

MIT Açık Ders Malzemeleri
<http://ocw.mit.edu>

12.113 Yapısal jeoloji

Bölüm 1: Sürekli ortamlar mekaniği ve reolojisi

Güz 2005

Bu materyallerden alıntı yapmak veya Kullanım Şartları hakkında bilgi almak için
<http://ocw.mit.edu/terms> ve <http://tuba.acikders.org.tr> sitesini ziyaret ediniz."

| | |
|--|-----------|
| Bölüm 1..... | 3 |
| Gerilme ve yamulma..... | 3 |
| 1.1 Gerilme (T&M, sayfa 128 -164)..... | 3 |
| 1.1.1 Giriş..... | 3 |
| 1.1.2 Gerilme tansörü..... | 4 |
| Bölüm 2..... | 4 |
| Yamulma: birinci kısım..... | 4 |
| 2.1 Okuma ödevi | 4 |
| 2.2 Yamulma I: yerdeğiştirme, yamulma ve terminoloji | 4 |
| 2.2.1 Yamulma ölçüsü..... | 5 |
| 2.3 Yamulma elipsoidi..... | 7 |
| 2.4 Yerdeğiştirme vektör alanları ve yamulma | 8 |
| 2.5 Yamulma için Mohr dairesi I : Sonsuz küçük yamulma | 9 |
| 2.6 Mohr daireleri II: Sonlu yamulma..... | 10 |
| 2.6.1 Yamulmamış hal koordinat sistemi..... | 10 |
| 2.6.2 Yamulmuş koordinat sistemi | 11 |
| Bölüm 3..... | 11 |
| Üçüncü hafta notları: İlerlemeli deformasyon..... | 11 |
| 3.1 Okuma ödevi | 11 |
| 3.2 Saf makaslama ilerleyen yamulma | 12 |
| 4. Bölüm..... | 12 |
| Reoloji kısım 1: İdeal malzeme davranışları..... | 12 |
| 4.1 Okuma ödevi | 12 |
| 4.2 İdeal davranışlar..... | 12 |
| 4.2.1 Elastik davranış - Hooke kanunu..... | 13 |
| 4.2.2 Viskoz davranış - Nevtoniyen akışkanları..... | 13 |
| 4.2.3 Visko-elastisite I: Maxwell kütleleri..... | 15 |
| 4.2.4 Visko-elastisite II: Kelvin kütleleri | 16 |
| 4.2.5 Diğer ideal reolojiler | 17 |
| 4.3 Çalışma ve gözden geçirme soruları..... | 18 |
| Bölüm 5..... | 19 |
| Reoloji kısım 2: Deneysel kaya deformasyonu, gerilme-yamulma eğrileri | 19 |
| 5.1 Okuma ödevi | 19 |
| 5.2 Deneysel kaya deformasyonu | 19 |
| 5.3 Deneysel kaya deformasyonu: fenomenoloji | 20 |
| 5.4 Sünümlü deformasyon: yamulma oranının ve sıcaklığın etkileri | 21 |
| 5.5 Gözden geçirme soruları | 22 |

Bölüm 1

Gerilme ve yamulma

1.1 Gerilme (T&M, sayfa 128 -164)

1.1.1 Giriş

Jeolojide incelediğimiz deformasyonları oluşturan kuvvetleri nadiren gözlemleriz. Gerçekte gerilmeyi doğrudan ölçemeyiz (gerilme ölçümleri, gerilmeye karşı davranışı bilinen malzemelerin deformasyonunun referans alınarak gözlemlenmesi ile yapılır). Bundan başka, yer bilimlerinin ana amaçlarından biri de gözlenen deformasyonların (faylar, kıvrımlar, dağ kuşakları v.b.) yardımıyla mekanizmayı anlamaktır.

Bu konuda anahtar kavram, doğrudan **kuvvet** kavramıyla yakından ilişkili olan **gerilmedir**.

Gerilme = Kuvvet / Alan

Bu tanımda, büyük bir alanı etkileyen kuvvetin, daha küçük alana uygulanan aynı kuvvetten daha az bir gerilmeye neden olacağı açıktır. Kuvvet vektör cinsinden olduğu için (yani doğrultusu ve büyüklüğü tanımlanmış) yukarıdaki eşitliği aşağıdaki gibi gösterebiliriz:

$$\vec{\sigma} = \frac{\vec{F}}{A} \quad (1.1)$$

$\vec{\sigma}$ gerilme vektörü veya çekme olarak adlandırılır ve belli bir düzleme göre tanımlanır. Gerilmenin birimi, kuvvetin (Newton) alana (metrekare) bölünmesidir. $\frac{N}{m^2}$ bir Paskaldır (Pa). Yerkürede gerilme alanının büyük bir kısmı $10^6 - 10^9$ Pa mertebesinde ve gerilme genelde megapaskal olarak (MPa) ifade edilir.

Mühendislik ve malzeme biliminde birimler, gerilme pozitif ise tansiyonal (gerilme) ve negatif ise kompresyondur (sıkışma). Yerkürede, gerçek tansiyonal gerilme aşırı derecede nadirdir. Ancak, biz zıt işareti kullanırız.

1.1.2 Gerilme tansörü

Bir düzlem üzerine etkiyen gerilme üç bileşenle ifade edilir: düzleme dik (normal gerilme) ve düzlemin yüzeyine teğet birbirlerine dik iki bileşen (makaslama gerilmeleri). Biz tüm yerküre ile ilgilendiğimiz için bu ifade aşağıdaki şekilde genelleştirilebilir:

Yüzeyleri koordinat eksenini boyunca uzanan küçük bir kütle düşününüz. Bu yüzeyleri, yüzeye dik koordinat eksenine sahip x , y , z harflerini belirleyerek izleriz. Bu kütlede çıkardığımız sonuç, her çift yüzeydeki yüzey gerilmelerinin diğer yüzey çiftlerindeki yüzey gerilmelerinden bağımsız olduğudur. Sonsuz küçük kütle tanımlayan birbirine dik üç yüzeydeki yüzey gerilmeleri bilindiğinde gerilmeyi tümüyle tanımlayabiliriz ve bu bölgeyi kesen herhangi bir düzlemin üzerindeki yüzey gerilmesini hesaplayabiliriz.

Bölüm 2

Yamulma: birinci kısım

2.1 Okuma ödevi

Twiss ve Moores: 15. Bölüm, özellikle sayfa 292-302. Sayfa 303'te başlayan farklı tipteki yamulmaların (saf makaslama, basit makaslama) tartışma bölümü. Sayfa 304-310 ilerleyen yamulma ve laboratuvarında kullanmak için faydalı temel bilgi ile ilgilidir.

W. Means (1976) *Stress and Strain* çok açık, iyi yazılmış ve kolay okunabilen iyi bir kitaptır. J. Ramsay and M. Huber (1983) *The Techniques of Modern Structural Geology, Volume 1: Strain Analysis* detaylı yamulma analizini içeren birçok örneğin bulunduğu şaşılacak derecede ayrıntılı bir kitaptır. Ancak, bu kitap "biraz fazla" olabilir.

2.2 Yamulma I: yerdeğiştirme, yamulma ve terminoloji

Yeterli derecede verilen farklı gerilmelerde malzeme deforme olarak karşılık verir. Bu deformasyonları biz **rijit kütle deformasyonları** ve **rijit olmayan kütle deformasyonları** olarak ayırt ederiz. Birincisi kütlelerin ötelenmesi ve rotasyonundan meydana gelir. İkincisi ise burkulması ve genişlemesi ile ilgilidir.

