

## YATAY TABAKALI ORTAMDA SÖNÜM İÇEREN SENTETİK SİSMOGRAMLARI VE GEÇİŞ ZONLARI

### SYNTHETIC SEISMOGRAMS WITH ATTENUATION IN HORIZONTALLY LAYERED MEDIUM AND TRANSITION ZONES

A. Güngör TAKTAK

D. E. Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir

**ÖZ:** Yakın zamanlara kadar, Yerkabuğunun elastik modelleri için hesaplanan Sentetik (yapay) Sismogram'ların büyük bir kısmı sönüm etkisini içermiyordu. Oysa sismik enerjinin sönümü (atenüasyon) katı yerküresinin çok önemli bir parametresidir. Eğer bu temel özellik olmasaydı, geçmişteki depremler tümüyle yeneden yankılanırdı. Bununla beraber, kuramsal sonuçları gözlenen arazi verileriyle karşılaştırmak için, teoride sönüm faktörü alınmadan birinci mertebeden bir yaklaşım yeterli görülüyordu.

Sismik sinyallerin genlik ve şekillerinin değişiminin gerçeğe yakın bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla sönüme bağlı yapay sismogram üreten bir yöntem verilmiştir. Yöntemin esasını yatay katmanlı bir ortamda düşey gelişli düzlem dalga için hızın her zaman katman içinde derinlikle doğrusal değişmesi durumunda, yansıma katsayılarının frekansa bağlı olarak elde edildiği yinelenen bir denklem oluşturur. Kuramsal bir yer modeli için, hesaplanan transfer fonksiyonu ile frekans bileşenleri tanımlanan sismik dalgacığın çarpımının ters Fourier dönüşümü yapay sismogramı verir.

Yansıma katsayılarını hesaplarken kullanılan karmaşık hızın gerçel bileşeni faz hızının tersini ve sanal bileşeni ise yaklaşık sönüm katsayısını " $\alpha$ " verir. (KNOPOFF, 1964). Böylece, transfer fonksiyonuna bağlı olarak üretilen yapay sismogramda sönüm etkisini içerir. Sismogramın ilgililenen zaman aralığındaki özilişkisinden hesaplanan özgül spektrumundaki eğim değerleri (dB/Hz), sönüm frekansı bileşenlerindeki etkisini gösterir.

Sönüm faktörü içeren bu tür yapay sismogramlar yerkabuğundaki geçiş zonlarını ve diğer arayüzeylerin fiziksel özelliklerini incelemek için kullanılır.

**ABSTRACT:** Up to recent times, great many of the synthetic seismograms, calculated for the earth crust elastic models, haven't contained attenuation factor. Seismic energy attenuation factor. Seismic energy attenuation is however a very important factor of solid earth. If this fundamental property were absent, the energy the earth today. There fore, a first order approximation has been found to be enough in theory in order to compare the observed daha with the theoretical results.

A method of construction of synthetic seismogram with the inclusion of attenuation, was given here in order to evaluate the real variations of amplitudes and shapes of seismic signals. The method is based on the conditions of vertical incidence of plane compressional wave with the linear variation of velocity within a layer with depth for the layered media, a recursive equation is formed according to the reflection coefficients being calculated depending on frequency. Inverse Fourier Transform of the multiplication of calculated transfer function and its frequency components, for a given seismic wavelet, will give the synthetic seismogram for the theoretical earth model.

Real component of the complex velocity used during the calculation of reflection coefficients, gives the effect of phase velocity, whereas its imaginary component indicates the approximate specific attenuation factor " $\alpha$ " (Knopoff, 1964). Hence, the synthetic seismograms produced according to transfer function, will include the attenuation effect. Slope values (dB/Hz) of the autopower spectra calculated from the autocorrelation functions for the interested time interval of a seismogram, indicate the effects attenuation on the frequency components. These kinds of synthetic seismograms having attenuation factor, can be used to investigate the transition zones of earth crust as well as the physical properties of other boundary surfaces.

## GİRİŞ

Gözlemsel sismik yansıma verilerini daha kolay yorumlamak amacıyla yapay sismogramlar üretilmektedir. Modele dayalı olarak geliştirilen bu sismogramlar, gerçek sinyallerin şekil ve geneliklerinin daha doğru yorumlanmasını sağlar.

İlk çalışmalar Peterson et al. (1955)'nin sürekli hız loglarından yararlanarak ürettikleri Yapay Yansıma sismogramlarıdır. Geliştirdikleri yöntem çok sayıda varsayım dayanağına rağmen iyi sonuçlar vermiştir. Gerçek sismogramlardaki yansıma sinyali ile üretilen yapay sismogramların uyumu özel durumlarda gayet iyi idi. Fakat sözkonusu sentetik veriler, tabakalı ortamlarda kaçınılmaz bir şekilde oluşan tekrarlama yansıma dalgaları içermiyordu. Daha sonraları özellikle sayısal bilgisayarları kullanılmaya başlanması ile bu alanda yapılan çalışmalar artmış ve bir çok araştırmacı tarafından çok sayıda yöntem geliştirilmiştir (Berryman et al. 1958; Wuenchel (1960); Sengbush et al. 1961; Goupillaud 1961 ...). Baranov ve Kunetz (1960) ilk kez derinlikle bağımsız sönüm etkisi ve daha sonra da, Trorey (1962) derinlik ve frekansa bağımlı sönümü içeren yöntemleri ortaya koymuşlardır.

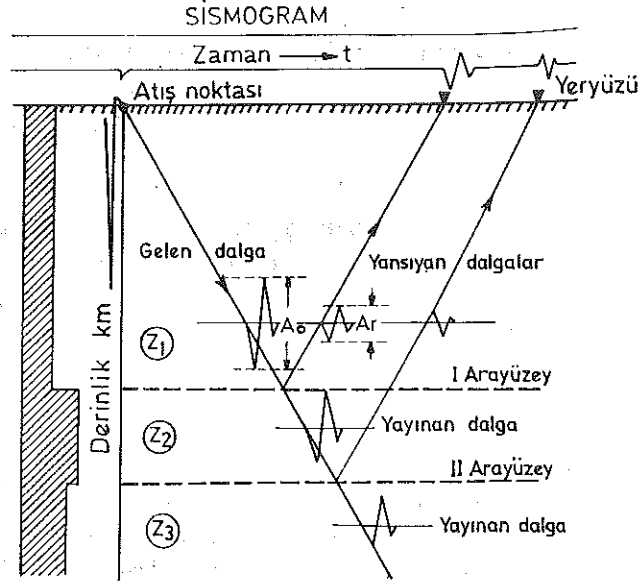
Treitl ve Robinson (1966) normal P düzlem dalgasının yatay tabakalı, homojen ve mükemmel elastik bir ortamda yayılımını iletişim kuramı yardımıyla açıklamışlardır. Daha sonra, Colwes et al. (1970) de Berryman (1958)'nin geliştirdiği iteratif (yinelenen) yöntemdeki hız karmaşık olarak sönüm etkisini içeren yapay sismogram üretmişlerdir. Sözkonusu sismogramlar, yerkabuğunun (Kanada) çeşitli derinliklerinde bulunan geçiş zonları ile yansıtıcı arayüzeylerin fiziksel özelliklerini incelemede başarı ile kullanılmıştır. Ayrıca Güney Kanada'daki yerkabuğu için bir Q-modeli oluşturmayı denemişlerdir.

Çalışmanın birinci kısmında yapay sismogramın elde edilişi, dalga genliklerini etkileyen faktörler ve dalganın ideal elastik bir ortamda yansıma ve yayılımı kısaca anlatılmıştır. İkinci kısımda ise sönüm içeren yapay sismogramın hesaplanması ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Sonuç olarak, bazı kuramsal yerkabuğu modelleri için üretilen yapay sismogramın belirli zaman aralığındaki özelliğinden yararlanarak hesaplanan özgüç spektrumundaki eğim değerleri, sönümün frekans bileşenlerindeki etkisinin biri ölçüsüdür.

## TABAKALI ORTAMDA SİSMİK DALGA YAYINIMI

Tabakalı bir ortamda yayılan sismik dalganın genliği ortamın akustik empedansına ve elastik özelliklerine bağlı olarak azalır. Başka bir deyimle, ortamın oluşturduğu bir süzgeçte sönüme uğrarlar. Dalga genliğini etkileyen iki önemli faktör sönüm ve ara yüzeylerdeki yayılım kayıplardır (Şekil 1).

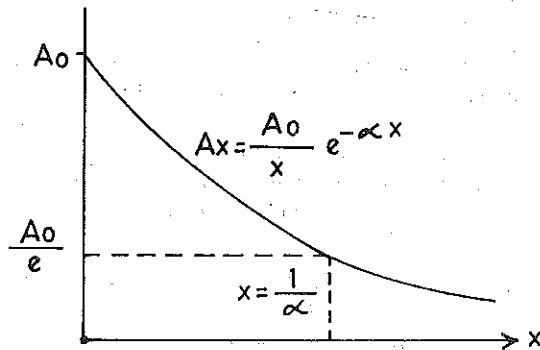


Şekil 1— Akustik empedansları farklı ortamların oluşturduğu ara yüzeylerde Yansıma ve yayımdan dolayı dalga genliklerinin değişimi.

Figure 1— Variation of wave amplitudes due to the reflections and transmissions of the interfaces formed by media of different acoustic impedances.

Bir noktadan yayılan sismik dalganın enerjisi, iç sürtünmeden dolayı, ısıya dönüşerek soğurulur. Böylece enerji yoğunluğu uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak azalır. Bir dalganın geçişi sırasında sıkışma fazında açığa çıkan ısı, genişleme fazında soğurulur. Soğurma mekanizması genliği uzaklıkla eksponansiyel olarak azalan (Şekil 2).

$$A_x = A_0 \cdot \exp(-\alpha x) \quad (1)$$



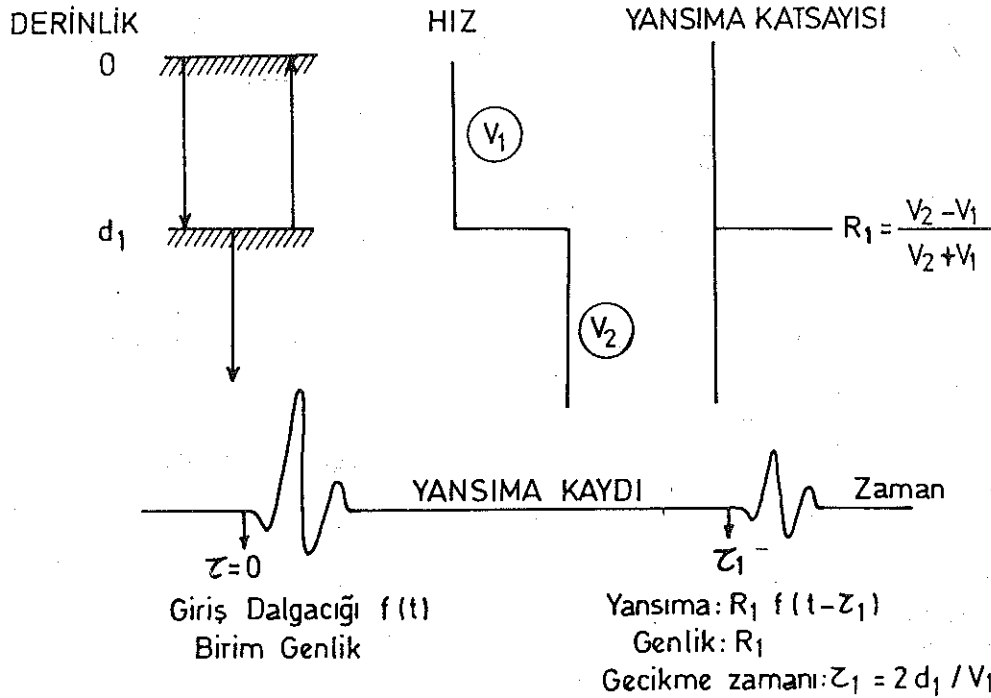
Şekil 2— Bir sismik dalga genliğinin kaynaktan itibaren uzaklıkla eksponansiyel olarak azalması.

