

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TRABZON DEPREM İSTASYONUNUN (TBZ)' DA KAYDEDİLEN YÜKSEK

MODLU LOVE DALGALARININ YORUMU

78074

Jeof. Müh. Yusuf Arif KUTLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

"Jeofizik Yüksek Mühendisi"

Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.01.1998

Tezin Savunma Tarihi : 04.03.1998

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Özcan ÇAKIR

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YILMAZTÜRK

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fahrettin KADİR

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN

Trabzon 1998

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümünde bulunan TBZ istasyonuna 1996 yılından itibaren dijital geniş-bandlı üç bileşen kayıt alabilecek şekilde işlevsellik kazandırılmıştır. 14.08.1996 tarihinde Çorum civarında iki deprem meydana gelmiştir. Bu depremler TBZ istasyonunda dijital geniş-bandlı üç bileşen olarak kayıt edilmiştir. Yapılan çalışmada kaydedilen bu depremler kullanılarak kaynak mekanizması ve Trabzon-Çorum arasında kalan kabuk yapısı hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır.

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlenerek, gerek konu seçimi, gerekse çalışmaların yürütülmesi sırasında ilgisi ve yardımını esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Özcan ÇAKIR' a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Türkiye Cumhuriyeti Devletine, Karadeniz Teknik Üniversitesine, Fen Bilimleri Enstitüsüne, Jeofizik Mühendisliği Bölümüne, Aileme ve arkadaşlarıma maddi ve manevi katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Yusuf Arif KUTLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ	XI
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1 Giriş	1
1.2 Sismik Dalgalar ve Sismik Dalgaların Temel Özellikleri	2
1.3 Kabuksal Fazlar ve Bunların Yerkabuğu Araştırmalarındaki Önemi	5
1.4 Yüzeysel Dalgalar ve Bunların Yerkabuğu Araştırmalarındaki Önemi	7
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	10
2.1 Filon Yöntemi	10
2.2 Çok Tabakalı Yarı-Sonsuz Bir Ortam İçin Love Dalgalarına Ait Transfer Fonksiyonunun Hesaplanması	18
2.3 Uygulamalar	26
2.3.1 Uygulamada kullanılan depremler ve kabuk modeli	26
2.3.2 Kullanılan Depremlerin Benzerliklerinin Araştırılması	27
2.3.3 Filon Yöntemi Kullanılarak Titreşim İntegrallerinin Hesaplanması	30
2.3.4 Kaynak Fonksiyonu ve Odak Parametrelerinin Belirlenmesi	31
2.3.5 Grup Hızı, Faz Hızı ve Derinlikle Enerji Dağılımının Araştırılması	36
2.3.6 Düşey S Dalga Hız Yapısındaki Değişimlerin Sentetik Sismogramlar Üzerine Etkisinin Araştırılması	40
2.3.7 Lg Dalgaları Kullanılarak Kaynak Karmaşıklığının Araştırılması	46

3.	BULGULAR ve İRDELEME	52
4.	SONUÇLAR	56
5.	ÖNERİLER	61
6.	KAYNAKLAR	62
7.	EKLER	65
8.	ÖZGEÇMİŞ	67



ÖZET

Anadolu kabuğu altındaki Lg tipindeki yüksek modlu makaslama dalga yayılımını modellemek için geniş-bandlı sismogramları kullanabiliriz. Yüksek modlu Lg yüzey dalgalarının modellenmesinde yüksek frekanslarda sayısal duraysızlıklarla karşılaşmaktadır. Aynı zamanda hesaplamalar çok uzun bilgisayar zamanı gerektirmektedir. Yazılan programlar yüksek frekanslarda karşılaşılan duraysızlıkları azaltabilecek şekilde düzenlenmiştir. Filon yöntemi bilgisayar zamanını mümkün olduğunca en aza indirmek için kullanılmıştır. Sentetik sismogram hesaplamalarında aşağıya ve yukarıya giden dalga alanlarını modelleyen yansıma yöntemi kullanılmıştır. KAF ve DAF fayları üzerinde yaklaşık olarak 10-15 km odak derinliğine sahip, orta büyüklükte ve yüksek frekanslı makaslama dalgalarını üreten depremlerin olduğu gözlenmiştir. Literatürde önerilen tek boyutlu hız profilleri kullanılmıştır. Kullanılan düşey hız profilinde ilk 15 km de SH hız gradyenti 2.7-3.6 km/sn arasında değişim göstermektedir. Bu derinlikteki hız gradyenti Lg yüzey dalgası yayılımını kontrol etmektedir. Yaklaşık olarak 25 km derinlikte daha düşük bir hız gradyenti olduğu görülmekte ve 5-35 km arasında tabaka kalınlıkları ise yavaş bir artış göstermektedir. Kullanılan hız profili Moho civarındaki odak derinliklerinde oluşabilecek Lg dalga yayılımına uygun bir yapıya sahiptir. Yüksek frekans içeriğine sahip Lg dalga yayılımı derinlik arttıkça yüksek frekans içeriğini kaybetme eğiliminde olacaktır. Değişik band-geçişli filtreler kullanılarak Lg dalga formlarının belirginleştirilmesi sonucunda kaynak fonksiyonu karmaşıklığı aydınlatılabilir.

Anahtar kelimeler : Bilgisayar zamanı, Filon yöntemi, Geniş-bandlı sismogram, Karmaşık kaynak, Yansıma yöntemi.

SUMMARY

Interpretation of higher mode Love waves at TBZ

We use broad-band seismograms to model the shear wave propagation of higher modes of Lg type under Anatolian crust. The modelling suffers numerical instabilities at high frequencies. The computation time is very high. Computer programs written is so design to alleviate the numerical instabilities, and Filon's method is used to reduce the computational time. Reflectivity method which models both upgoing and downgoing waves is utilized. The seismicity of right lateral north and left lateral east Anatolian strike slip faults are usually shallow around 10-15 km. Small and moderate size earthquakes with high frequency shear wave propagations are observed. We use one dimensional velocity profiles formerly published in the literature and extend them as necessary due to the lateral heterogeneity. In the first 15 km depth range SH velocity gradient is high, rising from 2.7 to 3.6 km/sec. This depth range controls the Lg velocity of 3.4 km/sec and shows a group velocity stationary phase. Another velocity gradient lower than the first appears to start from about 25 km depth and below that moho shows a smooth transition of thickness about 5 km at around 35 km in depth. This velocity profile results the Lg propagation for focal depths as deep as moho, but the frequency content is reduced as the focal depth increases. It is sometimes possible to observe the source time complexity looking at Lg waves of several band-pass filtered forms.

**Key Words : Broad-band seismograms, Computation time, Filon's method
Reflectivity method, Source time complexity.**

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1. Yerküre küreselliğinin ihmal edildiği tipik bir kıtasal kabuk modeli içinde seyahat eden fazlar ve ışın yolları	6
Şekil 2. Herhangi bir F kuvveti altında kalan birim uzunluğundaki ipin titreşimleri	8
Şekil 3. (a) Love ve (b) Rayleigh dalgaları için temel (U_0, C_0), birinci (U_1, C_1) ve ikinci (U_2, C_2) modlara ait teorik faz hızı ve grup hızı eğrileri [27].	9
Şekil 4. Paralel tabakalardan oluşan yarı-sonsuz ortam modeli ve bu modele ait koordinat sisteminin gösterimi [33].	19
Şekil 5. (j)' inci ve (j+1)' inci tabakalar arasında kalan sismik arayüzey için aşağıya ve yukarıya giden dalga alanlar	21
Şekil 6. (j)' inci ve (j+1)' inci tabakalar arasında kalan sismik arayüzey için yukarıdan ve aşağıdan gelen dalga alanlarının yansımaya ve iletilmesi	22
Şekil 7. Çizelge 1' de verilen iki depremin BAZ=267' ye göre hesaplanmış tanjansiyel bileşenleri	28
Şekil 8. (a) Çizelge 1' de verilen 1. depremin tanjansiyel bileşenine ait genlik ve gürültü spektrumları ve (b) Çizelge 1' de verilen 2. depremin tanjansiyel bileşenine ait genlik ve gürültü spektrumları	29
Şekil 9. Filon yönteminin uygulanmasında Δu örnekleme aralığı faktörünün gösterilmesi	30
Şekil 10. Kaynak fonksiyonu parametresi k' nin değişiminin kaynak fonksiyonu ve sentetik sismogramlar üzerine etkisinin gösterilmesi	32
Şekil 11. Odak derinliği değişiminin sentetik sismogramlar üzerine etkisinin gösterilmesi	33

