## Ders 11: Sismik Fazlar ve Hareket Zamanları

Sismik kütle dalgaları, (P ve S), gezegen kütlelerinin çekirdekleri, mantoları ve kabukları arasında ilerlerler. Bu dalgalara çekirdekten ilerlerken farklı adlar verilmektedir. Dış çekirdekteki P dalgaları, dış çekirdeğin P dalga hızları olarak adlandırılmasına rağmen, K dalgaları olarak ta isimlendirilmektedir. Yeryuvarı'nda, dış çekirdeğin sıvı olmasından dolayı dış çekirdekte ilerleyen S dalgası yoktur ve dış çekirdek makaslama gerilmelerini kaldıramaz. Bu derste iç çekirdekte ilerleyen P ve S dalgalarının adları hakkında kafa yormayacağız.

Her mineral ve tasavvur edilebilen kaya için gelişi güzel adlara sahip olan petrolojinin aksine, sismik dalgalarının fazları ve ilerleme çığırları (yolcukları) basitçe adlandırılmaktadır. Söz gelimi, PKP mantoda ilerleyen bir P dalgası olup, dış çekirdeğe P(K) kırılmış ve daha sonra mantoya gene P dalgası olarak yeniden kırılmıştır. Benzer şekilde SKS manto içerisinde ilerleyen bir S dalgası olup, dış çekirdekte P(K) dalgası olarak kırılıp, daha sonra mantoya S dalgası olarak yeniden kırılmaya uğramıştır. Bir gezegen içinde, her çok büyük sismik hız ara yüzeyinde özellikle çekirdek-manto ve iç çekirdek-dış çekirdek sınırında dalgalar kırılmakta ve/veya yansımaktadır. Böylece gelen bir P dalgası bir hızı ana yüzeyinde yansıtılmakta ve/veya diğer bir P ve S fazı olarak kırılmaktadır. (S dalgası bir sıvıda hareket edememesine rağmen, ara yüzeyde üretilmekte ve herhangi bir yere gitmemektedir).

Yansıma ve kırılma açılarını belirleyen yasalar ışığın kırılması ve optik yansımadan öğrendiğimiz yasalarla bütünüyle aynıdır. Enerji ve momentin ana korunum yasalarından türetilebilirler. Bu kural "Snell Yasası" olarak bilinmekte bir P ya da S dalgasının bir ara-yüzeye girerken ya da ara-yüzeyden çıkarken yapmış olduğu açı ile bir P veya S sismik dalga hızı arasında ilişki kurmaktadır. Eğer gelen bir sismik dalga, bir ara yüzeyle düşeye göre $\theta_1$ açısıyla ve $v_1$ hızıyla karşılaşırsa, o zaman ara yüzeyin diğer tarafında $v_2$ sismik hızlı bir dalga için kırılma açısı Snell Yasası'na göre

$$\frac{\boldsymbol{sin(\theta_1)}}{\boldsymbol{v_1}} = \frac{\boldsymbol{sin(\theta_2)}}{\boldsymbol{v_2}}$$

olacaktır.

