kuralları, klâsik bir yorulma eğrisinin safhaları ayrıntılarıyla anlatılıyor. Yorulmaya etki eden etkenler bir bir sıralanıp bunların etkileri inceleniyor. Konuya değişik yaklaşımlar (Deneysel, Olaysal, Teorik) gerekli formüller ve reolojik modellerle ayrı ayrı inceleniyor.

Tebliğin devamında yorulma deney yöntemleri, ve yapılan deneylerin metodu anlatılıyor. Kullanılan örneklerden kısaca bahsedildikten sonra, deneylerden elde edilen yorulma denklemleri veriliyor. (Denklemlerin elde edilmesinde computer kullanıldığını belirtmekte yarar var). Son olarak deneylerden elde edilen sonuçlar sıralanmakta ve yapılan işlerin genel bir eleştirisi verilmektedir.

### Summary

Rules of time-dependent deformation and stages of a classical creep curve are defined. The factors effecting creep are examined. Empirical, phenomenological and theoretical approaches to creep mechanism are discussed with necessary formulas and rheologic models.

The methods of creep observations and samples experimented are introduced. The equations of each creep curve are given and affects of various factors examined and lastly a general criticism is made.

(\*) Maden Y. Mühendisi - M.T.A.

## I. GİRİŞ

Çoğunlukla her bilimin çok genelleşmiş kural v.e formülleri vardır. Bu genel kurallar o bilim dalındaki konuların pek çoğunu kapsarlar. Elektrikte  $V=IR$ , mekanikte  $F=ma$ , madde-enerji ilişkisinde  $E=mc^2$  bunların örnekleridir.

Kaya mekaniğinde ise bu şekilde genelleşmiş kurallar henüz yoktur. Bunun nedeni kaya mekaniğinin konusunun gösterdiği özelliştir. Konu: Kayadır, taştır, doğal kayasal yapılardır. Kayalar homojen değildir. Oluşumları insan kontrolünün dışında olmuştur. Birbirinin tıpa tıp aynı iki taş yapısı bulunamaz. Hatta aynı taş yapısı içinde birer metre aralıkla alman iki örnek bile aynı özellikleri göstermez. Bu yer-kabuğunun doğal özelliğidir. Dolayısıyla kaya mekaniğinde çok genel kurallara rastlanmaz. Her olay belli özellikleri ile tanımlanır.

Yorulma, kaya mekaniğinin bir özel dalıdır. Bazı genellemeler varsa da, her yorulma olayının özel formül ve modelleri vardır.

Bu çalışma, yorulma konusunda yapılan özel bir laboratuvar araştırmasıdır. Bu şeküde yapılan binlerce deney ve araştırma gelecekte toplandığında, kaya mekaniğinde çok genel kurallara gidilmesi sağlanabilecektir.

Burada, çalışmada, yorulmaya etki eden etkenler incelenmiştir. Zamana bağlı yorulmaların grafikleri çizilip denklemleri ve bunların geçerliliği tartışılmıştır.

## H. TANIMLAR

### A. Yorulma

Yorulma, zamana bağh bozulma yada bir maddenin elastik basınç limitinin altında, sürekli ve fakat yavaş bozulması olarak tanımlanır (1). Zamana bağh olan yorulma, çeşitli etkenlerin, örneğin uygulanan basınç yada yük, kayanın mekanik ve minerolojik özellikleri, deney ortamı vs.. etkisiyle örnek taşın kırılmasına sebep olabilir.

## B. Rheoloji

Rheoloji, maddelerin bozulmalarını ve akmalarını inceleyen bilim dalıdır. Terim geneldir. Akma'da bütün etkenleri zamanın fonksiyonu olarak inceler (5). Bükülebilme, kıvrılabilme özellikleri olmayan, ana özellikleri "gevrek kırılma" olan bazı kayaların, bazan yer kabuğunda gayet kıvrımlı bir durumda oldukları görülmüştür. Zaman etkisi hesaba katılmazsa bu durumun açıklanması olanaksızdır. Böyle bir evrimin bilimsel yorumu Rheolojinin konusudur.

## C. Genel Mekanik

Genel mekanik, madde noktalan ve bunların meydana getirdiği sistem veya rigid maddeler sistemi ile ilgilenir (5). Maddesel özellikler önemli değildir, örneğin güneş etrafında dönen gezegenleri ele alalım. Genel mekanik açısından önemli olan gezegenlerin kütleleridir. Gezegen suda mı oluşmuş, kayadan mı, lastikten mi, plastikten mi, bu genel mekaniği ilgilendirmez. Oysa bunların rheologyc özellikleri çok farklıdır: Su akar, lastik elastiktir, plastik plastiktir. Gezegenin güneş etrafındaki hareketi düşünülürse, bu ayrı maddelerin davranışı aynıdır. Oysa gezegenin içinde bunların birbirine göre hareketleri farklıdır.

## D. Ağdalılık

Ağdalılık (TI), belirli bir alana dik olan yönde birim hız değişimi varsa, bu alana etki eden kesme gerilmeğidir (22) :

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt}$$
$$\tau \frac{dt}{d\gamma} = \eta = \frac{\text{din}}{\text{cm}^2} \text{ sn} = \text{Bar. sn} = \text{Poise}$$

## m. YORULMA KURALLARI

Yorulma bazı kurallar içinde olur. Değişik etkenler değişik biçimlerde zamana bağlı yorulmayı etküler. Bunları, ayrıntıları

ile birlikte, incelemeden evvel klâsik bir yorulma eğrisini incelemekte fayda vardır.

## **A. Zamana Bağlı Yorulma Eğrisi**

### **1 — Ansal Bozulma**

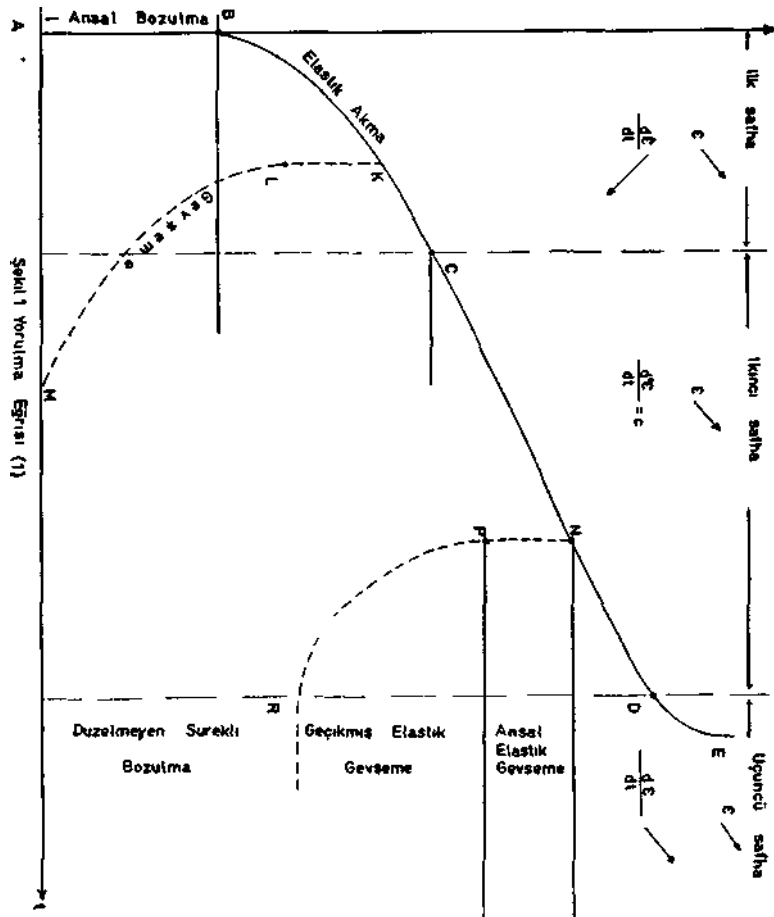
Bir örnek taş, elastik sınırının altında ansal olarak yüklendiğinde taşta ansal bir deformasyon olur. Buna ansal yorulma (1) denir. Olay şekil l'de görülmektedir. A-B arası ansal yorulmayı göstermektedir.

### **2 — Yorulmanın tik Safhası**

Bu safhaya geçici yorulma da denir. Bu safha şekü l'de B-C arasında gösterilmiştir. Zaman artarken deformasyon oranı artmakta ve ancak deformasyon oranının zamana göre artış hızı azalmaktadır. Artış oranı (eğriye çizülen teğetin eğinü) B noktasında hemen hemen sonsuzdur. C noktasına yaklaşırken, bu oran azalmaktadır. Bu aşamaya elastik akışkanlık ya da gecikmiş elastik deformasyon da denmektedir. Eğer örnek taş tamamen elastik ise ve yük, yorulmanın bu safhasında iken kaldırılırsa, ükin ansal bir boşalma, gevşeme olur (Şekü K-L arası). Daha sonra zamana bağlı gevşeme başlar ve bir M noktasında deformasyon sıfıra ulaşır. Şeküde L-M arasında gösterilen bu durum zamana bağlı elastik gevşeme diye adlandırılır. Elbetteki eğer örnek taş plastik karakterde ise deformasyon hiç bir zaman sıfıra ulaşamaz ve belli bir değerde değişmez kalır (12).