Şekil 12.	(a) Şekil 10' da $k=0.5, 1.0$ ve 1.5 için ve (b) Şekil 11' de $d=5, 12$ ve 20 km odak derinlikleri için hesaplanan sentetik sismogramların genlik spektrumlarının karşılaştırılması	34
Şekil 13.	Doğrultu atımlı, 45° eğimli ve 90° eğimli normal fay modelleri için hesaplanan sentetik sismogramlar	35
Şekil 14.	Çizelge 2' de verilen kabuk modeli için $0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ ve 11 . modlar için $0-2$ Hz frekans aralığında hesaplanan (a) grup hızlarının, (b) faz hızlarının, (c) enerji ve (d) Q kalite faktörünün frekansa göre değişiminin gösterilmesi	37
Şekil 15.	Çizelge 2' de verilen kabuk modeline göre (a) 3. mod için, (b) 4. mod için ve (c) 5. mod için hesaplanan eigen fonksiyonlarının derinliğe göre, grup ve faz hızlarının frekansa göre değişiminin gösterilmesi	38
Şekil 16.	Çizelge 2' de verilen kabuk modeline göre (a) 6. mod için, (b) 7. mod için ve (c) 8. mod için hesaplanan eigen fonksiyonlarının derinliğe göre, grup ve faz hızlarının frekansa göre değişiminin gösterilmesi	39
Şekil 17.	(a) Çizelge 2' de önerilen kabuk modeline ait S dalga hızının derinliğe göre değişimi ve (b) Çizelge 1' de verilen birinci deprem için çizelge 2' de önerilen kabuk modeline göre hesaplanan sentetik sismogram	41
Şekil 18.	(a) Çizelge 2' de önerilen S dalga hız yapısının ve bu modelin $0-5$ km arasında hızların % 2 oranında düşürülmesiyle elde edilen yeni S dalga hız yapısının $0-10$ km arasında kalan kısımlarının gösterilmesi ve (b) Şekil 18a' da verilen S dalga hız modelleri için hesaplanan sentetik sismogramların karşılaştırılması	42
Şekil 19.	(a) Çizelge 2' de önerilen S dalga hız yapısının ve bu modelin $7.5-35$ km arasında hızların % 2 oranında düşürülmesiyle elde edilen yeni S dalga hız yapısının $5-40$ km arasında kalan kısımlarının gösterilmesi ve (b) Şekil 19a' da verilen S dalga hız modelleri için hesaplanan sentetik sismogramların karşılaştırılması	43

- Şekil 20. (a) Çizelge 2' de önerilen S dalga hız yapısının ve bu modelin 35-90 km arasında hızların % 2 oranında düşürülmesiyle elde edilen yeni S dalga hız yapısının 30-100 km arasında kalan kısımlarının gösterilmesi ve (b) Şekil 20a' da verilen S dalga hız modelleri için hesaplanan sentetik sismogramların karşılaştırılması 44
- Şekil 21. (a) Çizelge 2' de önerilen S dalga hız yapısının ve bu modelin 70-220 km arasında hızların % 2 oranında düşürülmesiyle elde edilen yeni S dalga hız yapısının 60-220 km arasında kalan kısımlarının gösterilmesi ve (b) Şekil 21a' da verilen S dalga hız modelleri için hesaplanan sentetik sismogramların karşılaştırılması 45
- Şekil 22. (a) 3-3.5 km/sn grup hızı aralığı için 0.2-2 Hz frekans bandında momentleri 1.23×10^{24} ve k' ları 1.0 olarak alınan ve aynı zamanda 0, 15 ve 22 sn ötelenmeye sahip üç ayrı kaynaktan oluşan bir karmaşık kaynak fonksiyonu için elde edilen Lg yüzey dalgası hız kaydı sentetik sismogramı ve (b) Şekil 22a' da verilen sentetik sismogramın 0.25 sn aralıklarla pencereyerek 0-2 Hz frekans bandı için hesaplanan spektrogram 47
- Şekil 23. (a) Çizelge 1' deki 1. depreme ait tanjansiyel bileşenin Lg dalga formlarını ortaya çıkarmak için 6 kutuplu ve 0.8-2.0 Hz köşe frekanslarına sahip bir Butterworth band-geçişli filtreden geçirilerek süzülmesi ve (b) Şekil 23a' da verilen süzülmüş tanjansiyel bileşenin 0.25 sn aralıklarla pencereyerek 0-4 Hz frekans bandında hesaplanan spektrogramı 48
- Şekil 24. (a) Şekil 23a ve şekil 23b' de gözlemlenebilen üç ayrı Lg dalga formuna göre momentleri 6.15×10^{23} ve k' ları 1.0 olarak seçilen ve aynı zamanda 0, 15 ve 22 sn ötelenmeye sahip üç farklı kaynaktan meydana gelen bir karmaşık kaynak fonksiyonu ve (b) Çizelge 1' de verilen 1. depremin ve bu deprem için şekil 24a' da verilen karmaşık kaynak fonksiyonu kullanılarak hesaplanan sentetik sismogramın karşılaştırılması 49

- Şekil 25. (a) Çizelge 1' verilen 2. depreme ait tanjansiyel bileşenin Lg dalga formlarını ortaya çıkarmak için 6 kutuplu ve 0.8-2.0 Hz köşe frekanslarına sahip bir Butterworth band-geçişli filtreden geçirilerek süzülmesi ve (b) Şekil 25a' da verilen süzülmüş tanjansiyel bileşenin 0.25 sn aralıklarla pencereyerek 0-4 Hz frekans bandında hesaplanan spektrogramı 50
- Şekil 26. (a) Şekil 25a ve şekil 25b' de gözlemlenebilen üç ayrı Lg dalga formuna göre momentleri 3.5×10^{23} , 3.5×10^{23} , 1.75×10^{23} ve k' ları 1.0 olarak seçilen ve aynı zamanda 0, 13 ve 20 sn ötelenmeye sahip üç farklı kaynaktan meydana gelen bir karmaşık kaynak fonksiyonu ve (b) Çizelge 1' de verilen 1. depremin ve bu deprem için şekil 26a' da verilen karmaşık kaynak fonksiyonu kullanılarak hesaplanan sentetik sismogramın karşılaştırılması 51

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1. Kullanılan depremler [34].	26
Çizelge 2. Mindevalli tarafından Türkiyenin doğusu için önerilen kabuk modeli	27



SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

α	: P dalga hızı
β	: S dalga hızı
Q_α	: P dalgası hızı için kalite faktörü
Q_β	: S dalgası hızı için kalite faktörü
h	: Tabaka kalınlığı
ρ	: Yoğunluk
K	: Bulk modülü
λ	: Dalgaboyu
LQ	: Uzun periyotlu Love dalgası
LR	: Uzun periyotlu Raleigh dalgası
G	: LQ tipi manto dalgaları
R	: LR tipi manto dalgaları
$U(w)$: Grup hızı
$c(w)$: Faz hızı
FM	: Filon yöntemi
$f(p)$: Sayısal olarak hesaplanabilen bir fonksiyon
$g(p)$: Analitik olarak ifade edilebilen bir fonksiyon
$J(s,p)$: Bessel fonksiyonları
s	: Kompleks veya gerçel olabilen bir parametre
$L_i^n(p)$: i ' inci Lagrange katsayısının n . mertebeden türevi
S	: [$s^{-1}, s^{-2}, s^{-3}, s^{-4}, s^{-5}$]
$H(P_i)$: [$f(p_i), f'(p_i), f''(p_i), f'''(p_i), f^{IV}(p_i)$]
$H(P_{-i})$: [$f(p_{-i}), f'(p_{-i}), f''(p_{-i}), f'''(p_{-i}), f^{IV}(p_{-i})$]
$F(f)$: [$f(p_{-2}), f(p_{-1}), f(p_0), f(p_1), f(p_2)$]
$B(2h)$: [$(2h), -(2h)^2/2!, (2h)^3/3!, -(2h)^4/4!, (2h)^5/5!$]
$[W^{(i)}(z)]$: i ' inci tabakaya ait yerdeğiştirme
$[T^{(i)}(z)]$: i ' inci tabakaya ait gerilme
$Z^{(i)}$: i ' inci tabakanın derinliği

μ^i, λ^i	: i ' inci tabakaya ait Lamé sabitleri
w	: Açısal frekans
v	: Düşey dalga sayısı
k	: Yatay dalga sayısı
C_u	: Yukarıya giden düzlem dalğanın genliği
C_d	: Aşağıya giden düzlem dalğanın genliği
$\Lambda_d^{(i)}$: Aşağıya doğru giden dalgalara ait düşey yöndeki üstel yayılım faktörü
$\Lambda_u^{(i)}$: Yukarıya doğru giden dalgalara ait düşey yöndeki üstel yayılım faktörü
$R_{du}^{(i)}$: Aşağıya giden dalga alanları için i ' inci arayüze ait yansımaya katsayısı
$R_{ud}^{(i)}$: Yukarıya giden dalga alanları için i ' inci arayüze ait yansımaya katsayısı
$T_d^{(i)}$: Aşağıya giden dalga alanları için i ' inci arayüze ait iletim katsayısı
$T_u^{(i)}$: Yukarıya giden dalga alanları için i ' inci arayüze ait iletim katsayısı
R/T	: Yansımaya ve iletim katsayıları
n	: Verilen herhangi bir w frekansı için hesaplanacak mod sayısı
OD	: Odak derinliği
BAZ	: Geriazimut
Δu	: Yatay yavaşlık örnekleme aralığı
M_0	: Kaynak momenti

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

Yüzey dalgaları ve yüzey dalgalarının temel özellikleri kullanılarak yer kabuğu yapısı hakkında önemli bilgiler edinilebilir.

Tabakalı bir modele ait dispersiyon eğrilerinin ve onlara karşılık gelen eigen fonksiyonlarının hesaplanması Haskel [1] tarafından yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Verilen herhangi bir frekans için faz hızlarının ve bunlara karşılık gelen eigen fonksiyonlarının hesaplanması Harkrider [2] ve Knopoff [3] tarafından yüzey dalgalarının incelenmesinde, Oliver & Ewing [4, 5], Kovach & Anderson [6] ve Knopoff, Schwab & Kausel [7] tarafından rejyonel uzaklıklarda Lg ve Rg dalgalarının modellenmesinde ve Harvey [8] tarafından sismogramların modellenmesinde kullanılmıştır. Değişik sentetik sismogram hesaplama tekniklerinde karşılaşılan titreşim integrallerinin sayısal olarak hesaplanmasında Filon yöntemi kullanılabilir. Filon yönteminin esası Filon [9] ve Tranter [10] tarafından yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Filon yöntemi Luke [11], Flinn [12], Phinney [13], Apsel [14] ve Apsel [15] tarafından sentetik sismogram hesaplama yöntemlerine yönelik olarak geliştirilmiştir. Brüstle & Müller [16] sığ odak derinliğine sahip depremlere ait kaynak parametrelerinin daha detaylı bir şekilde saptanabilmesi için rejyonel uzaklıklarda kaydedilen Love dalgalarını kullanmışlardır. Yamanaka, Seo & Samano [17] yüzey dalgalarını kullanarak sediment tabakaların yüzey dalgası yayınındaki önemini gözlemsel ve sayısal çalışmalarla ortaya koymuştur. Panza [18] litosferin anelastik özelliklerini saptamak için tek kaynak-tek istasyon multimod yöntemi Cheng & Mitchell [19]'ni kullanarak sismik enerjinin soğrulma nedenlerini ve sentetik sismogramlar üzerine etkilerini ortaya koymuştur.