Diğer önemli ayrımlar ise **sürekli** ve **süreksiz** yamulma ile **homojen** ve **heterojen** yamulmadır. Homojen ve heterojen gerilmeler sıklıkla gözlem ölçeğinin bir fonksiyonudur. Ayrıca, doğal sistemlerdeki yamulma analiz edildiğinde en yaygın yaklaşım yamulmanın sürekli ve homojen olduğu yapısal alanların tayin edilmesidir. Bu şekilde incelemenin amacı sürekli ortamlar mekaniğinin araçlarını ve sürekli deformasyon fiziğini kullanabilmemizdir.

2.2.1 Yamulma ölçüsü

Çizgilerin uzunluğundaki değişimler

Açılardaki değişimler

Alan ve hacimdeki değişim

Çizgilerin uzunluğundaki değişimler:

3 önemli ölçü:

Elongasyon (uzanım)

$$e \equiv \frac{\Delta l}{l_i} = \frac{l_f - l_i}{l_i} = \frac{l_f}{l_i} - 1$$

Esneme, gerginleşme

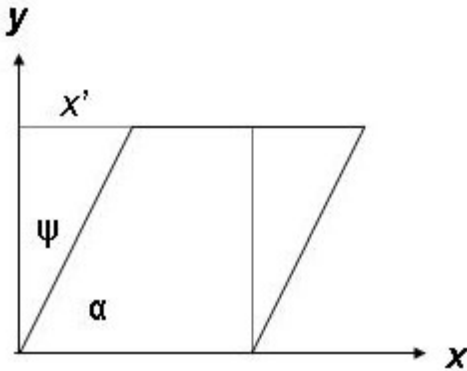
$$S \equiv \frac{l_f}{l_i} = 1 + e$$

İkinci derece uzama

$$\lambda \equiv S^2 = (1 + e)^2$$

$\lambda = 1$ 'in anlamı uzunlukta değişim olmadığıdır; $\lambda < 1$ kısalmayı yansıtır ve $\lambda > 1$ genişlemedir.

Açılardaki değişimler



Şekil 2.1: Başlangıçta birbirine dik çizgilerin izleyen yamulması

1. Birbirine dik iki çizgiyi alınız. Bu çizgiler arasındaki açı değişimi

$$90 - \alpha = \psi \equiv \text{açısal makaslama}$$

2. y ekseninde bir partikülü alınız. x doğrultusunda merkezden y mesafesine yerdeğiştirmeyi ölçün.

$$\frac{x}{y} = \gamma \equiv \text{makaslama yamulması}$$

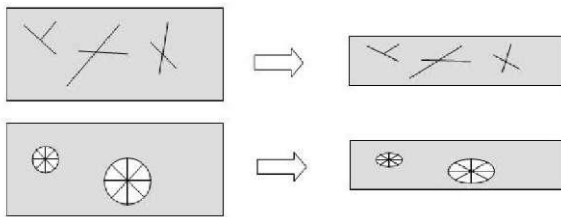
$\gamma = \tan \psi$ olduğuna dikkat ediniz.

Hacimde (veya alanda) değişim

Genişleme, uzama tanımına benzerdir.

$$\Delta \equiv \frac{V_f - V_i}{V_i} = \frac{\Delta V}{V_i}$$

Tüm bu ölçümlerde, referans noktası olarak deforme olmamış konumun kabul edildiğine dikkat ediniz. Uzunluk veya açıda deforme olmamış konumun referans noktası olarak alınması eşit derecede mümkündür. Büyük yamulmalar için hiçbiri iyi olmamakla birlikte başka bir alternatifi uygulamak için iyi bir sebep de yoktur. Azalan anlık deformasyon altında artan yamulmaya karşılık gelen **sonsuz küçük yamulma** genelde faydalı bir kavramdır.



Şekil 2.2: Malzeme çizgileri ve yamulma belirteçlerinin bükülmesi

2.3 Yamulma elipsoidi

Deforme olan bir kütlede malzeme çizgileri rotasyona uğrayacak ve şeklini değiştirecektir. Biz herhangi bir çizginin rotasyonunu ve uzamasını tanımlamak istiyoruz. Bir çember (üç boyutta bir küre) çizgilerin tüm oryantasyon olasılıklarını işaretlememize olanak verir. Homojen yamulma, çemberi bir elipse ve küreyi bir elipsoide dönüştürür.

Koordinat eksenine paralel küçük ve büyük yarı eksenler boyunca uzanan elipse dönüşmüş bir çemberi ele alınız. Büyük yarı eksenin uzama, genişleme ve ikinci uzaması aşağıdaki gibidir:

$$e_x = \frac{l_{fx} - 1}{1}$$

$$S_x = 1 + e_x = l_{fx}$$

$$\lambda_x = l_{fx}^2$$

Alternatif olarak, $l_{fx} = \sqrt{\lambda_x}$. Benzer şekilde $l_{fz} = \sqrt{\lambda_z}$. Elipsin denklemi $\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$. Burada a ve b yarı eksenlerin uzunluğudur. Yamulma elipsinin denklemi

$$\frac{x^2}{\lambda_x} + \frac{z^2}{\lambda_z} = 1$$

ve üç boyutta,

$$\frac{x^2}{\lambda_x} + \frac{y^2}{\lambda_y} + \frac{z^2}{\lambda_z} = 1$$

Daha genel olarak, yamulma elipsinin (üç boyutta elipsoid) yarı eksenleri, daha önce gördüklerimize benzer **asal yamulmalardır**. Yarı eksenlerin uzunluğu (S_1 , S_2 ve S_3) asal yamulmaların büyüklükleridir. Yamulma elipsoidi **tek eksenli**, **iki eksenli** ve **üç eksenli** yamulmaya karşılık gelen farklı şekillere sahip olabilirler. İki

eksenli yamulma elipslerinin çember kesitleri bükülmemiş olacaktır. Üç eksenli yamulmada ise tüm yönlerde eşit miktarda kısalma ve uzama olmasıyla birlikte çember kesitleri bükülecektir.

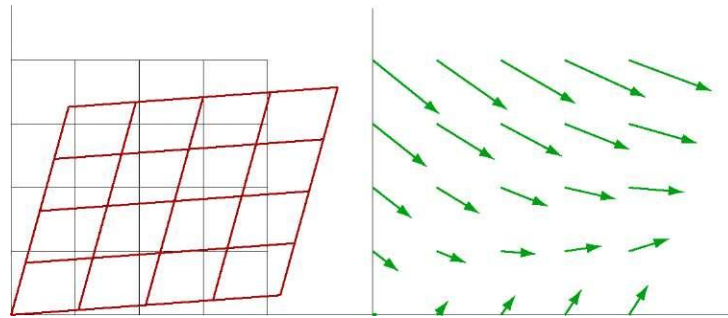
Şanslıysanız baktığınız kayaç kütlesi başlangıçta dairesel veya küresel belirteçler içerirler. Deformasyon, uzun ve kısa eksenleri asal yamulma eksenleri olan daire ve küreleri elipse dönüştürecektir. Konglomeradaki çakıllar veya ooidler, küresel yamulma belirteçlerinin oldukça iyi örnekleridir. Kurt oygu izlerinin küresel enine kesitleri de daha karmaşık olmasına karşın bu amaçla kullanılabilir.

2.4 Yerdeğiştirme vektör alanları ve yamulma

Yamulmayı analiz etmede bir diğer yaklaşım, partikül hareketlerini izlemektir. Partikülün deformasyon öncesindeki (x, y) konumu deformasyon sonrasındaki (x', y') konumuna gelmesi bir takım koordinat dönüşüm denklemleri ile ilişkilendirilebilir:

$$x' = ax + by$$

$$y' = cx + dy$$



Şekil 2.3: Genel, homojen yamulma için yer değiştirme alanı.

