

ELASTİK OLMAYAN (ALELASTIC) ÖZELLİĞİN SİSMİK HIZLARA ETKİSİ

Effect of Inelastic Properties On Seismic Velocities

Dr. H. SOYSAL *

ABSTRACT :

When the scientific investigation of our planet was started it was supposed to have uniform structure. Afterward it is concluded that it contains concentric spherical layers. But thickness of the layers and properties of transition between the layers have been investigated in detail along with the reason of layering.

At the Moskov meeting of IUGGASPEI in 1971, a working group was proposed to find out a standart Earth interior model and their work is still developing.

Standart Earth interior modelling and finding inelastic properties of Earth's interior have gained more importance in recent years for orogenes, earthquakes, continental drift, etc..

In this study, after discussing some major points in development of the subject, the effect of inelastic properties on seismic velocities which are important for finding layering is investigated. This paper presents a few parts of the study.

Ö Z :

Gezegemimizin bilimsel incelenmesine başlandığında, üniform yapıda olduğu öngörülmüştü. Zamanla eşmerkez küre tabakalarından oluştuğu sonucuna varıldı. Ancak bu küre tabakalarının kalınlıkları, birinden diğerine geçişin özellikleri ve tabakalı oluşun nedenleri geniş ölçüde araştırmalara konu oldu. Uluslararası Jeodezi Jeofizik Birliğin'nin 1971 Moskova toplantısında, standart bir yer içi modeli belirleme çalışma grubu önerildi ve çalışmalar bu yolda geliştirilmektedir.

Teknolojik gelişmeler, Dağoluş, Depremler, Kıt'asal yerdeğiştirme v.b. konularda yer içinin elastik olmayan özelliklerini belirleme ve standart yer modeli sorununa ayrı bir önem kazandırdı.

Bu çalışmada, sorunun gelişiminin özüne bir yaklaşımdan sonra; özellikle elastik olmayan özelliğin, sözkonusu tabakalaşmanın belirlenmesinde önemli payı olan, sismik hızlara etkisi incelendi. Bu incelemenin sonuçlarının çok az bir bölümü sunulmaktadır.

* İstanbul Üniversitesi Jeofizik Enstitüsü Doçenti Fen Fakültesi - İSTANBUL

Elastik Olmayan (Anelastik) Özelliğin Sismik Hızlara Etkisi

G İ R İ Ş :

Yer içinde bir çekirdeğin, kabuğun, düşük hız zonunun ve iç çekirdeğin varlığını örmeyi gerektiren ilk gözlemsel verileri, sırasıyla, Oldham (1906), Mohorovicic (1909) Gutenberg (1926), Lehman (1936), sağlamışlardır. Bu süreksizliklerin ne sınırları, ne özellikleri, ne de nedenleri yeteri kadar açıklığa erştirilmiş sayılamaz. Ancak, son yıllarda, aynı amaçla, büyük çabalar gösterildiğini kanıtlayan örnekler çoktur: Bullen (1974), Dziewonski et al (1975).

Yakın zamana kadar, Ay-Yer çekim etkileşmesi (AYÇE = tidal) sonucu sağlanan verilerden yer'in ortalama rijiditesi ve viskozitesinin saptanması ile yetinilir; derinliklerinden geçerek yüzeye erişebilen sismik enerjinin sözcüsü olan sismogramlar değerlendirilirken, yer, tam elastik özellikte nitelenirdi.

Son on yıldanberi, gezegenimizin gelişim ve ilgili problemlerinin (dağoluş, depremler, kıtasal yerdeğiştirmeler v.b.) araştırılmasında sağlanan gelişmeler, yer içinin elastik olmayan özelliklerini inceleme sorununa ayrı bir önem kazandırdı.

Sözü edilen süreksizliklerin sınırlarının belirlenmesinde en elverişli sonuçlar, sismik dalgaların yansınması (refleksiyon) ve geçmesi (transmission) ile ilgili yöntemlerden sağlanmakta ise de, yol-zaman eğrilerinden türetilen sismik hızların derinlikle değişimi için güvenilir sonuçlar sağlanamamıştır: Chinnery-Toksöz (1967), Herrin et al (1968), Chinnery (1969), Kanamori (1970), Hales (1974), Kulhanek-Brown (1974)...