Mindevalli [20] Love ve Rayleigh dalgalarını kullanarak Anadolu plakasının düşey yönde ilk 200 km.'lik kısmı için çeşitli kabuk modelleri önermiştir. Bu çalışmada TBZ' de alınan dijital kayıtlar kullanılarak Türkiyenin doğusu için önerilmiş olan kabuk modelinin doğruluğu kaynak parametreleri ve karmaşıklığı göz önünde bulundurularak ortaya konulması amaçlanmaktadır.

1.2 Sismik dalgalar ve sismik dalgaların temel özellikleri

Kayaçlarda biriken deformasyon enerjisi kayaçların elastik limitini aştığı zaman kayaç kütleleri aniden yerdeğiştirir ve oluşan kırılmadan sismik enerji titreşimler halinde yayılmaya başlar [21]. Fay düzlemi üzerindeki her bir nokta farklı deformasyon birikimine ve elastik limite sahip olan kayaçlardan oluşmuştur. Bu nedenle fay düzlemi üzerindeki her bir nokta belirli bir zaman gecikmesiyle (kırılmanın yayılım hızına bağlı olarak) kırılmaya maruz kalır. Kırılma fay düzlemine paralel olarak yayılır ve aktif hale geçen fay düzlemi boyunca biriken deformasyon enerjisi serberst bırakılır. Kırılma esnasında fay düzlemi üzerindeki her bir noktadan boşalan deformasyon birikimi, sonuç olarak faydan yayılmaya başlayan sismik enerjiyi oluşturur. Fay düzlemi üzerinde fazla deformasyon birikiminin ve yerdeğiştirmenin olmadığı yerler **fiziksel engel** olarak adlandırılır. Fiziksel bariyerler, birincil kırılma devam ederken belirli bir süre sonra tetiklenerek ikincil bir kaynak olarak davranırlar. Bu tür fay düzlemi ve fay hareketi sonucu oluşan kaynak **karmaşık kaynak** olarak adlandırılır.

Cisim dalgaları ve yüzey dalgaları olmak üzere iki çeşit sismik dalga vardır. Cisim dalgaları yüzey dalgalarına göre daha yüksek yayılım hızına sahiptir. Kaynaktan çıkan cisim dalgaları her yöne yayılır. Cisim dalgaları sismik hız veya yoğunluk değişiminin olduğu arayüzeylerden yansır ve kırılır. Hızın derinlikle arttığı tabakalı bir ortamda süreksizlikler boyunca kırılan, yansıyan, kırılan ve dönüşen cisim dalgalarının yapıcı girişimleri **yüzey dalgalarını** oluşturur. Yüzey dalgaları yerkürenin yüzeyi ve yüzeye yakın tabakalar boyunca yayınırlar. Sığ odaklı depremlerde açığa çıkan enerjinin büyük bir kısmını yüzey dalgaları taşır. Aynı zamanda sismogramlar üzerinde yeraltı hız yapısıyla ilgili bilgilerin çoğunu yüzey dalgaları içerir. Nükleer patlatmalar esnasında ortamın küresel simetriye sahip deformasyonu söz konusudur. Bu nedenle, P dalgaları patlatma türü kaynaktan iyi oluşur ve onların tabakalı ortamda seyahati esnasında SV dalgalarına dönüşümü mevcuttur. Rayleigh dalgalarının nükleer patlatmalardan sonra gözlemlendiği görülmüştür. Bazı durumlarda, patlatmanın küresel simetrisi bozulduğundan makaslama türünden deformasyon ve dolayısıyla Love dalgasının oluşumu söz konusu olabilmektedir. Dolayısıyla nükleer patlatmaların Love türü yüzey dalgalarının oluşabilmesi için iyi bir kaynak oluşturmadığı söylenebilir. Bu özellik kullanılarak nükleer patlatmalar ile depremler birbirinden ayırt edilebilir. Yüzey dalgaları

sismogramlar üzerinde yüksek genliğe ve uzun kayıt süresine sahiptir. Ayrıca yüzey dalgaları yüzeye yakın düşük hızlı zon boyunca kanalize olarak seyahat ettikleri için yayılım hızları cisim dalgalarına göre daha düşüktür ve sismogramlar üzerinde P ve S varışlarından sonra gözlenirler [22].

Cisim dalgaları boyuna P dalgaları ve enine S dalgaları olmak üzere ikiye ayrılır ve tabakalı ortamlarda Snell yasasına göre seyahat ederler. Genel olarak boyuna cisim dalgaları enine cisim dalgalarına göre 1.7 kat daha hızlı yayınırlar. P dalgaları kayıt istasyonlarına ilk olarak varan sismik dalgalardır. Bu nedenle birincil cisim dalgalar olarak adlandırılırlar. S dalgaları kayıt istasyonlarına P dalgalarından sonra geldiklerinden ikincil cisim dalgaları adını alırlar. Boyuna cisim dalgaları yayılım doğrultusunda ileri ve geri hareket ederek titreşirler. Enine cisim dalgaları ise yayılım doğrultusuna dik doğrultuda ileri ve geri hareket ederek titreşirler. Yatay doğrultuda polarize olmuş enine cisim dalgaları SH düşeyde polarize olmuş enine cisim dalgaları SV ile gösterilir.

$\beta = \sqrt{\mu/\rho}$ ve $\alpha = \sqrt{K + \frac{4}{3}\mu/\rho}$ bağıntılarında α P dalga hızını, β S dalga hızını, K bulk modülü veya sıkışmazlığı, μ shear modülü veya sertliği ve ρ yoğunluğu göstermektedir. Bulk modülü K, artan basınçla materyalin hacmindeki değişim oranı olarak tanımlanabilir. Shear modülü μ ise bir materyalin şeklini değiştirebilmek için birim alana düşen gerekli kuvvet miktarı olarak ifade edilebilir. Sismik dalga hızları da içinde seyahat ettikleri ortamın elastik modülüne ve yoğunluğuna bağlıdır. P dalgalarının yayılımı esnasında materyalin sıkışması ve genişmesi söz konusudur. Aynı olay S dalgalarının yayılımı esnasında materyalin kesme ve döndürme kuvvetlerine maruz kalması olarak açıklanabilir [23]. Bu nedenle P dalgalarının seyahatı esnasında materyalin hacmi ve şekli değişirken S dalgalarının seyahatı esnasında ise materyalin sadece şekli değişir. Dolayısıyla α hızı K ve μ' ye ve β hızı ise sadece μ' ye bağlı olarak değişim gösterir. P dalgaları katı ve sıvı ortamlarda seyahat edebilirler. Sıvılarda makaslama gerilmeleri söz konusu olmadığı ($\mu=0$) için S dalgaları sıvı ortamlar içinde seyahat edemezler.

Love ve Rayleigh dalgaları sismogramlar üzerinde en çok karşılaşılan yüzey dalgası türleridir. Genel olarak Love dalgası LQ, Rayleigh dalgası ise LR ile gösterilir. LQ ve LR dalgaları yerkürenin yüzeyinde veya yerkabuğu ve üstmanto içerisinde yeralan hız süreksizlikleri boyunca yayınırlar. Rayleigh dalgası yarı sonsuz bir ortamın

yüzeğine yakın kısımlarında oluşur. Love dalgası ise S dalga hızının derinlikle arttığı tabakalı ortamlarda oluşur. Rayleigh dalgası yayınım doğrultusuna dik bir düşey düzlemde saat yönünün tersine eliptik bir yörünge çizerek titreşim hareketi yapar. Love dalgası düşey doğrultuda titreşim hareketi yapmaz. Yatay doğrultuda Rayleigh dalgası boyuna cisim dalgası gibi ve Love dalgası ise enine cisim dalgası gibi titreşim hareketi yapar. LQ dalgasının yayınım hızı LR dalgasının yayınım hızına göre daha yüksektir. LQ ve LR seyahat yollarının karmaşıklığına bağlı olarak sismogramlar üzerinde ikinci kez gözlenebilirler. LQ tipi manto dalgası G ile LR tipi manto dalgası ise R ile gösterilir. G_n ve R_n manto dalgaları sismogramlar üzerinde gözükmeye sayılarına göre değişen n indisine göre adlandırılırlar. Yatay bileşen kayıtlarında LQ dalgası LR dalgasına göre daha belirgindir. Her iki tip yüzey dalgası da yakın alan deprem kayıtlarında yüksek genlikli S varışları nedeniyle gözükmeyizler. Düşey bileşen kayıtlarında ise LR dalgası maksimum genliğe sahiptir. Yüzey dalgaları değişik modlarda seyahat edebilirler. Temel ve yüksek modlarda seyahat eden yüzey dalgaları farklı frekans içeriği ile sismogramlar üzerinde gözlenebilir.

