

## Ders 9: Reoloji ve Sismoloji

Yeryuvarı'nın (ve diğer gezegenlerin) reolojisi (ancak yeryuvarı hakkında daha fazla bilgimiz var)

Gezegenlerin içlerinin işleme tarzı, topografyaları ve yüzeysel nitelikleri, çoğunlukla gezegen içlerinin reolojisine bağlıdır. Reoloji, sadece belirli bir kayacın veya malzemenin değişik basınç, sıcaklık, hidratlaşma ve diğer koşullar altında deforme olma tarzı anlamına gelmektedir. Ancak, reoloji bir gezegen için ne kadar iyi karışmış olduğunu, ısı kaybı tarzını ve dolayısıyla sıcaklığı etkilemiş olduğundan tek yönlü bir sokak değildir. Bir gezegenin reolojisi, aynı şekilde deforme olan malzemeye bağlıdır (örnek olarak kabuk, manto ya da çekirdek). Bunun sonucu olarak, çekirdeğin ve gezegenin boyutu, alt mantonun reolojisini belirlemede önemli rol oynamaktadır.

Gezegen malzemelerinin nasıl deforme olduğu kabaca, (i) kırılğan, (ii) sünek ve (iii) elastik olmak üzere üç öbekte toplanabilir: Kırılğan ve sünek sınıflarda, tane sınırı deformasyonu ya da difüzyon sünmesi gibi deformasyonun alt kümeleri vardır. Ancak bu alt kümeler üzerine, burada daha fazla durulmayacaktır. Bakış açısına bağlı olarak konuları daha karmaşık ve daha ilginç yapmak için, deformasyon tarzlarının, deformasyon hızına büyük bağımlılık gösterdiğini burada söylemek gerekir. Eğer bir cisim hızlı bir şekilde deforme ederseniz, elastik gibi tarzda davranabilir. Ancak siz aynı malzemeyi daha yavaşça deforme ederseniz, aynı sıcaklık ve basınç koşulları altında bile sünek bel-vermeyle cevap verebilir.

**Elastik deformasyon** geri dönülebilir veya iyileştirilebilir deformasyondur. Elastik malzemelerde, gerilim deformasyonla çizgisel olarak bağlantılıdır. Bir malzeme yalnızca gerilim altında olduğu sürece, deforme edilmiş şekilde kalır. Eğer gerilim ortadan kaldırılırsa malzeme başlangıçtaki biçimine geri döner. Bu durum deformasyonun az veya çok kalıcı olduğu kırılğan ve sünek deformasyondan farklıdır.