### **3 — Yorulmanın İkinci Aşaması**

Bu aşamadaki deformasyon düzenli diye de adlandırılır (12). Bu safhada zaman artarken deformasyon oranı da artar. Ancak deformasyon oranının zamana göre orantısı değişmez. Şekü l'de, C-D arası bu safhayı göstermektedir. Yük kaldırıldığında deformasyonun tamamen sıfıra ulaşması, örnek yüzde yüz elastik te olsa ,bu aşamada artık olanaksızdır. İlkin elastik



bir gevşeme olur (N-P arası), sonra gevşemenin zamana göre oranıtısı giderek azalır ve sıfıra ulaşır (R noktası). Bundan sonra deformasyon sonsuza dek değışmez bir değerde kalır.

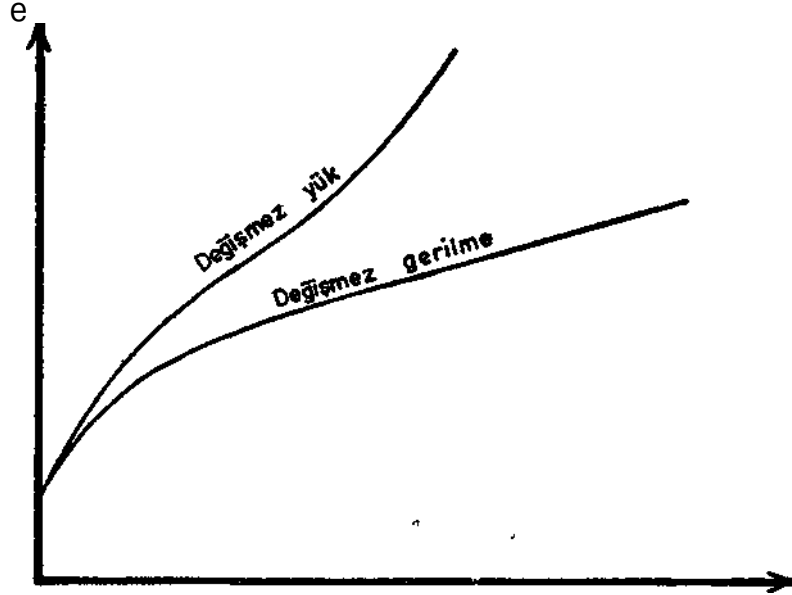
#### 4 — Yorulmanın Üçüncü Aşaması

Bu safha çok kısa sürer. Bu süre bazan bir kaç dakika ve bazan da bir iki saniye kadardır. Hem deformasyon oranı hem de bunun zamana göre oranıtısı, oldukça hızlı bir şekilde artar. Deney parçası E'de kırılır. Bu safha hakkında bu gün çok az şey bilinmektedir.

### B. Yorulma Olayına Etki Eden Etkenler

#### 1. Uygulanan Gerilme ya da Yük

İlkin "değişmez yük" ile "değişmez gerilme" arasındaki kavram farkını açıklamakta yarar vardır. Değişmez yük ile değişmez gerilme arasındaki fark şekil 2'de gösterilmiştir.

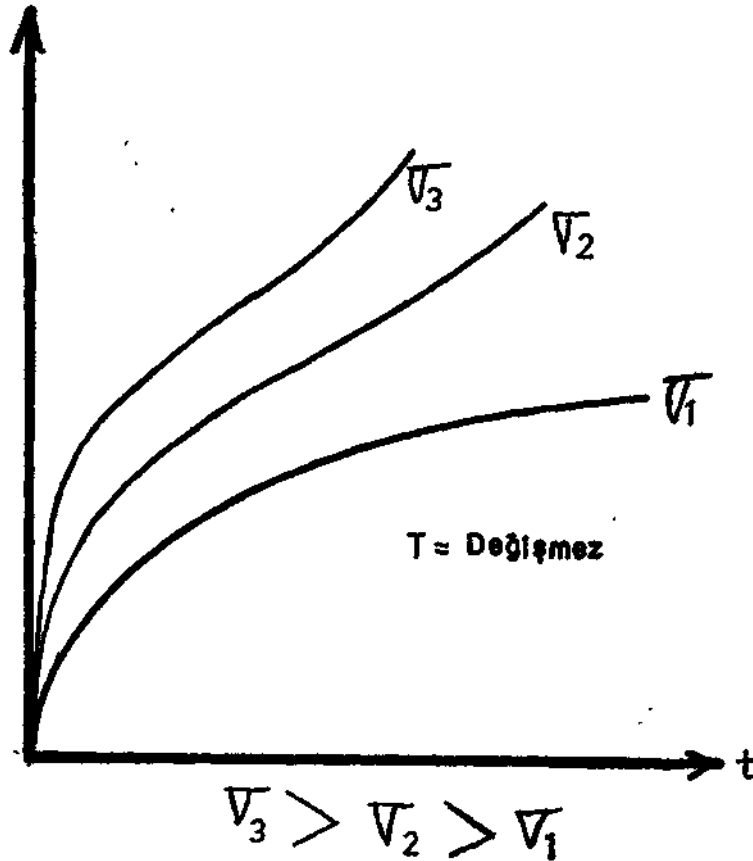


Şekil 2 — Değişmez yük ile değişmez gerilme arasındaki fark (22)

Bir örnek değişmez yük altında deforme olur. Bir tele asılan değişmez bir yükün telde yaratacağı normal gerilme, yük/telin kesit alanı'dır. Ancak zamanla tel uzar. Uzayınca kesit alanı küçülür. Yük değişmez kalmasına rağmen kesit alan değiştikten gerilme değişir. Değişmez basınç yaratmanın çok çeşitli yolları vardır. Ancak burada buna değinilmeyecektir.

Değişik gerilmelerde yorulma eğrisi: Uygulanan gerilme miktarı deformasyon'a ve deformasyon oranına etki eden önemli bir etkidir. Bu konuda deneysel bir formül de şudur:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = C \sigma^n \quad (1)$$

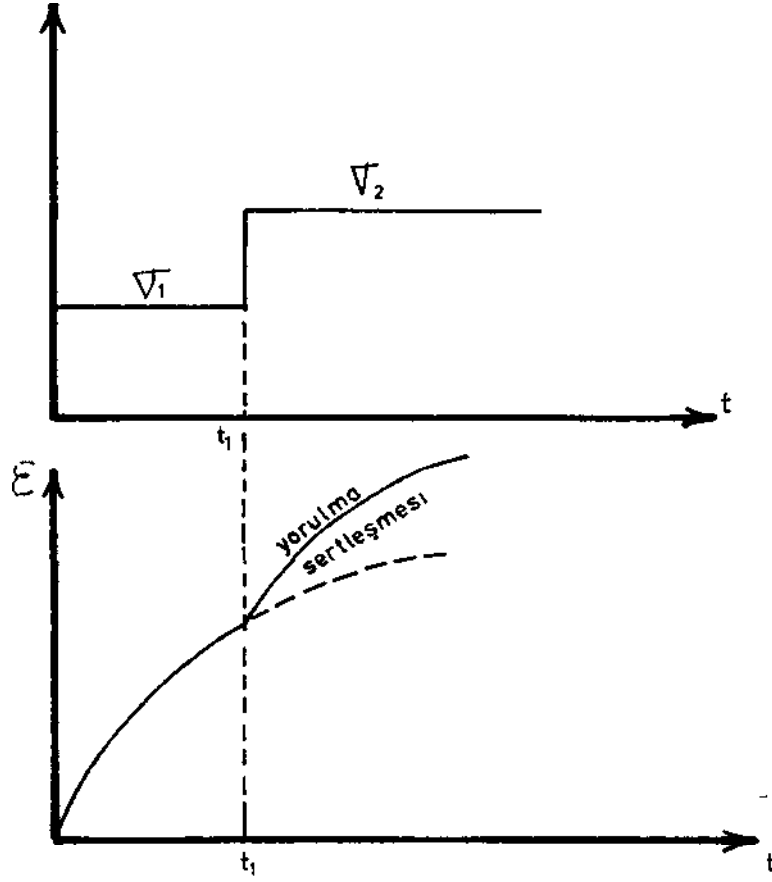


Şekil 3 — Deđiđik gerilme seviyelerinde değişik yorulma eğrileri (9,13)

Burada üst "n" deney parçasını oluşturan kayanın cinsine ve uygulanan gerilme miktarına bağlı bir değerdir. Düşük gerilmelerde genellikle  $n = 1$  civarındadır. Yüksek gerilmelerde  $n = 5$  ve daha da fazla olabilmektedir.

