



## Güneybatı Anadolu'da kabuk ve üst mantoda sismik dalgaların frekans bağımlı soğurulması

*Frequency dependent attenuation of seismic waves in the crust and upper mantle in southwest Anatolia*

Şakir ŞAHİN<sup>1</sup>, Ömer ALPTEKİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, ISPARTA

<sup>2</sup> İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL

Geliş (received) : 24 Ocak (January) 2006

Kabul (accepted) : 04 Temmuz (July) 2006

### ÖZ

Bu çalışmada, genliğin zaman ve uzaklıkla azalmasına dayanan koda dalgası ve koda normalizasyon yöntemleri kullanılarak güneybatı Anadolu'da kabuk ve üst mantoda frekansa bağımlı olarak yayılan makaslama (S) dalgasının soğurulma özellikleri incelenmiştir. Bu yöntemler, heterojen bir ortamda saçınmış koda dalgalarının soğurulma özelliklerine dayanır. Veriler merkez frekansı 0.75, 1.5, 3.0, 6.0 ve 8.0 Hz olan Butterworth filtresi ile süzgeçlenmiş, sismogramların koda genliklerinin eğimlerinden koda kalite faktörü  $Q_c$  ve S-dalgası ile koda dalgası spektral genlik oranlarından bölgedeki  $Q_s$  soğurulma özellikleri belirlenmiştir.  $Q_c$  değerleri hem zamanın (30-150 s), hem de frekansın (0.75-8.0 Hz),  $Q_s$  değerleri ise S-dalgası ve koda dalgası spektral genlik oranlarının kaynak-alıcı uzaklığının fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Güneybatı Anadolu için koda Q ( $Q_c$ ) değerleri  $18 \pm 3$  ile  $658 \pm 84$ , S dalgası Q ( $Q_s$ ) değerleri ise  $77 \pm 4$  ile  $697 \pm 86$  arasında saptanmıştır.  $Q_c$  değerlerinin frekans bağımlılığı  $0.886 \pm 0.007$  ile  $0.859 \pm 0.027$  arasında ve 40-160 km kaynak-alıcı mesafesi için S dalgası frekans bağımlılık derecesi  $0.996 \pm 0.014$  olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Güneybatı Anadolu, heterojenite, koda dalgası, saçınım, soğurulma.

### ABSTRACT

The attenuation of the shear (S) wave in the earth's crust and upper mantle in southwest Anatolia is estimated by using the coda wave and coda normalization methods which are based on the decrease of coda wave amplitude in time and distance. These methods depend on the attenuation properties of scattered coda waves in a heterogeneous medium. Seismograms are Butterworth filtered for centre frequencies of 0.75, 1.5, 3.0, 6.0 and 8.0 Hz, and the coda quality factor ( $Q_c$ ) values are computed from the slope of coda wave amplitude decay and S wave quality factor  $Q_s$  values are determined from the ratio of S wave and coda wave spectral amplitudes. The  $Q_c$  values are calculated both as a function of time (30-150 sec) and as a function of frequency (0.75-8.0 Hz),  $Q_s$  values are determined as a function of the ratio. The  $Q_c$  and  $Q_s$  values vary from  $18 \pm 3$  to  $658 \pm 84$  and from  $77 \pm 4$  to  $697 \pm 86$ , respectively, in the southwest Anatolian region. The frequency dependence of  $Q_c$  is described by  $0.886 \pm 0.007$  and  $0.859 \pm 0.027$  for lapse times of 30 sec and 130 sec respectively, and the frequency dependence of S wave attenuation between 40-160 km epicentral distance is described by  $0.996 \pm 0.014$ .

**Key words:** Southwest Anatolia, heterogeneity, coda wave, scattering, attenuation.

Ş. Şahin

E-mail: sakir@mmf.sdu.edu.tr

## GİRİŞ

Kabuk ve manto yapısının belirlenmesinde elastik dalga yayılımının ve buna bağlı soğurulma özelliklerinin araştırılması çok önemlidir. Sismik dalgaların soğurulması, kabuk içerisindeki heterojenite ve/veya elastik olmayan etkiden dolayı dalga enerjisinin zamanla ve uzaklıkla azalmasıdır. Soğurulmanın belirlenmesiyle kabuk içerisindeki süreksizliklerin fiziksel özellikleri, yapıların devamlılığı, sıcaklık değişimleri vb. gibi hususlar ortaya konulur. Tektonik bakımdan aktif olduğu bilinen güneybatı Anadolu'da S-dalgası soğurulma özelliklerinin ortaya konulmasında tektonik süreksizliklerde saçınımlar ile oluşan koda dalgalarının yayılım özelliklerinden yararlanılmıştır.

Koda dalgalarının oluşum mekanizmaları üzerinde ilk çalışma Aki (1969) ve Aki ve Chouet (1975) tarafından yapılmış ve Aki (1980) tarafından kodanın oluşumu üzerine modeller geliştirilmiştir. Bu modellerden tek saçılma modeli günümüze değin bir çok araştırmacı tarafından yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Koda dalgalarından elde edilen kalite faktörü  $Q$ , tektonik olarak aktif ve durağan bölgelerin ayırımını en iyi gösteren değişkendir.