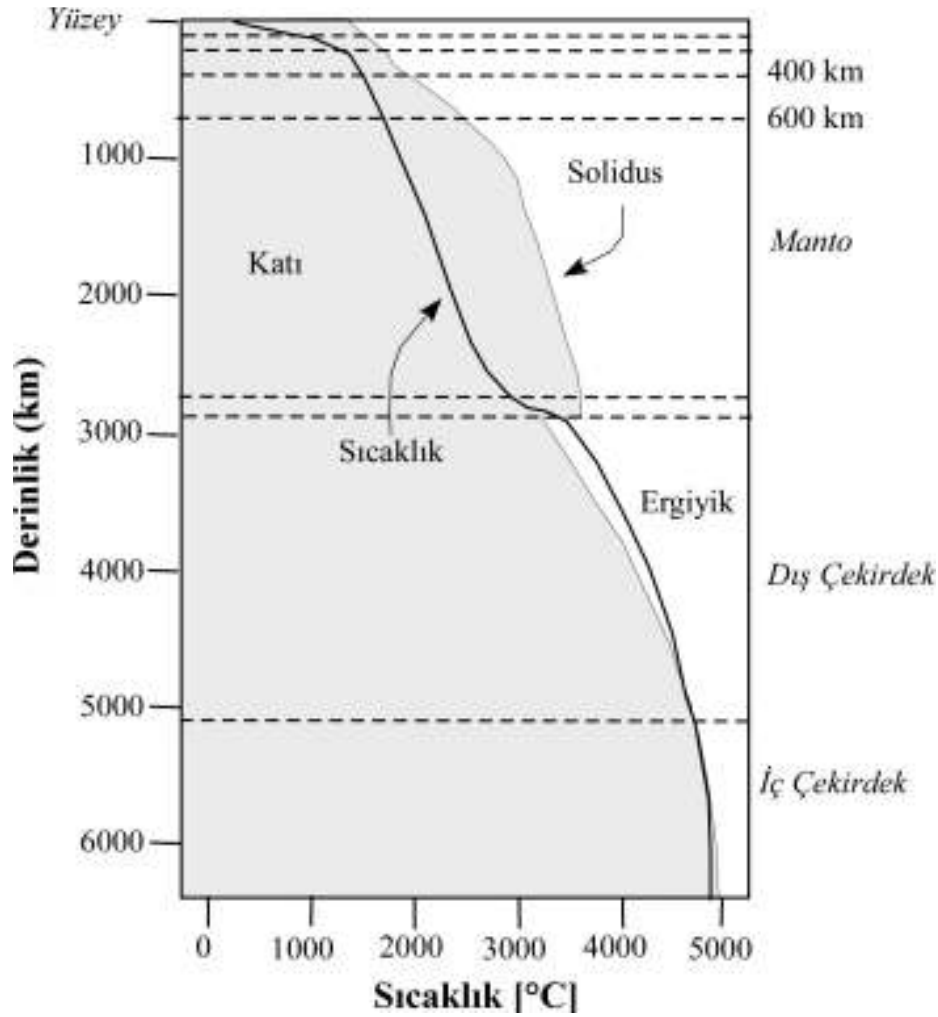
Ağdalı (viskoz) malzemelerde, gerilim deformasyon hızıyla bağlantılıdır. Bu bağlantı Eğer malzeme Newton ağdalı malzeme ise, bu bağlantı çizgiseldir. Aksi halde, çoğunlukla bir güç-yasası ilişkisi, çoğunlukla gerilim terimi üzerinde üstsel 3). Bu, ağdalı malzemelere uygulanan gerilimi ortadan kaldırdığımızda, ağdalı malzemenin deforme olmasının son bulacağı anlamına gelmektedir. Fakat, o noktaya kadar ulaşılmış deformasyon yerinde kalacaktır.

Kırılğan deformasyon, çatlakların oluşumu, depremler sırasında faylar üzerinde kayma ve kırıkların ve de fay sünmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Kırılğan deformasyon, aynı şekilde kalıcı bir deformasyon olup, deformasyon hızına çok bağımlı olarak gözükmektedir. Bunun yerine, bir fayın hareket edebilmesi önce kritik bir bel-verme geriliminin ulaşılması gerektiğini düşünmekteyiz. Depremin çekirdeklenmesinin fiziği dahil olmak üzere fay kaymalarının birçok nedeni günümüze kadar pek iyi anlaşılammış olarak kalmaktadır.

*Reoloji*, cisimlerin deformasyon ve akış davranışlarını ele alan bilim dalıdır.

Yüzeylerinin çoğunlukla faylar üzerinde kaymayla deforme olan bir gezegeni anlamamızda büyük bir boşluk mevcuttur.

Genel olarak Yeryuvarı-benzeri gezegenler satıhta en soğuk halde olup, sıcaklıkları derinlikle artar. Ancak bu derinliğe bağlı sıcaklık artışı, pek de çizgisel olarak gerçekleşmemektedir. Gezegenin en üst katmanlarında (yani sıcaklığın en düşük olduğu yerlerde) sıcaklık tipik olarak aşağıya doğru oldukça düzenli şekilde artar. Gezegen ısı akısını daha sonra ayrıntılı olarak ele alacağız. Fakat şu an için, difüzyonla ısı aktarımının esaslarına bakmak faydalı olacaktır (konduksiyon: iletim)



Prof. Charles J. Ammon'un (Penn State Üniversitesi) nezaketi ile, izinle kullanılmıştır.