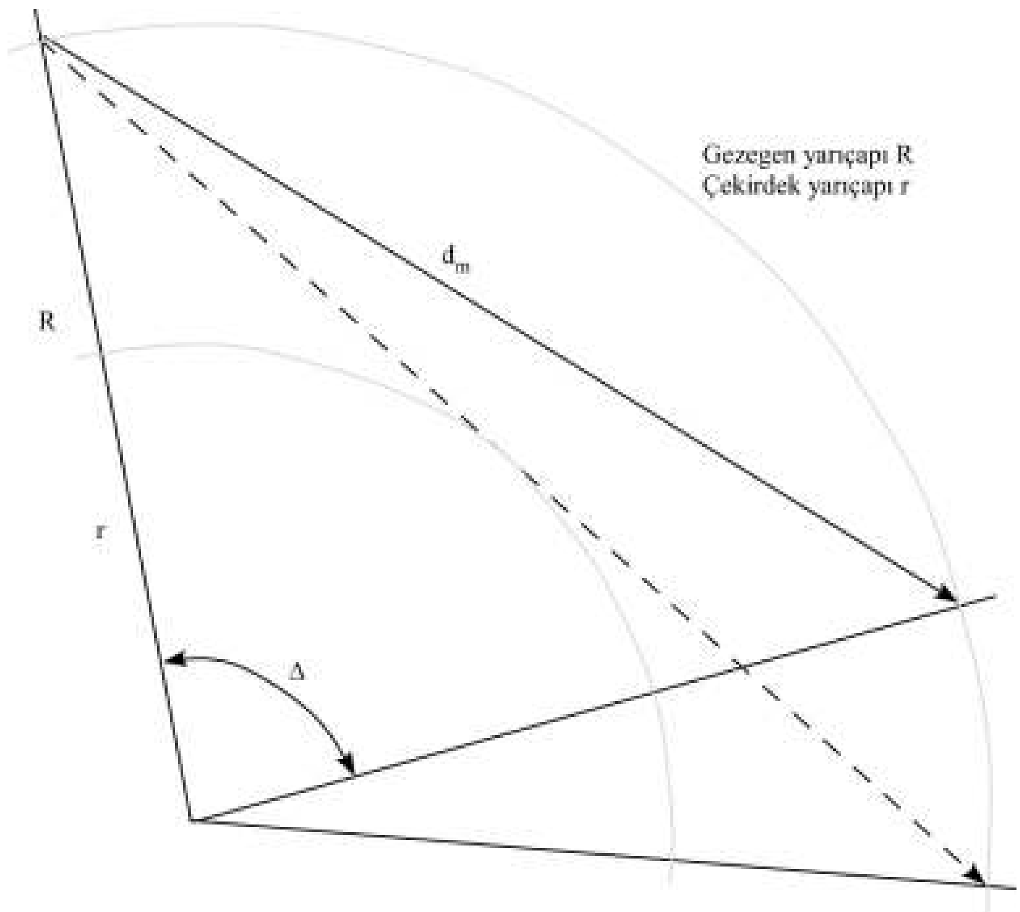
Eğer $v_2 > v_1$ ise, o zaman kritik bir geliş açısı olacaktır. Bu kritik açının ötesinde dalgalar kırınımdan ziyade yansıtılacaktır

$$sin(\theta_{1crit}) = \frac{v_1}{v_2}$$

Eğer $v_1 > v_2$ ise, kırılmış dalgaların sahip olabileceği maksimum bir açı vardır:

$$sin(\theta_{2max}) = \frac{v_2}{v_1}$$

Bir gezegenin içerisinde katmanların sismik hızlarını belirlemek, yeterince dağılmış olan sismik kaynaklara (çoğunlukla depremler aynı şekilde nükleer patlamalar ya da yerel çalışmalar için dinamitler) sahip olmayı gerektirmektedir. Şimdi bir gezegen mantosunun tekdüze sismik hızlara sahip olduğu basit durumu tasavvur edelim (ve kabuğu ihmal edelim).




Bu durumda mantoda ilerleyen P dalgasının geometrisi ve dalga tarafından kat edilen mesafe (dm) kaynaktan alıcıya olan açısal mesafeyle Δ şu şekilde bağıntı içinde olacaktır:

$$d_m = 2Rsin(\frac{\Delta}{2})$$

Dalganın ilerleme zamanı ise,

$$t_p = \frac{d_m}{v_m} = \frac{2Rsin(\frac{\Delta}{2})}{v_m}$$

olacaktır.

Direk P varışlarının olduğu maksimum bir açısal mesafe olacaktır. Bu açının ötesinde, (bu açıdan daha büyük açılarda), çekirdek yalnızca manto içerisinde giden potansiyel P fazlarının yolunda olacaktır. Yeryuvarı için bu kritik açı ~100°'dir. Tekdüze hız mantosu için, kritik açısal mesafe ise:

$$\frac{r}{R} = \cos{(\Delta_{crit}/2)}$$

dir.