Eğer a, b, c, d sabit değerler ise yamulma homojendir (Şekil 2.3). İki önemli yamulma rejimi, **basit makaslama** ve **saf makaslama**dır (Şekil 2.4). Matris ile ifade edilen koordinat dönüşüm eşitlikleri:

$$\text{Basit makaslama: } \begin{bmatrix} 1 & \gamma \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{saf makaslama: } \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & 1/k \end{bmatrix}$$

Deformasyon genelde anlık değildir. Yamulma zaman içerisinde birikir. Bir tür yamulma diğer bir yamulmayı izler. Matematiksel olarak gerilme matrislerinin çarpımına eşittir. Matris çarpımının değiştirilebilir olmadığını, örneğin saf makaslamanın izlediği basit makaslama ile basit makaslamanın izlediği saf makaslamanın aynı sonuçları vermediğine dikkat ediniz.

Asal yamulma eksenlerinin oryantasyonu deformasyon süresince rotasyona uğramazsa bu yamulma rotasyonsuz veya koaksiyel "eş eksenli" olarak adlandırılır.

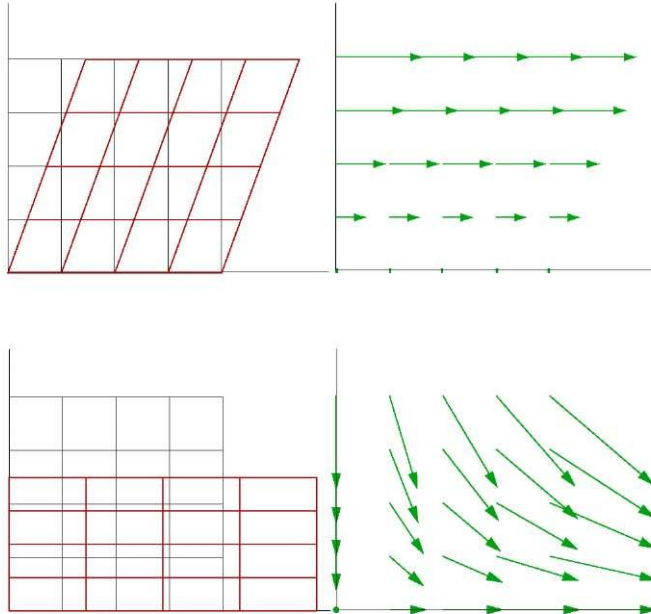
2.5 Yamulma için Mohr dairesi I : Sonsuz küçük yamulma

Sonsuz küçük yamulma, malzemenin gerilmeye tepkisini temsil eden kullanışlı bir kavramdır. Jeolojik zaman içerisinde sonsuz küçük yamulmadaki artış, jeologun yüzlekte **sonlu yamulma** olarak gözlemlediği ve anlamaya çalıştığı deformasyonu meydana getirir. Biz çalışmalarımızda "oldukça küçük" -yaklaşık % 1'den az- yamulmaları sonsuz derecede küçük olarak kabul ederiz. Mohr dairesi eşitliklerinde bu durum düşük açı kabullerinin yapılmasına imkan verir. Özellikle, $\gamma = \psi'$ dir.

Gerilmeyle birlikte, (1) uzama (sonsuz derecede küçük yamulma ϵ olarak adlandırılır) ve (2) verilen oryantasyon çizgisini etkileyen makaslama yamulmasının (γ) okunmasına olanak veren Mohr dairesi çizimi yapmak istiyoruz. Asal yamulmalar ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 olarak ifade edilir. Can sıkıcı türev (detaylar için Hobbes (1976)' yı inceleyebilirsiniz) şu şekilde ifade edilir:

$$\epsilon = \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \right) \cos 2\alpha$$

$$\frac{\gamma}{2} = \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \right) \sin 2\alpha$$



Şekil 2.4: Saf ve basit makaslama için yer değiştirme alanları

Mohr dairesi çiziminden elde edilebilir (bakınız Şekil 3.1). α malzeme çizgisi ile asal yamulma eksenleri arasındaki açıdır. Mohr dairesinin ε ve $\gamma/2$ koordinatlarına çizildiğine dikkat ediniz. Sonsuz derecede küçük gerilmeler ile ilgili Mohr dairesi alıştırmaları aşağıdaki önemli ilişkileri ortaya çıkarmıştır:

1. Maksimum makaslama yamulmasına maruz kalan iki çizgi vardır ve bu çizgiler asal yamulma eksenleri ile 45° açı yaparlar.
2. Maksimum makaslama yamulması $\gamma/2 \pm (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2$, yani $\gamma \pm (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ olarak verilmektedir.
3. Birbirlerine dik iki çizgi, Mohr çemberinde 180° lik açığa sahiptir. Bu nedenle eşit büyüklükte makaslama yamulmasına uğramakla birlikte ters işarete sahiptir.

2.6 Mohr daireleri II: Sonlu yamulma

Sonlu yamulmanın sonucu olarak, çizgiler uzar veya kısalır ve birbirlerine kesen çizgiler arasındaki açı genellikle değişir. Koordinat sistemine paralel eksenlere sahip elipse deforme olan bir birim çemberi ele aldığımızda, herhangi bir çizginin rotasyonu veya uzamasını (makaslama yamulmalarını) çıkarabiliriz. Bekleyeceğimiz üzere, Mohr dairesi çizimi oldukça önemlidir. Bu denklemlerin ortaya çıkışı oldukça sıkıcıdır ve Ramsay ve Huber bile ek bölümüne koymuştur (Kendi başınıza çözemiyorsanız Ramsay ve Huber, Ek D'ye bakınız). İki ayrı çizim vardır: birincisi, çizgileri "yamulmasız durumda" asal yamulma doğrultuları ile yaptıkları açığa göre tanımlar. Bu yol, çizgilerin oryantasyonlarının nadiren bilinmesi nedeniyle sınırlı olarak kullanıma sahiptir. Diğer çizim ise yamulma durumundaki oryantasyonlarla ilgilidir. Gerilme ve sonsuz derecede küçük yamulma ile birlikte çizginin oryantasyonu asal yamulma eksenleri arasındaki açı ile tanımlanır. Mohr dairesi çizimleri, uzama, makaslama yamulması ve çizginin oryantasyonunu birleştiren ve çember için parametrik eşitlikleri de meydana getiren denklemlerden oluşturulmuştur.

2.6.1 Yamulmamış hal koordinat sistemi

Yamulmamış koordinat sistemi, P çizgisinin deformasyon öncesi oryantasyonunu ifade etmektedir. Çizgi, asal yamulma eksenleri ile θ açısını yapar. Deformasyon sırasında çizgi uzar ve asal yamulma doğrultusu ile θ' açısı yaparak yeni P' konumuna döner (genelde koordinat sistemini ayırt edebilmek için asal sayıları kullanırız). İki boyutta belli bir çizginin makaslama yamulması ve uzaması, *deja vu* hissini uyandıran eşitliklerle verilmektedir:

$$\lambda = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{2} + \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)}{2} \cos 2\theta$$

$$\gamma = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2\sqrt{\lambda_1\lambda_2}} \sin 2\theta$$

Not: bu eşitlikler $\sqrt{\lambda_1\lambda_2} = 1$ olmadığı, yani genişleme olmadığı sürece bir çember oluşturmaz (bunun yerine Mohr elipsi elde edersiniz).