Dispersiyon seyahat esnasında dalga treni şeklinin değişmesi anlamına gelir. Love ve Rayleigh dalgaları genel olarak dispersiftirler. Bu yayınım hızlarının frekans bağımlı olduğunu, diğer bir ifadeyle, frekans bandındaki herbir frekansın farklı hızlarla seyahat ettiği anlamına gelir. Büyük dalga boylu olaylar yüksek hızla seyahat ederek kısa dalga boylu olaylardan erken kayıt istasyonlarına varmaları halinde sismogramlar üzerinde kısa dalga boylu olaylardan daha önce kayıt edilir ve artan periyotla birlikte dispersif yüzey dalgalarının hızının arttığı gözlenebilir. Bu olay **normal dispersiyon** olarak tanımlanabilir. Ayrıca artan periyotla dispersif yüzey dalgalarının hızının azalması ise **ters dispersiyon** olarak tanımlanabilir.

Soğurma kaynaktan çıkan sismik dalgaların kayaçların mükemmel olmayan elastik özellikleri, küresel açılma, yansıma, kırılma, kırınma, saçılma ve mod dönüşümleri sonucunda enerji kaybına uğramaları olarak tanımlanabilir. **Soğurma** frekans bağımlıdır ve sismik enerjinin düşük genlikli olarak kayıt edilmesine neden olur. Aynı zamanda kaynak mekanizması ve kaynak yayınım özellikleri de sismik sinyalin genliğini etkileyen faktörlerdendir.

Değişik insan aktiviteleri sonucu oluşan ve genellikle 1 Hz.' in üstünde hakim frekanslara sahip olaylar **çevresel gürültü** olarak adlandırılır. **Mikrosismik gürültüler**

ise okyanusal ve kıtasal kökenli atmosferik olaylar sonucu oluşur ve genellikle 0.01 ile 0.5 Hz. arasında değişim gösteren frekans bandına sahiptir. Çevresel gürültüler yüksek frekans bandında seyahat ederler. Bu nedenle 1000 km.' ye kadar olan episantral uzaklıklarda meydana gelen yakın alan deprem kayıtlarını etkileyebilirler. Mikrosismik gürültüler ise çevresel gürültülere göre daha düşük frekans bandında seyahat ederler. Bu nedenle 1000 km.' den büyük episantral uzaklıklarda meydana gelen uzak alan deprem kayıtlarını etkileyebilirler.

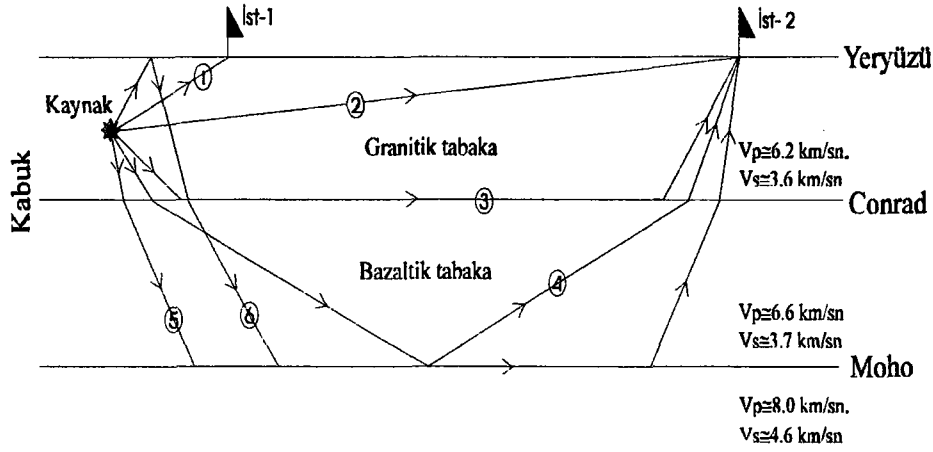
Tabakalar içinde rastgele dağılım gösteren küçük boyutlu inhomojeniteler ile dalga alanlarının etkileşimi saçılma olayını meydana getirir. Küçük çaptaki inhomojenitelerin neden olduğu saçılma olayı yüksek frekanslı dalga alanlarını **koda dalgaları** adı verilen ardışık ve karmaşık varışlara dönüştürebilir [24]. Soğurmanın düşük olduğu ve heterojenitenin yüksek olduğu ortamlarda seyahat eden sismik dalgalar sismogramlar üzerinde belirgin varışlar olarak gözlenmeyebilirler.

Sismik dalgalar varış zamanlarına, farklı genlik seviyeleri, periyotlarına, dispersif özelliklerine ve tanecik hareketlerine bakılarak sismogramlar üzerinde ayırt edilebilirler.

1.3 Kabuksal fazlar ve bunların yerkabuğu araştırmalarındaki önemi

Tipik bir kıtasal kabuk sediment, granitik ve bazaltik tabakalardan ve tipik bir okyanusal kabuk ise su, sediment ve bazaltik tabakalardan oluşur. Ayrıca granitik-bazaltik tabaka sınırı Conrad ve bazaltik-ultrabazaltik(manto) tabaka sınırı ise Mohorovicic olarak adlandırılır(Şekil 1).

Kaynak yerkürenin yüzeyi boyunca enine ve boyuna cisim dalgaları yaydığından küçük episantral uzaklıklarda (0° - 10°), sismogramlar üzerinde enine ve boyuna cisim dalgalarının granitik ve bazaltik tabakalar içinde seyahat eden ve seyahat esnasında bu tabakalar içinde yansıma ve kırılmalara uğrayan değişik fazları kayıt edilir. 0° ile 10° arasındaki episantr uzaklıklarında sismogramlar lokal yerkabuğu yapısı nedeniyle karmaşık bir yapıya sahiptir. Küçük episantral uzaklıklarda (0° - 10°) kısa periyotlu aletlerle kaydedilebilen kabuksal dalgalar (\bar{P} , \bar{S} , Pg, Sg, P*, S*, PmP, SmS, Pn, Sn, pPn, sPn, Rg, Lg) kullanılarak yerkabuğu yapısı hakkında önemli bilgiler edinilebilir.



Şekil 1. Yerküre küreselliğinin ihmal edildiği tipik bir kıtasal kabuk modeli içinde seyahat eden fazlar ve ışın yolları. (1) \bar{P} ve \bar{S} dalgalar, (2) P_g ve S_g dalgaları, (3) P^* ve S^* dalgaları, (4) P_mP ve S_mS dalgaları, (5) P_n ve S_n dalgaları ve (6) pP_n ve sS_n dalgaları

P_n ve S_n dalgaları küçük episantral uzaklıklarda (0° - 10°) baş dalgaları olarak (Mohodan kırılarak gelen) sismogramlar üzerinde kayıt edilen kabuksal fazlardır. P_n ve S_n dalgalarının varış zamanları ve varış zamanları arasındaki zaman farkları episantr uzaklığına, yerkabuğu kalınlığına, odak derinliğine ve yerkabuğu içinde ve altındaki(üst manto) hız dağılımına bağlıdır. Genellikle 200 km' den daha küçük episantr uzaklıklarında P_n ve S_n dalgaları, P_g ve S_g dalgalarından sonra; 200 km' den büyük uzaklıklarda ise P_g ve S_g dalgalarından önce kaydedilirler. Bunların yanında, sismogramlar üzerinde kaydedilen \bar{P} ve \bar{S} varışlarının varlığı episantral uzaklığının çok küçük olduğunu gösterir.

Lokal uzaklıklarda kaydedilen kısa periyodlu Rayleigh tipi R_g dalgası ortalama 3 km/sn yayılım hızıyla kıtasal kabukta seyahat eder. Sismogramlar üzerinde kaydedilen R_g dalgasının varlığı meydana gelen depremin çok sığ odaklı olduğunu gösterir. Bununla birlikte, P_n varışından sonra kayıt edilen derinlik fazı (pP_n veya sP_n) ile P_n varışı arasındaki zaman farkı kullanılarak odak derinliği belirlenebilir. Ayrıca yerkabuğu içindeki hız süreksizlikleri boyunca seyahat eden SH dalgalarının girişimi sonucu istasyonlarda kaydedilen L_g dalgası (ortalama yayılım hızı 3.5 km/sn) kullanılarak yerkabuğunun hız yapısı hakkında önemli bilgiler edinilebilir.

Sismogramlar üzerinde kaydedilen değişik sismik dalgalar kaynağın ve yaraltı yapısının özelliklerini yansıtırlar. Okyanus kenarlarında ve adalarda kurulu olan

istasyonlarda kaydedilen yüksek frekanslı sismik dalgalar tuzluluğa ve sıcaklığa bağlı olarak okyanuslarda düşük hızlı derin bölgelerin oluştuğunu gösterir. Aynı zamanda denizel volkanik patlamalar sonucu kaydedilen T fazının varlığı ve bu fazda gözlenen değişimler okyanus tabanı topoğrafyasının ve stratigrafisinin özelliklerini belirtir.

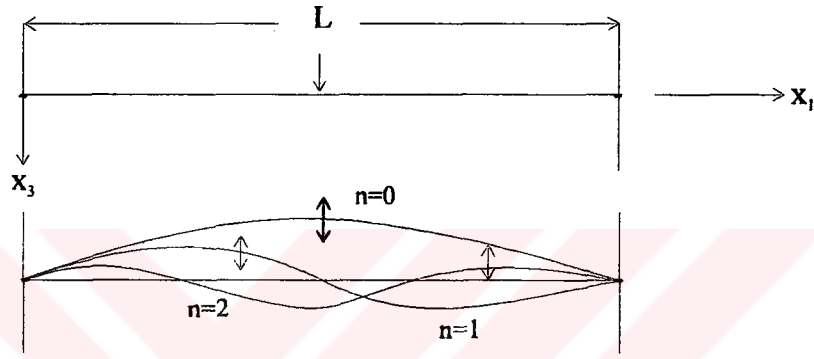
Gerçekte, yerkabuğu yapısı birbirine paralel ve kendi içinde homojen özellikler taşıyan tabakalardan oluşmayabilir. Genellikle, yerkabuğu model çalışmalarında yerkabuğunu meydana getiren tabakaların birbirine paralel olduğu ve herbir tabaka için tabaka parametrelerinin (h , α , β , Q_α , Q_β , ρ) yanal olarak değişmediği kabul edilir. Yapılan model çalışmalarında farklı bölgelerde farklı tabaka parametrelerinin saptanması bölgeden bölgeye yerkabuğu yapısının değiştiğini gösterir. Yerkabuğu model çalışmalarının daha sağlıklı sonuçlar üretebilmesi için birden fazla istasyonda kayıt edilen sismik kabuksal fazların kullanılması gerekmektedir.