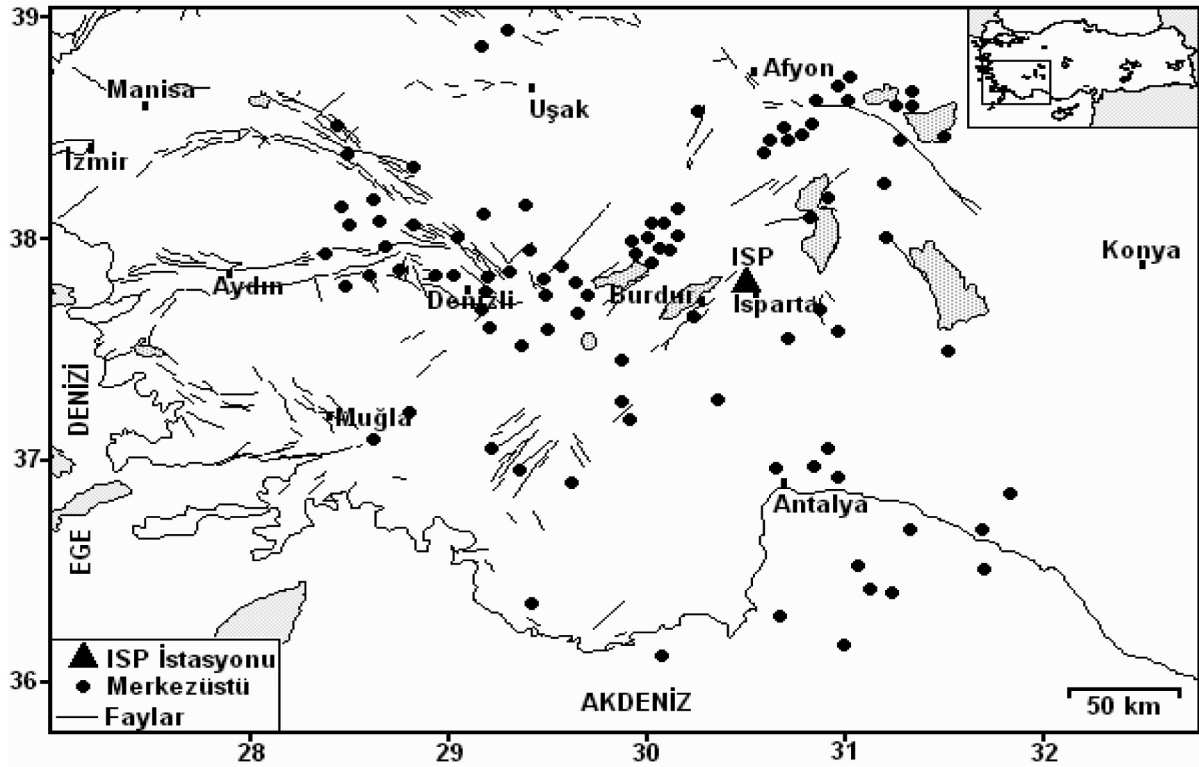
Kodanın oluşum mekanizmasıyla ilgili olarak Sato (1977) tarafından geliştirilen ve günümüzde en popüler olan tek saçılma modeli, soğurulma hesapları için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, tek saçılma yöntemi çerçevesinde ilk kez Sato (1977) tarafından önerilen koda dalgası yöntemi kullanılarak soğurulma parametresi  $Q_c^{-1}$  hesaplanmıştır. Koda Normalizasyon Yöntemi ile S-dalgasının koda dalgasına spektral genlik oranları depremlerin Isparta (ISP) geniş bant deprem istasyonuna olan uzaklığın fonksiyonu olarak görüntülenip, genlik oranının azalımından soğurulma parametresi  $Q_s^{-1}$  hesaplanmıştır (Aki, 1980; Frenkel vd., 1990). En son aşamada, bölgeler için ortalama soğurulma parametresi  $Q^{-1}$  tanımlanırken  $Q_c^{-1}$  ve  $Q_s^{-1}$  değerleri birlikte kullanılmıştır. S-dalgası yayılım özelliklerinin, diğer bir ifadeyle soğurulma yapısının belirlenmesi ile ortamın heterojenliği ve bunun dalga yayılımına etkisi açıklanmaya çalışılmıştır.

## TEKTONİK

Güneybatı Anadolu, Alp-Himalaya orojenik kuşağı içinde yer almakta olup (Ketin, 1977), Ege, Anadolu ve Afrika plakalarının doğrudan dokanak halinde bulunduğu bindirme zonu içindedir. Ege hendeği ya da kuşağı boyunca, Afrika levhası kuzeye Ege-Anadolu levhasının altına  $5.5 \pm 2$  mm/yıllık bir hızla dalmaktadır (Toksöz, 1975; Le Pichon vd., 1973; Papazachos, 1973). Güney Ege'de KKD-GGB doğrultusunda %30-80, güneybatı Anadolu'da ise aynı doğrultuda %20 oranında genişleme meydana gelmiştir (Le Pichon ve Angelier, 1979). Ege'deki gerilme biçimi, Ege litosferi içindeki kuvvetlerce denetlenmekte ve Ege-Anadolu levhasındaki yüzey devinimleri, derin astenosfer içindeki konveksiyon hücrelerinin özelliklerini yansıtmaktadır (Mc Kenzie, 1970, 1972 ve 1978). Kıtaların çarpıştığı yerlerde depremler geniş kuşaklar içerisinde oluşurlar ve buralardaki deformasyonların karmaşık olduğuna işaret ederler (Alptekin, 1973). Güneybatı Anadolu'daki depremler Ege-Anadolu bloğunun batıya doğru hareketinin yanı sıra, Girit ve Kıbrıs yitim zonlarıyla ilgilidirler (Dewey ve Şengör, 1979). Koçyiğit vd. (2002)'ne göre güneybatı Anadolu'da etkin olan blok faylanmalar değişik doğrultularda birbirlerini kesen normal faylar şeklinde gelişmişlerdir. Bu kırıklar, değişik doğrultulu, ancak aynı dönemde oluşmuş faylardır (Şekil 1). Güneybatı Anadolu'da KD-GB, KB-GD, D-B ve K-G gidişli ve eş yaşlı normal fay sistemlerinin gelişmiş bulunması, bu alanın yeni tektonik dönemde çekme tektoniği denetiminde gelişen blok faylanma ile oluştuğunu kanıtlamaktadır (Koçyiğit, 1984). Grabenleşme, birbirini izleyen basınç ve çekim modeli içinde yer almaktadır. Kuvaterner'de tüm Ege ve Anadolu basınç altında kalmıştır (Papazachos ve Comninakis, 1977).