2.6.2 Yamulmuş koordinat sistemi

Genellikle kötü hale gelmiş iyi kayaçlarla karşılaşırız ve çizgiler arasında ölçtüğümüz açı yamulmuş konumu göstermektedir. Biz θ değil, θ' ölçeriz. İki koordinat sistemi arasındaki dönüşüm aşağıdaki eşitlik kullanılarak yapılır:

$$\sin \theta = \lambda^{1/2} \sin \theta' / \lambda_2^{1/2}$$

$$\cos \theta = \lambda^{1/2} \cos \theta' / \lambda_1^{1/2}$$

Özellikle biz aşağıdaki eşitlikleri tanımlarız:

1. Yeni yamulma parametresi $\gamma' = \gamma/\lambda$

2. Karşılıklı ikinci derece genişlemeler $\gamma'_{1'} = 1/\gamma'_{1'}$ ve $\gamma'_{2'} = 1/\gamma'_{2'}$

Mohr eşitlikleri

$$\lambda' = \frac{\lambda'_1 + \lambda'_2}{2} - \frac{\lambda'_1 - \lambda'_2}{2} \cos 2\theta'$$

$$\gamma' = \frac{\lambda'_2 - \lambda'_1}{2} \sin 2\theta' \quad \text{olur.}$$

Bölüm 3

Üçüncü hafta notları: İlerlemeli deformasyon

3.1 Okuma ödevi

İlerlemeli yamulma tarihçeleri Twiss ve Moores'daki Kısım 15.5'te bulunmaktadır (Sayfa 308ff). Ayrıca, sayfa 352-357'yi okuyunuz (makaslama zonlarında yamulma). Bu tür konuların incelemesi, Passchier ve diğ. (2005) *Microtectonic* kitabının giriş bölümlerinde de bulunabilir.

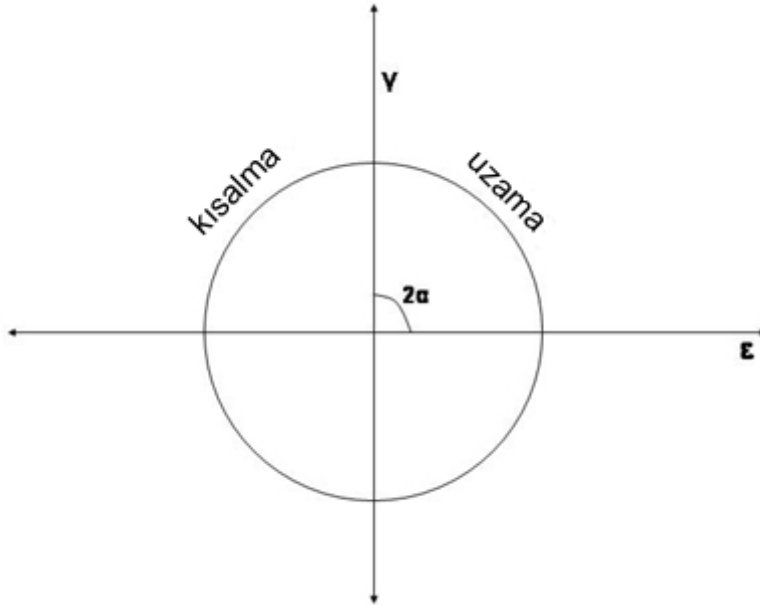
3.2 Saf makaslama ilerleyen yamulma

Derste, ilerleyen yamulmaya uğrayan farklı doğrultudaki çizgilerin olası yamulma tarihçelerini tartışacağız. (Laboratuvarda saf makaslama konusu ile ilgileneceğiz).

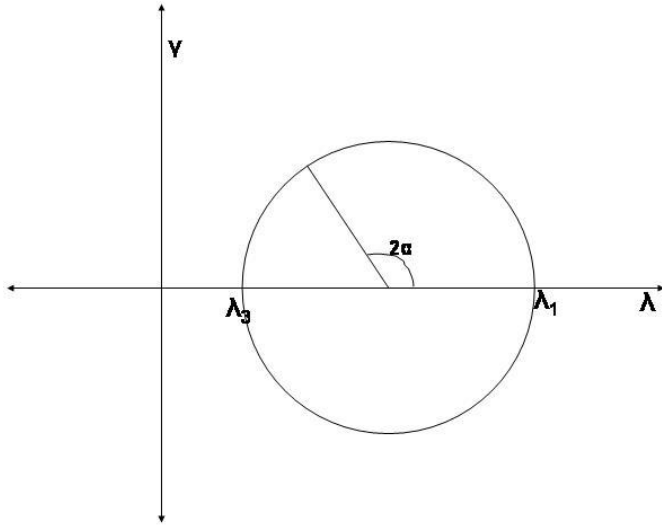
İlerleyen yamulma ile, incelemelerimiz sırasında deformasyon tarihini çok küçük basamaklara ayırdığımızı ifade etmekteyiz. Her bir basamakta, artan **sonsuz derecede küçük yamulma** ve belli bir noktaya kadar olan **sonlu yamulmayı** incelemekteyiz. Çok basit durumlarda bile oldukça karmaşık sonuçlar ortaya çıkabilir.

İnceleme, yamulmanın "en basit" türünden birini ele alır: iki boyutta **saf makaslama**. Yani, **düzlemsel makaslama** $\varepsilon_2 = 0$ ve $\lambda_2 = 1$.

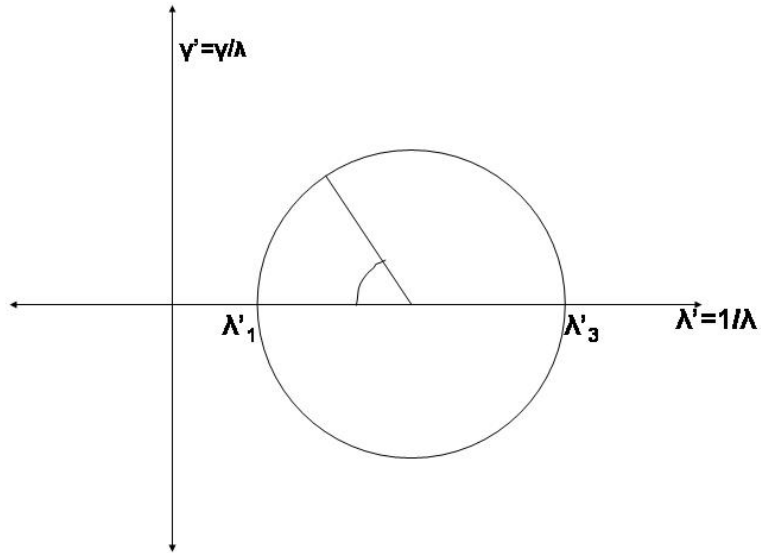
Aşağıdaki dört şekil sınıf içerisindeki tartışmaya eşlik etmektedir. Bu şekillerin tamamlanmamıştır. Bu şekilleri sınıftaki tartışmayı izlemenize yardımcı olması için kullanınız. Bunlarla ilgili not alınız ve şekilleri tamamlayınız.



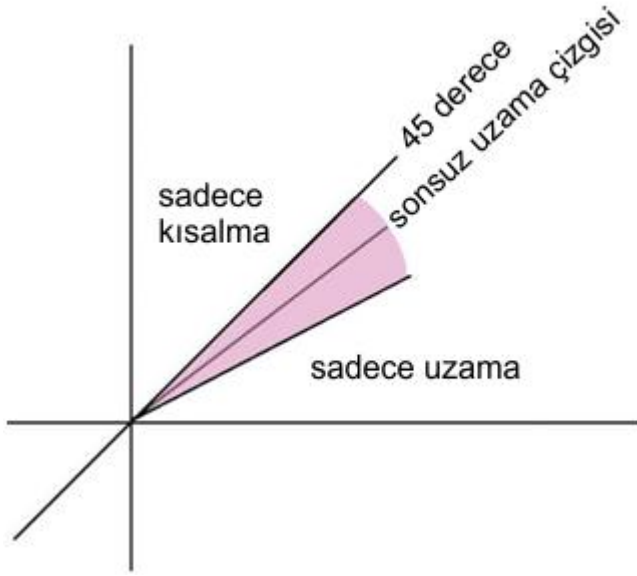
Şekil 3.1: Sonsuz derecede küçük yamulma için Mohr dairesi



Şekil 3.2: Sonlu yamulma, yamulmamış hal koordinat sistemindeki Mohr dairesi



Şekil 3.3: Sonlu yamulma, yamulmuş hal koordinat sistemindeki Mohr dairesi



Şekil 3.4: "Gerçek dünya" koordinat sistemi. Gölge alan malzeme çizgisinin kısılmadan sonra uzamaya uğradığı bölgeyi göstermektedir. Sonsuz uzama çizgisi kısılmanın gerilmeye göre azalması veya artması ile tanımlanan alt bölgeleri ayırmaktadır.