1.4 Yüzey dalgaları ve bunların yerkabuğu araştırmalarındaki önemi

Yüzey dalgaları yatay homojen izotropik bir ortamda boyuna P dalgalarının düşey inhomojen bir ortamda ise enine SV ve SH dalgalarının girişimi sonucu oluşurlar. Yerkürenin iç yapısının araştırılması çalışmalarında yüzey dalgalarının dispersiyon özelliklerinden yararlanır [25].

Tek bir frekansla seyahat eden yüzey dalgası hızı **grup hızı**, seyahat eden herhangi bir yüzey dalgası fazının hızı ise **faz hızı** olarak adlandırılır. $U(w)=c(w)+k(w)dc(w)/dk(w)$, burada $U(w)$ ve $c(w)$ frekansla değişim gösteren grup ve faz hızlarıdır [26]. Diğer bir ifadeyle grup hızı kaynaktan belirli bir yelpazedan çıkarak yayılan dalga treninin hızı ve faz hızı ise sismik dalga cephesinin yüzeydeki görünür hızı olarak açıklanabilir. Artan dalga boyu ile birlikte yüzey dalgası penetrasyon derinliği ve yayılım hızı da artar. Bu etki dalga dispersiyonunu, dolayısıyla farklı periyotlarda yayılan dalgaların farklı grup ve faz hızlarına sahip olduğu sonucunu ortaya çıkarır. Faz ve grup hızının frekansa veya periyoda göre değişimi ise **dispersiyon eğrilerini** verir. Dispersiyon eğrileri kabuk ve üst mantonun hız yapısıyla ilgili bilgiler içerir. Teorik modellerden elde edilen Love ve Rayleigh dalgalarına ait dispersiyon eğrileri gözlemlenen Love ve Rayleigh dalgalarına ait dispersiyon eğrileriyle karşılaştırılarak kabuk ve üst mantonun iç yapısı hakkında bazı temel bilgiler edinilebilir.

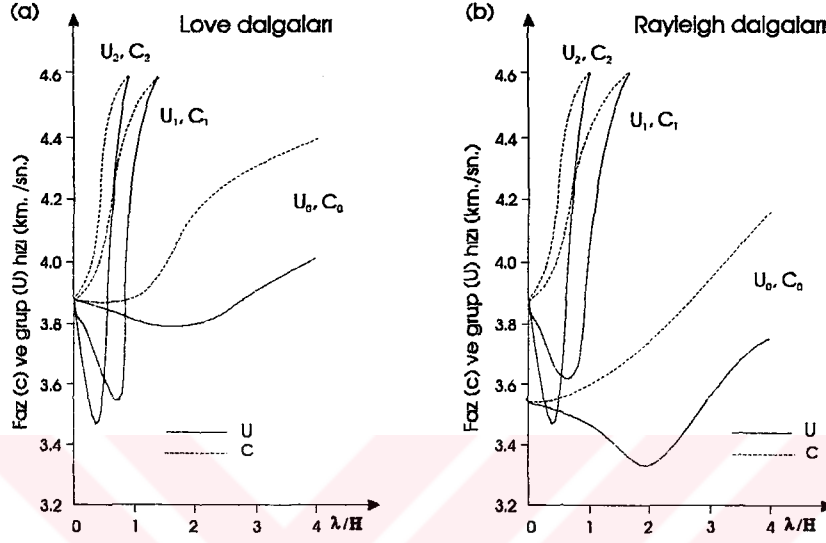
Artan derinlikle birlikte yüzey dalgalarının dalgaboyunun büyüyor olması, uzun dalgaboylu yüzey dalgalarının yerin derin hız yapısı ile ilgili bilgiler taşıdığını gösterir. Aynı zamanda kısa periyotlu yüzey dalgalarının da yerin sığ hız yapısıyla ilgili bilgiler taşıdığı sonucuna varılabilir. Yaklaşık olarak 50 sn' den daha küçük periyotlarda seyahat eden yüzey dalgaları kabuksal S dalga hız yapısını ve daha uzun periyotlu yüzey dalgaları (G ve R) ise mantonun S dalga hız yapısını belirlemek için kullanılabilir. Yüksek frekans içerikli yüzey dalgaları ise sığ yapıların S dalga hız yapısını ortaya koymak için kullanılabilir.



Şekil 2. Herhangi bir F kuvveti etkisi altında kalan birim uzunlukdaki ipin titreşimleri

Yüzey dalgaları değişik modlarda seyahat edebilirler. Temel ve yüksek mod yüzey dalgaları farklı frekans içeriği ile sismogramlar üzerinde gözlenirler. Şekil 2' deki ipin sabit olan her iki ucu yer içinde cisim dalgalarının seyahat ettikleri tabakanın alt ve üst sınırları ve ipin uzunluğu ise tabakanın kalınlığı olarak alınabilir. İpin herhangi bir kuvvet altındaki titreşiminin dalga boyu ile ipin uzunluğu arasındaki ilişki $l=n\lambda/2$ olarak verilebilir. İp $n=0$ için temel modda ve $n>0$ için ise yüksek modlarda titreşim hareketi yapar(Şekil 2). Bu ilişkiden yola çıkarak yüzey dalgasının dalgaboyu, içinde seyahat ettiği tabakanın kalınlığından büyük olduğunda($n=0$) temel mod yüzey dalgası, eşit veya küçük olması halinde ise ($n>0$) yüksek modlu yüzey dalgalarından sözedilebilir. Temel mod yüzey dalgaları düşük frekanslı ve yüksek genlikli olarak sismogramlar üzerinde gözlenirler. Yüksek modlu yüzey dalgaları ise temel mod yüzey dalgalarına göre düşük genlikli ve yüksek frekanslı olarak gözlenirler ve de temel mod yüzey dalgalarına göre daha yüksek yayılım hızına sahiptirler. Okyanusal ve kıtasal plaka sınırları yüksek

soğurucu özelliğe sahiptir. Okyanusal plakayı geçerek kıtasal plakaya ulaşan yüksek modlu yüzey dalgaları dağ köklerini geçmeden soğurulurlar. Bu nedenle okyanusal ve kıtasal plaka karışımından oluşan ışın yolları üzerinde yer alan istasyonlarda gözlenmeyebilirler.



Şekil 3. (a) Love ve (b) Rayleigh dalgaları için temel(U_0, C_0), birinci(U_1, C_1) ve ikinci(U_2, C_2) modlara ait teorik faz ve grup hızları. Tek tabakalı bir model ele alınmıştır. Tabakanın kalınlığı H olup $V_{s1}=3.86$ km/sn $V_{s2}=4.6$ km/sn olarak alınmıştır [27].

Basit bir model için faz ve grup hızlarının analizinden önemli bilgiler elde edilebilir. Tabaka sayısı arttıkça dispersiyon eğrilerinin hesaplanması bilgisayarların kullanımını ve algoritma yaklaşımlarını gerektirmektedir. Basit modeller için hesaplanan teorik dispersiyon eğrilerinin gösterdiği karakteristik özellikler karmaşık modellere ait dispersiyon eğrileri ile benzerlik gösterirler. Grup hızı dispersiyon eğrilerinde gözlenen minimum değerler Airy fazına karşılık gelir. Maksimum periyotlardaki titreşimler homojen yarı uzayda S dalgası hızı ile seyahat ederler. Love dalgası Airy fazı grup hızı değerleri temel moddan yüksek modlara geçerken azalmaktadır. Rayleigh dalgası Airy fazı grup hızı değerleri ise birinci mod dışında temel moddan yüksek modlara geçerken artmaktadır. Aynı zamanda sismogramlar üzerinde Love dalgası için yüksek modlara ait Airy fazı temel moddan sonra gözlenirken Rayleigh dalgası için yüksek modlara ait Airy fazı ise temel moddan önce gözlenmektedir (Şekil 3.).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Filon yöntemi

Filon yöntemi analitik olarak çözümü yapılamayan (1), (2) ve (3) formundaki integrallerin sayısal olarak hesaplanmasında kullanılabilen yöntemlerden biridir. Filon yöntemi Frazer & Gettrust [28] tarafından değişik sentetik sismogram hesaplama tekniklerinde karşılaşılan titreşim integralleri (oscillatory integrals)' nin sayısal olarak değerlendirilmesinde kullanılabilir şekilde geliştirilmiştir. Genellikle, sentetik sismogram hesaplama yöntemlerinde üç değişik integral formuyla karşılaşılır. (1) formundaki integraller doğrudan Filon yöntemiyle değerlendirilebilir. (2) ve (3) formundaki integraller ise (1) formuna dönüştürülerek Filon yöntemi ile değerlendirilir. (2) ve (3) formunun (1) formuna nasıl dönüştürüldüğü Frazer [29] tarafından verilmiştir. Burada (1) formuna Filon yönteminin uygulanışı verilecektir.

$$\int_a^b f(p)e^{sp} dp \quad (1)$$

$$\int_a^b f(p)J(s,p)dp \quad (2)$$

$$\int_a^b f(p)e^{sg(p)} dp \quad (3)$$

$f(p)$ sayısal olarak hesaplanan bir fonksiyon, a ve b kompleks p düzleminde integral sınırları, $(b-a)$ örnekleme adım büyüklüğü ve s ise kompleks veya gerçel olabilen bir parametredir. Ayrıca, $J(s,p)$ ve $g(p)$ fonksiyonları analitik olarak ifade edilebilen terimlerdir.