Figure 2— Exponential decrease of a seismic wave amplitude with distance from the source.

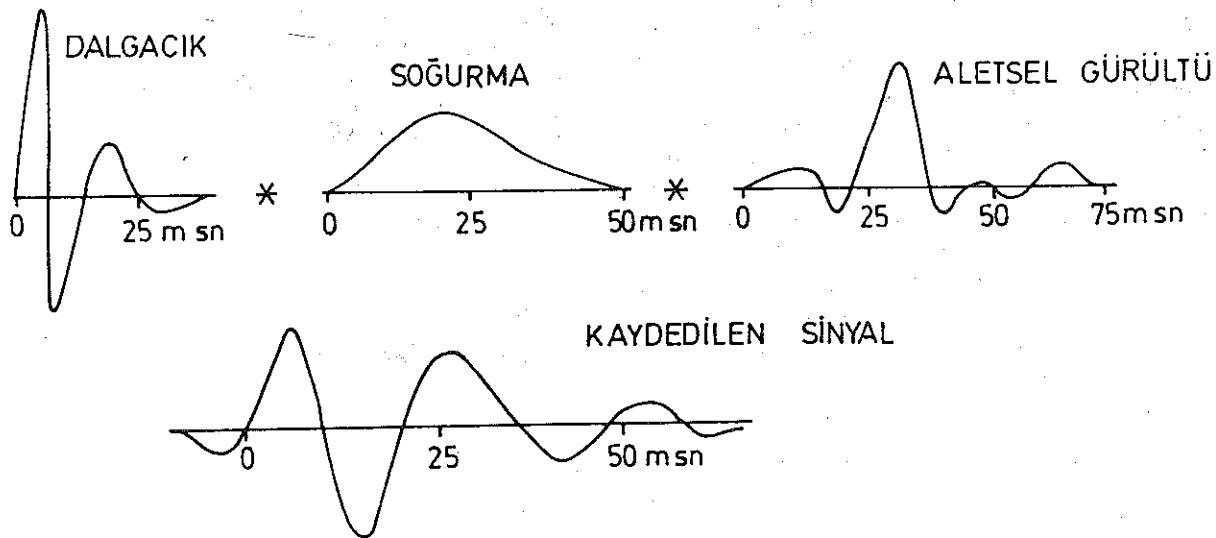
modeli ile verilir.  $\alpha$  soğurma katsayısı olmak üzere, x-yönünde yayılan bir dalganın sönüm faktörü  $\exp(-\alpha x)$  ile verilir.  $A_0$ , kaynaktaki dalganın ve  $A_x$  ise x kadar uzaklıktaki dalganın genliği olduğuna göre, eğer  $A_x/A_0$  (akustik opasite) oranı gözlenecek olursa,

$$\text{Sönüm: } S_x = 20 \lg (A_x/A_0) \quad (2)$$

olarak hesaplanır. Bir atış noktasından itibaren yayılan dalgaların genlikleri ve şekilleri uzaklığa bağlı olarak azalır. Soğurma katsayısı,  $\alpha$ , logaritmik azalma ( $\delta$ ) ve yayılım frekansı ile doğru orantılı dalganın yayılma hızı ( $v$ ) ile ters orantılıdır.



Şekil 3— Bir arayüzeyden gelen Yansımaya sinyali, sadece giriş dalgacığı ile şekli aynı, fakat sönümlenmiş bir yansımaya dalgası içerir.  
Figure 3—A reflection signal from an interface, attenuated reflection wave having the same shape of input wavelet only.



Şekil 4— Giriş dalgacığı üzerine soğurma ve aletsel gürültülerin etkileri  
Figure 4—Effects of absorption and instrumental noise on the input wavelet.

$$\alpha = \delta f/v \quad (3)$$

Ayrıca soğurma katsayısının dalga frekansı ile değiştiğini yani  $(\alpha\lambda)$ 'nın bir kayaç için yaklaşık sabit olduğu gösterilmiştir. (1) bağıntısı frekansa bağlı olarak;

$$A(x, f) = A_0 \cdot \exp[-\alpha(f)x] \quad (4)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Görüldüğü gibi yüksek frekanslı bileşenler daha hızlı sönerler.

Ara yüzeylerdeki yansıma ve yanımından ileri gelen enerji kayıpları da dalga genliklerini etkileyen esas faktörlerden biridir. Bir arayüze gelen sismik dalga, alt ve üstteki ortamın akustik empedansına bağlı olarak az yada çok enerji ile yansır ve kırılır. Üst tabakada yansıyan enerji miktarı ne kadar çok ise aşağı giden enerji o oranda azdır (Şekil 1).

### SENTETİK (YAPAY) SİSMİK İZ (SISMOGRAM)

Bir sismogramı oluşturan Yansıma, akustik empedansları farklı tabakalar arasında oluşan arayüzeyden yurakı doğru yansıyan enerjidir. Tortul ortamları oluşturan tabakaların yapısı çok hızlı değişir. Yapısal değişkenlere bağlı olarak yoğunluk ve elastik sabitlerin değişimi ise hızların farklılaşmasına yol açar. Böylece aşağı doğru giden sismik dalganın dalga boyundan daha küçüktür, böylece kaydedilen yansıma sinyalleri birbirleri üzerine binerler. Ayrıca her arayüzeyden gelen katlamalı yansıma sinyalleri esas yansıma üzerine eklenir. Böylece karmaşık bir sismogram elde edilir.

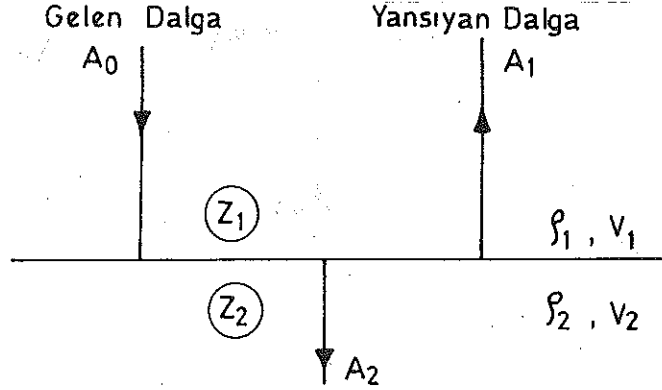
Yansıma sinyalleri çok karmaşık olmalarına rağmen, kaynak dalgacığına çok benzerler (Şekil 3). Yatay tabakalı bir ortamda yayına kaynak dalgacığı arayüzeylerin akustik empedanslarına bağlı olarak yansırak kayıtlara ulaşır. Böylece algılanan dalgacık yayındığı ortamın tüm özelliklerini taşır; genliği ve fazı arayüzeydeki empedans kontrastı ile varış zamanı ise kaynak-alıcı arasındaki yayım süresini verir. Yansıma olayı doğrusal bir işlem olarak alınabilir. Bu işlem ise giriş-çıkış ilişkilerinin tanımla tarif edilen bir doğrusal sistemdir. Bu sistemde önceden amaca göre belirlenen kaynak dalgacığı girişi, sistemin kendisini ortamı karakterize eden yansıma katsayıları ve çıkış verisini de bunların evrişimi sonucu oluşan sismik iz oluşturur. Şekil 4'de bir dalgacığı üzerine soğurma ve diğer gürültülerin etkisi görülmektedir.

Yatay tabakalı bir ortamda sonik ve yoğunluk loglarından yararlanarak tabakaların akustik empedansları bulunur. Daha sonra tabakaların kalınlıkları ve amaca uygun bir kaynak dalgacığı seçilerek yapay sismik iz oluşturulur. Sonik log verisinde her hangi bir t anında akustik empedans,  $\rho$  yoğunluk ve v hız olmak üzere,

$$Z_t = \rho_t v_t \quad (5)$$

ile verilir. Arayüzeyde yansıyan dalganın genliği hız ve yoğunluğa bağlı olduğundan ortam hakkında önemli bilgiler verir.

Bir arayüze dik olarak gelen düzlem dalganın genliği  $A_0$ , yansıyan dalganın  $A_1$  ve kırılan dalganın genliği ise  $A_2$  olduğuna göre (Zoeppritz bağıntıları) yansıma katsayısı, R, (Şekil 5) ve yayınma katsayısı T,



### Yayınan (Kırılan) Dalga

Şekil 5— Arayüzeye dik gelen düzlem dalga için enerji dağılımı,  
Figure 5— Energy spectrum for the plane wave having vertical incidence.

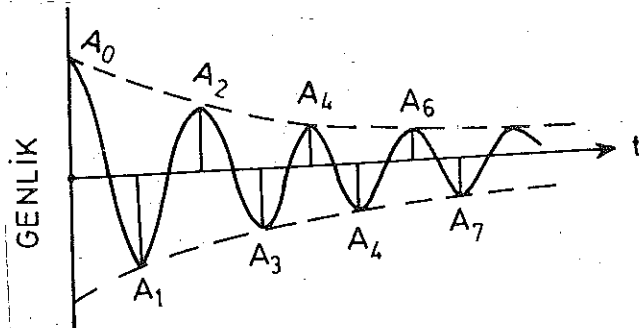
$$R = A_1/A_0 = (Z_{t+1} - Z_t) / (Z_{t+1} + Z_t) \quad (6)$$

$$T = A_2/A_0 = 2Z_t / (Z_{t+1} + Z_t) \quad (7)$$

bağıntıları ile verilir. Genel olarak, iki farklı ortam arasındaki yoğunluk kontrastı  $\pm \% 10$  ve buna karşın sismik hızlar arasındaki fark  $\pm \% 50$  civarındadır. Bu nedenle yoğunluğun derinlikle değişimi  $\partial\rho / \partial z$ , hızın derinlikle değişimine,  $\partial v / \partial z$ , göre basit kabul edilerek  $(\rho_{t+1} = \rho_t)$

$$R = (\rho_{t+1} v_{t+1} - \rho_t v_t) / (\rho_{t+1} v_{t+1} + \rho_t v_t) \quad (8)$$

(6) bağıntısı ise,



Şekil 6— Sönümlü bir dalgada loaritmik azalma  
 $d = \log(A_0 / A_1) = \log(A_1 / A_2)$

Figure 6— Logarithmic decrease within an attenuated wave.

$$r = (v_{t+1} - v_t) / (v_{t+1} + v_t) \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece sadece hız verisinden yararlanarak yansıma katsayıları elde edilir. Bu üretilen yansıma katsayılarıyla amaca uygun olarak seçilecek sismik dalgacık evriştirilerek yalın olarak,

$$s_t = r_t * p_t \quad (10)$$

Yapay (sentetik) Simogramlar elde edilir.

### SENTETİK SISMOGRAMDA SÖNÜM FAKTÖRÜ

Bir ortamda yayıman sismik dalgaya yerküresi alçak geçişli bir süzgeç gibi davranır. Dalga kaynaktan uzaklaştıkça yüksek frekanslarını kaybederek düzgünleşmiş bir şekil alır, zaman olarakta boyu uzar. Kaynaktan x kadar uzaklıkta bir dalganın genliği, küresel yayılmada gözönüne alındığında,

$$Ax = \frac{A_0}{x} \exp(-\alpha x) \quad (11)$$

bağıntısı ile verilir. Sönüm katsayısı  $\alpha$ , logaritmik azalma,  $\delta$  ve frekans,  $f$ , ile doğru ve faz hızı,  $c$  ile ters orantılıdır.

$$\alpha = \delta / c \quad (12)$$

Sönümlü bir dalgada logaritmik azalma, birbirini izleyen iki genliğin birbirine oranının logaritmasıdır.