Bu süreksizliklerin özelliklerinin belirlenmesinde, prospeksiyon sismiğini de ilgilendirmediği nedeniyle, daha çok çalışmalar yapılmıştır: Epstein (1930), Wolf (1937), Brekhovskikh (1960), Scholte (1961), Onda (1965), Berzon (1969), Johnson (1972, 1974)...

Aynı süreksizliklerin nedenleri ise, ya laboratuvarlardan (yüksek ısı ve basınç deneyleri), yahut kuramsal yollardan sağlanan sonuçların yer içine benzetilmesi (Anoloji) ile yorumlanmaktadır: Toksöz et al (1967), Nur (1971), Gueguen-Mercier (1973), Watt et al (1975).

Bütün bu çabalara rağmen SEM [Standart Earth Model, Bullen (1974)] ve PEM [Parametric Earth Model, Dziewonski (1975)] belirleme yarışında güvenilir bir yer içi modeli seçilemeyişinin gizleri, sözkonusu süreksizliklerin sınırlarının, özelliklerinin ve nedenlerinin içerisinde düğümliyor denebilir.

Son on beş yıllık sürede ki teknolojik gelişmeler (uzun periyotlu sismograflarla birlikte, geniş hafızalı ve çok hızlı hesap makineleri), yer içinin elastik olmayan özelliklerinin araştırılmasında çeşitli yöntemlerin uygulanmasını sağladı: Sismik dalgaların genliklerinin uzaklıkla ve zamanla azalması (sırası ile absorpsiyon ve attenuation); yüzey dalgalarının dispersiyon özelliklerinin belirlenmesi; spektral analiz...

Bu yöntemlerle visko-elastik niteliklerin (viskozite, relaksasyon zamanı, atenuation faktörü) belirlenebilmesi, maddenin hal denkleminin çözümünü kolaylaştırmış; aynı zamanda, sismik hız süreksizliğinin gerek özelliğini, gerekse nedenini açıklamaya yeni bir olanak sağlamıştır: Watt et al (1975).

Bu çalışmada, elastik olmayan (anelastik) özelliğin sismik hızlara etkisi denetlenmektedir.

ELASTİK OLMAYAN (ANELASTİK) ÖZELLİK :

Bilindiği gibi, bir ortamın herhangi bir P noktasına uygulanan etki (çekme veya itme=stress) ile, P çevresinde oluşan şekil değişikliği (strain) arasındaki ilişki, söz konusu ortamın elastiklik özelliğini niteler. Sırası ile stress-strain, rijidite, viskozite, relaksasyon zamanı : S, s, G, η , τ , ile gösterilmek üzere :

$$S_{ij} = 2 G s_{ij} \quad (1)$$

$$= 2 \eta s_{ij} \cdot \left(\frac{ds}{dt} = s \right) \quad (2)$$

$$= 2 G s_{ij} + 2 \eta \dot{s}_{ij} \quad (3)$$

$$S_{ij} + \tau S_{ij} = 2 \eta \dot{s}_{ij} \quad (4)$$

$$= 2 G s_{ij} + 2 \eta \dot{s}_{ij} \quad (5)$$

bu beş denklem tam elastikliği ve değişik anelastiklikleri nitelerler. Bullen (1975). Denklemlerden anlaşılacağı gibi, zamandan bağımsız ve lineer olan stress-strain bağıntısı (1), tam elastikliği; strain'ın, stressten geç kalması, yani stress-strain ilişkisi için, zamana bağlı çeşitli differansiyel denklemler (2), (3), (4), (5) yazılır. S_{ij} 'nin periyodik ve periyot değeri T'nin τ 'ya göre küçük veya büyük olması durumlarında anelastik ortamın değişik özellikleri nitelenmiş olur. Örneğin : viskozitesi η olan Newton'ien akışkan (2) ci; Kelvin-Voigt modelinde katı (3) cü, Maxwell modelinde viskoelastik ortam (4) cü ve standart linear solid özellik (5) ci denklemle ifade edilir.