## VERİ TABANI

Bu çalışmada kullanılan veriler, güneybatı Anadolu'da meydana gelmiş depremlerin jeofon kayıtlarına bağlı Isparta (ISP) istasyonunda üç bileşen olarak kaydedilmiş toplam 78 adet depreme ait kayıtlardan oluşmaktadır. Depremler güneybatı Anadolu'da ( $36^{\circ}$ - $39^{\circ}$  K enlem ve  $28^{\circ}$ - $32^{\circ}$  D boylamlarında) 1996-2000 yılları arasında



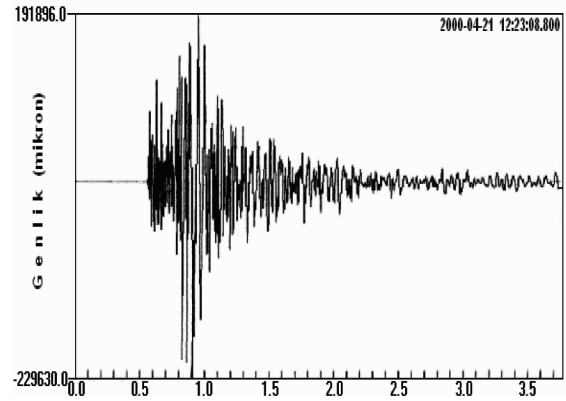
Şekil 1.  $Q_c$  ve  $Q_s$ 'in belirlenmesinde kullanılan depremlerin merkezüstü dağılımı ve güneybatı Anadolu'nun yalınlaştırılmış sismotektonik haritası (Şaroğlu vd., 1992; Veriler GEOFON'a bağlı Isparta (ISP) istasyonunda üç bileşen sayısal olarak kaydedilmiş olan 1996-2000 tarihleri arasında elde edilmiştir).

Figure 1. The epicenters of the earthquakes used in this study to determine  $Q_c$  and  $Q_s$  and simplified seismotectonic map of southwestern Anatolia (Şaroğlu et al. 1992; The data was collected between 1996 and 2000 at the Isparta (ISP) station of the GEOFON array).

kaydedilmiş olup, sismograf tepki fonksiyonu 0.02-50 Hz'dir. Veriler, 20 Hz broad-band düşey bileşenden oluşmaktadır. Kullanılan depremlerin yerel büyüklükleri ( $M_L$ ) 3 ile 5 arasında değişmektedir. Deprem kayıtlarında, sinyal gürültü oranı 2 ve daha büyük olarak kabul edilmiştir. Depremlerin merkezüstü uzaklıkları ise, 40 km ile 160 km arasında değişmektedir (Şekil 1 ve 2).

## YÖNTEM

Sato (1977) tarafından geliştirilen tek saçılma modeli, özellikle 100 km'den daha fazla kaynaklı mesafesi içeren verilerin soğurulma hesapları için uygulanmıştır. Tekil saçılma (Single Isotropic Scattering - SIS) olarak adlandırılan bu model çerçevesinde koda dalgası yöntemi ve koda normalizasyon yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 2. Güneybatı Anadolu'da 21/04/2000 tarihinde 38.84 K enlem ve 29.33 D boylamında oluşan ve ISP istasyonunda kaydedilen  $M_L = 5.2$  büyüklüğünde bir depremin düşey bileşen sinyali ( $t_0 = 12:23:08.80$  UT).

Figure 2. Vertical component recording at the ISP station of an earthquake with  $M_L = 5.2$  which occurred in southwest Anatolia on April 21, 2000 ( $t_0 = 12:23:08.80$  UT, epicenter coordinates, 38.84 N and 29.33 E).

### Koda Dalgası Yöntemiyle $Q_c$ 'nin Belirlenmesi

Küresel yayılım ve izotropik saçılma varsayımına bağlı olarak koda kalite faktörü  $Q_c$

$$\ln(A_c(f, t) / K(a)) = \ln A_0(f) - \pi f t / Q_c \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $A_0(f, t)$  koda dalgasının genliği,  $A_0$  kaynak faktörü,  $f$  frekans ve  $t$  depremin oluş zamanından itibaren ölçülen zamandır.  $K(\alpha)$  geometrik yayılım faktörü,

$$K(\alpha) = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{\alpha + 1}{\alpha - 1} \right) \quad (2)$$

eşitliği ile verilmektedir.  $K(\alpha)$ , S-dalgasına yakın kesme zamanında ( $t_c$ ) artan koda dalgası genliklerinin etkisini içermektedir.  $a = t / t_s$  ile verilen eşitlikte  $t_s$ , S-dalgası seyahat zamanını ifade etmektedir. Eşitlik (1)'den görüldüğü gibi,  $\ln(A_c(f, t) / K(a))$  ve  $t$  arasında doğrusal bir ilişki vardır ve bu ilişkiden elde edilen eğimden  $Q_c(f)$  hesaplanır (Sato, 1977). Burada  $b$  eğim değeridir. Eşitlik (1)'de  $A_c(f, t)$  merkez frekansı "f" olan bant geçişli filtre ile süzülükten sonra elde edilir. Koda zarfı kayan bir zaman penceresindeki sinyalin RMS genliklerinin bulunmasıyla elde edilir. Bu değer verilen bir bölge için alıcıdan bağımsızdır (Aki, 1969; Aki ve Chouet, 1975).

Novela-Casanova ve Lee (1991), kesme zamanına bağlı olarak koda genliklerinin hesaplanmasında, Sato (1977)'nin geometrik yayılım faktörünün yüksek soğurulmalı ortamlar için iyi sonuç verdiğini göstermiştir.  $Q_c$ , en küçük kareler yöntemi kullanarak her frekans için hesaplanmıştır.  $Q_c$ 'nin frekans bağımlılığı

$$Q_c = Q_0 f^n \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;  $Q_0$  1 Hz'deki  $Q_c$  değerini,  $f$  frekansı,  $n$  ise  $Q_c$ 'nin frekans bağımlılığı derecesini gösterir.