Bir ortamın sönüm özelliklerinin bir ölçüsü olarak, sismolojide ilk kez Knopoff (1964), spesifik sönüm faktörü veya boyutsuz nitelik faktörü  $Q$ 'yu kullanmıştır. Katı sürtünme içeren bir ortamda z-yönünde yayılan sıkışma dalgaları için sönüm faktörü yaklaşık olarak,

$$\exp(-wz / 2cQ) \quad (13)$$

bağıntısı ile verilir, burada  $w = 2\pi f$  açısal hız ve  $c$  ise faz hızıdır. Sönüm katsayısının değeri ise,

$$\alpha = w / 2cQ = \pi f / cQ \quad (14)$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 7'de sönüm faktörünün,  $\alpha$ , frekans ve soğurma sabitinin,  $Q$  bağlı olarak değişimi görülmektedir.

z-yönünde yayılan düzlem sıkışma dalgalarının hareket denklemi,

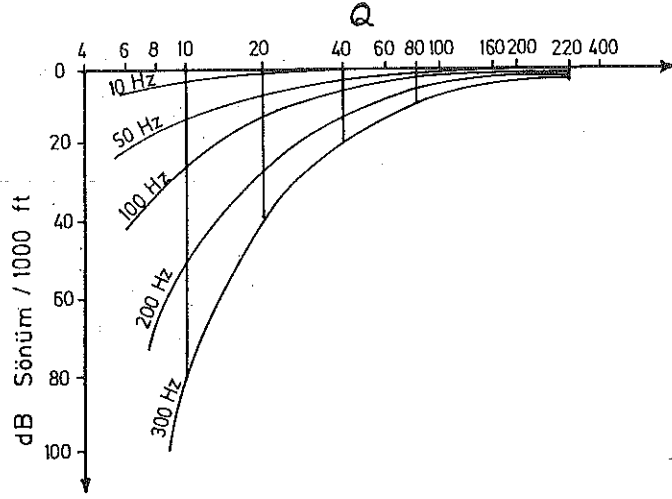
$$\left[1 + \frac{1}{\omega Q} \frac{\partial}{\partial t}\right] \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \quad (15)$$

şeklinde verilir; burada  $\omega =$  açısal frekans,  $W =$  partikülün yerdeğiştirmesini ve  $c$  ise dalga hızını gösterir. Kayıpların olmadığı varsayılırsa, faz hızı

$$c = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}\right)^{1/2}$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\lambda$  ve  $\mu$  Lamé elastik sabitleri ve  $\rho$  ortamın yoğunluğudur. (15) bağıntısında  $w = W \exp(i\omega t)$  yazılarak,

$$\left[1 + \frac{i\omega}{\omega Q}\right] \frac{d^2 W}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} W = 0 \quad (16)$$



Şekil 7— Sönüm frekans ve  $Q$ 'ye bağlı olarak değişimi  
Figure 7— Attenuation frequency and its variation due to  $Q$  factor.

denklemini elde edilir. Bu denklem çözülerek,

$$w = \exp \left[ i\omega t - i \frac{W}{C} \left( 1 + \frac{iW}{\omega Q} \right)^{-1/2} \right] z \quad (17)$$

sonucuna varılır. Eğer  $Q \gg 1$ , ise parantez içinde ifadeye, ( $w/w$  ihmal edilerek) binom açılımı uygulanır.

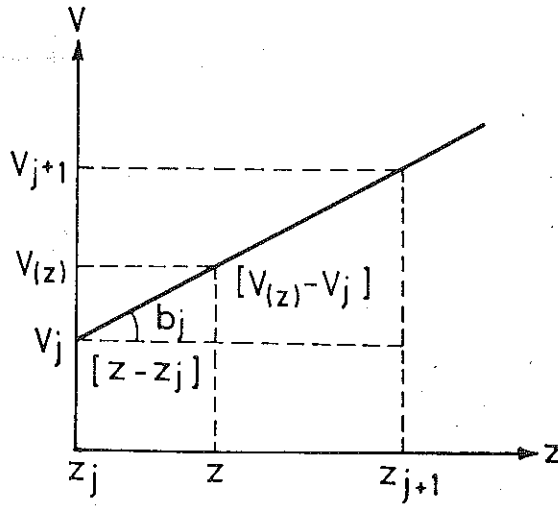
$$W = \exp \left\{ i\omega t - \frac{i\omega t}{C} - \frac{\omega z}{2cQ} - \frac{i\omega t}{C} \left[ -\frac{3}{8Q^2} + Q \left( \frac{1}{Q^4} \right) - \frac{\omega z}{2cQ} Q \left( \frac{1}{Q^2} \right) \right] \right\}. \quad (18)$$

Bu bağıntısındaki  $\exp(-wz/2cQ)$  faktörü sönümü gösterir. (Clowes et al. 1970). (11) bağıntısında  $x=z$  konularak,

$$Az = \frac{A_0}{x} \exp(-\alpha z)$$

Materyellerin sönüm karakteristikleri,  $d$  ve  $Q$ , birbirlerine ters orantılıdır:  $Q = \mu/\delta$ . Sönüm azaldığında  $Q$  büyür ve sönüm arttığında da  $Q$ 'nin değeri azalır.  $Q$  faktörü gözlenen çeşitli veriler için diğer parametrelere bağlanabilir. Bu nedenle, yerküresinin  $Q$ -yapısının tayini için yapılan araştırmalar çok önemlidir. Söz konusu yapı yerküresinin için fiziksel ve kimyasal durumunu saptamada kullanılır.

Derin yansıma verileri içeren yapay yansıma simogramlarını etüd etmek için Geçiş Zonlarının etkilerinin incelenmesi çok önemlidir. Tabakalı ortam, hızları derinlikle doğrusal olarak azalan veya çoğalan bir seri geçiş zonu'dan ibarettir. Berryman et al. (1958), yatay geçiş zonları içeren tabakalı bir ortamda  $R_j$  (17 no.lu denklem) yansıma katsayılarını hesaplamak için yinelemeli bir formül vermişlerdir. Bu bağıntıda ortam mükemmel elastik, yoğunluk sabit ve yatay tabakalara gelen dalgalar ise düşey gelişli düzlem dalgalar olarak var sayılmıştır. Clowes (1970) ise, denklemde verilen hızı karmaşık olarak sönüm etkisini de gözönüne almıştır. Hızın gerçel bileşimi doğru-



Şekil 8— Katmanlı bir ortamın j'ninci tabakasındaki karmaşık hızın doğrusal olarak değişimi.  
Figure 8—Linear variation of a complex velocity within the layer j of layered media.

HIZ (feet/sn)	Derinlik (feet)
$V_1$ ort = 3600	
	300
$V_2$ ort = 4000	
	1000
$V_3$ ort = 5400	
	2500
$V_4$ ort = 6300	
	4000
$V_5$ ort = 7500	
	5000
$V_6$ ort = 8400	
	7000
	7400
$V_7$ ort = 10 500	
	10000
$V_8$ ort = 19800	
	60 000

Şekil 9— Yatay tabakalı kuramsal Yerkabuğu modeli  
Figure 9—Horizontally layered theoretical earth model

sal bir gradyana sahip ortamı dolaşan dalgayı ve karmaşık (imajiner) bileşen ise sabit sönümü gösterir. Sönüm içeren denklemin çözümü ise aşağıda verilmiştir.

Sonsuz katı elastik bir ortamda bir noktanın yer değiştirmesi için  $u = (u_1, u_2, u_3)$  hareket denklemi,  $\rho$  sabit olmak üzere,

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_j} \quad (19)$$

ile verilir. Gerilme (stress)

$$P_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu e_{ij}$$

burada

$$\theta = \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

kübik dilatasyon ve

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

yamulma tansörüdür.

Ayrıca ortama bağlı olarak  $\lambda = \lambda(x_1, x_2, x_3)$  ve  $\mu = \mu(x_1, x_2, x_3)$  varsayılır. Lamé fonksiyonlarının ikinci ve daha yüksek türevleri ihmal edilir ve (19) bağıntısında yerine konulursa

$$\rho \ddot{u} = (\lambda + M) \nabla \theta + \theta \nabla \lambda + \mu \nabla^2 \underline{u} + (\nabla \mu \cdot \nabla \underline{u} + \nabla M \cdot \underline{u}). \quad (20)$$

denklemin bulunur.

Düşeye yakın yansıma verileri incelendiğinden, düzlem dalgaların yayını sadece z-yönünde alınarak denklemin çözümü çok kolaylaşır. Bu durumda, sadece yerdeğiştirme  $u_3 = w$  ve sadece  $x_3 = z$  göre türevler (sıfırdan farklı) gözönüne alınır.  $\mu$ 'nin ikinci türevi tekrar ihmal edilerek (20) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ [\lambda(z) + M(z)] \frac{\partial w}{\partial z} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (21)$$

veya

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\lambda(z) + 2\mu(z)}{\rho} \frac{\partial w}{\partial z} \right].$$

Burada partikül hareketi hem zamana ve hem de uzaya (derinlik) bağlıdır. Yukarıdaki denklemde

$w(z, t) = W(z) e^{i\omega t}$  konularak, hareket sadece uzaya bağımlı duruma getirilebilir, ( $W$ ,  $\lambda$  ve  $\mu$  sadece  $z$ 'ye bağımlıdır)

$$-\omega^2 W(z) = \frac{d}{dz} \left[ \frac{\lambda(z) + 2\mu(z)}{\rho} \right] \frac{dW}{dz} + \left[ \frac{\lambda(z) + 2\mu(z)}{\rho} \right] \frac{d^2 W}{dz^2} \quad (22)$$

Sorunun sönüm içermesi için  $\lambda$  ve  $\mu$  karmaşık şekilde ifade edilirler:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda^R + i \lambda^I \\ \mu &= \mu^R + i \mu^I \end{aligned} \quad (23)$$

Yoğunluk sabit olduğundan, bir karmaşık hızın,  $v$  karesi ve bu karmaşık elastik modülülüne bağlı olarak tüm sönüm aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$v^2 = \frac{\lambda^R u + 2\mu^R + i(\lambda^I + 2\mu^I)}{\rho} \quad (24)$$

Bu bağıntı (23) denkleminde yerine konularak,

$$\begin{aligned} -\omega^2 W(z) &= \frac{d}{dz} [v^2(z)] \frac{dW}{dz} + v^2(z) \frac{d^2 W}{dz^2} \\ &= \frac{d}{dz} [v^2(z) \frac{dW}{dz}]. \end{aligned}$$

veyahutta

$$\frac{d}{dz} (v^2 \frac{dW}{dz}) + \omega^2 W = 0 \quad (25)$$

şeklinde yazılabilir.