Isı iletimi (konduksiyon), bir malzeme içinden ısının yayılması sürecidir. Durağan ve radyoaktif parçalanma gibi bir süreçle içsel olarak ısı üretmeyen bir malzeme için ısı kaybı ya da ısı akısı ( $q$ ) ile ısısal (termal) gradyan arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

*Reoloji*, cisimlerin deformasyon ve akış davranışlarını ele alan bilim dalıdır.

$$q = K \frac{\partial T}{\partial z}$$

K ısısal (termal) iletkenlik olarak bilinen ampirik olarak ölçülmüş bir niceliktir. Birimi  $Wm^{-1}K^{-1}$ 'dir. Tipik Yeryuvarı malzemelerinde, en azından kabuk ve manto malzemelerinde, K çoğunlukla 2-10 W/mK aralığındadır.

Isı kaybı ile termal gradyan arasındaki ilişki, eğer bir gezegen bilinen bir hızda ısı yitiriyorsa, o zaman ısısal (termal) gradyan litosferden aşağıya doğru tahmin edilebilir. Litosfer nedir? Litosfer, bir gezegenin kolay şekilde deforme olmayan güçlü en dış kabuğudur. Litosferin tam tanımı biraz belirsizdir, ancak değişik şekillerde tanımlanabilir. Yeryuvarı'nda litosfer dendiğinde, güçlü tektonik plakaları anlamaktayız. Yeryuvarı'nda litosferin tabanı  $\sim 1300-1400$  °C'dir. Çünkü bu sıcaklığın üzerinde manto malzemeleri, jeolojik deformasyon hızlarında (yani plakaların hareket hızlarında) çok dayanıksızdırlar.

Plaka tektoniğinden ötürü, Yeryuvarı her tarafta aynı hızda ısı yitirmemektedir. Örnek olarak, okyanus ortası sırtları boyunca ısı kaybı son derece yüksektir. Kıtalarda ve eski okyanus tabanlarında ısı kaybı ise daha düşüktür. Eğer Yeryuvarı için ısı akısını  $50$  mW/m<sup>2</sup> (ya da  $0.05$  W/m<sup>2</sup>) ve ısı iletkenliğini  $5$  W/mK kullanılırsa, litosfer için ısısal (termal) gradyanı  $10$  °C/km olarak bulunur.  $0$  °C'ye yakın bir yüzey sıcaklığından başlarsak, litosfer kalınlığının yaklaşık olarak  $130-140$  km veya daha muhafazakar olarak  $100-170$  km olarak tahmin edebiliriz. Aslında bu tahmin yaşlı okyanuslar hiçte kötü değildir. Kıtalarda litosfer kalınlığı  $250$  km'ye kadar ulaşabilir. Ancak biz bu değerden o kadarda uzakta değiliz. Dolayısıyla en azından eğer manto malzemelerinin reolojisi ve ısı iletkenlikleri benzer ise (yaklaşık kondrtik bileşimleri hatırlayın), gezegen litosferlerinin uzun-dönem kalınlıklarını denetleyen etmenlerin (i) gezegenin yüzey sıcaklığı ve (ii) gezegenin en dış kabuğundaki ısı akısı olduğunu görmekteyiz. Bu, aynı şekilde bize  $1000$  °C'den az veya benzer yüzey sıcaklıkları için, bütün kayasal gezegenlerin bir litosfere sahip olması gerektiğini söylemektedir. Eğer gezegen çok soğuk veya çok küçük değilse, litosferin daha yumuşak, daha zayıf bir manto ile atlanacaktır. Küçük gezegenler daha hızlı soğurlar, böylece her iki nicelik birlikte hareket etme eğiliminde olacaktır.