Uygulanan gerilme düşük olduğunda, deformasyon oranı/zaman da düşük olmaktadır. Değişik gerilmelerin etkileri şekil 3'de görülmektedir.

**Yorulma esnasında, gerilmenin değişmesi:** Yorulma olayı esnasında gerilmenin artması, deformasyonun da artmasına sebep olur. Bu olay "deformasyon sertleşmesi" olarak bilinir (13). Şekü 4 böyle bir değişmeyi göstermektedir.



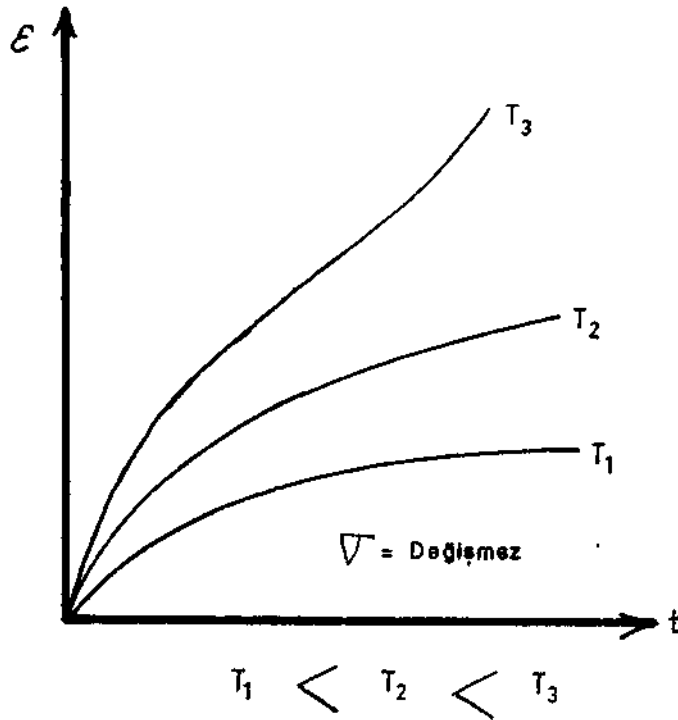
Şekil 4 — Yorulma esnasında gerilmenin artırılması (13)



Deney parçasına ilkin  $f_1$  gerilmesi uygulanmıştır.  $t_x$  zamanında gerilme  $f_1$ 'den  $f_2$ 'ye çıkarılmıştır. ( $f_2 > f_1$ ). Yorulma eğrisi de "yorulma sertleşmesi" durumuna girer. Eğer gerilme artırılmasaydı, normal yorulma kesik çizgi ile devam edecekti (Şekil: 4).

## 2. Sıcaklık

Diğer bütün etkenler değişmez tutulduğunda, sıcaklıktaki artış, yorulma değerlerini arttıracaktır. Şekil 5'de bu açıkça görülmektedir.



Burada deneysel olarak bulunmuş deformasyon oranı/zaman formülünü belirtmekte fayda vardır.

$$\frac{dz}{dt} = A \cdot t^{-n} \quad (9,11).$$

oluşturan taşın cinsine ve deney koşullarına bağlı değerlerdir. Sıcaklık arttıkça A değeri de artar.

Gazlarda, sıcaklığın artması ağırlığı arttırır, oysa sıvı ve katılarda sıcaklığın artmasıyla ağırlık azalır ve bu özellik de akmayı, yani zamana bağlı yorulmayı kolaylaştırır.

#### 5. Nem

Bir çok deneyler göstermiştir ki çevrenin izafi nemi azaldıkça yorulma/zaman oranı artmaktadır. Çevre nemi ile deney parçası taşın nemi dengeye ulaştıkça, artık yorulma nemden etkilenmemektedir (12,19).

#### 4. Deney Parçasını Oluşturan Taşların Minerolojik özellikleri

Bu konu, yorulma olayının "teorik açıklaması" kısmında geniş bir şekilde anlatılacaktır.

#### 0. Yorulma Olayının Mekanizması

Kayalarda yorulma olayının mekanizmasını açıklamak oldukça güçtür. Bunda en büyük etken, başlarda da sözü edildiği gibi, kayaların homojen olmayışıdır. Her deney parçası birbirinden farklıdır. Bunun içindir ki her yorulma deneyi, kendi özel karakterlerini de birlikte getirir. Değişik yorulma eğrileri bir "genel formül" ile belirlenmemektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı, yorulma olayım üç ayrı yaklaşımla incelemek gerekliliği doğmuştur. Bu yaklaşımlar:

#### 1. Deneysel Yaklaşım

Burada esas amaç, zaman-deformasyon oranı/zaman değerlerini gözetlemek ve yorulmayı, gerilme, sıcaklık ve diğer değişkenlerin fonksiyonu olarak belirlemektir. Deneysel sonuçlar matematiksel formlere çevrilebilir. Belli deney koşulların-

da, sonuçlar matematiksel olarak belirlenir. Yorulma eğrisini çok iyi tanımlayan bu yaklaşımın eksik yanı, deformasyon olayının mekanizması hakkında çok şey söylememesidir.

a. Yorulmanın İlk Aşaması

Bu safhadaki yorulma eğrisini belirlemek için bazı formüller vardır. Bunlar üslü formül, logaritmik formül, hiperbolik formül, sinhiperbolik, coshiperbolik ve/veya bunların kombinasyonu ile elde edilen formüllerdir.

Genel olarak:

$$\frac{de}{dt} = A \cdot t^{-n} \quad (9,11)$$

Eğer  $n=1$  ise

$e = A \log t$  (9) bulunur. Bu formül ya " $\infty$  yorulma" ya da "logaritmik yorulma" denklemleri diye adlandırılır. Ancak formülün bazı noksanlıkları vardır.

$t$  zamanının (0) olduğu yerde, formüle göre  $e = -\infty$  dur. Bu ise yorulma gerçeğine aykırıdır. Daha geçerli olması için formülde bazı değişiklikler yapılması gerekli olmuş ve yapılmıştır. Düzeltilmiş formül şöyle:

$$e = A \log (1 + Bt)$$

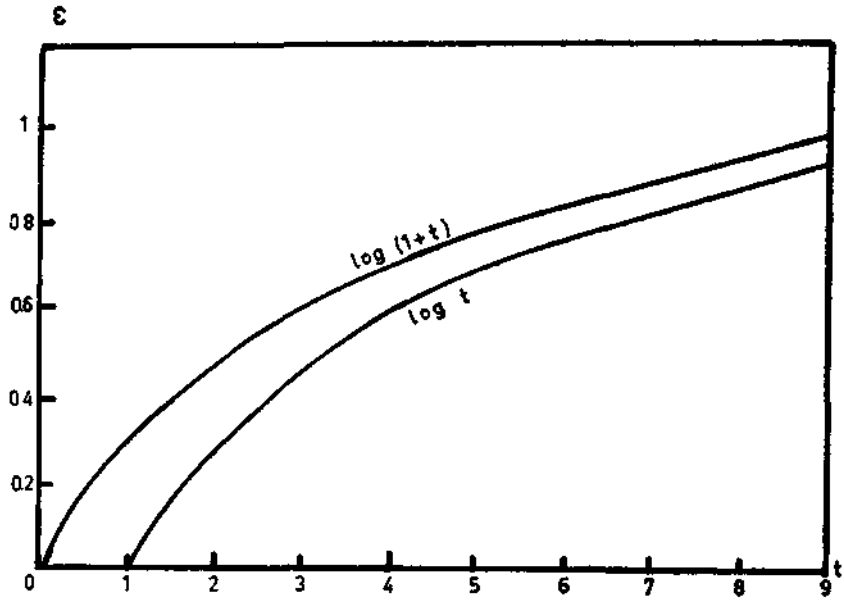
Burada  $t = 0$  iken  $e = 0$  olur.

$e = \log t$  ve  $e = (1 + t)$  eğrilerinin gösterdiği farklılıklar şekil 6'da gösterilmiştir.