$N+1$  geçiş zonundan oluşan tabakalı bir ortamda  $j$ 'nci tabakadaki karmaşık hız, derinliğin doğrusal bir fonksiyonu olarak (Şekil 7) aşağıdaki şekilde verilir:

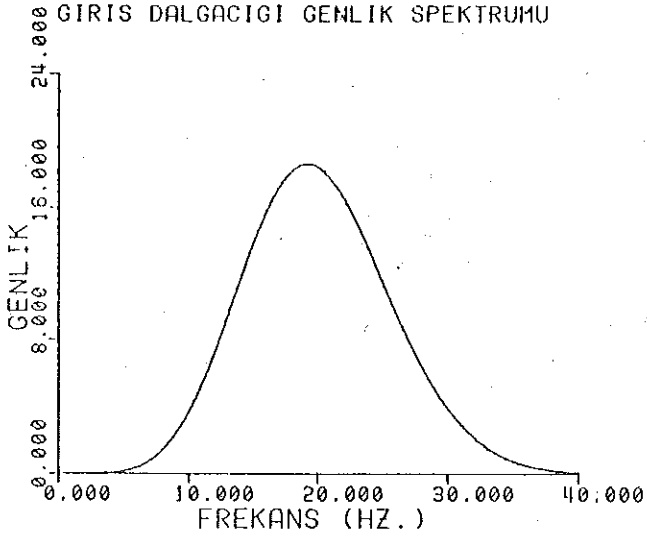
$$\begin{aligned} v(z) &= v_j + b_j (z - z_j) \quad \text{olmak üzere} \quad (26) \\ & \quad z_j \leq z \leq z_{j+1} \\ &= v_j^R + i v_j^I + b_j (z - z_j). \end{aligned}$$

Burada  $v_j = v_j^R + i v_j^I$  ve Eğim  $= b_j = (v(z) - v_j) / (z - z_j)$  dir.

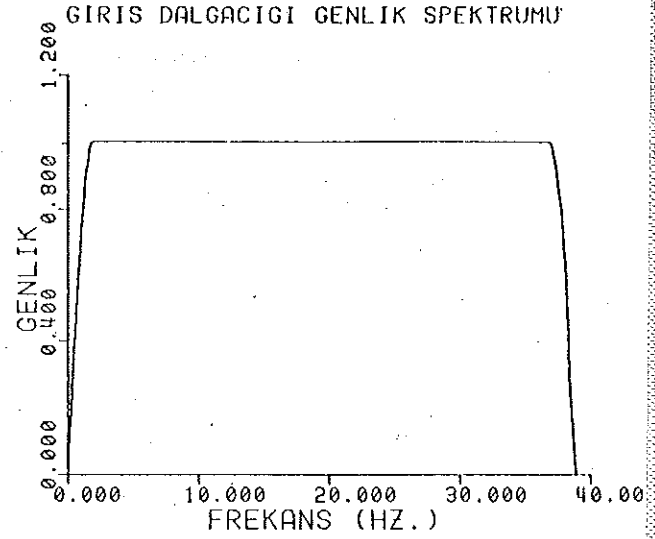
Sıfırncı katman için üst sınır yoktur, böylece  $z_0 = 0$  dır. Burada başlangıç hızı bir sabittir,  $v_0 = v_1$ . Ayrıca  $N$ 'nci tabaka  $v_N$  hızının sonsuz yarı-uzayıdır. Sonuç olarak, verilen bir tabaka için, doğrusal bir değişim gösteren hızın gerçel kısmı yayınan dalgayı simgeler. Sönümü gösteren hızın gerçel kısmı yayınan dalgayı simgeler. Sönümü gösteren sanal kısım ise sabittir. Karmaşık hız  $v_j = v_j^R + i v_j^I$  olmak üzere,  $j$ 'nci tabaka için (25) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{d}{dz} \left\{ [v_j^R + i v_j^I + b_j (z - z_j)]^2 \frac{dW_j}{dz} \right\} + \omega^2 W_j = 0. \quad (27)$$

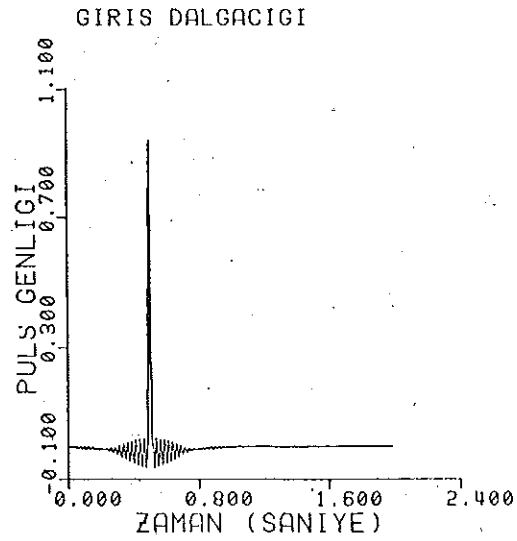
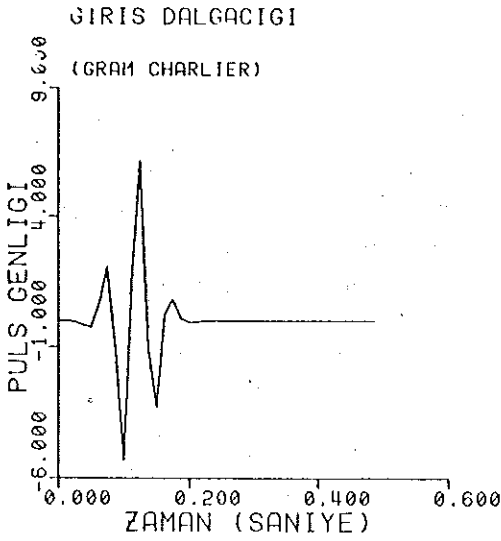
Genel olarak, dalga denkleminin  $\exp[(i\omega(z/v-t))]$  şeklinde bir çözümü vardır. (27) bağıntısı Berryman (1958) de verilen (5) denkleminin bir benzeridir, ancak bu çalışmada kullanılan hız karmaşık olarak alınmıştır.  $R_j$  'ye bağlı olarak ( $j-1$ )'inci tabaka için Yansıma Katsayısı  $R_{j-1}$  aşağıdaki şekilde verilir:



(a)



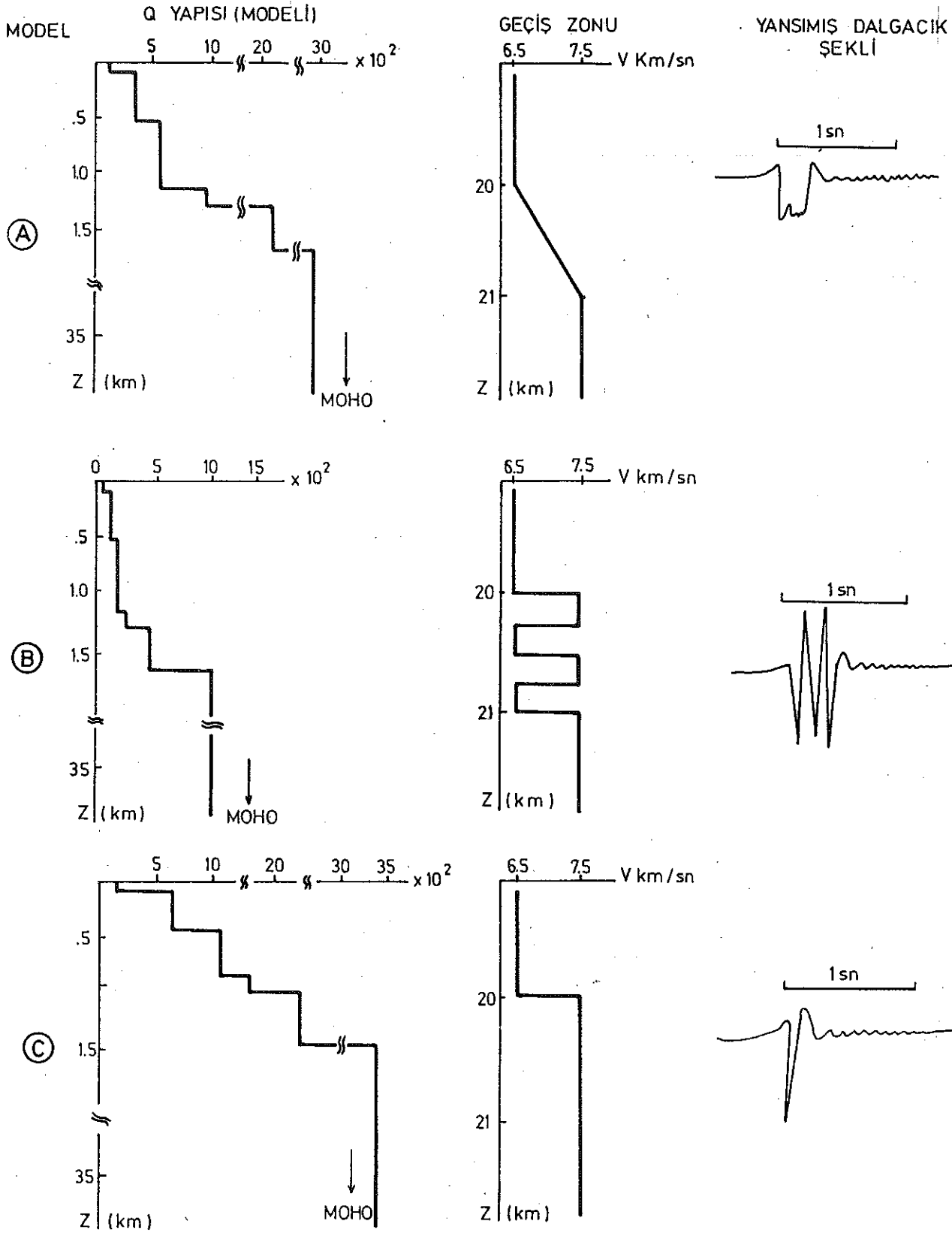
(b)



ŞEKİL 10(a): GRAM-CHARLIER DALGACIĞININ ZAMAN ORTAMINDAKİ GÖRÜNÜMÜ (ALTTA) VE FREKANS ORTAMINDAKİ GÖRÜNÜMÜ (ÜSTTE):

- Şekil 10— a) Gram-Charlier dalgacığının zaman ortamındaki görünümünü (altta) ve frekans ortamındaki görünümü (üstte)  
 b) Delta fonksiyonuna benzer dalgacığın zaman ortamındaki görünümü, 0,5 sn gecikmeli, (altta) ve frekans ortamındaki görünümü, 2 ile 37 Hz, (üstte)
- Figure 10— a) Time (lower) and frequency domains (upper) illustrations of the Gram-Charlier wavelet.  
 b) Time and frequency domains illustrations of wavelet resembling a delta function; 0,5 sec. delayed (lower) and 2 to 37 Hz (upper) respectively.





Şekil 11— Sönüme bağlı yapay sismogram üretiminde kullanılan kuramsal Q-modelleri (solda), geçiş zonları (ortada) ve bu bölgelerden yansıyor gelen dalgacıklar (sağda).

Figure 11— Theoretical Q-models used for the production of attenuated synthetic-seismograms (on the left), Transition zones (in the middle) and the wavelets reflected from these zones (on the right).

$$R_{j-1} = \frac{bj-1Bj-1 + (bj - bj-1) - bjBj \frac{1-Rj}{1+Rj}}{bj-1Bj-1 + (bj - bj-1) + bjBj \frac{1-Rj}{1+Rj}} \exp \left\{ -Bj-1 \ln \left[ \frac{v_I^R + iv_I^1}{v_I^R - 1 + iv_I^R - 1} \right] \right\} \quad (28)$$

$$B_j = [1 - 4\omega^2/b_j^2]^{1/2}$$

N'nci tabaka için sadece yayınan dalga mevcut olduğundan  $R_N=0$  dir. (28) denklemini, tanımlanan tüm frekanslar için,  $R_N$ 'den  $R_0$ 'a kadar yinelerek tam bir tabakalı sistemde düşey olarak yansıyan dalgalara ait "transfer fonksiyonu"nu hesaplar. Frekansa bağlı olarak hesaplanan yansıma katsayıları çok katlı yansımalarda içerirler.