Bu çalışmada, sinyal/gürültü oranı 2 ve daha büyük olan sismogramlar seçilmiştir (bkz. Şekil 2). S varış zamanından başlayarak, sinyal/gürültü oranının 2 ve üstü olduğu noktaya kadar olan kısım içindeki sismogram parçası kullanılır.

miştir. Koda Q'nun RMS genliğini hesaplamak için kullanılan zaman penceresinin uzunluğu, koda Q'nun azalımı ile ilişkilidir. Koda Q azalımı; depremlerin büyüklüğü, uzaklık ve kesme zamanının fonksiyonudur. Sismogramın seçilen kısmı, 8 kutuplu ardışık Butterworth filtresi kullanılarak, merkez frekansları 0.75, 1.5, 3.0, 6.0 ve 8.0 Hz'lerde bant geçişli olarak filtrelenmiştir. Sismogramın filtrelenmiş kısmının koda zarfı, 1 saniye aralıklar ile 2 saniye genişlikli zaman penceresi zaman serileri üzerinde kaydırılarak ve bu zaman pencereleri içinde kalan sinyale ait RMS hesaplanarak elde edilmiştir.

### Koda Normalizasyon Yöntemiyle $Q_s$ 'in Belirlenmesi

Koda normalizasyon yöntemi; değişik doğrultularda yayılan birçok deprem verisinden hesaplanan ortalama kaynak büyüklüğü ve zemin büyütmesinin, kaynak-alıcı doğrultusundan bağımsız olduğu ve ortalama değerler coğrafik olarak değişim gösterdiği varsayımına dayanmaktadır (Aki, 1980). Buna göre; S dalgası spektral genliğinin koda spektral genliğine bölünmesiyle kaynak, zemin ve alet ile ilgili etkiler giderilmektedir (Aki, 1980).  $Q_s$  değerleri, her istasyonda elastik olmayan koşulların, ya da saçılımın sebep olduğu kabuğa ait S dalgası genliğinin azalımından hesaplanır (Aki, 1980; Frankel vd., 1990). Bu amaçla S dalgasının ve koda dalgasının 128 ( $\Delta t = 6.40$  sn) noktalık uzunlukları seçilerek genlik spektrumları hesaplanmıştır. Aki (1980) ve Frankel vd. (1990) tarafından verilen;

$$\langle \ln \{ D^y A_s(f) / A_c(f) \} \rangle = a - b * D \quad (4)$$

ifadesi uzaklığın fonksiyonu olarak grafiği çizilmiştir. Burada;  $D$  kaynak-alıcı uzaklığı,  $g$  geometrik yayılım etkisi,  $A_s(f)$  S dalgası spektral genliği ve  $A_c(f)$  koda dalgası spektral genliğidir. Elde edilen sonuçlar, merkezüstü uzaklığına bağlı olarak işaretlenerek noktaları temsil eden en uygun doğru geçirilir.  $Q_s$  değeri,

$$Q_s = \frac{\pi f}{b \beta} \quad (5)$$

bağıntısından hesaplanır. Burada  $b$  doğrunun eğimi,  $f$  frekans ve  $\beta$  S-dalgası hızıdır. Uzunlu-

ğu 6.40 s olan zaman penceresi, S-dalgası için sırasıyla  $A_s(f)$  ve  $A_c(f)$  parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. S-dalgasının koda dalgasına genlik oranının ortalamaları, oktav frekans bandları 0.75, 1.5, 3.0, 6.0 ve 8.0 Hz'lerde merkezlenecek şekilde hesaplanmıştır. Bu işlem, istasyondan  $D-\Delta D$  ve  $D+\Delta D$  uzaklık aralığında yer alan her deprem için yinelenmiştir.  $\Delta D$  değeri 10 km olarak alınmıştır.  $\gamma$ , geometrik yayılım değerinin Frankel vd. (1990)'nin yapay modeller üzerinde yaptıkları çalışmalara göre merkezüstüne uzaklığın 15 ile 90 km arasında olması halinde  $\gamma$ 'nin 1 olarak alınmasının uygun olacağı ortaya konmuştur. Lg dalgalarına göre yapılan çalışmalarda merkezüstüne uzaklığın 100 ile 400 km olduğu durumda geometrik yayılım etkisinin  $0.7\pm 0.2$  olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada,  $\gamma$  değeri 100 ile 160 km arasındaki uzaklık için 0.9 olarak alınmıştır.

## BULGULAR

Koda analizi ile farklı kesme zamanlarında frekansın fonksiyonu olarak  $Q_c$  değerleri (Çizelge 1) ve bunların frekans bağımlılıkları ile korelasyon katsayıları (Çizelge 2) hesaplanmıştır. Şekil 3 ve 4'de ortalama  $Q_c$  değerlerinin kesme zamanına ve frekansa bağlı olarak değiştiği görülmektedir.  $Q_s$  değerinin hesaplanması için, S dalgası ve koda dalgası spektral genlik oranları farklı frekanslarda episantr uzaklığının fonksiyonu olarak görüntülenmiştir (Şekil 5). Çizelge 3'de frekansın fonksiyonu olarak hesaplanan  $Q_s$  değerleri verilmiştir.