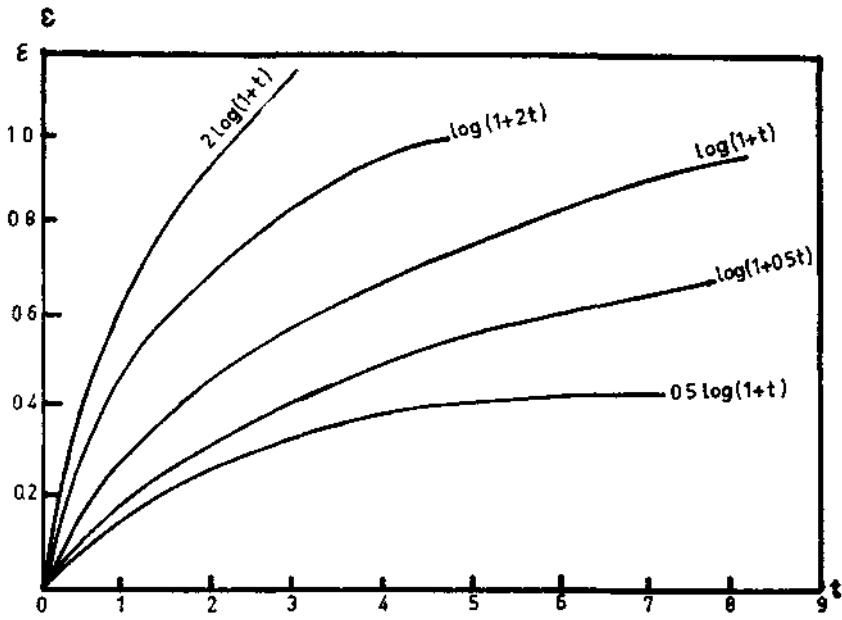
Logaritmik formüller içinde en uygun olanı

$e = A \log (1 + Bt)$ 'dir. Değişik A ve B değerlerine göre elde edilen eğriler şekil 7'de gösterilmiştir.

Deformasyonun ve deformasyon/zaman oran değerlerinin daha yüksek olduğu yorulmalarda  $n = 2\beta$  olarak alınır ve bu yorulma " $\beta$  yorulması" diye adlandırılır.



Şekil 6 — Log (1+t) ve log t eğrileri (4)



ŞekU 7 — A Log (1+Bt) eğrileri (4)

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A t^{-2/3}$$

$$\varepsilon = 3 A t^{1/3} = \beta t^{1/3} \quad (9) \text{ bulunur.}$$

Genel formülde  $n \longrightarrow -n$  olursa,

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A \cdot t^n \quad \text{olur.}$$

$$\varepsilon = \frac{A}{n+1} t^{n+1} \quad (9,14) \text{ bulunur. Bu da üs formülü}$$

olarak bilinmektedir.

Hiperbolic sine formülleri de aynı amaç için kullanılmaktadır. Genel olarak,

$$E = A + B \operatorname{smh}(ct^{1/3}) \text{ kullanılır.}$$

Yorulmanın ilk safhası için kullanılan diğer formülleri de şöyle sıralayabiliriz:

$$\varepsilon = a \operatorname{Log} (1+bt)^{2/3} \dots \text{ Mott ve Nabarro formülü (4)}$$

$$\varepsilon = at^m + bt^n + ct^p + \dots \text{ Graham formülü (4)}$$

$$\varepsilon = a \operatorname{Log} t + bt^n, \dots \text{ Wyatt formülü (4)}$$

b. ikinci Ađama

Bu safhada yorulma eğrisi bir doğru olarak belirlemektedir. Bu bakımdan formüle edilmesi çok daha basittir:

$$e = bt, \text{ yeterli bir formüldür.}$$

c Üçüncü Ađama

Üçüncü aşama hakkında henüz pek bir şey bilinmiyor. Dolayısıyla belli bir formül yazmak olanaksızdır.

## 2 — Olaysal Yaklaşım

Olaysal yaklaşım ile yük altındaki tasların durumları bazı fiziksel modellerle açıklanır. Bunun için de bazı reolojik modeller önerilmiştir. Bu modellere geçmeden önce, cisimlerin gerilmeye karşı gösterdikleri direniş özelliklerine göre sınıflandırılması yararlı olacaktır.

Paskal sıvısı (5) : Hidrostatik basıncı, Paskal sıvısının hacim değiştiremez. Yani cisim "sıkıştırılmaz" özelliğindedir. Bununla birlikte, cismi meydana getiren parçacıklar birbiri üstünden sürtünmesiz olarak kayarlar.

Euclid - Katısı: Parçacıkların birbirine; cismin içinde karşılıklı hiç bir iç-basma yoktur (5). Parçacıklar birbirlerinden bağımsızdır. Veya parçacıklar bir cisim meydana getiremezler. Bundan dolayı Euclid-Katısı, reoloji açısından enteresan değildir. Reolojinin konusu içine girmez.

Paskal-sıvısı ve Euclid-katısı matematiksel ideallerdir. Gerçek cisim değildirler. Bütün gerçek cisimler bu iki uç idealler arasında sıralanırlar. Euclid-katısı, genel mekaniğin konusudur. Hooke-katısı da elastik-teorisinin konusudur. Hidrodinamik Paskal ve Newton sıvılarıyla uğraşır.

Sınıflandırma şöyledir (5) :

Euclid-katısı, Gerçek cisimler (Hooke-katısı . . . Newton sıvısı) /Paskal sıvısı

Hooke-katısı için çelik, Newton-sıvısı için de su güzel birer örnektir.

### b. Reolojik modeller

Reolojik modellere geçmeden önce ilkel elektrik devreleri ile konu arasında bir benzerlik kurulabilir. Deformasyon oranları potansiyel (gerilim) farkı, gerilmeler de elektrik akınımına benzetilebilir. Seri bir devreden geçen elektrik akımı değişmez. Oysa toplam gerilim bütün birimlerdeki gerilmelerin toplamına eşittir. Seri bir bağlantıda gerilmelerin aynen iletildiği varsayımı kabul edilmiştir. Oysa toplam deformasyon her birimdeki

deformasyonun toplamıdır. Paralel bir devrede ise toplam deformasyon, paralel birimlerdeki deformasyonlara eşittir; tıpkı elektrik devresindeki voltaj durumu gibi.

i — Hooke-katısı (H); yay modeli (1,14, 20, 21)

Burada ideal bir özellik vardır. Tüm deformasyonlar tekrar düzelir. Basınç ve deformasyon ile gerilme arasındaki ilişki:

$$\sigma = \epsilon \cdot E$$

Bu çeşit katılar bir yay modeli üe gösterilir. Şekü 8'de böyle bir model gerüme-zaman ile deformasyon oranı-zaman eğri-leri gösterilmiştir.

ü — Ağdalı katı, Newton katısı-(doğrusal sıvı) Daspot modeli (1,14, 20, 21)

Değişmez bir gerilme, ağdah bir katıya uygulandığında, deformasyon zamana bağlı olarak artar. Yük kaldırılınca deformasyon geri düzelmez. Model, yük-zaman ve deformasyon oranı-zaman eğri-leri şekü 9'da gösterilmiştir. Burada uygulanan yük üe deformasyon oranı-zaman arasındaki ilişki şöyle-  
dir:

$$\sigma = \eta \frac{d\epsilon}{dt} \quad (5). \text{ Buradan}$$

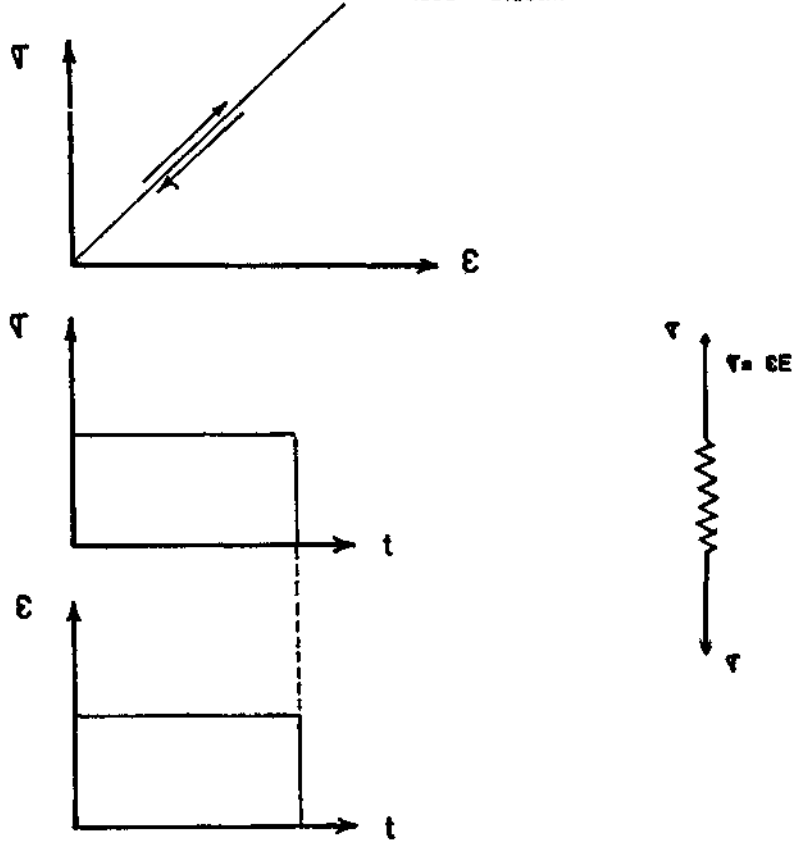
$$\epsilon = \frac{\sigma}{\eta} t \quad \text{bulunur.}$$