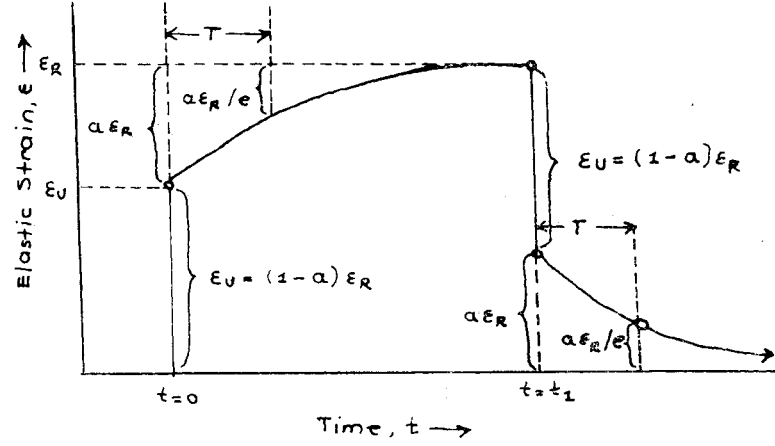
Bütün bunların fiziksel anlamı, periyodik streslerle etkilenen ortamda, strain'ın, stres'e göre gecikmesi enerjinin yokolmasına (sönümünü), enerjinin sönüm karakteristiği de, ortamın elastik özelliğini belirler, önerisi ile noktalanır.

Bu çalışmada asıl amaç, enerji sönümünü gerektiren strain'ın zamanla bağıntısını ve relaksasyon zamanı diye bilinen geçerli sürenin, sismik hızlara etkisini belirlemektir.

Sözü edilen kavramları yeteri kadar açıklığa erdirmek amacı ile aşağıdaki deneme yapılır; Çabuk etkilemelerde parçalanana, yavaş etkilemelerde ise bir tür akışkanlık gösteren (örneğin asfalt yapımında kullanılan zift, reçine, v.b.) ortam $t=0$ anında etkilenip, etki t_1 anına kadar sürdürülür, (zift üzerine ağır bir kütle düşürülüp t_1 anına kadar kaldırılmazsa) ve t_1 anında kaldırıldığında, zamana bağlı strain değişimi şekildeki gibi olur Hayden (1965).

$$\text{Strain-zaman bağıntısı etki süresince; } s = s_r [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (6)$$

$$\text{Etkinin giderilmesiyle; } s = a s_r \exp[-\{(t-t_1)/\tau\}] \quad (7)$$



THE ELASTIC AFTEREFFECT

ifade edilir. Relaksasyon zamanı τ , strain'in $1/e$ değerine erişmesi için geçen zamandır ve ortamın sönüm yeteneğinin ölçüsü niteliğindedir.

Sismik hızların süreksizlik gösterdiği bölgeye (örneğin düşük hız zonu veya Manto-Çekirdek sınırı) uygun bir model bulmak amacı ile gerek deneysel, gerek kuramsal yoldan çok çaba gösterilmiştir: Shimozuru (1954), Nakamura (1956), Gutenberg (1959), Jeffreys (1959), Meidav (1964), Nur (1971), Burdick-Anderson (1975)...

Bütün bu çabalarda —(1, ..., 5) eşitliklerinden anlaşılacağı gibi— sadece shear modülünde relaksasyon etkinin payı araştırılmıştır. Bulk modülündeki relaksasyon etkinin payını Kuhn-Vielhauer (1953) araştırmışlardır. Sağladıkları sonuçların sismolojik verilere uygunluğu, manto-çekirdek sınırı için, incelenmiş; relaksasyon etki ile çekirdek sınırındaki sismik dalga yansımalarının olanaksızlığı sonucuna varılmıştır, Soysal (1958).