Frekans arttıkça ortalama  $Q_c$  değerlerinin kesme zamanına bağımlılığı da artmaktadır. Farklı kesme zamanları için ortalama  $Q_c$  değerlerinin

frekans bağımlılığı bölgedeki fay zonlarının neden olduğu üst kabuktaki güçlü heterojenliklere karşılık gelmektedir. Tek saçılma modeli kuramına göre, ortalama  $Q_c$ 'ye karşılık gelen hacim, odağa uzaklık ve istasyonların oluşturduğu elipsoid ile tanımlanır (Lee vd., 1986). Örneklenen alan kesme zamanı arttıkça artmakta ve tüm kabuğu kapsamaktadır.  $D$  kaynak-alıcı mesafesi (km),  $v$  ortam hızı (koda dalgaları için 3.5 km /s alınabilir),  $t$  kesme zamanı  $x$  ve  $y$  yüzey koordinatları olmak üzere kodanın oluşumuna neden olan saçıcıların bulunduğu hacim,

$$\frac{x^2}{(vt/2)^2} + \frac{y^2}{[(vt/2)^2 - (D^2/4)]} = 1 \quad (6)$$

ifadesiyle verilir (Pulli, 1984). Merkezüstüne uzaklığın 15 km olduğu bir depremde, kesme zamanı 40 s'deki koda dalgaları, en fazla 100 km'lik bir uzaklık, 50 km'lik bir derinlikte ve toplam 15.000 km<sup>2</sup>'lik bir alanda konumlanan saçıcılardan etkilenmektedirler (Kempfer ve Garfunkel, 1994; Akıncı vd., 1996). Bu nedenle, büyük kesme zamanları için hesaplanan ortalama  $Q_c$  değerlerindeki farklar, esas olarak derin kabuktaki heterojenliklerden cisim dalgalarının geri saçınımdan kaynaklanmaktadır.

Eşitlik (3) ile temsil edilen frekans bağımlılığı, çalışılan bölgenin tektonik aktivitesi hakkında bilgi verir. Frekans bağımlılığının yüksek ve  $Q_0$  değerinin düşük olması, ortamın tektonik olarak aktif olduğunu gösterir. Güneybatı Anadolu'da düşük kesme zamanları için elde edilen yüksek frekans bağımlılığı, sığ kabuğun derinlere oranla daha heterojen olduğunu göstermektedir. Güneybatı Anadolu'da sığ kabukta düşük ortalama

Çizelge 1. Farklı kesme zamanları için frekansın fonksiyonu olarak kestirilen  $Q_c$  kalite faktörü ve standart sapması. Table 1.  $Q_c$  as a function of frequency for the different lapse times and the standard deviation values.

Frekans (Hz)	Kesme Zamanı (s)						
	30	50	70	90	110	130	150
0.75	18±3	33±5	50±4	63±4	71±3	78±4	88±7
1.5	42±4	50±4	87±3	97±4	120±5	131±4	163±11
3.0	49±6	95±6	146±4	178±6	219±10	255±20	335±49
6.0	121±6	187±6	241±7	308±14	419±28	531±60	542±79
8.0	163±24	239±19	303±12	428±14	549±42	750±157	658±84

Çizelge 2. Farklı kesme zamanları için frekans bağımlı  $Q_c$  değerleri ve korelasyon katsayıları (r).  
Table 2. The frequency dependent  $Q_c$  values for the different lapse times and the correlation coefficients, (r).

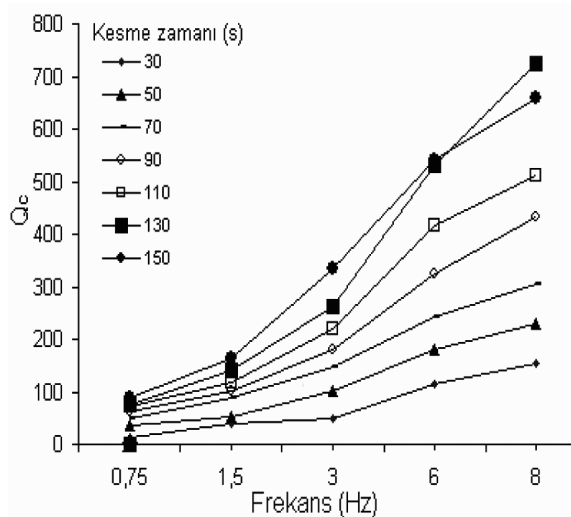
Kesme zamanı (s)	$Q_c = Q_0 * f^n$	r
30	$Q_c = (24 \pm 3) * f^{0.886 \pm 0.007}$	0.989
50	$Q_c = (39 \pm 4) * f^{0.860 \pm 0.0043}$	0.988
70	$Q_c = (63 \pm 3) * f^{0.755 \pm 0.015}$	0.999
90	$Q_c = (74 \pm 5) * f^{0.809 \pm 0.002}$	0.997
110	$Q_c = (87 \pm 3) * f^{0.870 \pm 0.018}$	0.998
130	$Q_c = (95 \pm 3) * f^{0.962 \pm 0.054}$	0.998
150	$Q_c = (116 \pm 10) * f^{0.859 \pm 0.027}$	0.994

$Q_c$  değerlerinin elde edilmesi, bölgede üst kabukta yaygın olarak gözlenen Isparta Açısı'na ait fay sistemleri (Burdur-Fethiye ve Akşehir - Antalya körfezi) ve bölgede etkin olan horst-graben yapılarıyla ilişkilidir.

Frekans bağımlılık derecesinin, (n),  $0.755 \pm 0.015$  ile  $0.962 \pm 0.054$  arasında değiştiği saptanmıştır. Heterojen veya sismik etkinliği yüksek (makaslama zonuyla ilgili) bölgelerin frekans bağımlılık derecesinin 0.7-1.1, daha homojen ve duraylı alanlarda ise 0.2-0.6 arasında değiştiği görülmektedir. Q'nun frekans bağımlılık katsayısı, bölgedeki heterojenitenin göstergesidir. Sığ ortamlarda Q düşük ve frekansa bağımlılık derecesi yüksek (kısa kesme zamanı duru-