Kesme gerilmesi üe kesme-deformasyon oram arasındaki ilişki doğrusaldır ve bu doğrunun eğimi ağdalılık katsayısını yani  $O_i$ )'yı verir. Bu ilişki şekü 10'da gösterilmiştir.

iü — Maxwel Modeli

Ansal deformasyon üe yorulmanın ikinci safhasını kapsar. Ansal deformasyon sonra yorulma doğrusal olarak artar. Bir  $t_i$  anında yük kaldırılırsa yine ansal bir gevşeme olur. Daha sonra yorulma eğrisi zaman eksenine paralel olarak devam

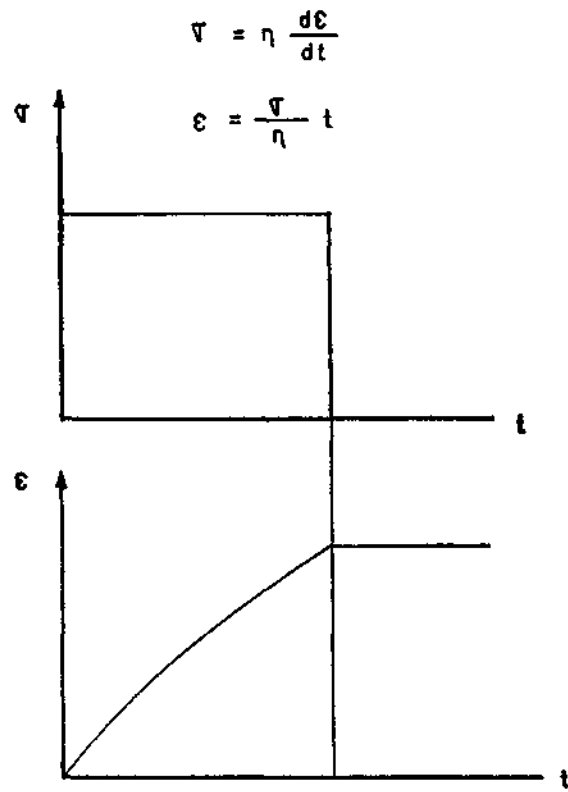
HOOKE KATISI (H)  
İdeal Elastik



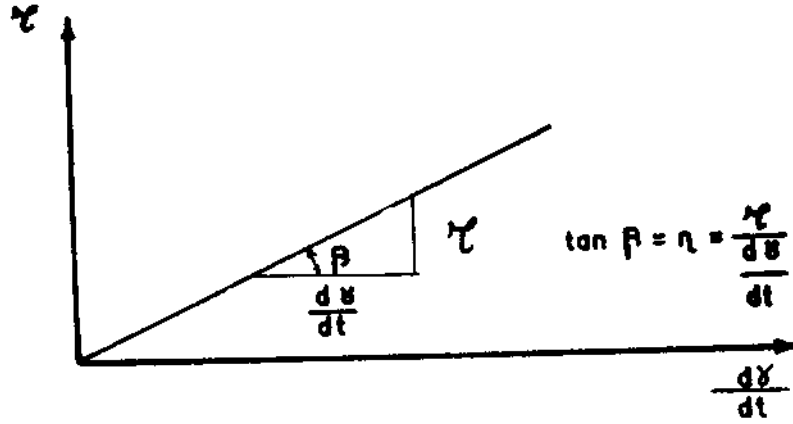
Şekil 8 – Hooke katısı (1, 14, 20, 21)



NEWTON



Şekil 9 — Ağdalı kata-doğrusal sıvı (1, 14, 21)



Şekil 10 — Kesme gerilmesi ile kesme deformaasyon oranı arasındaki ilişki (21)

eder. Bu model bir yay ile bir daspotunu (silindir-piston) seri olarak bağlantısıdır. Şekil 11'de bu model görülmektedir. Ansal deformaasyon yayın elastik özelliğinden dolayıdır ve  $\frac{\sigma}{E}$ 'ye eşittir. Yorulmanın denklemi:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} t \quad \text{dir.}$$

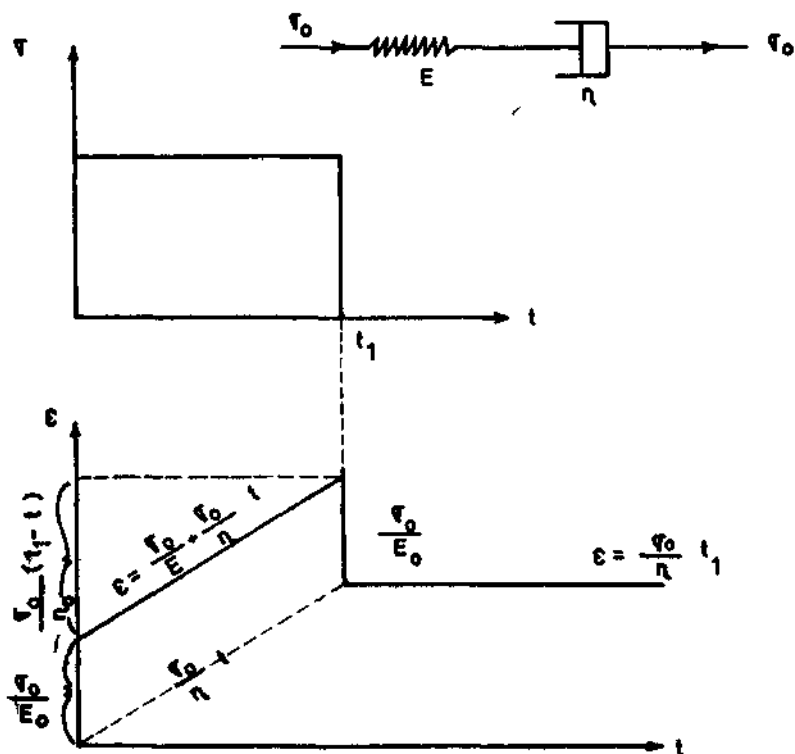
iv — Kelvin (Voigt) Model (1, 14, 20, 21)

Bir dashpot ile bir yayın paralel bağlanmasından meydana gelen bir modeldir. Burada ansal deformaasyon yoktur. Ancak yorulmanın ilk safhasını kapsar. Denklemi,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left( 1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} \right) \quad \text{şeklindedir.}$$

Yük kaldırıldığında, ansal bir boşalma olmaz. Deformaasyon azalması zamana bağlı olarak giderek oluşur. Deformaasyon azalması denklemi,

MAXWELL MODELİ



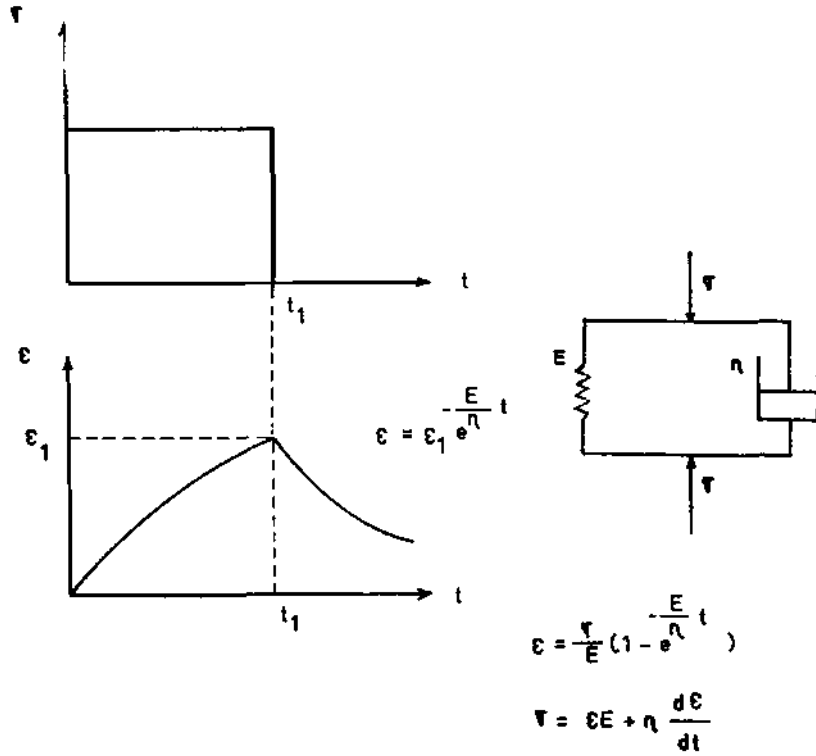
$$\frac{dE}{dt} = \frac{\tau_0}{E} + \frac{dF}{dt} \Rightarrow \frac{d\tau}{dt} = -\frac{E}{\eta} \cdot \tau_0 \cdot \frac{F}{\tau}$$

Sekil 11 - Maxwell model (4, 14, 20, 21)

$$\epsilon = \epsilon_1 e^{-\frac{E}{\eta} t} . \text{ Burada görüldüğü üzere } (t = \infty) \text{ son-}$$

suz zamanda bu düzelme tam olur. Şekil 12'de bu model görülmektedir.