Herzfeld-Litovitz (1959), deneysel yoldan shear modülü sıfır olmayan akışkan türünü varlığını ve matematik modelini belirlemişlerdir. Çekirdek maddesini, Herzfeld-Litovitz modeline uygun olduğu varsayımı ile, sismik dalgaların manto-çekirdek sınırında absorpsiyon, yansıma ve geçme özellikleri incelenmiş, kuramsal, olumlu sonuçlar sağlanmışsa da, parametrelerin bilinen değerlerinin yetersizliği nedeniyle, uygulama olanağı bulunamamıştır, Soysal (1966).

Geçen süre içinde, gerek anelastik, gerekse diğer sismik parametrelerin değerlerine daha iyi yaklaşımlar yapılabildi. Aynı zamanda, anelastik parametrelere yaklaşım oranında anelastikliğin önemi artmış oldu.

Bütün bu nedenler, konuya yeniden değinmeyi gerektirdi. Problem bütün olarak, düşük hız zonu ve çekirdek sınırında relaksasyon etkinin incelenmesidir. Burada sadece, çekirdek sınırında, bulk ve shear modüllerine relaksasyon etkinin değeri incelenecektir.

STRESS-STRAIN İLİŞKİSİ

Tam elastik ortamda stres-strain ilişkisi, daha önce de belirtildiği gibi

$$\text{hacımsal etkileşme için: } S_{ii} = -Ks_{ii} \quad (3a)$$

$$\text{yüzeysel etkileşme için: } S_{ij} = 2Gs_{ij} \quad (3b)$$

eşitlikleri ile belirlenir. (K, bulk; G shear modülü). Tam elastik olmayan ve $G \neq 0$ olan akışkan halinde, hacımsal ve yüzeysel etkileşmelerde sırası ile

$$S_{ii} = - \frac{K_0 + \tau K_\infty \partial/\partial t}{1 + \tau \partial/\partial t} s_{ii} \quad (3a)$$

$$S_{ij} = 2 \frac{G_0 + \tau G_\infty \partial/\partial t}{1 + \tau \partial/\partial t} s_{ij} \quad (3b)$$

eşitlikleri öngörülmüştür. Herzfeld-Litovitz (1959), 0 ve ∞ indisleri düşük ve yüksek frekanslara denk değerleri simgelerler. Matematik anlamda (5) ve (9b) eşitlikleri özdeşdir; ancak fiziksel yorumda değişik kavramlar türetilmektedir; statik, dinamik modüller v.b...

Stress ve strainlerin zamanın basit harmonik fonksiyonu oldukları, en basit hal olarak, tek bir relaksasyon zamanının geçerliliği gözönüne alınarak (9a) ve (9b) yerlerine

$$S_{ii} = - \frac{K_0 + J K_\infty \omega \tau}{1 + J \omega \tau} s_{ii} \quad (10a)$$

$$S_{ij} = 2 \frac{G_0 + J G_\infty \omega \tau}{1 + J \omega \tau} s_{ij} \quad (10b)$$

yazılabilir.

(10a) ve (10b) eşitliklerinin reel kısımları sismik verilerden hesaplanabilen, yahut dinamik modülleri, sanal kısımların ise,, bulk ve shear viskozitelerini simgeledikleri öngörüldüğünde (10a) ve (10b) eşitliklerinden kompleks bulk ve shear modülleri:

$$K = K_0 + K_r \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} + J K_r \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (11a)$$

$$G = G_0 + G_r \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} + J G_r \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (11b)$$

$$(K_r = K_\infty - K_0, G_r = G_\infty - G_0)$$

(11a, b) eşitlikleri ile belirlenir; bu eşitlikleri sadeleştirmek amacı ile

$$K_o + K_r \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} = K_D \text{ ve } K_r \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} = \eta_B;$$

$$G_o + G_r \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} = G_D \text{ ve } G_r \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} = \eta_S;$$

(D := Dinamik, η = viskozite, B = Bulk, s = shear) dönüşümleri yapıp (11a, b) yeniden yazıldığında da

$$K = K_D + J \eta_B \quad (11a')$$

$$G = G_D + J \eta_S \quad (11b')$$

sağlanmış olur.