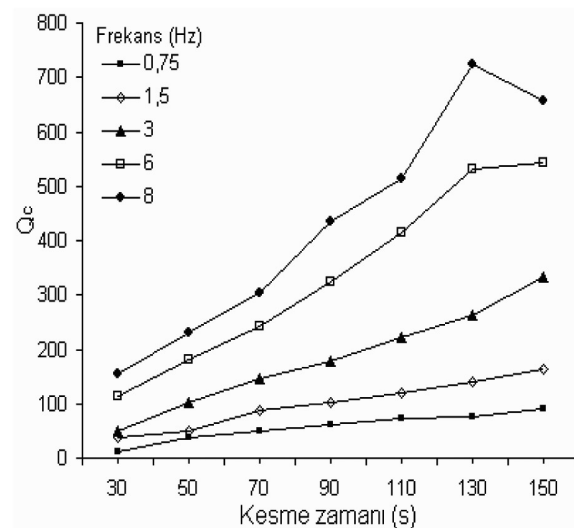
munda), derinlere doğru gidildikçe, Q yüksek ve frekans bağımlılık derecesi düşük olması beklenir. Ancak güneybatı Anadolu'da derinlere inildikçe soğurulmanın azalmasına karşın, frekans bağımlılık derecesinde değişik kesme zamanları için azalma ve artma şeklinde değişim görülmektedir. Bu durumun, bölgede belli derinliklerde var olabilecek düşük hız zonu veya oldukça aktif bir magmatik sokulumdan kaynaklanması söz konusudur. Bu değişim özellikle, Isparta Açısı dışındaki jeotermal havzaların yoğun olduğu (Denizli civarı) kısımlarda görülmektedir.

Ortalama Q değerleri sığ kabukta soğurulmanın derine oranla daha fazla olduğuna işaret etmektedir. Tüm kesme zamanları için ortalama  $Q_c$  de-



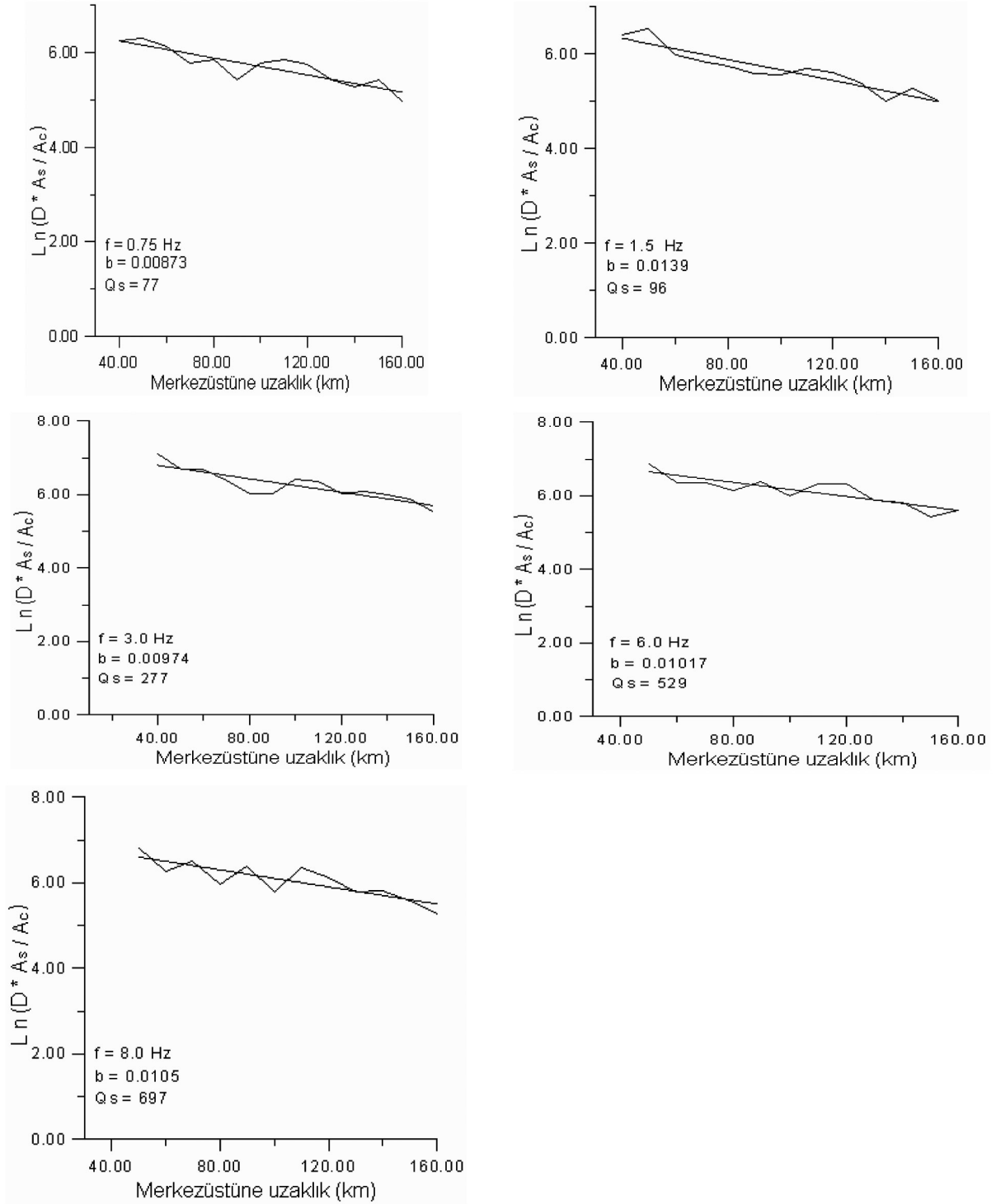
Şekil 3. Güneybatı Anadolu için farklı kesme zamanları için  $Q_c$ 'nin frekansın fonksiyonu olarak görüntülenmesi.

Figure 3. The frequency dependence of  $Q_c$  for different cut-off times in southwest Anatolia.



Şekil 4. Güneybatı Anadolu'da farklı frekanslar için  $Q_c$ 'nin kesme zamanının fonksiyonu olarak görüntülenmesi.

Figure 4. The variation of  $Q_c$  with cut-off time at different frequencies, in southwestern Anatolia.



Şekil 5. Isparta (ISP) istasyonuna ait kayıtlar için Eşitlik (4)'ün sol tarafındaki ifadenin değişik frekanslar (f) için uzaklığın fonksiyonu olarak görüntülenmesi (Doğrusal çizgi en küçük kareler yöntemi kullanılarak veriden doğru geçirme işlemi göstermektedir. Merkezüstüne uzaklık 40-160 km).