(1), (2) ve (3) formundaki integraller $f(p)$ nin sayısal olmasından dolayı analitik olarak değerlendirilememektedir. Bu nedenle, hesaplamalarda sayısal yöntemler

kullanılmaktadır. $f(p)$ ' nin yavaş değişim gösteren bir fonksiyon olabilmesine rağmen $f(p)e^{sp}$ çok hızlı değişim göstermektedir. Yamuk kuralı gibi sayısal integral hesaplama tekniklerini kullanarak analitik sonuçlara yakın sayısal sonuçlar elde etmek için $f(p)e^{sp}$ çarpımının çok küçük Δp örnekleme aralıklarındaki sayısal değerlerine gerek duyulmaktadır. Bu yaklaşım kullanılan bilgisayarın hızına bağlı olarak çok uzun işlem zamanı gerektirebilir.

Filon yöntemi (FM) sayısal integral hesaplama tekniklerinden biridir. Yöntem, kısmi integrasyon tekniği kullanılarak çok hızlı değişim gösteren e^{sp} fonksiyonunu (1) formundaki integralde integral dışına çıkartmak ve Δp ' yi büyütterek işlem zamanını kısaltmak esası üzerine dayanır.

Filon-5 nokta yönteminde kısmi integrasyon işlemi, (1) formundaki integrale ardarda beş kez uygulanır. Kısmi integrasyon işlemi sonucunda $f(p)$ ' nin 1., 2., 3., 4. ve 5. meretebeden türevleri bilinmeyen olarak elde edilir. $f(p)$ fonksiyonunun türevleri Lagrange-5 nokta yöntemi kullanılarak sayısal olarak hesaplanır [30]. Filon-5 nokta yönteminin (1) formundaki integrale uygulanması aşamalı olarak aşağıdaki gibi ele alınabilir.

$f(p)e^{sp}$ nin p ' ye göre türevi alınır, (1) formundaki integralde yerine konur ve gerekli düzeltmeler yapılırsa (4) eşitliği elde edilir. Burada söz konusu olan 5 nokta p_{-2} , p_{-1} , p_0 , p_1 , p_2 olarak seçilmiştir.

$$\int_{P_{-1}}^{P_1} f(p)e^{sp} dp = \frac{1}{s} f(p)e^{sp} - \frac{1}{s} \int_{P_{-1}}^{P_1} f'(p)e^{sp} dp \quad (4)$$

$f'(p)e^{sp}$ nin p ' ye göre türevi alınır, (4) formundaki integralde yerine konur ve gerekli düzeltmeler yapılırsa (5) eşitliği elde edilir.

$$\int_{P_{-1}}^{P_1} f'(p)e^{sp} dp = \frac{1}{s} f'(p)e^{sp} - \frac{1}{s} \int_{P_{-1}}^{P_1} f''(p)e^{sp} dp \quad (5)$$

$f''(p)e^{sp}$ nin p ' ye göre türevi alınır, (5) formundaki integralde yerine konur ve gerekli düzeltmeler yapılırsa (6) eşitliği elde edilir.

$$\int_{P_{-1}}^{P_1} f''(p)e^{sp} dp = \frac{1}{s} f''(p)e^{sp} - \frac{1}{s} \int_{P_{-1}}^{P_1} f'''(p)e^{sp} dp \quad (6)$$

$f'''(p)e^{sp}$ nin p ' ye göre türevi alınır, (6) formundaki integralde yerine konur ve gerekli düzeltmeler yapılırsa (7) eşitliği elde edilir.

$$\int_{P_{-1}}^{P_1} f'''(p)e^{sp} dp = \frac{1}{s} f'''(p)e^{sp} - \frac{1}{s} \int_{P_{-1}}^{P_1} f^{(4)}(p)e^{sp} dp \quad (7)$$

$f^{(4)}(p)e^{sp}$ nin p ' ye göre türevi alınır, (7) formundaki integralde yerine konur ve gerekli düzeltmeler yapılırsa (8) eşitliği elde edilir.

$$\int_{P_{-1}}^{P_1} f^{(4)}(p)e^{sp} dp = \frac{1}{s} f^{(4)}(p)e^{sp} - \frac{1}{s} \int_{P_{-1}}^{P_1} f^{(5)}(p)e^{sp} dp \quad (8)$$

(8) eşitliğini (7) eşitliğinde, (7) eşitliğini (6) eşitliğinde, (6) eşitliğini (5) eşitliğinde ve (5) eşitliğini (4) eşitliğinde yerine koyar ve gerekli düzeltmeleri yaparsak (9) eşitliği elde edilebilir.

$$\int_{P_{-1}}^{P_1} f(p)e^{sp} dp = \frac{1}{s} f(p)e^{sp} - \frac{1}{s} \left\{ \frac{1}{s} f'(p)e^{sp} - \frac{1}{s} \left\{ \frac{1}{s} f''(p)e^{sp} - \frac{1}{s} \left\{ \frac{1}{s} f'''(p)e^{sp} - \frac{1}{s} \left\{ \frac{1}{s} f^{(4)}(p)e^{sp} - \frac{1}{s} \int_{P_{-1}}^{P_1} f^{(5)}(p)e^{sp} dp \right\} \right\} \right\} \right\} \Bigg|_{P_{-1}}^{P_1} \quad (9)$$

(9) eşitliğinde alt ve üst integral sınırlarını yerine koyar ve gerekli kısaltmalar yapılırsa (10) elde edilir.

$$\begin{aligned} \int_{P_{-1}}^{P_1} f^{iv}(p)e^{sp} dp &= s^{-1} \cdot [f(p_1)e^{sp_1} - f(p_{-1})e^{sp_{-1}}] - s^{-2} \cdot [f'(p_1)e^{sp_1} - f'(p_{-1})e^{sp_{-1}}] + \\ & s^{-3} \cdot [f''(p_1)e^{sp_1} - f''(p_{-1})e^{sp_{-1}}] - s^{-4} \cdot [f'''(p_1)e^{sp_1} - f'''(p_{-1})e^{sp_{-1}}] - \\ & s^{-5} \cdot [f^{iv}(p_1)e^{sp_1} - f^{iv}(p_{-1})e^{sp_{-1}}] - \int_{P_{-1}}^{P_1} f^v(p)e^{sp}s^{-5} dp \end{aligned} \quad (10)$$

(10) eşitliği düzenlenerek aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\int_{P_{-1}}^{P_1} f(p)e^{sp} dp = S \cdot [e^{sp_1} H(p_1) - e^{sp_{-1}} H(p_{-1})] - \int_{P_{-1}}^{P_1} f^v(p)e^{sp}s^{-5} dp \quad (11)$$

$$H(p_1) = [f(p_1), f'(p_1), f''(p_1), f'''(p_1), f^{iv}(p_1)]$$

$$H(p_{-1}) = [f(p_{-1}), f'(p_{-1}), f''(p_{-1}), f'''(p_{-1}), f^{iv}(p_{-1})]$$

$$S = [s^{-1}, s^{-2}, s^{-3}, s^{-4}, s^{-5}]$$

(11) eşitliğinin sağ tarafında kalan integralli ifade hata tolerans sınırları içerisinde çok küçük değerlere karşılık gelmektedir. Bu nedenle Filon-5 nokta yönteminde yapılan hesaplamalara dahil edilmemektedir. p_1 ve p_{-1} noktalarında, $f(p)$ fonksiyonunun 1., 2., 3. ve 4. mertebeden sayısal türevlerini hesaplamak için Lagrange-5 nokta yöntemi kullanılabilir. Lagrange-5 nokta yöntemi, $f(p)$ ' nin sayısal değerlerini kullanarak $f(p)$ ' nin sayısal değerlerine 4. mertebeden bir polinomiyal yaklaşım yapmaktan ibarettir. Bu polinomiyal yaklaşım (12) eşitliği ile gösterilebilir.

$$f(p) = L_0(p)f(p_{-2}) + L_1(p)f(p_{-1}) + L_2(p)f(p_0) + L_3(p)f(p_1) + L_4(p)f(p_2) \quad (12)$$

Lagrange-5 nokta yönteminde $f(p)$ ' nin p_{-2} , p_{-1} , p_0 , p_1 , p_2 noktalarındaki sayısal değerleri kullanılarak $f(p)$ ' nin n . mertebeden sayısal türevi hesaplanabilir. $f(p)$ ' nin n . mertebeden sayısal türevi (13) eşitliği ile verilebilir.

$$f^n(p) = L_0^n(p)f(p_{-2}) + L_1^n(p)f(p_{-1}) + L_2^n(p)f(p_0) + L_3^n(p)f(p_1) + L_4^n(p)f(p_2) \quad (13)$$

$f(p)$ ' nin p_1 ve p_{-1} noktalarında gerekli olan sayısal türevlerini hesaplamak için Lagrange-5 nokta yönteminde Lagrange katsayıları $L_0(p)$, $L_1(p)$, $L_2(p)$, $L_3(p)$, $L_4(p)$ ' nin p_1 ve p_{-1} noktalarında 1., 2., 3. ve 4. mertebeden sayısal türevlerine ihtiyaç duyulmaktadır. $(p_k - p_{k-1}) = h$ olmak üzere Lagrange katsayıları ve türevlerinin p_1 ve p_{-1} noktalarındaki sayısal değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir. $L_0(p)$ 1. Lagrange katsayısı (14) eşitliği ile verilebilir.