Genel olarak, dalga denkleminin,  $v=v_R + iv_I$  olmak üzere,  $\exp [i\omega (z/v-t)]$  şeklinde bir çözümü vardır. Fakat hız,  $c$ , ve sönüm faktörü,  $\alpha$ , karmaşık hızdan elde edilebilir:

$$\frac{1}{c} = \text{Re} \left[ \frac{1}{v_R + iv_I} \right]; \alpha = \omega \text{Im} \left[ \frac{1}{v_R + iv_I} \right] \quad (29)$$

Ayrıca, (14) bağıntısından spesifik sönüm faktörü,  $Q$ ,

$$\frac{1}{Q} = \frac{2\alpha c}{\omega} \quad (30)$$

yazılabilir. (29) ve (30) bağıntıları kullanılarak,

$$\text{Im} \frac{1}{v} = \text{Re} / 2Q \quad (31)$$

bulunur. Bu bağıntının sağ tarafındaki pay ve payda, paydanın eşleniği ile çarpılarak aşağıdaki denklem bulunur:

$$\frac{1}{v} = \frac{v^R}{v_R^2 + v_I^2} - i \frac{v_I}{v_R^2 + v_I^2} \quad (32)$$

(31) ve (32) bağıntısından

$$-\frac{v_I}{v_R^2 + v_I^2} = \frac{1}{2Q} \frac{v_R}{(v_R^2 + v_I^2)} \text{ bulunur.}$$

Sonuç olarak, karmaşık hızın sanal kısmı,  $v_I$ , gerçel kısmı,  $v_R$  ve spesifik sönüm faktörüne,  $Q$ , bağlı olarak hesaplanmış olur:

$$v_I = -\frac{v_R}{2Q} \quad (33)$$

(29) denkleminde görüldüğü gibi  $1/c = \text{Re} (1/v)$  dir. Ayrıca (32) bağıntısına göre  $v_I$  bilinmeden  $v_R$  hesaplanamaz. Bu nedenle sorunun çözümü için  $v_R \equiv c$  olması gerekir. (29), (30) ve (32)'den

$$\text{Re} \frac{1}{v} = \frac{v_R}{(v_R^2 + v_I^2)} = \frac{1}{c} \quad (34)$$

ve

$$\text{Im} \frac{1}{v} = \frac{-v_I}{v_R^2 + v_I^2} = \frac{1}{2cQ} \quad (35)$$

(34) denkleminde

$$v_R = \frac{v_R^2}{c} + \frac{v_I^2}{c} \text{ ve } v_I = (cv_R - v_R^2)^{1/2}$$

bulunur. Bunlardan (35) bağıntısında yerine konularak,

$$\frac{-(c v_R - v_R^2)^{1/2}}{v_R^2 + c v_R - v_R^2} = \frac{1}{2cQ}$$

her iki taraf  $cv_R$  ile çarpılır ve karesi alınarak,

$$c - v_R = \frac{v_R}{4Q^2}$$

ve buradan da  $v_R$ ,  $c$  ve  $Q$ 'ye bağlı olarak

$$v_R = c \frac{4Q^2}{(4Q^2 + 1)} \quad (36)$$

hesaplanır,  $Q \gg 1$  olduğundan, (37) bağıntısı yaklaşık olarak

$$v_R \equiv c \quad (37)$$

sonucuna varılır. Böylece karmaşık hızlar faz hızı,  $c$ , ve spesifik sönüm faktörü,  $Q$ , modellerinden tayin edilir.

#### KURAMSAL YERKABUĞU MODEL ÇALIŞMASI

Yukarıda verilen (28) denklemini programlanarak frekansa bağlı olarak tabakalı ortamın yansıma cevabı hesaplanır. Giriş dalgasının karmaşık spektrumu ile tabakalı ortamın transfer fonksiyonunun çarpımının ters Fourier dönüşümü sönümüne bağlı yapay sismogramı verir:

$$\text{Yapay Sismogram } S(\omega) = P(\omega) \cdot R(\omega)$$

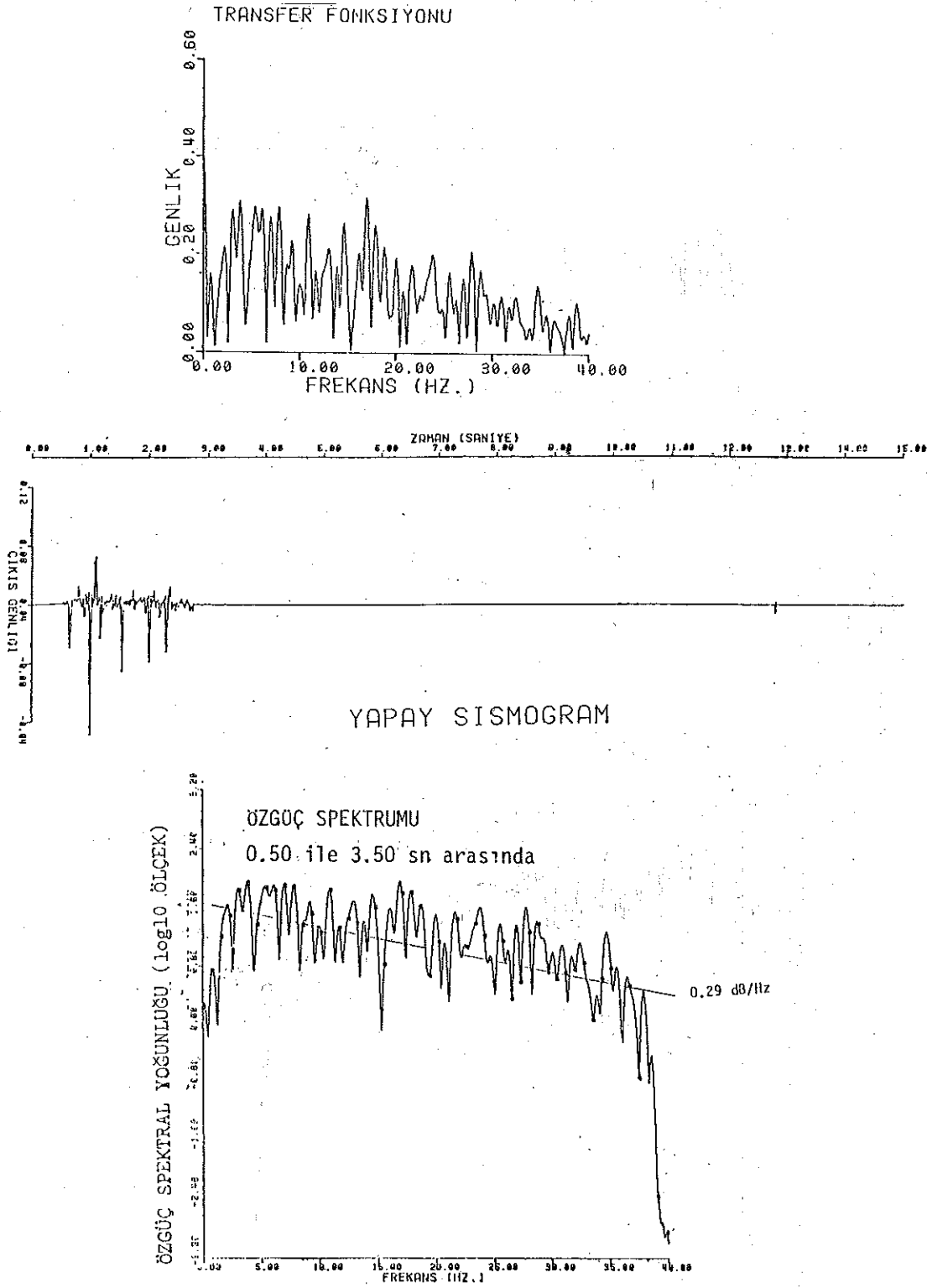
Burada,

$P(\omega) = P(\omega)/e^{i\varphi(\omega)}$  ve  $R(\omega) = R(\omega)/e^{i\varphi'(\omega)}$  olduğundan

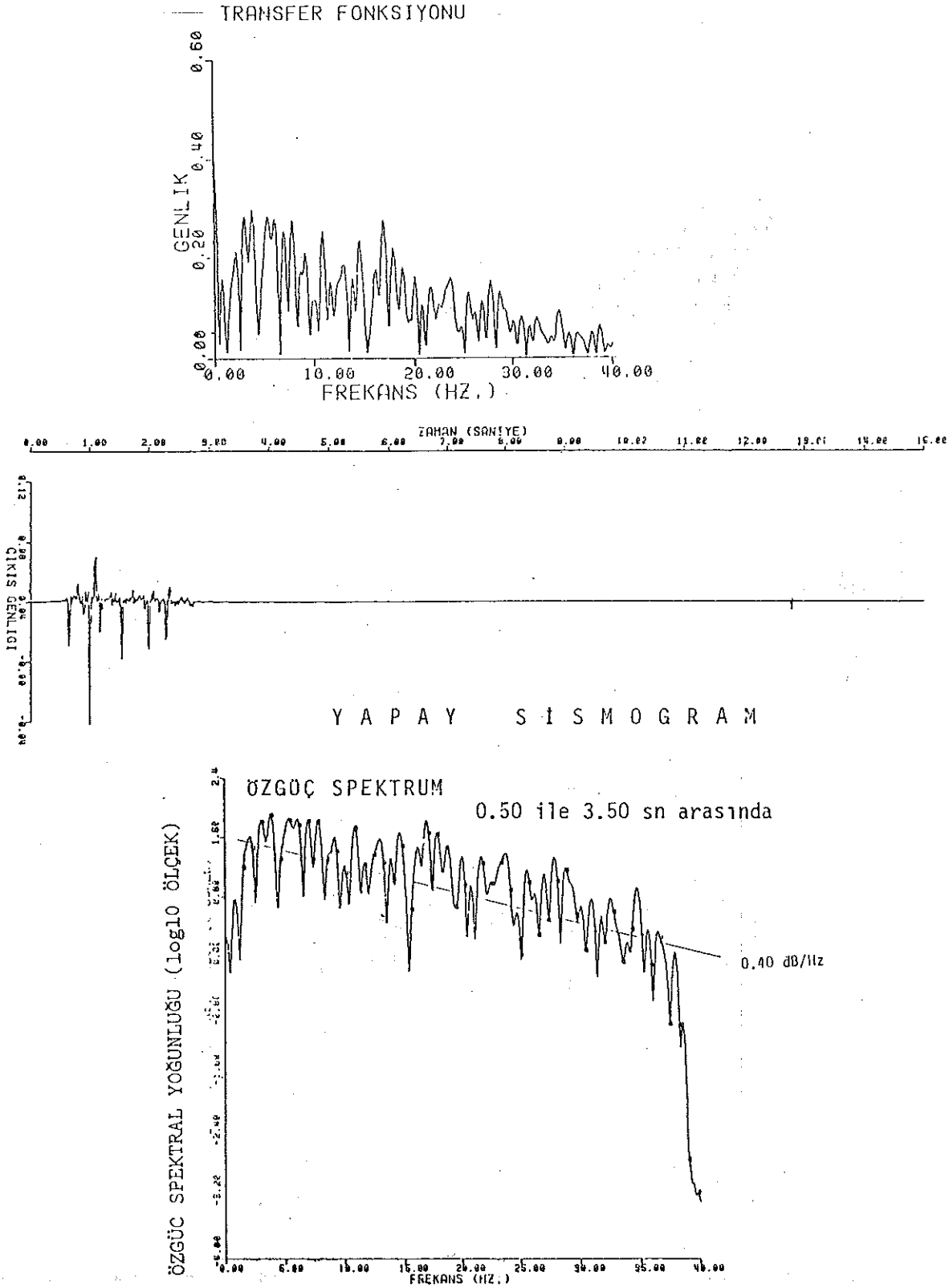
$$S(\omega) = P(\omega) \cdot R(\omega) \exp i[\varphi(\omega) + \varphi'(\omega)] \quad (38)$$

elde edilir. Zaman ortamında yapay sismogram,  $S(t)$ , ise (38) bağıntısının ters Fourier dönüşümü alınarak bulunur.