Figure 5. Variation of the left hand side of Equation (4) with distance for earthquakes recorded at the ISP station for different frequencies (The straight line represents the least squared fit to data. Epicentral distance is between 40 and 160 km).

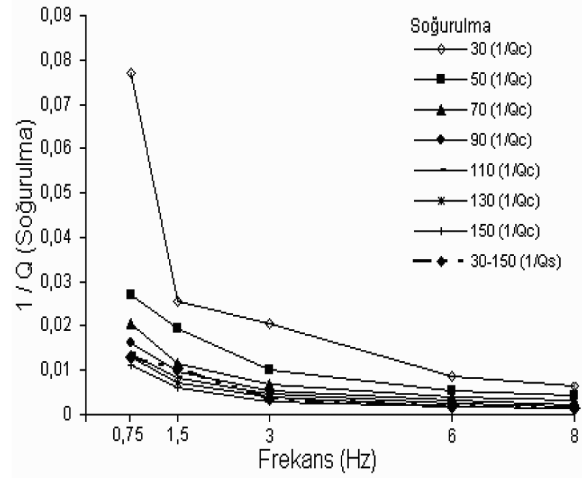
Çizelge 3. Eşitlik (5)'de verilen b değerleri ( $Q_s$  değerleri  $Q_s = (\pi f / b\beta)$  ifadesinden hesaplanmış olup, ifadede S-dalgası hızı,  $\beta = 3.5$  km/s olarak alınmıştır. Merkezüstü uzaklığı 40-160 km'dir.

Table 3. The b values in equation (5) (The  $Q_s$  values were calculated from the equation  $Q_s = (\pi f / b\beta)$  and S-wave velocity is assumed to be 3.5 km/s. Epicentral distances are between 30-160 km).

Frekans (Hz)	a	b	$Q_s$
0.75	6.2022±0.745	0.00873±0.00341	77±4
1.5	6.3074±0.534	0.01390±0.00519	96±6
3.0	6.9514±0.934	0.00974±0.00326	277±10
6.0	6.6729±0.828	0.01017±0.00521	529±36
8.0	6.8047±0.874	0.01050±0.00527	697±86

ğerlerinin frekansa bağımlılık oranı güneybatı Anadolu'da yaklaşık  $f^{0.857 \pm 0.023}$  olarak hesaplanmıştır (bkz. Çizelge 3). Bu değer, Marmara Bölgesi için hesaplanan değerden küçük ( $f^{1.1}$ ) (Horasan vd., 1998), Yunanistan'ın kuzeyinde ( $f^{0.91}$ ) (Hatzidimitriou, 1995), batı Anadolu'da ( $f^{0.76}$ ) (Akıncı vd., 1994) ve Erzincan ve çevresinde ( $f^{0.78}$ ) (Akıncı ve Eyidoğan, 1996) hesaplanan değerlere yakındır.

Güneybatı Anadolu'dan elde edilen verilerden hesaplanan  $1/Q_c$  ve  $1/Q_s$  soğurulma değerleri, frekansın fonksiyonu olarak Şekil 6'de gösterilmiştir. Bu şekilde iki husus dikkati çekmektedir. Birincisi  $Q_c$  değerlerinin frekansa bağlı olarak artması, ikincisi ise düşük frekanslara doğru  $Q_c$  değerlerindeki büyük saçılmadır. Bu saçılma; koda dalgalarının kesme zamanına, daha açık bir tanımlama ile pencere aralığının artmasına bağlı olarak değişik  $Q_c$  değerlerinin elde edilmesi şeklinde yorumlanmıştır. Diğer bir ifadeyle,  $Q_c$  değerlerindeki zamana ( $t_c$ ) bağlı değişim, bölgede derinlikle soğurulmanın değiştiğini belirleyen bir ilişkiyi ortaya koymaktadır (Pulli, 1984; Ibanez vd., 1990). Şekil 3'deki  $Q_c$  ve Şekil 6'daki  $1/Q_c$  değerlerindeki saçılma, kullanılan verinin geniş bir alan üzerinde incelenmesinden kaynaklanmaktadır. Eşitlik (1)'e göre, 30 s kesme zamanında ve 100 km merkezüstü uzaklığına sahip depremlere ait veriler kullanılarak elde edilen  $Q_c$  değerleri 20-25 km derinliğindeki bir alandan, 70 s kesme zamanında ve 150 km merkezüstü uzaklığına sahip deprem verileri kullanılarak elde edilmiş  $Q_c$  değerleri ise 100-110 km derinlikteki bir alandan elde edilmiş olmaktadır. Böylesine bir hacimde  $Q_c$  değerlerinin oldukça farklı değerler göstermesi doğaldır.



Şekil 6. Güneybatı Anadolu'da farklı kesme zamanları için frekansın fonksiyonu olarak  $Q_c^{-1}$  ve  $Q_s^{-1}$  değerleri (Kesme zamanı 30-150 s aralığındadır).

Figure 6. Computed  $Q_c^{-1}$  and  $Q_s^{-1}$  values as a function of frequency in southwestern Anatolia for different cut-off times (between 30-150 sec).