$$L_0(p) = \frac{(p - p_{-1})(p - p_0)(p - p_1)(p - p_2)}{(p_{-2} - p_{-1})(p_{-2} - p_0)(p_{-2} - p_1)(p_{-2} - p_2)} \quad (14)$$

$$L_0(p) = \frac{1}{24h^2} [(p - p_{-1})(p - p_0)(p - p_1)(p - p_2)]$$

$$L_0(p_1) = 0 \quad L_0(p_{-1}) = 0$$

$L_0(p_1)$ ve $L_0(p_{-1})$ ifadeleri ise 1. Lagrange katsayısının p_1 , p_{-1} noktalarındaki sayısal değerleridir. $\partial L_0(p)/\partial p$ analitik türev ifadesi (15) bağıntısıyla verilebilir.

$$L_0'(p) = \frac{1}{24h^2} \{ [(p - p_{-1}) + (p - p_0)](p - p_1)(p - p_2) + [(p - p_1) + (p - p_2)](p - p_{-1})(p - p_0) \} \quad (15)$$

$$L'_0(p_1) = -\frac{1}{12h} \quad L'_0(p_{-1}) = -\frac{1}{4h}$$

$L'_0(p_1)$ ve $L'_0(p_{-1})$ ifadeleri 1. Lagrange katsayısının birinci mertebeden türevinin p_1, p_{-1} noktalarındaki sayısal değerleridir. $\partial L'_0(p)/\partial p$ analitik türev ifadesi (16) bağıntısıyla verilebilir.

$$L''_0(p) = \frac{1}{12h^4} \left\{ (p-p_1)[(p-p_2) + (p-p_{-1}) + (p-p_0)] + (p-p_{-1})[(p-p_2) + (p-p_0)] + (p-p_2)(p-p_0) \right\} \quad (16)$$

$$L''_0(p_1) = -\frac{1}{12h^2} \quad L''_0(p_{-1}) = \frac{11}{12h^2}$$

$L''_0(p_1)$ ve $L''_0(p_{-1})$ ifadeleri 1. Lagrange katsayısının ikinci mertebeden türevinin p_1, p_{-1} noktalarındaki sayısal değerleridir. $\partial L''_0(p)/\partial p$ analitik türev ifadesi (17) bağıntısıyla verilebilir.

$$L'''_0(p) = \frac{1}{4h^4} [(p-p_2) + (p-p_{-1}) + (p-p_0) + (p-p_1)] \quad (17)$$

$$L'''_0(p_1) = \frac{1}{2h^3} \quad L'''_0(p_{-1}) = -\frac{3}{2h^3}$$

$L'''_0(p_1)$ ve $L'''_0(p_{-1})$ ifadeleri 1. Lagrange katsayısının üçüncü mertebeden türevinin p_1, p_{-1} noktalarındaki sayısal değerleridir.

$$L^{iv}_0(p_1) = \frac{1}{h^4} \quad L^{iv}_0(p_{-1}) = \frac{1}{h^4} \quad (18)$$

$L_0^{iv}(p_1)$ ve $L_0^{iv}(p_{-1})$ ifadeleri 1. Lagrange katsayısının dördüncü mertebeden türevinin p_1, p_{-1} noktalarındaki sayısal değerleridir.

Diğer Lagrange katsayıları ve türevlerinin p_{-1} ve p_1 noktalarındaki sayısal değerleri benzer şekilde hesaplanır. Lagrange katsayılarının 1., 2., 3. ve 4. türevlerinin p_1 noktasındaki sayısal değerleri M_1 matrisi, p_{-1} noktasındaki sayısal değerleri M_{-1} matrisi olarak yazılabilir. M_1 ve M_{-1} matrisleri (11) eşitliğinde yerine konulursa aşağıdaki gibi genel bir bağıntı elde edilebilir.

$$\int_{p_{-1}}^{p_1} f(p)e^{sp} dp = S \left[e^{sp_1} \cdot M_1 - e^{sp_{-1}} \cdot M_{-1} \right] \cdot F(f) \quad (19)$$

$$S = [s^{-1}, s^{-2}, s^{-3}, s^{-4}, s^{-5}]$$

$$F(f) = [f(p_{-2}), f(p_{-1}), f(p_0), f(p_1), f(p_2)]$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{12h} & \frac{1}{2h} & -\frac{3}{2h} & \frac{5}{6h} & \frac{1}{4h} \\ -\frac{1}{12h^2} & \frac{1}{3h^2} & \frac{1}{2h^2} & -\frac{5}{3h^2} & \frac{11}{12h^2} \\ \frac{1}{2h^3} & -\frac{3}{h^3} & \frac{6}{h^3} & -\frac{5}{h^3} & \frac{3}{2h^3} \\ \frac{1}{h^4} & -\frac{4}{h^4} & \frac{6}{h^4} & -\frac{4}{h^4} & \frac{1}{h^4} \end{bmatrix} \quad M_{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{4h} & -\frac{5}{6h} & \frac{3}{2h} & -\frac{1}{2h} & \frac{1}{12h} \\ \frac{11}{12h^2} & -\frac{5}{3h^2} & \frac{1}{2h^2} & \frac{1}{3h^2} & -\frac{1}{12h^2} \\ -\frac{3}{h^3} & \frac{5}{h^3} & -\frac{6}{h^3} & \frac{3}{h^3} & -\frac{1}{2h^3} \\ \frac{1}{h^4} & -\frac{4}{h^4} & \frac{6}{h^4} & -\frac{4}{h^4} & \frac{1}{h^4} \end{bmatrix}$$

$h.s < 1/50$ olması halinde $y(p) = f(p)e^{sp}$, p_1 noktası civarında Taylor serisine açılarak p_{-1} den p_1 'e kadar integre edilebilir. $y(p)$ fonksiyonunun p_1 noktası civarında n . mertebeden Taylor serisi açılımı (20) bağıntısıyla ifade edilebilir.

$$y(p) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{[y^k(p_1)(p-p_1)^k]}{k!} \quad (20)$$

$y(p)$ fonksiyonunun p_1 noktası etrafındaki 5. mertebeden Taylor serisi açılımı (21) bağıntısıyla verilebilir.

$$y(p) = y(p_1) + \frac{y'(p_1)(p-p_1)}{1!} + \frac{y''(p_1)(p-p_1)^2}{2!} + \frac{y'''(p_1)(p-p_1)^3}{3!} + \frac{y^{iv}(p_1)(p-p_1)^4}{4!} + \dots \quad (21)$$

(1) formundaki integrali (21) eşitliğinin sağ tarafını kullanarak ifade edebiliriz.

$$\int_{p_{-1}}^{p_1} y(p) dp = y(p_1) \int_{p_{-1}}^{p_1} dp + y'(p_1) \int_{p_{-1}}^{p_1} (p-p_1) dp + \frac{y''(p_1)}{2!} \int_{p_{-1}}^{p_1} (p-p_1)^2 dp + \frac{y'''(p_1)}{3!} \int_{p_{-1}}^{p_1} (p-p_1)^3 dp + \frac{y^{iv}(p_1)}{4!} \int_{p_{-1}}^{p_1} (p-p_1)^4 dp + \dots \quad (22)$$

(22) eşitliğinin sağ tarafı yeniden düzenlenerek aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\int_{p_{-1}}^{p_1} f(p) e^{sp} dp = \left[\frac{(2h)}{1!}, \frac{-(2h)^2}{2!}, \frac{(2h)^3}{3!}, \frac{-(2h)^4}{4!}, \frac{(2h)^5}{5!} \right] \begin{bmatrix} y(p_1) \\ y'(p_1) \\ y''(p_1) \\ y'''(p_1) \\ y^{iv}(p_1) \end{bmatrix} \quad (23)$$

(19) eşitliğinde $y(p) = f(p)e^{sp}$ nin p_1 noktasındaki 1., 2., 3. ve 4. mertebeden sayısal türevleri M_1 , $F(f)$ olarak elde edildi. Hesaplanan sayısal türevler (23)' de yerine konular ve gerekli düzeltmeler yapılırsa aşağıdaki gibi genel bir bağıntı elde edilmiş olur.

$$\int_{p_{-1}}^{p_1} f(p) e^{sp} dp = B(2h) \cdot M_1 \cdot F(fe^{sp}) \quad (24)$$

$$F(fe^{sp}) = [f(p_{-2}), f(p_{-1}), f(p_0), f(p_1), f(p_2)]$$

$$B(2h) = \left[\frac{(2h)}{1!}, \frac{-(2h)^2}{2!}, \frac{(2h)^3}{3!}, \frac{-(2h)^4}{4!}, \frac{(2h)^5}{5!} \right]$$