### Gezegen Litosferleri İçin Esneme-Gerilim Diyagramları

Esneme-gerilim diyagramları, bir gezegenin litosfer kolonunda (kabuk ve manto içeren) kırılmanın nerede, nasıl ve hangi gerilim farklılığında gerçekleşeceğini gösterir. Gerilim farklılığı, bir kayaç paketine etki eden maksimum ve minimum sıkıştırma gerilimleri arasındaki farktır. Bu gerilimlerin yönelimleri ne tür bir fay ya da deformasyonun, yani açılma, doğrultu atım, vs. . , olacağını gösterir.

Kırılma için bel-verme ölçütleri basınç ile yaklaşık olarak çizgisel ilişkilidir. Basınç derinlikle çizgisel olarak arttığından, kırılma için gerekli gerilim farklılığı da artar. Kırılma esneme ölçütleri kaya türüne çok hassas olmayıp, yüksek gözenek-akışkanı basıncı olduğunda

*Reoloji*, cisimlerin deformasyon ve akış davranışlarını ele alan bilim dalıdır.

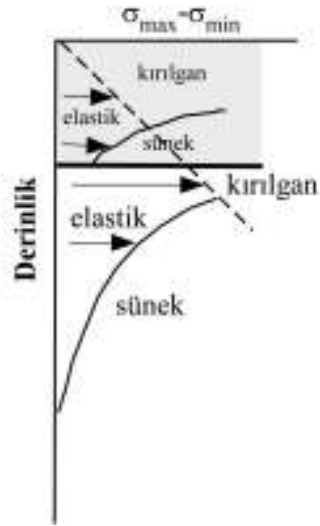
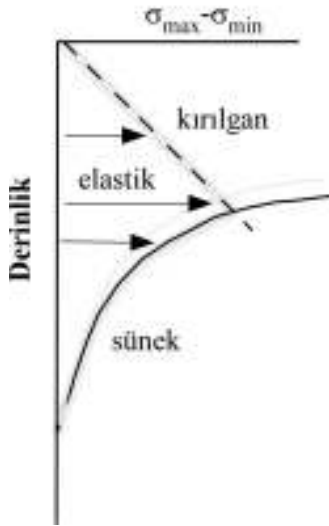
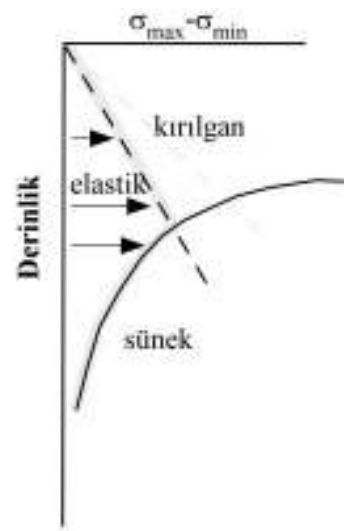
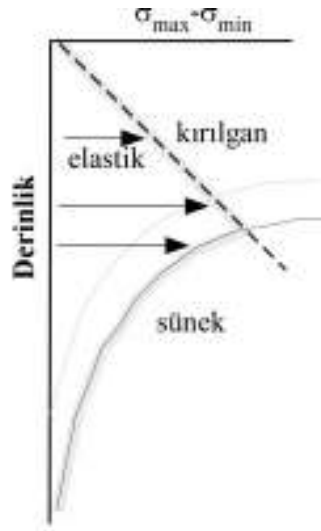
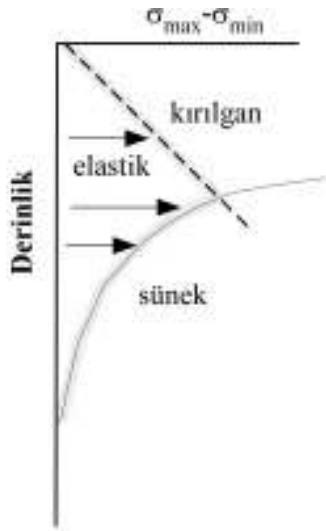
alçalmaktadır. Kırılma ölçütleri, faylarda yeni kırıklarda olduğundan ve yeni kırılmış faylarda daha azdır. Kırılma ölçütleri aynı şekilde yığınla kötü anlaşılmiş ölçütlere bağımlıdır. Kırılma bel-verme ölçütleri aynı şekilde farklı büyüklerdeki gezegenlerde değişik derinlik bağımlılıklarına sahiptirler. Çünkü g gezegen yarıçapına ve ortalama gezegen yoğunluğuyla çizgisel ilişkili olup, büyük bir gezegende küçük olana nazaran yüzeyin altında belirli bir derinlikte basınç daha fazla olacaktır.