## SONUÇLAR

Bu çalışma sonucunda güneybatı Anadolu'da yüksek bir soğurulma yapısının varlığı anlaşılmaktadır. Zamana bağlı olarak gözlenen düşük  $Q_c$  değerleri ve uzun-kısa kesme zamanlarına karşılık gelen bu değerlerin yaklaşık olarak aynı derecede yüksek frekans bağımlılıkları, derinlikle ortamın heterojenitesini kaybetmediğini ve soğurulmayı arttıran karmaşık bir yapının ya da üst manto malzemesinin kabuğun üst kısmına yakın olduğuna işaret etmektedir. Güneybatı Anadolu'nun tümünde toplam 78 depreme ait veri kullanılarak elde edilen kısa kesme zamanına ( $t_c < 100$  s) ait  $1/\text{soğurulma}$  ve frekans bağımlılığı ortalama  $Q_c(f) = (63 \pm 3)f^{0.755 \pm 0.015}$  ve uzun kes-



me zamanına ait ( $t_c > 100$  s) ait  $1/Q_c$  ve frekans bağımlılığı ortalama  $Q_c(f) = (95 \pm 3)f^{0.962 \pm 0.054}$  olarak hesaplanmıştır. S-dalgası spektral genişliğinin koda dalgası spektral genişliğine oranının uzaklıkla azalımından  $Q_s(f) = (78 \pm 30)f^{0.872 \pm 0.062}$  olarak belirlenmiştir. Farklı kesme zamanları için, ortalama  $Q_c$  ve  $Q_s$  değerleri ve frekans bağımlılığının derecesi üst kabuktaki heterojen yapıya göre önemli değişiklikler göstermektedir. Bu heterojenlikler, bölgenin tektoniğine bağlı olarak şekillenmektedir. Frekans bağımlılık derecesinin kısa ve uzun kesme zamanları için birbirine yakın ve yüksek olması, derinlikle heterojenitenin kaybolmadığını, soğurulmayı artıran karmaşık bir yapının var olduğunu göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- Aki, K., 1969. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *Journal of Geophysical Research*, 74, 615-631.
- Aki, K., 1980. Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 85, 6496-6504.
- Aki, K., and Chouet, B., 1975. Origin of Coda wave: Source, attenuation and scattering effects. *Journal of Geophysical Research*, 80 (21), 3322-3342.
- Akıncı, A. ve Eyidoğan, H., 1996. Frequency-dependent attenuation of S and coda waves in Erzincan Region (Turkey). *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 87, 155-165.
- Akıncı, A. Taktak, G.A. ve Ergintav, S., 1996. Batı Anadolu bölgesinde koda dalgalarının soğurulması. *Jeofizik*, 10, 57-66.
- Alptekin, Ö., 1973. Focal mechanisms of earthquakes in western Turkey and their tectonic implications. Ph.D. Thesis, New Mexico Institute of Mining and Technology Socorro, New Mexico.
- Dewey, J.F., and Şengör, A.M.C., 1979. Aegean and surrounding regions complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone, *Bulletin of the Geological Society of America*, 90, 84-92.
- Frenkal, A., McGarr, A., Bicknell, J. Mri, J., Seeber, L., and Cranswick, E., 1990. Attenuation of high-frequency shear waves in the crust: measurements from New York State, South Africa and Southern California. *Journal of Geophysical Research*, 95, 17441-17457.
- Hatzidimitriou, P.M., 1995. S-wave attenuation in the crust in northern Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85 (5), 1381-1387.
- Horasan, G., Kaşlılar, A., Boztepe, A., and Türkelli, N., 1998. S- wave attenuation in the Marmara Region, northwestern Turkey. *Geophysical Research Letters*, 25 (14), 2733-2736.
- Ibanez, J.M., Del Pezzo, E., De Miguel, E., Herraiz, M., Alguacil, G., and Morales, J., 1990. Depth dependent seismic attenuation in the Granada zone (Southern Spain). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80 (5), 1232-1244.
- Kempler, D., and Garfunkel, Z., 1994. Structures and kinematics in the northeastern Mediterranean: A study of an irregular plate boundary. *Tectonophysics*, 234, 19-32.
- Ketin, İ., 1977. Genel Jeoloji: Cilt 1. İ.T.Ü. Maden Fakültesi Yayını, İstanbul.
- Koçyiğit, A., 1984. Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi tektonik gelişimi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 27 (1), 1-15.
- Koçyiğit, A., Ünay, E., and Saraç, G., 2002. Episodic graben formation and extensional neotectonic regime in west central Anatolia and the Isparta Angle: A case study in the Akşehir-Afyon graben, Turkey. In: E. Bozkurt, J. A. Winchester, J. D. A. Piper, (eds.), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*, Geological Society, London, Special Publication, 173, 405-421.
- Le Pichon, X., and Angelier, J., 1979. The Hellenic arc and trench system: a key to the neotectonic evolution of the eastern Mediterranean area. *Tectonophysics*, 60, 1-42.
- Le Pichon, X., Francheteau, J., and Bonnin, J., 1973. *Plate Tectonics: Developments in Geotectonics*. Elsevier, Amsterdam.
- Lee, W.H., Aki, K., Chouet, B. Johnson, J., Marks, S., Newberry, T., Ryall, A.S., Stewart, W., and Tottingham, D. M., 1986. A preliminary study of coda Q in California and Nevada, *Bulletin of Seismological Society of America*, 76, 1143-1150.
- Mckenzie, D.P., 1970. Plate tectonics of the Mediterranean Region. *Nature*, 226, 239-243.
- Mckenzie, D.P., 1972. Active tectonics of the Mediterranean Region. *Geophysical Journal of Royal Astrological Society*, 30, 109-185.
- Mckenzie, D.P., 1978. Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt: The Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal of Royal Astrological Society*, 55, 217-254.

- Novelo-Casanova, D.A., and Lee, W.H.K., 1991. Comparison of techniques that use the single scattering model to compute the quality factor Q from coda waves. *Pure and Applied Geophysics*, 135, 77-89.
- Papazachos, B.C., 1973. Distribution of seismic foci in the Mediterranean and surrounding area and its tectonic implications. *Geophysical Journal of Royal Astrological Society*, 33, 421-430.
- Papazachos, B.C., and Comninakis, P.E., 1977. Modes of lithospheric interaction in the Aegean area. *International Symposium on the Structural History of the Mediterranean Basins*, Split, Yugoslavia, 319-331.
- Pulli, J.J., 1984. Attenuation of coda waves in New England. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74 (4), 1149-1166.
- Sato, H., 1977. Energy propagation including scattering effects single isotropic scattering approximation. *Journal of Geophysical Research*, 25, 27-41.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Kuşçu, İ., 1992. Türkiye diri fay haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Toksöz, N., 1975. Subduction of the lithosphere. *Scientific American*, 233, 89-101.