4. Bölüm

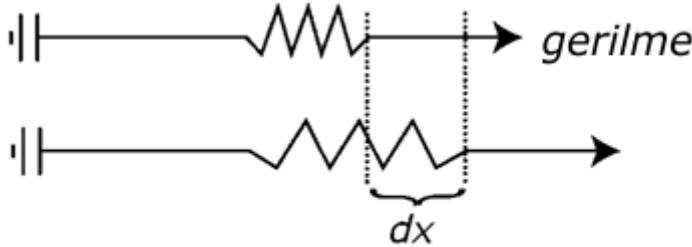
Reoloji kısım 1: İdeal malzeme davranışları

4.1 Okuma ödevi

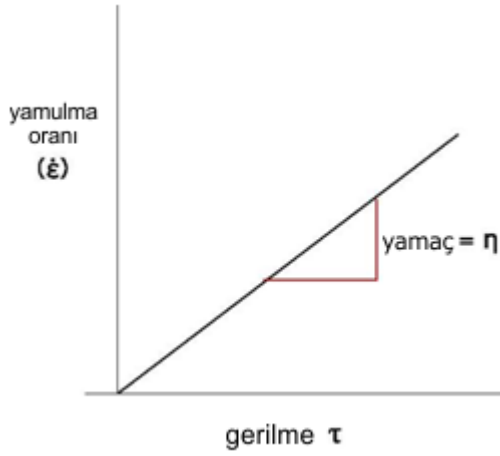
Twiss ve Moores'daki sayfa 361-385, kayaç deformasyonu ile ilgili ideal modeller ile sünümlü akmanın deneysel araştırması ile ilgilidir. Dokuzuncu bölüm sayfa 165-190 kırılma, gevrek çatlaklanmanın mekaniği ile ilgilidir. İnanın bu çok iyi bir nottur.

4.2 İdeal davranışlar

Dersin sonraki bölümü gerilme ve yamulma arasındaki ilişki hakkında bildiklerimizi, özellikle deformasyonu kontrol eden kanunları, gözden geçirecektir. Öncelikle "ideal" davranışlar ile başlayacağız ve bunları deneysel sonuçlar ile karşılaştıracacağız. Maruz kalınan gerilmeye karşı malzemenin davranışı **reoloji** olarak adlandırılır. Reolojinin matematiksel olarak ifadesi ise **temel kanun** "constitutive law"dur.



Şekil 4.1: Basit, bir boyutlu Hooke kütlesi (çizgisel elastisite)



Şekil 4.2: Newtoniyen davranış gösteren sıvıda gerilme ve yamulma oranı birbirleriyle doğrusal olarak orantılıdır. Gerilme ve yamulma oranı çizgisinin eğimi viskozitedir.

4.2.1 Elastik davranış - Hooke kanunu

Elastisitenin özellikleri: 1. Gerilmenin uygulandığında yamulma **anlıktır**. 2. Gerilme ve yamulma **doğrusal olarak** orantılıdır. 3. Yamulma mükemmel bir şekilde **geriye döndürülebilir**.

$$\sigma \propto \epsilon$$

Oran sabiti, **elastik modül** olarak adlandırılır. Kullandığınız modül, yamulmanın hacimsel, tek eksenli veya makaslama olup olmadığına bağlıdır. Sırasıyla, bunlar:

$$\sigma_h = K\epsilon_v$$

$$\sigma_n = E\epsilon_n$$

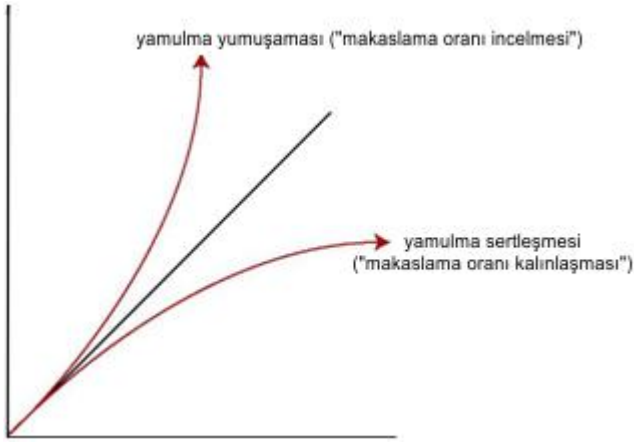
$$\sigma_s = 2\mu\epsilon_s$$

Burada K , E , μ hacim modülü, Young modülü ve makaslama modülüdür. Diğer önemli elastik sabit ise Poisson oranı ν dir. Poisson oranı elastik yamulmayı dik doğrultularda ilişkilendirir.

4.2.2 Viskoz davranış - Newtoniyen akışkanları

Viskoz akışkanda yamulma **zamana bağlı** ve **geri döndürülemezdir**. Zaman bağımlılığı elastik davranıştaki esas farklılıktır. Gerilme ve yamulmadaki doğrusal ilişkiye karşın, viskoz malzemeler gerilme ve **yamulma oranı** arasında çizgisel ilişki gösterir.

$$\tau = \eta\dot{\epsilon}$$



Şekil 4.3: Yamulma oranı yumuşaması veya sertleşmesi

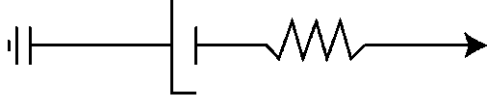
Sabit oran, η , viskozitedir ve Paskal-saniye birimine sahiptir. Yamulmaya karşı zaman diyagramı bir çizgidir ve viskozite sabit kalır. Viskozite bir malzemenin direnç ölçüsüdür: yüksek viskoziteli bir malzeme daha dayanıklıdır. Tipik jeolojik viskoziteler:

| Malzeme | Viskozite (Pa-s) |
|--------------------|-----------------------|
| Su | 10^{-1} |
| Lav | 0.1 -10 |
| Buzul | 10^{13} |
| Tuz | 10^{14} - 10^{20} |
| Pencere camı | 10^{21} |
| Astenosferik manto | 10^{21} |

Efektif viskozite deformasyon süresince değişebilir. Viskozite artarsa, biz buna **yamulma sertleşmesi** veya **yamulma oranı kalınlaşması** adı veririz. Ters olarak, malzeme zayıflar ve viskozite azalır ise süreç, **yamulma yumuşaması** veya **makaslama oranı incelmisidir**.

4.2.3 Visko-elastisite I: Maxwell kütleleri

Biz çalışmalarımızda elastik davranış için helezonik yay ve viskoz davranış için amortisörü¹ örnek olarak gösterebiliyorsak, farklı olası ideal malzeme davranışı ve reolojisini simüle etmek için amortisör ve yayları farklı şekilde birleştirebiliriz.



Şekil 4.4: Maxwell visko-elastik kütlesi

En temel kombinasyon yay ve amortisörleri bir seri halinde koymaktır. Bu kombinasyon, **Maxwell visko-elastisitesi** olarak bilinmektedir. Maxwell visko-elastisitesi ile ilgili temel denklem, elastisite ve viskoz akışkanlar² denklemlerinin toplanmasından oluşur.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{2\mu_M} + \frac{\sigma}{2\eta_M}$$

Altta gösterilen M sadece Maxwell rijiditesi ve Maxwell viskozitesi ile ilgili olduğunu belirtmektedir. Bu eşitlik sabit yamulma ($\dot{\epsilon} = 0$) veya sabit gerilme ($\sigma = \sigma_0$) koşullarında tekrar düzenlenebilir. Sabit gerilme altında:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{2\mu_M} + \frac{\sigma_0}{2\eta_M} t$$

Yamulma ve zaman çiziminde (Şekil 4.5), bu çizim anlık elastik yamulmayı izleyen duraylı konumdaki lineer (çizgisel) viskoz yamulmayı gösterir. Sabit yamulma durumunu anlamak biraz zordur. Ancak, bu eşitlik ile gerilme-zaman diyagramları yeterince açıktır.