Yansıma sismogramlarının frekans içerikleri özgüç spektrumları alınarak bulunur. Hesaplarda hızlı Fourier dönüşümü algoritması kullanılmıştır. Özgüç spektrumu hesaplanırken sönüme bağlı yapay sismik iz üzerinde istenilen bir zaman aralığındaki verilerin ilk ve son %10' u keskin enerji sızlamalarını önlemek için,  $\cos$  çanı ile yuvarlatılır. Yuvarlatılan verilerin otokovaryansı elde edildikten sonra Parzen gecikme penceresi uygulanarak istatistiksel olarak güvenilir güç spektrum değerleri sağlanır. Böylece, yapay sismogramın tanımlanan zaman aralığı için hesaplanan özgüç spektrumlarındaki eğim değerleri, dB/Hz sönümün frekans bileşenlerindeki etkisinin bir ölçüsüdür.

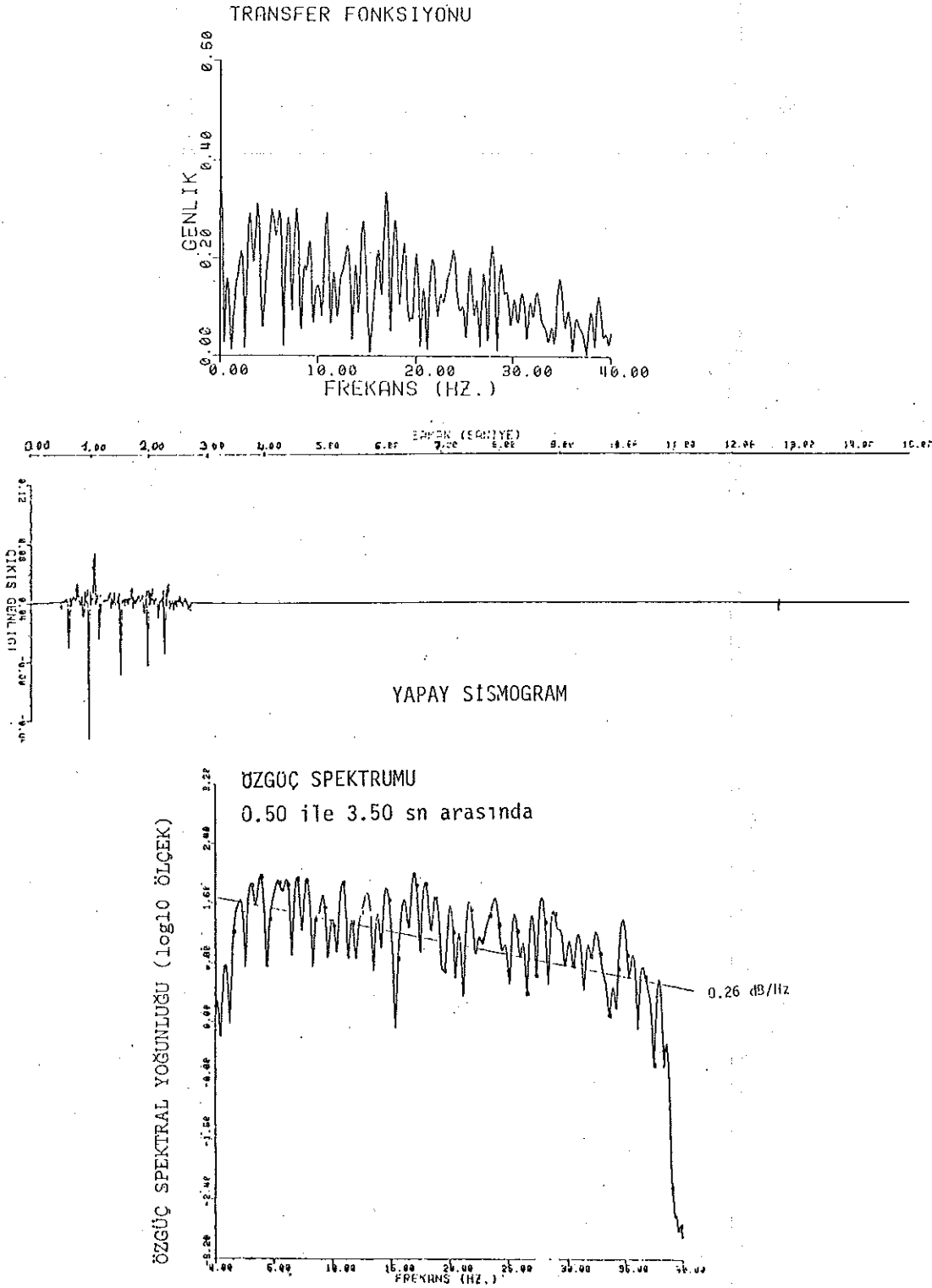


Şekil 12— Kuramsal yerkabuğu modelinin (Şekil 9) ile 7000 ft'lik kısmının Şekil 11 A'daki Q-model esas alınarak elde edilen transfer fonksiyonu (üstte), yapay sismoqram (ortada) ve 0.50 ile 3.50 sn arasında hesaplanan özgül spektrumu (altta).  
Figure 12— Transfer function obtained from the theoretical earth model (figure 9) using only the 7000 ft upper part with the Q model (figure 11A) (upper), Synthetic seismogram (middle), and autopower spectrum determined in between 0.50 and 3.50 sec. (lower).



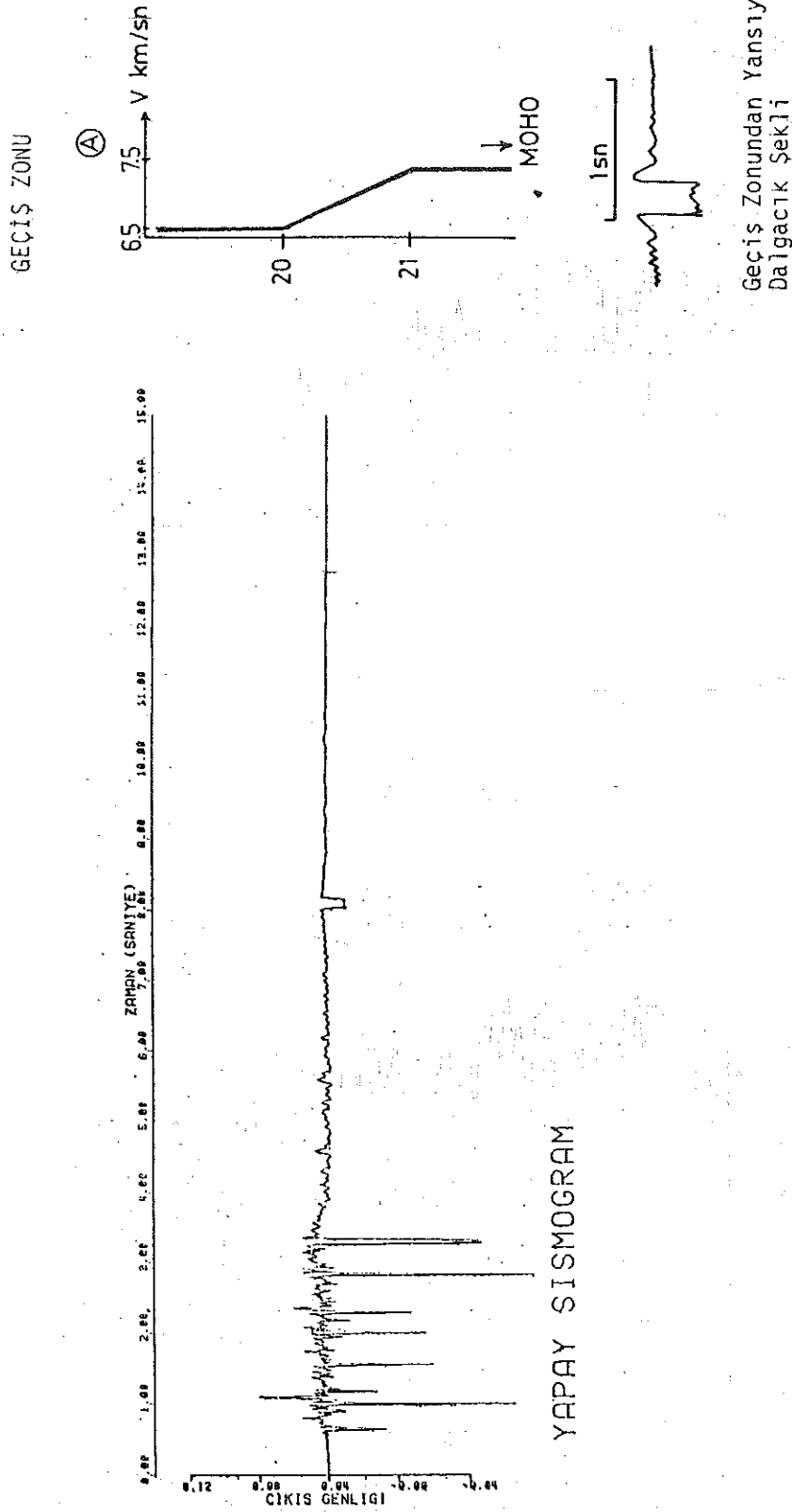
Şekil 13— Aynı yerkabuğu modelinin ilk 7000 ft. lik kısmının Şekil 11 B'deki Q-modeli esas alınarak elde edilen Transfer Fonksiyonu (üstte), yapay sismogram (ortada) ve 0.50 ile 3.50 sn arasında hesaplanan özgül spektrumu (altta).

Figure 13— Transfer function obtained from the same earth model using again the same 7000 ft upper part with the Q-model (Figure 11B) (upper), synthetic seismogram (middle) and autopower spectrum determined in between 0.50 and 3.50 sec. (lower).



Şekil 14— Aynı yerkabuğu modelinin 7000 ft. lik kısmının Şekil 11C'deki Q-modeli esas alınarak elde edilir. Transfer fonksiyonu (üstte), yaya sismoqram (ortada) ve 0.50 ile 3.50 sn arasında hesaplanan özgülük spektrumu (altta).

Figure 14— Transfer function obtained from the some earth model using again the some 7000 ft upper part with the Q-model in figure 11C (upper), synthetic seismoqram (middle) and autopower spectrum determined in between 0.50 and 3.50 sec. (lower).



Şekil 15— Aynı yerkabuğu modeli ile yandaki şekilde görülen Geçiş Zonu için elde edilen sentetik sismogram.  
 Figure 15— Synthetic seismogram obtained for the transition zone shown on the side for the same earth model.