### KELVIN (VOIGT) (K)



Şekil 12 — Kelvin (Voigt) modeli (1, 14, 20, 21)

### v — Diğer Modeller

Burada sıralananların dışında daha birçok modeller vardır. Örneğin Zener modeli, Maxwell ve Voigt karmaşığı, Burger modeli vs.

### 3 — Yorulma Mekanizmasına Teorik Yaklaşım

Bu yaklaşım gerilme altındaki taşların minerolojik özelliklerini ve bunların değişimini inceler. Taşlar, gerilme altında değişik deformasyon özellikleri gösteren mineral taneciklerinden oluşmuştur. Kalker hariç tutulursa, tortusal kayalar genellikle kalkerli veya killi bağ maddeleriyle birbirine yapışmış Quartz taneciklerinden oluşur. Mağmatik ve metamorfik kayalar ise genellikle mekanik bağlarla birbirine bağlanmış bir takım kristallerden oluşmaktadır (1).

Değişik deformasyon özellikleri olan minerallerden meydana gelen bir taş, gerilme altında tutulduğunda, elastik özellik gösteren bir mineral ansal olarak deforme olur. Oysa ağdalılık özeliği gösteren komşu bir mineral ansal olarak deforme olmaz; ancak yavaş yavaş başlayan bir deformasyon gösterir. Yük kaldırıldığında, daha elastik olan mineraller ansal olarak boşanıp düzelmeye çalışır. Ancak ağdalılık özeliği gösteren ortam bunu engeller. Tortusal kayalarda ağdalılık özeliği gösteren madde kalkerli veya killi bağlantı maddeleridir.

Elastik deformasyon genellikle ansal olan deformasyondur. Daha sonraki deformasyonlar elastik olmayanlardır. Bu ise cismin atomik yapısındaki şeküsel değişimelerdendir. Bir kristalin yapıda bu, bir kristal blokun diğeri üzerinde, şekil 13 de görüldüğü gibi kayması şeklinde olur (7).

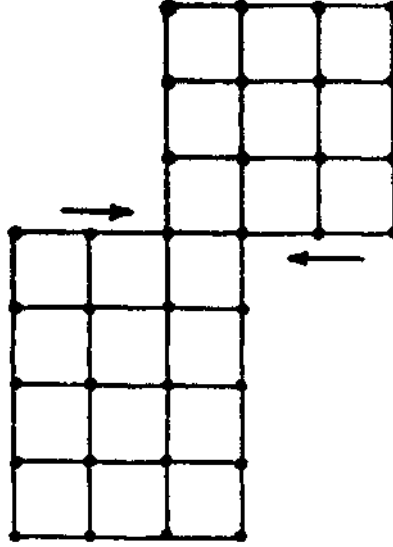
Bir polimerde ise, zayıf bağlı polimer zincirlerinin kopması şeklinde belirlenebilir.

Tekrardan kristalize olma, yüksek sıcaklıkta dikkate alınması gerekli olan bir olaydır.

#### IV — MADEN PLANLAMASINDA YORULMA

Yeraltı ocaklarında yorulmanın etkisi yok denecek kadar azdır. Zaten madencilik felsefesi, yeraltından (veya üstünden) değerli madenleri mümkün olduğu kadar çabuk çıkartmaktır. Üst tabakaların gevşeme, bozulma ve kırılma veya yı-

kılma (çökme) lan belli bir zaman ister. İşte madenci bu zamandan evvel işini bitirmelidir. Yani madencilik dinamik bir iştir. Dolayısıyla yorulma pek söz konusu olmaz. Ancak oda ve topuk yönteminde topuklarda bazı yorulmalar gözetlenmiştir.

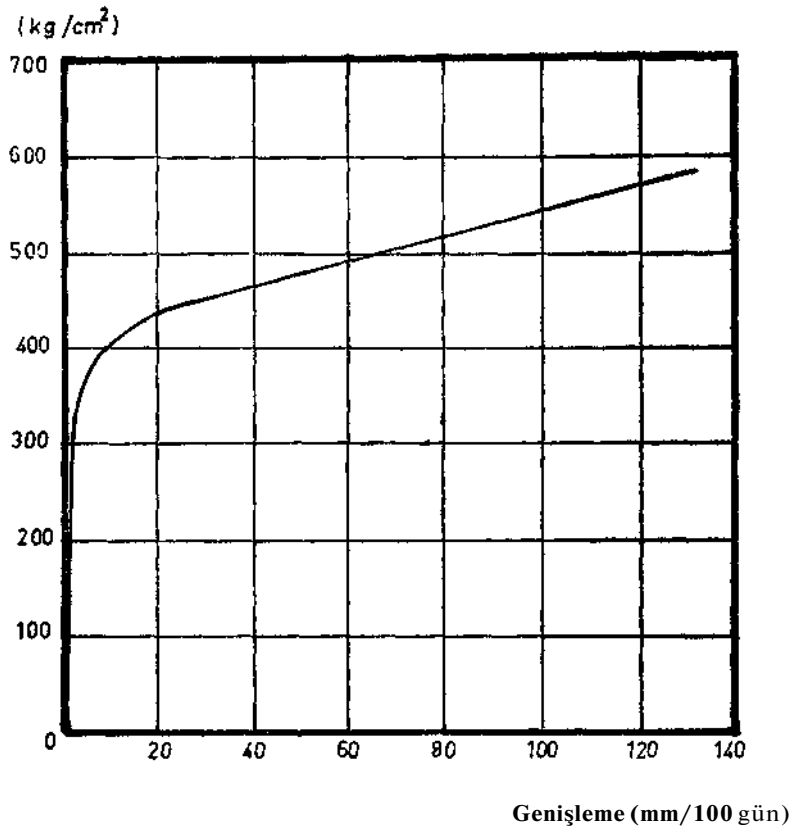


Şekil 15 — Kristal kayma (7)

Yeraltında yan basınç önemli bir etkidir. Belli bir sınıra kadar yan basınç yorulmaya fazla bir etkisi olmaz. Ancak o sınır aşıldığında, yan basınç, kayaların plastik özelliğini artırır.

Ayrıca topuklardaki genişlik/yükseklik oranı da önemli bir etkidir. Pott bazı modeller üzerinde bu konuda bir çalışma yapmıştır (2). Daha çok gözlem niteliğinde olan çalışmaları için Pott bazı sonuçları tabloştırmıştır. Ona göre kaya tuzu topuklarında genişlik/yükseklik oranının değişik değerlerine göre kritik deformasyon değeri vardır. Bu kritik deformasyon oranları aşılnca tehlikeli durumlar ortaya çıkmaktadır.

Yorulmaya yatkın Potash yataklarının işletilmesinde, yorulma ile ilgili ilk bilgiler Höfer (2) tarafından ortaya konulmuştur. Şekil 14 Höfer'in gözlemelerini göstermektedir. Düşey



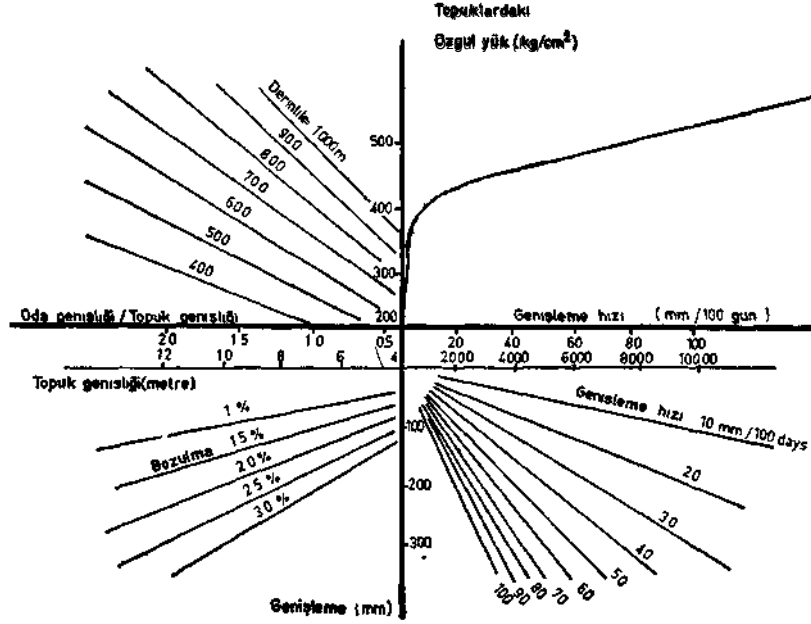
ŞekU 14 — Hitter\*!» gözlemleri

Tablo 1 — Pott'un Model Çalışmalarının Sonuçları (2)

Genişlik/Yükseklik	Kritik Deformasyon Oranı %
1.00	1.6
1.50	3.0
1.75	5.0
2.00	15.0

eksen topuğa gelen basıncı, yatay ekseninde topuğun enlemesine genişleme hızım (mm/100 gün) göstermektedir.