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\mu_M}{\eta_M} t\right)$$

Gerilme ve zaman diyagramı bir Maxwell kütlelerinin viskoz gerilme rahatlamasını göstermektedir (Şekil 4.5). Maxwell kütlesi, $\eta M : \mu M$ ile ifade edilen

¹Amortisör nedir? Jeodinamik, diferansiyel denklemlerde ve malzeme bilimlerinde göze çarpmaktadır ve her zaman bilinen bir şeymiş gibi gösterilmektedir. Aslında değildirler. Sokaktaki herhangi birine amortisörü sorduğunuzda boş bir bakışla karşılaşabilirsiniz. Amortisörler, - genelde- hidrolik bir sıvı ile çalışan basit pistondur. Amortisör içeren eşyalar, otomobil ve bisiklet ile bazı kapılardır.

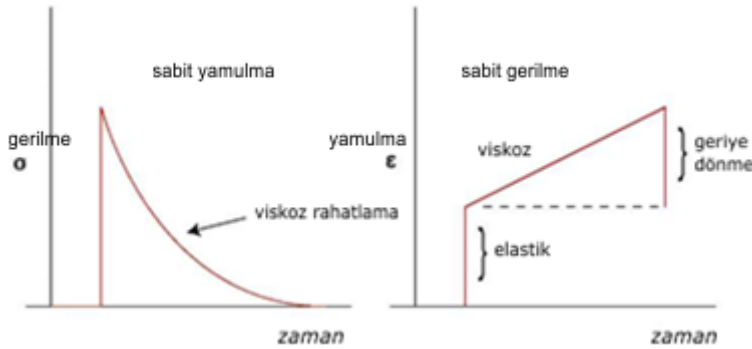
²Kullandığım yazım şekli Clark'ın sınıfta kullandığı yazım şekline biraz farklıdır. Benim kullandığım standart metin, Ranalli, G. (1995) *Rheology of the Earth*, ve Turcotte, D. ve Schubert (2002) *Geodynamics*.

zaman ölçeğinde izotropik (hidrostatik) gerilme konumuna gevşemelidir. Kesirli olarak ifade edilen zaman birimi **Maxwell zamanı** olarak bilinir. Astenosferik mantonun Maxwell zamanı, binlerce yıl mertebesinde dir.

4.2.4 Visko-elastisite II: Kelvin kütleleri

Yay ve amortisörü (elastik davranış ve viskoz davranış) birbirine bağlamanın farklı diğ er bir yolu ise seri halinde bağlamak yerine paralel olarak koymaktır. Bu malzeme **Kelvin** kütle si olarak bilinir ve bazı yerlerde **fermoviskoz** davranış olarak adlandırılır. Bu durum, "**elastic afterworking**" olarak adlandırılan elastik olgunun idealleştirilmesidir (gerçek dünyada olan bir şeydir). Gerçek dünyada çoğ u yaylar ve elastik kabul edilen malzemeler her zaman etkiyen gerilmeye anında tepki vermezler. Bir Kelvin kütle si **zamana bağı lı, geriye döndürülebilir** yamulma gösterirler. Kelvin davranış ı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\sigma = 2\mu_K \epsilon + 2\eta_K \dot{\epsilon}$$



Şekil 4.5: Maxwell visko-elastik kütle nin gerilme ve yamulma-zaman diyagramları

Yükleme karş ısında yayın elastik davranış ı amortisör tarafından söndürülür ve yayın davranış ı asimptotik olarak $\sigma_0/2\mu_K$ 'ya gider:

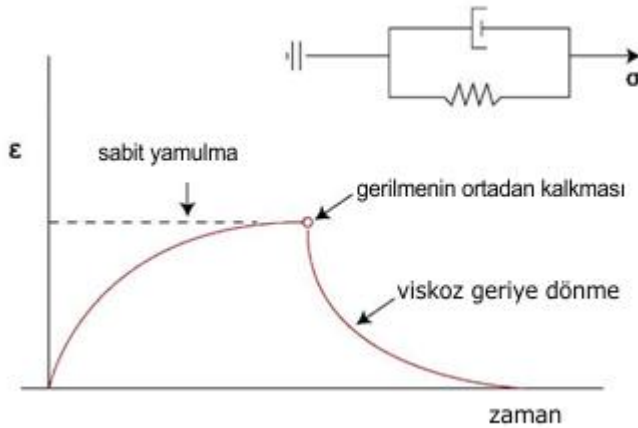
$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{2\mu_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu_K}{\eta_K} t\right) \right]$$

Yük kaldırıldığında yamulma geriye döner, ancak aniden gerçekleşmez. Yamulma ϵ_0 , biriktiğinde ve $\epsilon(t)$ olduğunda

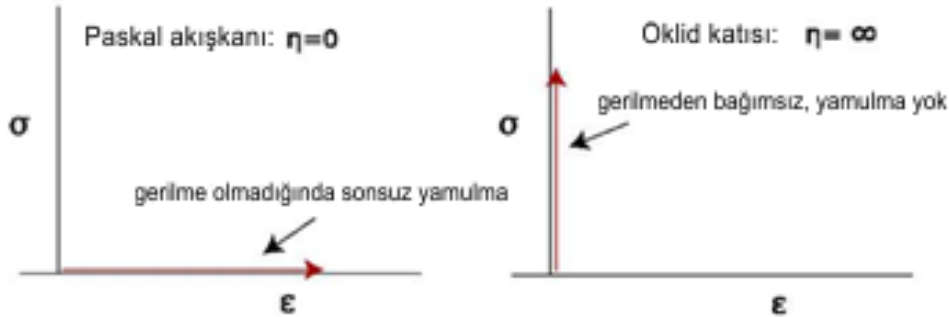
$$\epsilon = \epsilon_0 \exp\left(-\frac{\mu_K}{\eta_K} t\right) \quad \text{olduğunu kabul ediniz.}$$

4.2.5 Diğer ideal reolojiler

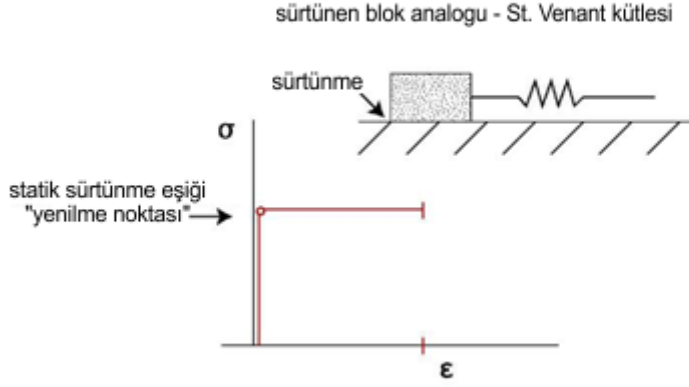
Diğer dört ideal davranış bahsetmeye değerdir. İlki, Newtoniye viskozitesinin iki uç üyesini oluşturur (Şekil 4.7): Sırasıyla viskoziteleri 0 ve ∞ olan **Pascal akışkanı** and the **Öklid katısıdır**. Son ikisi **plastik davranış** tipidir. Akma gerilmesi olan bir plastik malzemedir. Aksi takdirde Newtoniye akışkanı (veya Newtoniye olmayan "power-law" akışkanı) olarak davranır. **St. Venant** kütlesi (elastik-plastik kütle olarak da adlandırılır), elastik yayla çekilen ve sürtünmeye uğrayan bir blok şeklinde ifade edilmektedir (Şekil 4.8). Böyle bir kütle, yenilme noktası gibi belli bir noktaya kadar çizgisel elastiklik gösteren malzemedir. Daha sonra ise malzeme aniden zayıflar. Bu tür bir reoloji, deprem döngüsünü çalıştıran elastik yamulma birikimlerinin anlaşılması konusu ile ilgilidir.