SİSMOLOJİK VERİLERİN UYGULANIŞI

A. Bulk Modülü için uygulama :

Bu uygulamada yoğunluğun sürekliliği, elastik parametrelerin süreksizliği söz konusudur. Çekirdek sınırında yoğunluğun sürekli olması halinde $\rho = 8,7 \text{ gr/cm}^3$ iken bilinen mertebede hız süreksizliğinin meydana gelmesi için bulk modülünün 10^{13} den $5,8 \cdot 10^{12}$ dyn/cm² ye düşmesi gerekir; yani $K_c = 0,58 K_m$ olmalıdır. (ç, çekirdeği; m, mantoyu simgeler). Aksi halde yoğunluk 5,54 değerinden 9,76 değerine sıçrarken bulk modülü $6,2 \cdot 10^{12}$ olarak hesaplanmıştır, Bolt (1957).

Söz konusu parametrelerin bugün geçerli olan değerlerinin relaksasyon etki yararına geliştiği söylenebilir. Dzievonski (1975). Rölaksasyon kuramının verdiği sonuçları karşılaştırabilmek için « K_d » ile sembolize edilen, ölçülen modül ifadesini, değişik olarak

$$\frac{K_D}{K_\infty} = \frac{K_o}{K_\infty} + (1 - \frac{K_o}{K_\infty}) \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

şeklinde yazalım; bu son bağıntıdan « K_d » nin « K_o » ve « K_∞ » değerlerine asimtotik olarak yaklaştığı açıkça görülmektedir. $\omega\tau \ll 1$ için $K_d \rightarrow K_o$ ve $\omega\tau \gg 10$ için ise, $K_d \rightarrow K_\infty$ farkları mutlak değerlerinin % 1 inden küçük, yani etkin değişim aralığının

$$0,1 < \omega\tau < 10$$

olduğu ve $\omega\tau = 1$ için, $K_d = \frac{K_o + K_\infty}{2}$ sonucuna varırız. Ölçülen « K_d » değeri, limit

halde « K_∞ » ve « K_o » değerlerine eriştiğine göre, bu sonuçları manto ve çekirdekte ölçülen değerler olarak, yani $K_\infty = K_m$ ve $K_o = K_c$ kabul edebiliriz. Ölçülen « K_c » değeri, « K_m » kadar kesin olmadığından (çekirdeğe ait bilgilerin yetersizliği dolayısıyla « K_c », « K_m » yanında ihmal edilebilecek mertebeden ise $K_d = 0,5 K_m$ olur ki, $K_c = 0,58 K_m$ ifadesinde alt sınırın 0,5 olacağını gösterir. Zaten 0,58 değeri de seçilen hız ve yoğunluk değerlerine göre değişen bir parametridir. «p» tipi dalga hızının, manto'da 13,64 km/s den, çekirdekte 8,1 km/sn değerine düşmesinin, yoğunluğun sürekli olması ile de mümkün olabileceği sonucuna varılır. Ancak burada açıklanması gereken bir özellik kalıyor: Rölak-

sasyon zamanının etkin olduğu değişim aralığı, gözlenen dalga periyotlarına uyar mı? Daha önce « $\omega\tau$ » için müessir değişim aralığının

$$0,1 < \omega\tau < 10$$

olduğu belirtilmişti; bu ifade

$$\frac{T}{20\pi} < \tau < \frac{10T}{2\pi} \left(= \frac{5T}{2\pi} \right)$$

şeklinde yazılır ve çekirdek sınırında yansıyan dalgaların gözlemlenen periyot değerleri (1 ile 5 sn) gözönüne alınırsa, yaklaşık olarak τ için etkin değişim aralığının sınırları tayin edilmiş olur. Bu sınırların teorideki sınırlara tamamen uyduğu açıktır.