Sentetik Sismogramı oluşturmak için ilkönce yatay tabakalı bir Yerkabuğu modeli (Şekil 9) ve bir giriş dalgacığı biçimi tanımlamak gerekir. Bu çalışmada iki çeşit dalgacık kullanılmıştır. Birincisi, Gaussien fark fonksiyonunun 5'inci ve 6'ncı türevlerinden hesaplanan bir Gram-Charlier dalgacığıdır (Berryman et al. 1958). Şekil 10 (a)'da frekans ve zaman ortamlarındaki görünümüleri verilmiştir. İkincisi ise delta fonksiyonuna yaklaşan bir dalgacık türüdür. Delta fonksiyonu  $-\infty$  ile  $+\infty$  arasında tüm frekansları içermesine karşın uygulamalarda 0 ile Nyquist frekansı arasında sınırlandırılmış sıfır fazlı,  $\phi'(W) = 0$ , bir dalgacıktır. İstenmeyen frekanslar ise spektrumun sağ ve sol tarafı  $\sin(i\mu/2m)$   $i = 0, 1, 2, 3, \dots, m$ , fonksiyonu ile yuvarlatılır. Şekil 10 (b) Delta fonksiyonuna benzeyen dalgacığın frekans ortamındaki (üstte) ve zaman ortamındaki görünümü (altta) verilmiştir. Zaman ortamında 0.5 sn geciktirilen dalgacığa bağlı olarak yapay sismogram da gecikir:

$$\phi'(W) = 0 \text{ için } S(W) = R(W) \cdot P(W) \exp i[\phi(W)]$$

$$\phi'(W) \neq 0 \text{ için } S(W) = R(W) \cdot P(W) \exp i[\phi(W) + \phi'(W)]$$

Yansıma sinyallerinin özgül spektrumları üzerine sönümün etkisini görmek için çeşitli Q-yapılar (Şekil 11) denenmiştir. Oluşturulan kuramsal yerkabuğu modelinin ilk 2200 m (7000 ft) lik bölümünün Şekil 11 (A) daki Q-yapısı esas alınarak elde edilen transfer fonksiyonu, yapay sismogram ve özgül spektrumu (0.5 ile 3.50 sn arasında) Şekil 12'de görülmektedir. Burada giriş dalgacığının bağlı olarak yapay sismogram 0.5 sn gecikmelidir.

Şekil 9'da verilen kuramsal yerkabuğu modelindeki 300, 1000, 2500, 4000, 5000, 7000 ft derinlikten yansıyıp gelen dalgalar sırasıyla 0.66, 1.01, 1.56, 2.03, 2.30, 2.77 sn'de görülmektedir. Sonuncu yansıma net bir pik vermektedir. Üretilen yapay sismogram üzerinde istenilen, zaman aralığında özgül spektrumu alınarak sönüm etkisi sürekli kontrol edilebilir. Çalışmada tortul tabakalardaki etkiyi görmek amacıyla 0.5 ile 3.50 sn arasındaki özgül spektrumlar Şekil 12, 13 ve 14'te verilmiştir.

Aynı yerkabuğu modelinin küçük Q-değerleri için Şekil 11'B modeli kullanarak hesaplanan transfer fonksiyonu yapay sismogram ve özgül spektrumu şekil 13'te verilmiştir. 0.5. ile 3.50 sn arasındaki pencere aralığında alınan özgül spektrumun eğim oranı 0.40 dB/Hz bulunmuştur. Buna karşın daha büyük Q değerleri içeren 11 C modeli için elde edilen transfer fonksiyonu, yapay sismogram ve özgül spektrumu ise Şekil 14'te görülmektedir. Aynı zaman aralığında alınan özgül spektrumunun eğim oranı 0.36 dB/Hz dir. Görüldüğü gibi, Q değerine bağlı olarak eğim oranları değişmektedir.

Şekil 11'de çeşitli Q-modellerinin yanısıra farklı yapıda Geçiş Zonları, yaklaşık 21 km 63000 ft, verilmiştir. Hızı derinlikle doğrusal olarak artan 1 km kalınlığın-

daki bu bölge için hesaplanan sentetik sismogram Şekil 15'te verilmiştir. Buradan gelen U şeklindeki yansıyan sinyal 8 sn de görülmektedir. Bu tür derin yansıtıcı yerkabuğu modellerinde bu şekil yapılar fazla kullanılmamaktadır.

Şekil 11 C hızın 20. km de aniden arttığı geçiş zonu ile yukarıda kullanılan yerkabuğu modelinden elde edilen yapay sismogram Şekil 16'da verilmiştir. İğnecik şeklindeki yansıma sinyali 8 sn'de görülmektedir.

Şekil 9'da verilen Yerkabuğu modeli ile Şekil 11 B'deki geçiş zonu için elde edilen yapay sismogramlar Şekil 17 ve 18'de görülmektedir. Birinci şekilde 11 A'daki Q-modeli kullanılmıştır. 7.00 ile 9.00 sn arasında hesaplanan özgül spektrumların eğim oranları 2.18 dB/Hz ve 2.60 dB/Hz dir. Her iki sismogramda da görüldüğü gibi Şekil 17'deki genlikler Şekil 18'dekilere oranla daha büyüktür, çünkü birincisinde kullanılan Q değerleri daha büyüktür.

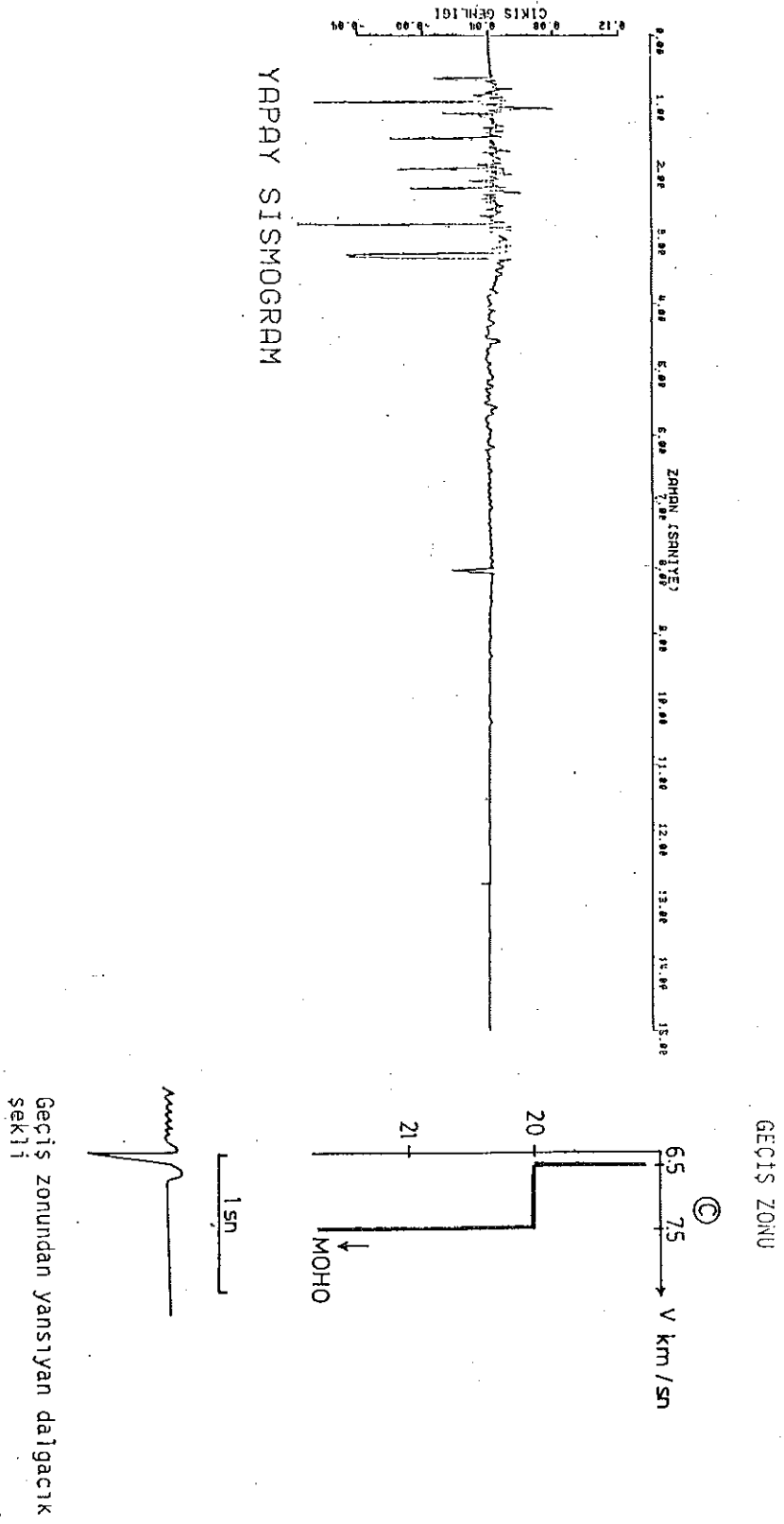
## SONUÇ

Sönüm içeren yapay sismogramlar gerçek verilerle karşılaştırılarak Yerkabuğu'nun yapısını incelemek için kullanılan en etkin araçlardan birisidir. Çalışma özgül sönüm faktörü Q'nün derinlikle değişimi ve sismik enerji yansıyan derin geçiş zonlarının (kalınlıkları yaklaşık 1 km) yapıları incelenmiştir.

Kalınlıkları aynı (yaklaşık 1 km) fakat hızları sürekli olarak artan veya azalıp çoğalan çeşitli geçiş zonları denenmiştir. Bunlardan farklı kalınlıkta hızı aniden azalan ve çoğalan (Şekil 11 B) bir seri ince tabakadan oluşan Geçiş Zonu modeli gözlenen verilerle büyük uyum sağlamaktadır (Fuchs, 1969; Clowes et al. 1970). Söz konusu model Avrupa ve Kuzey Amerika Yerkabuğu modellerinden pek çok araştırmacı tarafından başarıyla uygulanmıştır.

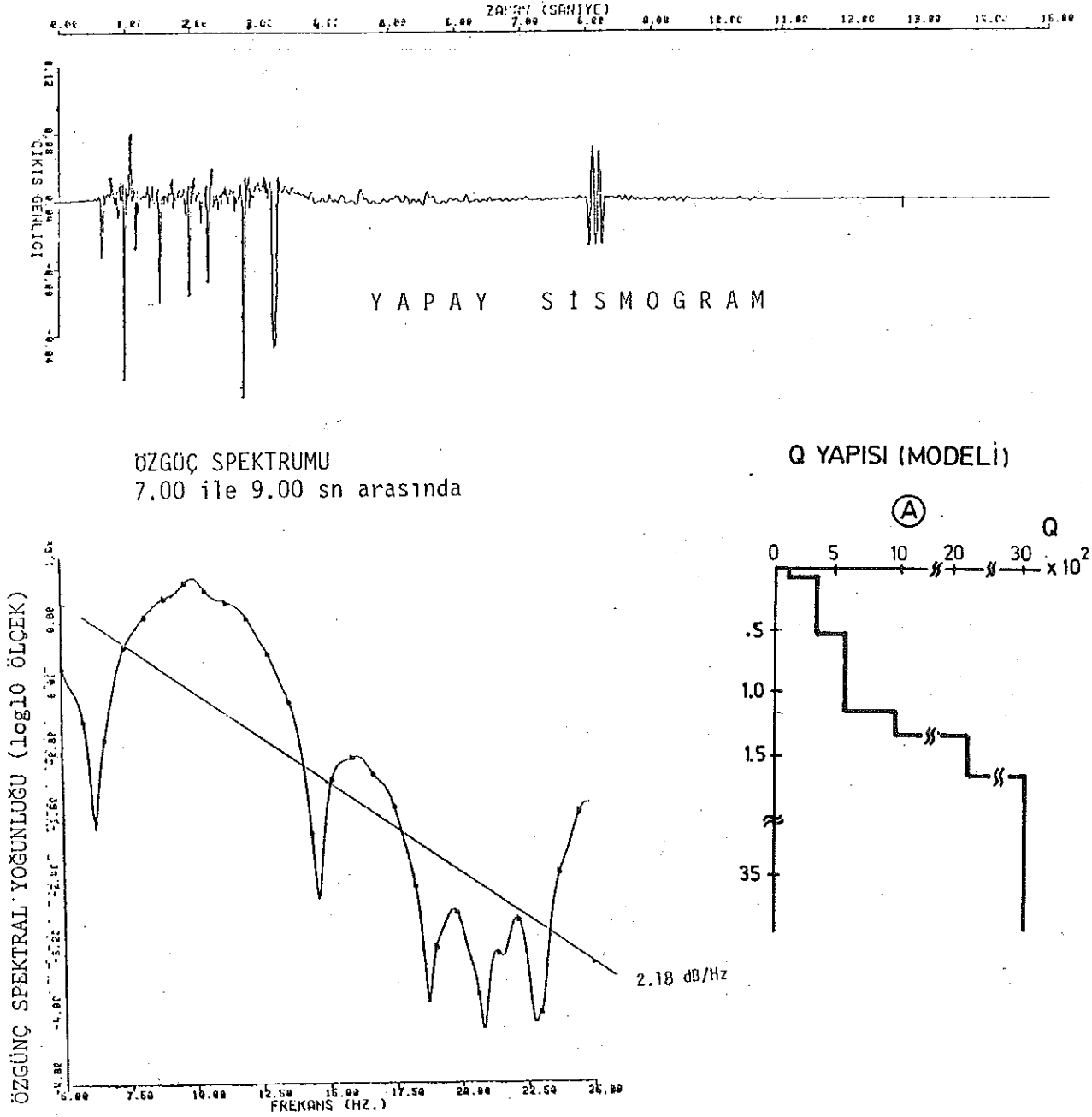
Yerkabuğunun üst kısımlarında özellikle tortul tabakalar içinde Q'nün değeri çok değişken olup, yaklaşık 300 dür. Kuramsal tabakalı bir ortamda her tabaka için bir Q değeri saptamak çok zordur. Bu nedenle Q faktörünün özellikle tortul tabakalardaki etkisini incelemek için çeşitli Q-modelleri kullanılmıştır. Hesaplanan yansıma sinyallerinin genlikleri özgül sönüm faktörü tarafından kontrol edilmektedir. Tüm denemelerde Yerkabuğu modeli sabit alınmıştır.