Höfer'in bulduğu en önemli sonuç şekil 15'de gösterilmiştir. Değişik boyutlardaki topukların (Potash'ta) seçimi ve bunlardaki genişlemeler grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 15 — Höfer'in gözlemleri

## V. DENEYLER

### A. Yorulma ölçme Yöntemleri

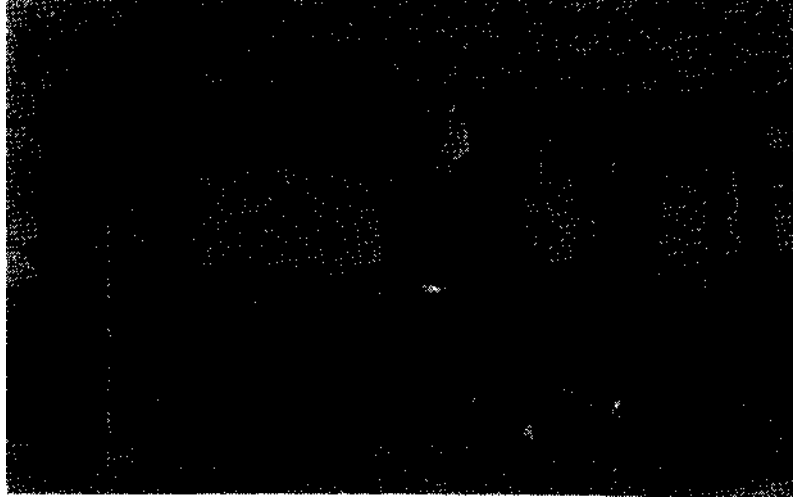
Yorulma ölçümlerinde genel prensip deney parçası üzerinde değişmez bir gerilme sağlamaktır. Bu da herhangi bir pres üe mümkün olamamaktadır. Devreye eklenen bir gas sistemi ile değişmez basınç sağlanabilir. Sonraki problem deformasyonları gözlemektir. Bunun da değişik yolları vardır. Deformasyon, örneğin, duyarlılığı  $10^{-6}$  inch olan mekanik göstergelerle dolaysız olarak ölçülebilir. Optik yollarla da ölçü almak mümkündür. Deformasyon gözlemlerinde en duyarlı yol elektro-mekanik yöntemdir.



## B. Yapılan Deneylede Kullanılan Gözlemi Yöntemleri

### 1 — Salt Mekanik Gözlemler

a. Örnek taşlar prizmatik şekilde kesilerek hazırlandıktan sonra şekil 16'da görülen, demirden yapılmış bir iskelet üzerine yerleştirilir. Yük tam orta noktadan asılır. Yükün asıldığı yerdeki belverme mekanik bir gösterge üe gözlenerek ölçülür.



Şekil 16 — Demir iskelet, yükün asılması

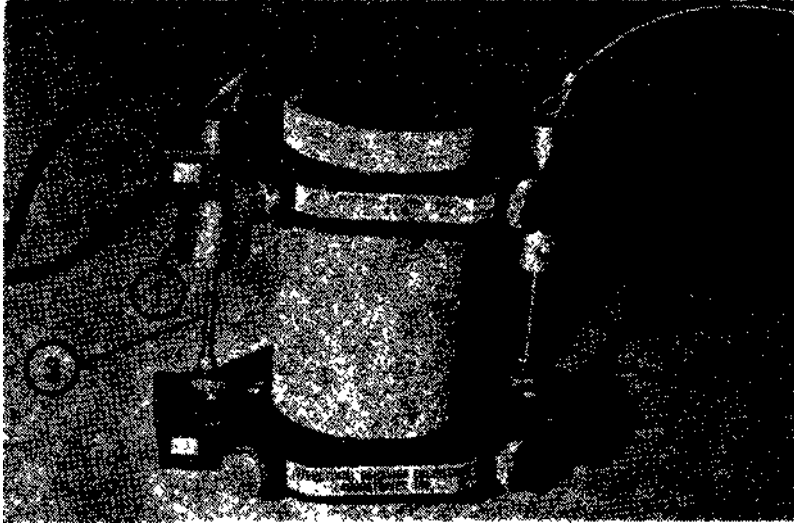
b. Prizmatik deney parçası bir ucundan tutturularak, öteki ucu kendi ağırlığı üe eğümeğe bırakılır. Deney parçasının serbest ucuna mekanik bir gösterge yerleştirilir, şekil 17.

### 2 — Elektro-Mekanik Gözlemler

Silindirik deney parçaları üzerinde uygulanan bir yöntemdir. Deney parçası 10 000 lb kapasiteli presin altına "deformasyon kelepçesi" ile birlikte yerleştirilir (Şekü 18). Bu kelepçelerde iki tane bobin ve mekanik deformasyonu, elektrik sinyallerine çeviren ve bobinin içinde hareket eden yumuşak, küçük demir çubuklar vardır; deformasyon arttıkça çubuk bobi-

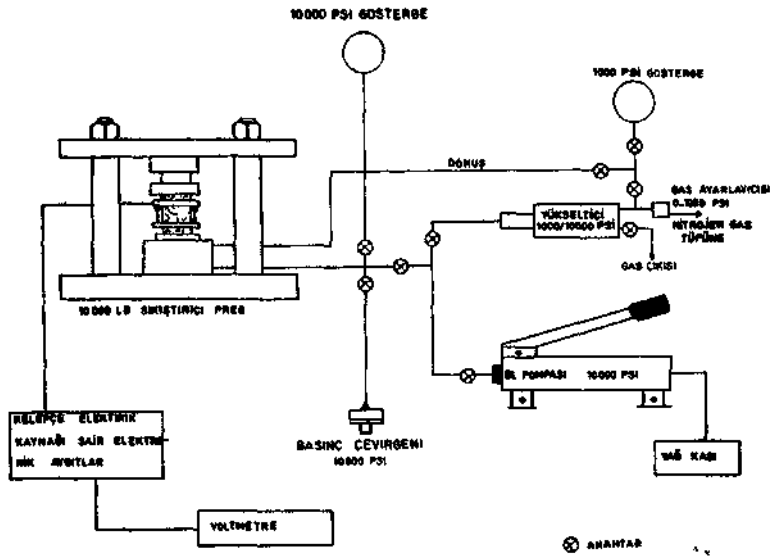


Şekil 17 — Bir ucundan kelepçelenmiş prizmalar



Şekil 18 — örnek taş ve bozulma kelepçesi  
1 - 2 Bobin, 3 - 4 Yumuşak demir çubuklar

nin içine daha çok girer ve bir indüksiyon gerilimi meydana gelir. Bu gerilim değişik zamanlarda ölçülür, belirli formüllerle işleme sokularak deformasyon duyarlı bir biçimde ölçülür. Gerilmenin değişmezliğini sağlayan bir de gas sistemi vardır. "Sistem 408" adıyla bilinen bu aygıtlar gurubu şematik olarak şekül 19'da görülüyor.



Şekil 19 – Sistem 408

c. Deneylerde kullanılan deney parçaları: Deneylerde üç çeşit deney parçası kullanıldı. Andezit, kireçtaşı ve traverten, Andezit Yenimahalle taş ocaklarından, kireçtaşı da Yalıncağ-özü taş ocaklarından seçildi. Traverten'in ise ana kaynağı bilinmiyor. O.D.T.Ü. bahçesinde merdiven taşı olarak kullanılmak üzere depolanmıştı. Andezit ve kireç taşı taze, bozulmamış, (İklimsel etkilerden etkilenmemiş) oysa traverten hayli etkilenmiş durumda idi.

#### 1 – Traverten ve Andezit Prizmatik Deney Parçaları

Bu parçalar M.T.A. Enstitüsü'nde hazırlandı. Andezit prizmalarının boyutları 4 X 4 X 90 cm.'dir. Traverten prizmaları-nın ise 4 X 4 X 62 cm. idi.