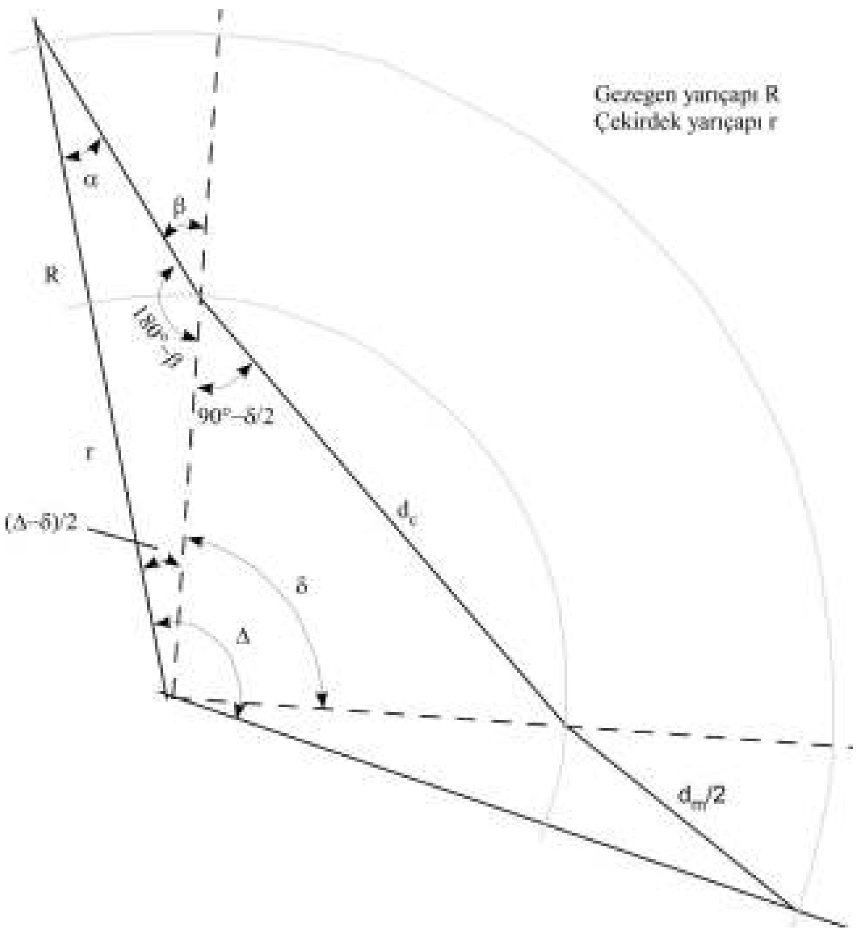
Bu açının ötesinde, P dalgaları ya çekirdek-manto arayüzeyinden yansıtılacak ya da P dalgasının geliş açısına, manto ve çekirdekteki sismik hızların göreceli büyüklüklerine bağlı olarak çekirdek içerisine doğru kırınıma uğrayacaktır. Aynı ilişkiler, çekirdek üzerine gelen S dalgaları için doğrudur.

Yeryuvarı'nda ve olasılıkla öteki yeryuvarı-benzeri kütlelerde çekirdek veya mantoda sismik hızlar tekdüze olmayıp, sismik dalgaların içinden ilerlemiş olduğu malzemeye etki eden artan basınçlardan dolayı aşağıya doğru artmaktadır. Artan yoğunluk aslında sismik dalga hızlarının düşürecek yönde etki eder (yukarıdaki denkleme bakınız). Ancak elastik modüller ($\lambda$ ve $\mu$) aşağıya doğru yoğunluktan daha hızlı şekilde artmaktadır. Bunun sonucu olarak dalga hızları bileşimsel ara-yüzeyler ya da durum değişiminin olduğu yerler (dıştan iç çekirdeğe doğru), kristal yapı değişimleri (mantodaki 660 kilometredeki süreksizlik) hariç olmak üzere derinliğe bağlı olarak artar.

Uygulamada bunun anlamı, söz gelimi P dalgaları mantoda düzgün bir hatta ilerlememesi ve Snell Yasası'ndan ötürü yukarıya doğru konkav oluşudur. Bu derste bunun hakkında daha fazla üzerinde durmayıp, bizim gezegenlerimizde basit, tekdüze hız çekirdekleri ve mantoları olduğunu varsayacağız.

İç çekirdekte bile, S hızı manto S hızından daha yavaştır.