Çeşitli Q-modelleri kullanılarak hesaplanan transfer fonksiyonları çizdirilecek sönüm faktörünün etkileri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, Q-değeri büyüdükçe sönüm aynı oranda azalır, buna bağlı olarak yapay sismogramın sönümünde azdır. Q küçüldükçe sönüm artar ve sismogramdaki genliklerde aynı oranda küçülür. Ayrıca aynı zaman aralığında hesaplanan her özgül spektrumunda Q değeri büyüdükçe eğim oranı azalır veyahutta Q azaldıkça eğim oranı artar. Q'nün azalmasına bağlı olarak sismogram üzerindeki yüksek frekanslar daha çabuk sönüme uğrarlar.



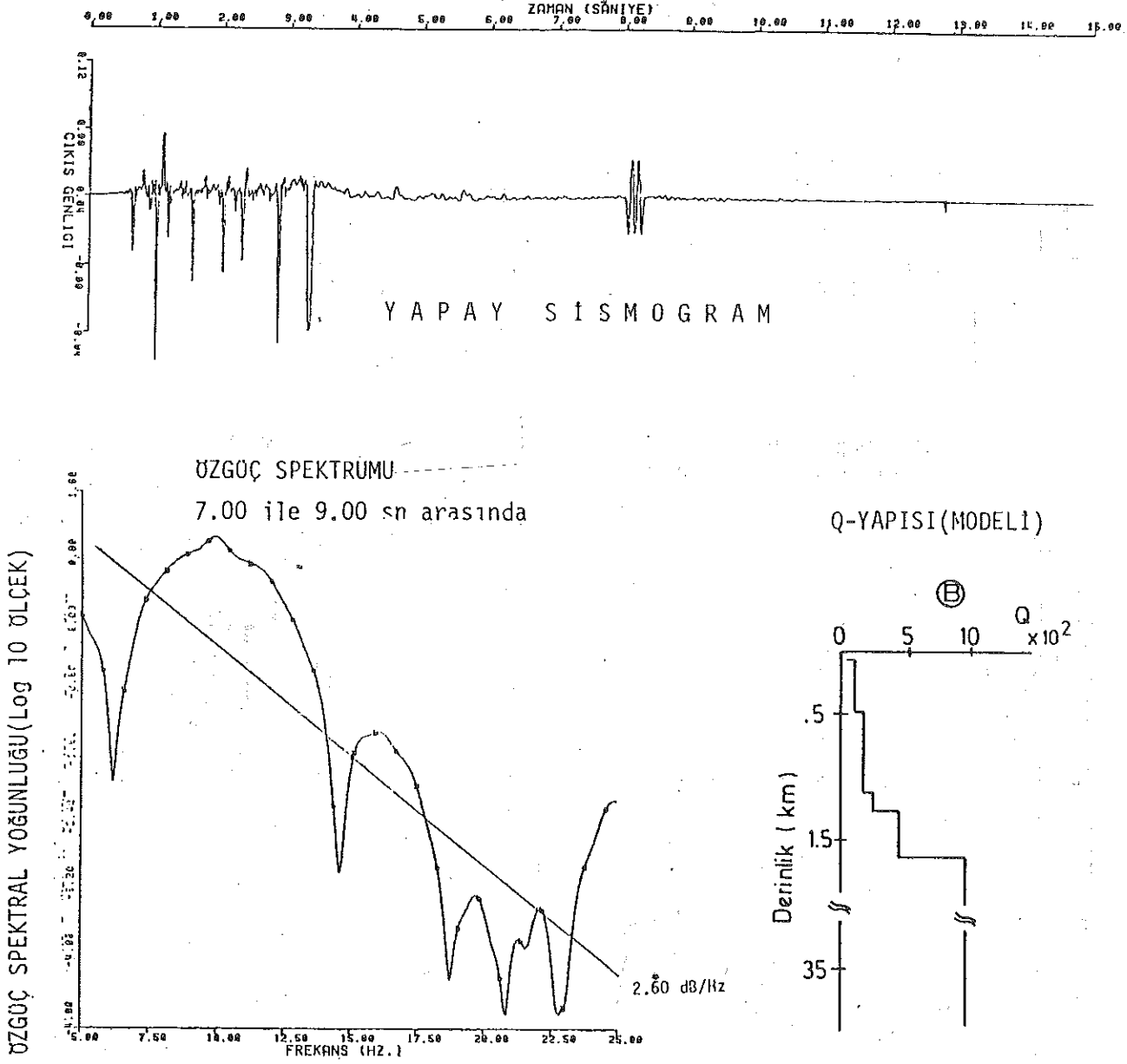
Sekil 16— Aynı yer kabuğu modeli ile yandaki şekilde görülen Geçiş Zonu için elde edilen sentetik sismogram.  
 Figure 16— Synthetic seismogram obtained for the Transition Zone shown on the side for the same earth model.





Şekil 17— Kuramsal yerkabuğu modeli (Şekil 9) ile Şekil 11B'de verilen geçiş zonunun yandaki Q-modeli kullanarak hesaplanan yapay sismogram (üstte) ve aynı sismogramın 7.00 ile 9.00 sn arasındaki özgüç spektrumu (altta).

Figure 17— Synthetic seismogram calculated using the Q-model shown on the side for the transition zone given in figure 11B with the theoretical earth model (figure 9) (upper); and the autopower spectrum of the same seismogram between 7.00 and 9.00 sec. (lower).



Şekil 18— Aynı Yerkabuğu modeli Şekil 11B'de verilen geçiş zonanun yandaki Q-modeli kullanarak hesaplanan Yapay sismogram (üstte) ve aynı sismogramın 7.00 ile 9.00 sn arasındaki özgül spektrumu (altta).

Figure 18— Synthetic seismogram calculated using the Q-model shown on the side for the transition zone given in figure 11B with the same theoretical earth model (upper) and the autopower spectrum of the same seismogram between 7.00 and 9.00 sec. (lower).

## KAYNAKLAR

- Anderson, D. L., et al., 1965, Attenuation of seismic energy in the upper mantle, *J. Geophys. Res.*, V-70, 1441-1448.
- Anstey, N. A., 1960, Attacking the problem of synthetic seismogram, *Geoph. Prosp.*, V-8, 242-260.
- Baranov, V. and Kunetz, G., 1960, Film synthétique avec réflexions multiples théorie et calcul pratique, *Geoph. Prosp.*, V-8, 242-260.
- Berryman, L. H. et al, 1958, Reflections from multiple transition layers. Part I, *Geophysics*, V-23, 223-243.
- Bois, P. et al., 1960, Seismogrammes synthétiques, possibilités, technique de réalisation et limitations, *Geoph. Prosp.*, V-8, 260-299.
- Cheng, C. H. And Toksöz, M. N., 1982, Determination of insitu attenuation from full waveform acoustic logs, *J. Geophys. Res.*, V-87, 5477-5484.
- Claerbout, J. F., 1968, Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response, *Geophysics*, V-33, 264-269.
- Clowes, R. M. and Kanasewich, E. R., 1970, Seismic attenuation and the nature of reflecting horizons within the crust, *J. Geophys. Res.*, V-75, 6693-6705.
- Durschner, H., 1958, Synthetic seismograms from continuous velocity logs, *Geophys. Prosp.* V-6, 272-284.
- Fuchs, K., 1969, On the properties of deep crustal reflectors. *Ztschr. f. Geophys.*, V-35, p: 133-149.
- Ganley, D. C., 1981, A method for calculating synthetic seismograms which include the effect of absorption and dispersion, *Geophysics*, V-46, 1110-1107.
- Goupillaud, P. L., 1961, An approach to inverse filtering of near-surface layer effects from seismic records, *Geophysics*, V-26, 754-760.
- Kanasewich, E. R, 1975, Time sequence analysis in Geophysics, Edmonton Univ. of Alberta press.
- Kelly, K. R., et al. 1976. Synthetic seismograms a finite-difference approach, *Geophysics*, V-41, 2-27.
- Knopoff, L., 1964, *Q. Rev. of Geophysics*, V-2, 625-660.
- Patton, S. W., 1988, Robust an least-squares estimation of acoustic attenuation from well-log. data, *Geophysics*, V-53, 1225-1232.
- Peterson, R. A., et al., 1955, The synthesis of seismograms from well-log data, *Geophysics*, V-20, 516-538.
- Press, F., 1964, Seismic wave attenuation in the crust, *J. Geophys. Res.*, V-69, 4417-4418.
- Robinson, E. A., 1967, Multichannel time series analysis with digital computer progrms, San Francisco, Holden Day Inc.
- Robinson, E. A., 1967, Basic equations for synthetic seismograms using the z-transform approach, *Geophysics*, V-33, 521-523.
- Robinson, E., And Treitel, S., 1977, The spectral function of layered system and the determination of the wave forms at depth, *Geophys. Prosp.* V-25, 434-459.
- Sengbush, R. L. et al., 1961, Interpretation of synthetic seismograms. *Geophysics*, V-26, 138-157.
- Sherwood, J. W., and Trorey, A. W., 1965, Minimum-phase and related properties of the response of a horizontally stratified absorptive earth to plane acoustic waves, *Geophysics*, V-30, 191-197.
- Treitel, S. and Rosinson, E. A., 1966, Seismic wave propagation in layered media in terms of communication theory, *Geophysics*, V-31, 17-32.
- Toksöz, M. N., 1981, Seismic wave attenuation, *Geophysics Reprint Series, 2, Soc. Explor. Geophys.*
- Trorey, A. W., 1962, Theoretical sesismogram with frequency and depth dependen absorption, *Geophysics*, V-27, 766-785.
- Tullos, F. N., and Reid, A. C., 1969, Seismic attenuation of Gulf Coast sediments, *Geophysics*, V-34, 516-528.
- Wuenschel, P. C., 1960, Seismogram synthesis including multiples and transmission coefficients, *Geophysics*, V-25, 106-129.