Şekil 4.6: Kelvin visko-elastisitesi, yamulma ve zaman diyagramı.



Şekil 4.7: Newtoniye viskozitesinin idealleştirilmiş uç üyeleri



Şekil 4.8: St. Venant reolojisinin modeli ve gerilme-yamulma diyagramı

Viskoplastik olarak da adlandırılan Bingham kütlesi, amortisör³ ile paralel sürtünen bloğun olduğu bir seri yay ile ifade edilmektedir. Davranışı aşağıdaki eşitliklerle açıklanmaktadır:

$$\begin{aligned} \sigma &= 2\mu\epsilon \quad \sigma < \sigma_Y \\ \sigma &= \sigma_Y + 2\eta_B\dot{\epsilon} \quad \sigma \geq \sigma_Y \end{aligned}$$

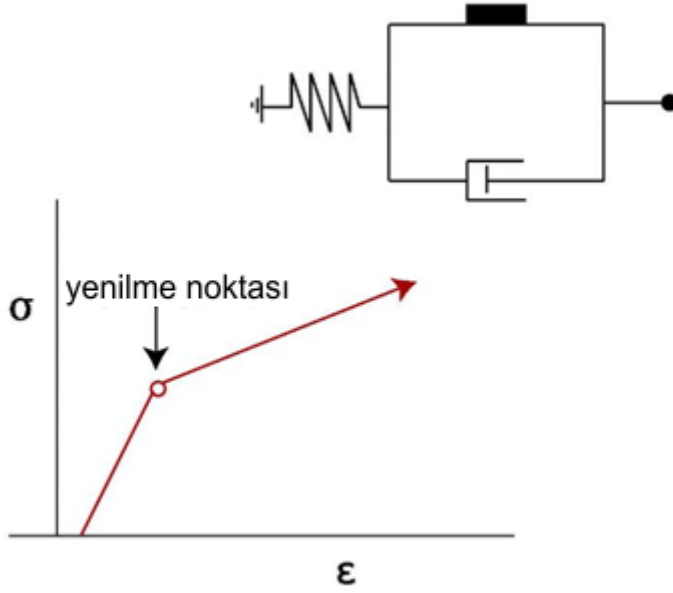
Bingham kütlesi, yenilme gerilmesinin altındaki gerilmelerde ve $\sigma - \sigma_Y$ ile orantılı yamulma oranına sahip akma direnci üzerindeki lineer akmada elastik olarak davranır. Bingham malzemelerine bazı killer, sualtı akma yığınlarının bazı türleri yağlı boya tablolar, sondaj çamuru, diş macunu ve ekmek hamuru örnek olarak verilebilir.

4.3 Çalışma ve gözden geçirme soruları

Lineer elastik, lineer viskoz, Maxwell viskoelastik ve Kelvin davranışı arasındaki farklar konusunda bilgi sahibi olmalısınız. St. Venant ve Bingham kütleleri yenilme gerilmesi kavramını anlattığı için konuyla ilgilidir.

Her biri için yay ve amortisör sistemini, gerilme ve yamulmayı (veya yamulma oranı) ilişkilendiren eğrileri çizin. Maxwell ve Kelvin kütleleri için, sabit yamulmada gerilme-zaman diyagramı, sabit gerilmede yamulma (veya yamulma oranı)-zaman diyagramlarını çizin. Her davranış için gerçek dünyadan bir veya iki örneği düşününüz.

³ Twiss ve Moores'un yayı hariç tuttuğuna dikkat ediniz. Bu özel bir durumdur.



Şekil 4.9: Bingham viskoplastik reolojisi.

Bölüm 5

Reoloji kısım 2: Deneysel kaya deformasyonu, gerilme-yamulma eğrileri

5.1 Okuma ödevi

Twiss ve Moores'un 18. Bölümdeki kısımlar bu konular için temel okumadır (sayfa 369-385). Diğer faydalı kaynaklar ise, Ranalli, G. (1995) *Rheology of the Earth*'deki 5. Bölüm ve Poirier, J.P. (1976) *Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks*. Hobbes, et. al. (1982) *An Outline of Structural Geology* sınıfta sunulan derslerin sırası ve mantığına en yakın ders notudur.

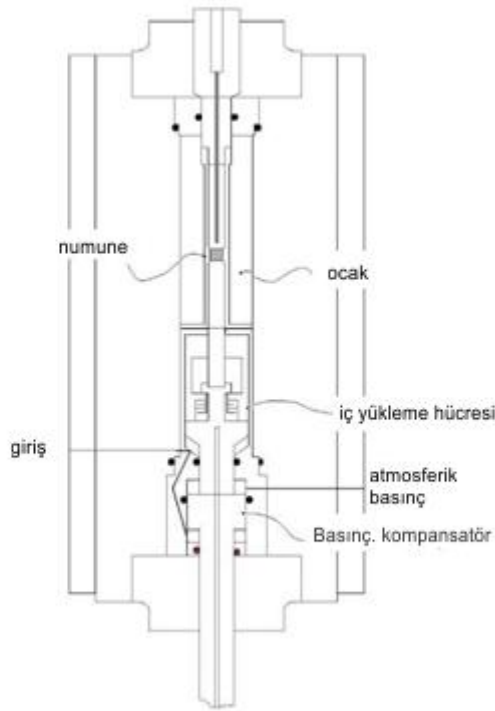
5.2 Deneysel kaya deformasyonu

Deneysel kayaç deformasyonunun sonuçlarının çoğu "üç eksenli deformasyon aparatı" denilen oldukça standart bir deneysel düzenden gelmektedir.

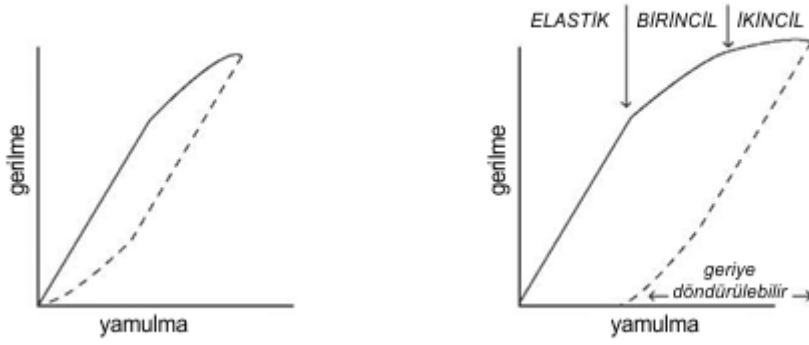
Üç eksenli deformasyon aparatı, temelde bir pistonu çevreleyen basınç kabıdır. Bu tür bir aparat asal gerilmelerin, sıcaklık ve yamulma oranlarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesine imkan verir. Gözenek akışkanı veya kimyasal çözelti etkisi de ayrıca kontrol edilebilmektedir. Belli başlı sınırlamalar: (1) aparatın dengeleyebildiği (% 10 mertebesinde) sonlu yamulma miktarı, (2) mümkün olduğunca yavaş yamulma oranları (yaklaşık 10^{-7} saniye⁻¹). Karşılaştırmak için, jeolojik yamulma oranları 10^{-12} ve 10^{-20} arasında değişir.