#### 2 – Silindirik (Karot) Deney Parçaları

Boyutları (çap = 5 cm., yükseklik = 10 cm) olan karot-lar O.D.T.U. kaya mekaniği laboratuvarında hazırlandı.

## D. Deneyler

### 1 — Prizmalarla Yapılan Deneyler

Traverten prizmaları tabakalanma gösteriyorlardı. Deney l'de traverten prizması bir ucundan kelepçelendi. Tabakalanma düşey durumdadır. Diğer uç kendi ağırlığıyla bozulmaya bırakıldı.

Deney 2: Traverten prizması deney l'deki gibi bir ucundan askıya alındı. Ancak tabakalanma yatay durumda ve deney parçasının uzunluğuna paralel idi.

Deney 3: Andesit prizması şekil 16'daki iskeletin üzerine kondu. Ortalama kırılma dayanımının %50.99'u olan 37.720 Kg.'lık yük asıldı. Deney parçasının ağırlığı 3.115 Kg. idi.

Deney 4: Boyutları aynı, ağırlığı 3.020 Ky. olan diğer bir andesit prizmasına aynı sistemde kırılma dayanımının %61.81'i olan 45.720 Kg. yük uygulandı.

Deney 5: Aynı boyuttaki ağırlığı 2.910 Kg. olan andesit prizmasına bu kez 57.720 Kg.'lık yük uygulandı. Bu değer, kırılma dayanımının %78.03'ü idi.

Deney 6: Boyutları ve ağırlığı aynı olan iki andesit prizması iki gün süre ile suda bırakıldı. Sonra biri hemen deneye kondu. Üzerine 37.720 Kg.'lık yük uygulandı. Diğer her saat tartıldı. İki prizmada da su kaybı aynı olacağı kabulü ile su buharlaşması zamana bağlı olarak hesap edildi.

Deney 7: Demir iskeletteki deformasyonu da hesap etmek için deney 3-4-5 ve 6'daki şartlar aynen yaratılarak demirdeki deformasyonlar ölçüldü.

### 2 — Karotlarla Yapılan Deneyler

Deney 8: "Sistem '408" de silindirik traverten karotu üe yapıldı. Deney parçasına 3000 psi'lik gerilme uygulandı. Gerüme yönü tabakalanmaya paralel durumda idi. Uygulanan 3000 psi'lik gerilme, elastik gerüme smır değerinin % 45.84 idi. Karot ağırlığı ise 495 gr. idi.

**Deney 9:** Silindirik traverten karotları değişik gerilme seviyelerinde yüklendi (3000, 2500, 1500, 1000 psi). Ancak burada gerilme yönü tabakalanmaya dikti. Karotlar en fazla yarım saat içinde kırıldı.

**Deney 10:** Kireç taşı karotuna 3000 psi'lik gerilme uygulandı. Bu değer elastik gerilme sınır değerinin %41.79 idi. Karotun ağırlığı 545 gr. geldi.

**Deney 11:** Andesit karotuna 3000 psi'lik gerilme uygulandı ki 3000 psi elastik gerilme sınırının % 41.80 idi.

**Deney 12:** Diğer bir andesit karotuna 4000 psi'lik gerilme uygulandı.

## E. Bozulma Eğrilerinin Denklemleri

- (1) Deney 1  
 $d = 0,1058 t^{0,8}$  Yorulmanın ilk safhası  $0 \leq t < 3,0$  saat  
 $d = 0,01 \times 10^{-4} t + 0,08 \times 10^{-4}$  Yorulmanın ikinci safhası  $t > 30$  saat
- (2) Deney 2  
 $d = 0,04264 t^{0,725}$  ilk safha  $0 < t < 13$  saat  
 $d = 0,017 \times 10^{-4} t - 0,10543 \times 10^{-4}$  ikinci safha  $t > 13$  saat
- (3) Deney 3  
 $d = 193,24 t^{0,00011405}$  - - - - -  $0 \leq t < 5$  saat ilk safha  
 $d = 0,01 \cdot 10^{-4} t + 19322942 \times 10^{-4}$   $t > 5$  saat ikinci safha
- (4) Deney 4  
 $d = 250,1652 t^{0,00385508}$   $0 \leq t < 20$  saat ilk safha  
 $d = 0,124 \times 10^{-4} t + 257 \times 10^{-4}$   $t > 20$  saat ikinci safha
- (5) Deney 5  
 Dört dakikada kırıldı, formül elde edilemedi
- (6) Deney 6  
 $d = 27,57646 t^{0,1207}$   $0 \leq t < 10$  saat ilk safha
- (12) Deney 8  
 $t = 0,00077 \times 10^8 d^2 - 0,02631 \times 10^4 d + 127,6085$   $0 \leq t < 15$  saat ilk safha  
 $d = 0,604 \times 10^{-4} t + 536,37817 \times 10^{-4}$   $t > 15$  saat ikinci safha
- (16) Deney 10  
 $t = 0,00261 \times 10^8 d^2 - 1,64868 \times 10^4 d + 260,15308$   $0 \leq t < 15$  saat ilk safha
- (18) Deney 11  
 $d = 266,6681166 t^{0,03056874}$   $0 \leq t < 15$  saat ilk safha  
 $d = 0,225 \times 10^{-4} t + 315,46851 \times 10^{-4}$   $t > 15$  saat ikinci safha
- (19) Deney 12  
 $t = 0,00111 \times 10^8 d^2 - 0,56384 \times 10^4 d + 71,60307$   $0 \leq t < 30$  saat ilk safha

## VL SONUÇLAR

1 — Bir ucundan kelepçelenmiş traverten prizmalarında: Tabakalamna düşey olduğundan, ilk safhada akma hızı oram yatay olandan daha fazla fakat ikinci safhada durum tersine dönmektedir.

2 — Artan gerilme seviyesi, ük safha süresini uzatmaktadır.

3 — Artan gerilme seviyesi, deformasyon hızı oranını da arttırmaktadır.

4 — Deney parçasının içinde bulunan su, def ormasyon ve deformasyon hızı oranım ve yük kaldırdığındaki gevşeme miktarım arttırmaktadır.

5 — Prizmalarla yapılan deneylerde, ansal eğilme toplam eğilmeye göre oldukça fazla görülmektedir. Karotlarda da aynı şey gözlenmiştir.

6 — Ansal gevşeme/ansal deformasyon oranı bire yakındır. Bu da deney parçalarının elastik karakterde olduklarını gösterir.

7 — Demir iskeletteki deformasyon hem çok az hem de değişmez kaldığından etkisinin hesabı kolay olmaktadır.

8 — Formül bulmalarda çalışmalar sınırlı kalmıştır. Kayaların mekanik katsayılarıyla karşılaştırılabilecek formüller denenmemiştir.

9 — Deneyler sırasında mekanik katsayılar değişmez kabul edilmiştir. Oysa, elastik modül (E), ağırlık (TJ), rigid'lik modülü (n) deney süresince değişiklik göstermektedir. Bu durum ayrıca incelenmelidir.

10 — Teorik formüller pratik çalışmalarda kullanılmalı, pratikleştirilmelidir. Böylece birçok faydalar sağlanabilir.

11 — Bu çalışma aslında çok yetersiz bir çalışmadır. Bu konuda daha çok laboratuvar çalışması gereklidir.

### Yararlanılan Kaynaklar

1. Woodruff, S.D.: Methods of Working Coal and Metal Mines. Cilt 1. Londra, 1966.
2. Feynon, P.: Rock Mechanics and Mine Design, 1966.
4. Conway, J. B.: Numerical Methods For Creep and Rupture Analysis.
5. Reiner, M.: Lectures On Theoretical Rheology, 1960.
7. Murrel, S. A. ve Mısra, A. K.: Time Dependent Strain or "Creep" in Rocks and Similar Non-Metalic Materials., 1961-62.
9. Hardy, H. R.: Time dependent Deformation and Failure of Geologic Materials, 1959.
11. Cruden, D. M.: The Form of The Creep Law For Rock Under Uniaxial Compression. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Cilt 1 - 1964.
12. Price, N. J.: A study of The Time-Strain Behaviour of Coal-Measure Rocks International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Cilt 3, 1966.
19. Altımtay, E.: Creep Deformations in Reinforced concrete Beems, Master Tezi, O.D.T.Ü., 1967.
20. Reiner, M.: Deformation, Strain And Flow An Elementary Introduction to Rheology. Londra, 1969.
21. Scheidegger, A. E.: On The Rheology Of Rock Creep, 1970.
22. Andrade, E.N.C.: Viscosity and Plasticity. New York, 1951.
23. Ataman, T.: Kişisel danışma.
24. özkaya, t.: Kişisel danışma.
25. özdoğan, M.: Laboratory Determination of Dynamic Elastic Constants of Ankara Andésite By Resonant Frequency Techniques, Ankara, Master Tezi, O.D.T.U. 1973.