Sünek davranış birkaç değişik deformasyon tarzında gerçekleşebilir. Bütün bu değişik deformasyon tarzlarında, sünek davranış sıcaklığa önemli ölçüde sıcaklığa bağımlıdır. Sünek kendini-bırakma için gerekli gerilim farklılığı sıcaklıkla hemen hemen üssel olarak değişmektedir (Kayalar yüksek sıcaklıkta daha dayanıksızdırlar). Sünek davranış aynı şekilde sıkıca deformasyon hızına bağlıdır. Yüksek deformasyon hızlarında kayalar düşük deformasyon hızlarında olduklarından çok daha güçlüdürler. Eğer kendimizi jeolojik deformasyon hızlarıyla sınırlandırsak, bu etki sıcaklığa nazaran çok daha az öneme sahiptir. Ancak biz jeolojik deformasyon hızları ile Yeryuvarı içinde ilerleyen sismik dalgalara eşlik eden deformasyon hızları arasındaki farkları dikkate alırsak, birkaç onluk kat büyüklük farkı vardır. Bunun sonucu olarak, sismik zaman ölçeğinde (saniyelerde) elastik olan bir malzeme, jeolojik zaman ölçeğinde (milyonlarca yıl) sünek olabilir.

Aşağıdaki diyagramlar, üzerine gerilim uygulandığında bir gezegen litosferinin nasıl deforme olacağını gösteren esneme-gerilim diyagramlarıdır. Sol üst taraftaki diyagram, bir referans durumu göstermektedir. Takip eden çizimler, soldan sağa, (i) jeotermal gradyan düşürüldüğünde, (ii) kırılma deformasyonu altındaki malzemeyi zayıflatmak için akışkan eklendiğinde, (iii) deformasyon hızı artırıldığında ya da (iv) farklı (daha zayıf) sünek esneme ölçütlü bir kabuğa yerleştirildiğindeki durumları göstermektedir.

Bu esneme diyagramları, gerilim farklılıklarının çok büyük olmaması şartıyla elastik bir çekirdekli ya da litosfer içine gömülmüş plakalı bir gezegen yüzeyine yakın ne kadar güçlü bir litosfer oluşturulabileceğini göstermektedir. Yeryuvarı'nda ve bir dereceye kadar üzerinde birkaç sismometrenin bulunduğu Ay'da, sismik olarak litosferin kalınlıklarını belirleyebiliriz. Ancak diğer gezegen kütlelerinde litosfer kalınlığını tahmin etmek için dolaylı yöntemler kullanmak zorundayız. Bunu yapmanın bir yolu, litosfer içerisindeki bu etkin elastik plakanın ne kadar kalın olduğunu belirlemek ve bunu toplam litosferin kalınlığının ve dolayısıyla ısı akısının bir ölçütü olarak kullanmaktır.

*Reoloji*, cisimlerin deformasyon ve akış davranışlarını ele alan bilim dalıdır.



*Reoloji*, cisimlerin deformasyon ve akış davranışlarını ele alan bilim dalıdır.