5.3 Deneysel kaya deformasyonu: fenomenoloji

Şekil 5.2, gerilme (bu "diferansiyel gerilme" için bir steno gibidir. Örn. $\sigma_1 - \sigma_3$) ile (toplam, sonlu) yamulma arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Eğrinin ilk kısmı, elastiklik için karakteristik olan, gerilme ve yamulma arasında doğrusal bir ilişkiyi ifade etmektedir. Bu yamulma geriye döndürülebilir. Bunun anlamı, yamulma gerilmenin kalkması ile birlikte tekrar sıfıra döner. Eğrinin ikinci kısmı **birincil sürüme** olarak bilinir. Gerilme ve yamulma lineer olarak ilişkili değildir. Gerilme geriye döndürülebilir. Ancak, geriye dönüşün zamana bağlı olduğu görülür. Eğrinin bu bölümünde Kelvin viskoelastik davranışın özellikleri görülür. Eğrinin üçüncü kısmı ise **ikincil sürüme** olarak ifade edilir. Gerilme kaldırıldığında elastik kısmı anında geriye döner, ikinci kısmı zamana bağlıdır. Ancak, kalıcı yamulmayı biriktirebilirsiniz.



Şekil 5.1: Üç eksenli deformasyon donanımı. Patterson kazanı olarak adlandırılır. Gözenek basıncı, statik basınç



Şekil 5.2: Gerilme ve yamulma eğrileri

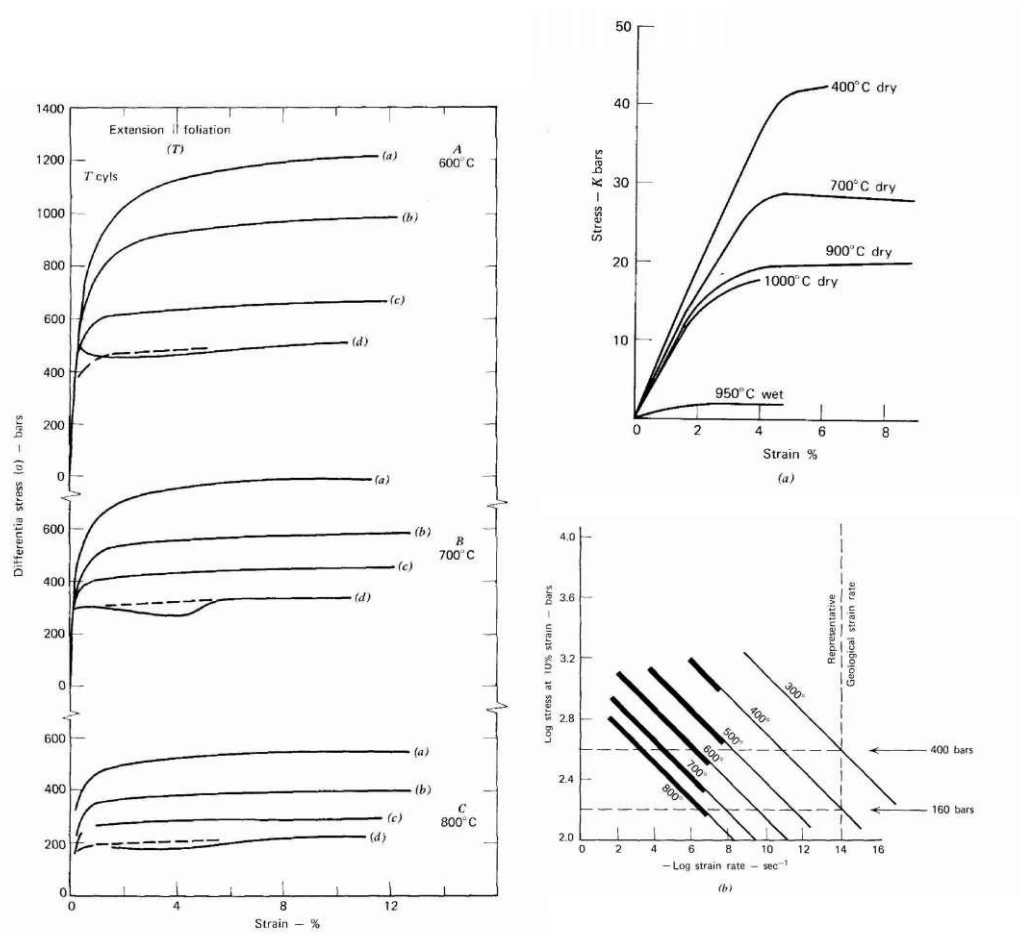
5.4 Sınımlı deformasyon: yamulma oranının ve sıcaklığın etkileri

Bir grup deneyi inceleyiniz (sonuçları ilk olarak mermerler üzerinde deneyler yapan Heard ve meslektaşları tarafından tanımlanmıştır. Hobbes ve diğ. 1982'deki referanslara göz atınız). Şekil 5.3 üç diyagram içermektedir. Birincisi, sabit yamulma oranında farklı sıcaklıklara bağlı eğri topluluğunu göstermektedir. İkinci diyagram sabit (yüksek) sıcaklıkta farklı yamulma oranlarına karşılık gelen eğri topluluklarını göstermektedir. Birinci derece gözlem, artan sıcaklık ve azalan yamulma oranının kayacı zayıflatıcı bir etkisi olduğunu işaret etmektedir (aynı yamulma için daha az gerilme). Üçüncüsü ise mermer deneylerinde gerilme-yamulma oranı diyagramını göstermektedir. İnce siyah çizgi çizgilerin jeolojik yamulma oranlarına dönüştürüldüğünü göstermektedir. Ancak, daha da önemlisi çizgilerin bir çoğu paralel olduğu için bu durum belli deformasyon mekanizmalarını ve sıcaklığın yamulma oranının yerini alabileceğini öne sürmektedir. Bir örneğin ısıtılmasını, geçen zamandan daha kolay kontrol edebildiğimiz için laboratuvarda doğal deformasyonun simülasyonu gerçekleştirilebilir. Deneysel veriler aşağıdaki eşitliğe uygundur:

$$\dot{\epsilon} = A \exp - \left(\frac{E}{RT} \right) \sigma^N$$

Burada, T mutlak sıcaklık, R gaz sabiti, E aktivasyon enerjisi ve N 1den 8'e değişen bir sabittir. $N > 1$ gibi deforme olan malzemelerde gerilme ve yamulma oranı N kuvveti ile ilişkili olması nedeniyle "üstü kuvvet (power-law) sürümü" olarak adlandırılır. $N = 1$ ise yamulma oranı, Newtoniyen viskoz kütlede görüldüğü gibi gerilme ile doğrusal orantılıdır. Sabit yamulma oranı veya sabit gerilmelerde eşitlik, sınımlı akmayla deforme olan malzemelerin dayanıklılığını

tanımlayan efektif viskoziteye göre dönüştürülebilir. Buzul çalışmalarından tahmin edildiği kadarıyla üst mantonun efektif viskozitesi 10^{21-22} aralığındadır.



Şekil 5.3: Deneysel gerilme- yamulma eğrileri. Bu diyagramlar Hobbs, H., Means, W., and Williams, P. (1982) *An Outline of Structural Geology*, New York: Wiley and Sons, inc., pp. 64 - 66. ' dan alınmıştır.

5.5 Gözden geçirme soruları

Tektonik sistemler için tipik yamulma oranları nedir? Laboratuvar deneylerinde gerçekleştirilebilecek en yavaş yamulma oranları nedir? Deneysel sonuçları doğal sistemlere nasıl güvenli bir şekilde uyumlu hale getirebiliriz.

Gerilme-yamulma oranındaki sıcaklık eğrileri topluluğu diyagramında aslında tüm çizgiler paralel değildir. Bu ve benzer diyagramlar sıklıkla yüksek, orta ve düşük gerilme bölgeleri olarak ayrılırlar.

Hidro/litostatik basınç, sıcaklık ve gerilme oranı gibi çevresel değişkenlerin kayacın deformasyonunu nasıl etkilediğini özetleyiniz.