B. Shear Modülü için uygulama :

Önce de belirtildiği gibi, shear modülünde rölaksasyon etkiyi bir çokları incelemiştir : Bu araştırmacıların hepsi çekirdekte «G» nin sıfır mertebesine düşebileceği kanısındalar; sadece Anderson-Kovach (1964), azalma mertebesine dokunmaksızın «G» nin çekirdekte 2.10^{12} den küçük olacağını belirtiyorlar.

Kuramsal görüşler ne olursa olsun, problemi güçleştiren, çekirdekte shear modülü ile «S» tipi dalga hızlarının bilinmeyişi oluyor. Biz bu güçlüğü, çekirdeğin viskozite ve rölaksasyon zamanı değerlerinden faydalanarak yenmeyi denemekteyiz. Bilinen kompleks ve dinamik shear modülü

$$G = G_d + J \omega \eta_s$$

$$G_d = G_0 + (G_\infty - G_0) \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2}$$

ifadelerine dikkat edilirse, $\omega\tau \gg 1$ için, $G_d = G_\infty$ yani $G_d = G_m$ demektir. Çoğunlukla sıfır kabul edilmekte olan « G_0 » = G_c nin hesaplanması için, shear viskozitesinin

$$\eta_s = \frac{G_\infty - G_0}{1 + \omega^2\tau^2} \omega\tau$$

ifadesinden, $\omega\tau \ll 1$ için

$$\eta_s = (G_\infty - G_0) \omega\tau$$

olacağı açıkça görülür.

Çekirdeğin hesaplanan en küçük viskozite değeri 5.10^8 poise (Jeffreys, 1959, pp. 254 - 255); rölaksasyon zamanı için, bu olayda etkin olan değerlerin en büyüğü 10 sn. alındığında

$$5.10^8 = (G_m - G_c).10$$

$$G_m - G_c = 5.10^7$$

ve « G_m » değerinin $(2,5 \simeq 4,65) \cdot 10^{12}$ mertebesinde olduğu bilindiğine göre (Bolt, 1957), çekirdeğin shear modülü için

$$G_o = G_c = 25 \cdot 10^{11} \text{ değeri bulunur.}$$

Bu şartlar altında, çekirdekdeki «S» tipi dalga hızının 1 km/sn. değerinden küçük olamayacağı sonucuna varılır. Hızı bu mertebede olan dalgaların çekirdeği geçip, geçmeyeceği incelenmesi gerekli bir problemdir.

ÖNEMLİ KAYNAKLAR

- Anderson, D.L. — Kovach, R.L. Proc. Nat. Acad. Sciences, 1964.1 (2)
Bolt, B.A. M.N.R. Astr. Soc. Geophys. Supply. 1957 (7)
Brekhovskikh, L.M. Waves in Layered Media. Acad. Press 1960
Bullen, K.E. Physics Earth. Planet. Interior 1974 (9)
Bullen, K.E. The Earth's Density. Chapman and Hall, London (1975)
Burdick, — Anderson, D.L. J.G. Res. A2. 1975.80 (8)
Dziwowski, A.M. et al Phys. Earth. Planet. Interior 1975.10 (1)
Guéguen, Y. — Mercier, J.M. Phys. Earth. Planet. Interior 1973.7
Hales, A.L. J.G. Res. 1974.9 (7) ve 9 (9)
Hayden, W. et. al. Mechanical Behavior. John-Wiley. 1965
Herrin, E. et. al. Bull. Scis. Soc. Am. 1968.58
Herzfeld, K.F. - Litovitz, T.A. Absob. and Dispers. of Ultra Sonic Waves. Acad. Press. 1959
Jeffreys, H. The Earth, Cambridge Uni. Press 1959
Kulhanek, O. - Brown, R.J. Pageoph. 1975.112 (3)
Kuhn, W. - Vielhauer, S. Geochimicu et Cosmochimica Acta 1953.3 (4)
Nur, A. J.G. Res. 1971, 76 (5)
Soysal, H. Doktora tezi 1958. yayınlanmamış
Soysal, H. Doçentlik tezi 1966. yayınlanmamış
Watt, J.P. et al. Geology (Geol. Soc. Am.). 1975.3 (2)