Çekirdek hızını hesaplamak, tekdüze çekirdek ve manto hızlı basit bir gezegen yapısı için bile elle yapılırsa oldukça karışık olabilir. Bu hesaplar çok can sıkıcı üçgen geometrileri vb. unsurlar içermektedir. Bütün her şeyi çekirdekte P (K) dalgasının kat etmiş olduğu açısal mesafe olan, $\delta$ açısı cinsinden ifade ederek kolay şekilde yapılabilir. Biz yolun aşağıya ve yukarıya giden kısımlarında her şeyin simetrik olduğu olgusunu kullanabiliriz. Bazı faydalı açılar aşağıdaki diyagramda gösterilmektedir.




$d_m$: Dalganın mantoda kat etmiş olduğu mesafe

$d_c$: Dalganın çekirdekte kat etmiş olduğu mesafe

Snell Yasası'nı kullanarak:

$$\frac{\sin\,(90°-\frac{\delta}{2})}{v_c} = \frac{\cos\,(\frac{\delta}{2})}{v_c} = \frac{\sin\,(\beta)}{v_m}$$

Üçgenler için sinüs teoremine göre,

$$\frac{\sin\,(\alpha)}{r} = \frac{\sin\,(180°-\beta)}{R} = \frac{\sin\,(\beta)}{R}$$

dir.

Bir üçgendeki bütün iç açıların toplamının 180° olacağı olgusundan yola çıkılırsa:

$$\alpha + (180° - \beta) + \frac{\Delta}{2} - \frac{\delta}{2} = 180°$$

ya da

$$\frac{\Delta}{2} = \frac{\delta}{2} + \alpha - \beta$$

Bunu her şeyde yerine koyalım ve Δ'yı δ cinsinden çözebiliriz:

$$\Delta = \delta + \sin - 1\left[\frac{v_m \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)}{v_c}\right] - 2sin^{-1}\left[\frac{v_m r cos\left(\frac{\delta}{2}\right)}{v_c R}\right]$$

Burada $\phi = v_m/v_c$ ve $r^* = r/R$'dir

Çekirdekte dalganın kat etmiş olduğu mesafe:

$d_c = 2rsin(\frac{\delta}{2})$'dir.

Dalganın mantoda kat etmiş olduğu mesafe ise:

$d_m = 2\left[R^2 + r^2 - 2rRcos(\frac{\Delta}{2} - \frac{\delta}{2})\right]^{1/2}$ dir.

Toplam hareket zamanı ise:

$$t = \frac{d_c}{v_c} + \frac{d_m}{v_m} = \frac{2rsin(\frac{\delta}{2})}{v_c} + \frac{2\left[R^2 + r^2 - 2rRcos(\frac{\Delta}{2} - \frac{\delta}{2})\right]^{1/2}}{v_m}$$

dir. PKP' nin varışında Δ'nın en küçük değerini bu denkleme bakılarak saptanabilir:

$$\Delta = \delta + 2sin^{-1}\left[\left(\frac{v_m}{v_c}\right)\cos(\delta/2)\right] - 2sin^{-1}\left[\left(\frac{rv_m}{Rv_c}\right)\cos\left(\frac{\delta}{2}\right)\right]$$

$Sin^{-1} \leq 1$ olmalıdır. Böylece cos(δ/2) nin sahip olabileceği en küçük değer, eğer $v_m > v_c$ ise $v_c$ / $v_m$ dir. Eğer $v_c > v_m$ ise δ=0'dır.

İlk durumda yani $v_m > v_c$ ise, bu minimum Δ değerini verir:

$$\Delta_{min} = 2cos^{-1}\left(\frac{v_c}{v_m}\right) + 180° - 2sin^{-1}\left(\frac{r}{R}\right)$$

İkinci durumda ise, yani vc>vm ise, bu bir minimum Δ değeri verir.

$$\Delta_{min} = 2sin^{-1}\left(\frac{v_m}{v_c}\right) - 2sin^{-1}\left(\frac{v_m r}{v_c R}\right)$$

İlk durumda, $v_m > v_c$ için, ne P ne de PKP'nin gözlenmediği bir boşluk vardır. $v_c > v_m$ için hem P hem de PKP'nin gözlenmiş olduğu bir örtüşme zonu olacaktır.