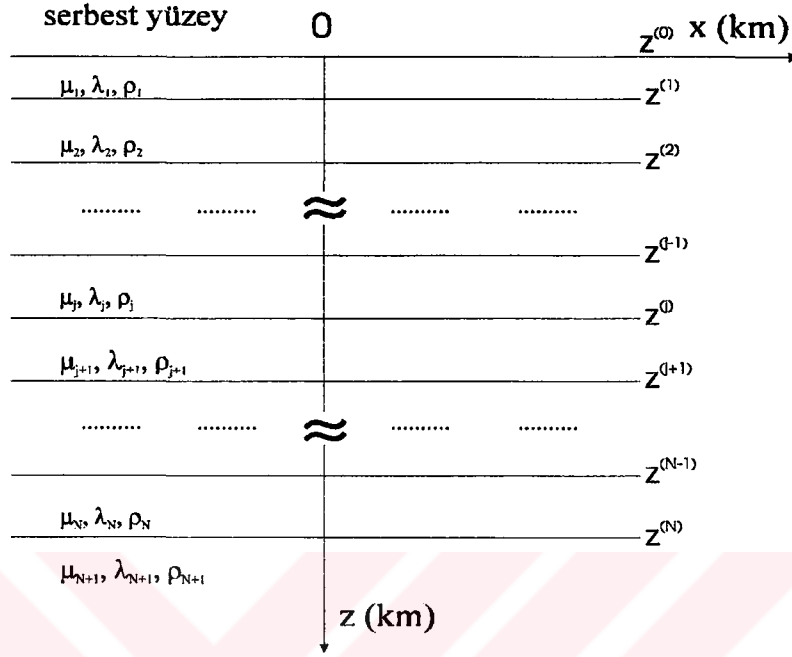
(19) ve (24) bağıntıları (1) formundaki integrale Filon-5 nokta yönteminin uygulanması sonucu elde edilmiştir. Filon-5 nokta yöntemi uygulanırken (19) ve (24) bağıntılarında yer alan M_1 ve M_{L1} matrisleri sadece birkez hesaplanmaktadır. Örnekleme her adımında p_{-2} , p_{-1} , p_0 , p_1 , p_2 olmak üzere ardarda beş nokta seçilir. Örnekleme birinci adımında, seçilen ilk beş nokta için integral sınırları p_{-1} den p_1 ' e kadar alınır. İlk beş noktaya ait p_0 noktası, örnekleme bir sonraki adımında seçilen ikinci beş noktanın birinci yani p_{-2} noktası olarak alınır. Örnekleme ikinci adımında integral sınırları ilk beş noktaya ait p_1 yani ikinci beş noktaya ait p_{-1} den p_1 ' e kadar alınır. Belirtilen esasa göre örnekleme her adımında integral sınırları yeniden belirlenerek (19) ve (24) bağıntıları kullanılır ve Filon-5 nokta yöntemi bilgisayarda programlanabilir.

2.2 Çok tabakalı yarı-sonsuz bir ortam için Love dalgalarına ait transfer fonksiyonunun hesaplanması

Yüzey dalgalarının eigen değerlerinin ve eigen fonksiyonlarının hesaplanması dalga yayılımının incelenmesinde ve özellikle rejyonel uzaklıklarda L_g ve R_g dalgalarının modellenmesinde kullanılabilir.

Thomson-Haskel yöntemi eigen fonksiyonlarının ve eigen değerlerinin hesaplanmasında etkin bir yöntem olmasına karşın yüksek frekanslarda sayısal duraylılığa sahip değildir. Chen [31], şekil 4' de gösterilen çok tabakalı yarı-sonsuz bir ortam modeli için Love ve Rayleigh dalgalarına ait transfer fonksiyonlarının hesaplanmasına yönelik sistematik ve etkili bir yöntem geliştirmiştir. Yöntemin esası sınır koşulları altında elastodinamik denklemin çözümüne dayanır. Luco & Apsel [32] tarafından verilen yansıma ve iletim katsayıları kullanılır. Normal modların fiziksel mekanizmasını

açıklamak için kurulan algoritmanın yüksek frekanslarda daha duraylı davranmasını sağlamak gerekmektedir.



Şekil 4. Paralel tabakalardan oluşan yarı-sonsuz ortam modeli ve bu modele ait koordinat sisteminin gösterimi [33].

Tabakalı ortama ait sismik transfer fonksiyonu sınır koşulları altında aşağıda verilen serbest elastodinamik denklemin çözümü sonucunda elde edilebilir.

$$-\rho\omega^2 \mathbf{u}^{(j)}(x, \omega) = [\lambda^{(j)} + 2\mu^{(j)}] \nabla \nabla \cdot \mathbf{u}^{(j)}(x, \omega) - \mu^{(j)} \nabla \mathbf{x} \nabla \mathbf{x} \mathbf{u}^{(j)}(x, \omega) \quad (25)$$

Burada ρ^j, λ^j ve μ^j j.tabakaya ait yoğunluk ve Lamé sabitleridir. $[W^{(j)}(z)]$ yerdeğiştirmesi ve $[T^{(j)}(z)]$ gerilmesi için harmonik açılım katsayıları aşağıdaki diferansiyel denklemini sağlamaktadır. Love dalgalarını göz önüne alarak (26) denklemini yazılabilir.

$$\frac{d}{dz} f^{(j)}(z) = A^{(j)} f^{(j)}(z) \quad (26)$$

$$f^{(j)}(z) = \begin{bmatrix} W^{(j)} \\ T^{(j)} \end{bmatrix}$$

$$A^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & 1/\mu^{(j)} \\ k^2 \mu^{(j)} - w^2 \rho^{(j)} & 0 \end{bmatrix}$$

(26) denklemini herbir tabaka içinde analitik olarak çözmek için aşağıdaki sınır koşulları kullanılabilir.

a) Serbest yüzeyde gerilme sıfır,

$$T^{(1)}=0. \quad (27a)$$

b) Hız süreksizliklerinde, gerilmeler ve yerdeğiştirmeler sürekli,

$$f^{(j)}(z^{(j)}) = f^{(j+1)}(z^{(j)}). \quad (27b)$$

c) Yarı sonsuz ortamdan geriye enerji dönüşü yoktur,

$$f^{(N)}(z) \rightarrow 0, \quad z \rightarrow +\infty. \quad (27c)$$

(27a), (27b) ve (27c) sınır koşulları kullanılarak (26) denklemi SH dalgası için aşağıdaki gibi analitik olarak çözülebilir.

$$f^{(j)}(z) = E^{(j)} \Lambda^{(j)}(z) C^{(j)} \quad (28)$$

$$E^{(j)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\mu^{(j)} v^{(j)} & \mu^{(j)} v^{(j)} \end{bmatrix}$$

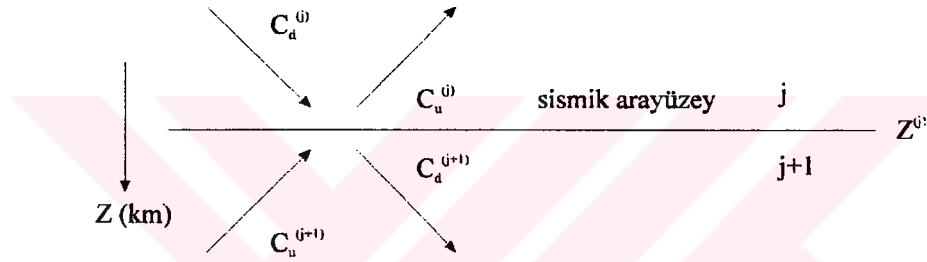
$$\Lambda^{(j)}(z) = \begin{bmatrix} \exp(-v^{(j)} z) & 0 \\ 0 & \exp(v^{(j)} z) \end{bmatrix}$$

$$C^{(j)} = \begin{bmatrix} C_a^{(j)} \\ C_u^{(j)} \end{bmatrix}$$

$$v^{(j)} = \begin{cases} \left[k^2 - (w / \beta^{(j)})^2 \right]^{1/2} & k > \frac{w}{\beta^{(j)}} \\ -j \left[(w / \beta^{(j)})^2 - k^2 \right] & k < \frac{w}{\beta^{(j)}} \end{cases}$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, N + 1$$

Burada μ ortamın rijititesi, v düşey dalga sayısı, k yatay dalga sayısı, w açılal frekans, β ortamın SH hızı, C_u yukarıya giden düzlem dalganın genliği ve C_d aşağıya giden düzlem dalganın genliği olarak tanımlanabilir(Şekil 5).



Şekil 5. (j)' inci ve (j+1)' inci tabakalar arasında kalan sismik arayüzey için aşağıya ve yukarıya giden dalga alanları

(28) denklemini düzenlenerek aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} W^{(j)}(z) \\ T^{(j)}(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11}^{(j)} & E_{12}^{(j)} \\ E_{21}^{(j)} & E_{22}^{(j)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_d^{(j)}(z) & 0 \\ 0 & \Lambda_u^{(j)}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_d^{(j)} \\ C_u^{(j)} \end{bmatrix} \quad (29a)$$

$$\Lambda_d^{(j)}(z) = \exp[-v^{(j)}(z - z^{(j-1)})]$$

$$\Lambda_u^{(j)}(z) = \exp[-v^{(j)}(z^{(j)} - z)]$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, N$$

(27c) sınır koşulu kullanılarak (26) denkleminin (N+1)' inci tabaka için çözümü aşağıdaki gibi yapılabilir.

$$\begin{bmatrix} W^{(N+1)}(z) \\ T^{(N+1)}(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11}^{(N+1)} & \Lambda_d^{(N+1)}(z) & C_d^{(N+1)} \\ E_{21}^{(N+1)} & \Lambda_u^{(N+1)}(z) & C_u^{(N+1)} \end{bmatrix} \quad (29b)$$

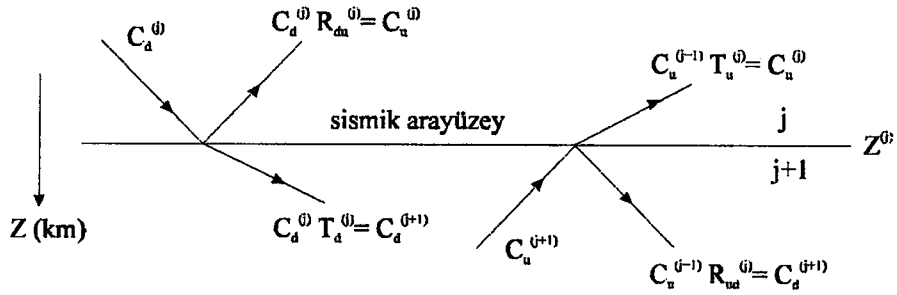
$$\Lambda_d^{(N+1)}(z) = \exp[-v^{(N+1)}(z - z^{(N)})]$$

(29a) ve (29b) bağıntılarında $\Lambda_d^{(j)}$ ve $\Lambda_u^{(j)}$ ifadeleri aşağıya ve yukarıya giden dalgalara ait düşey yöndeki üstel yayılım faktörlerini göstermektedir.

Yansımaya ve iletim katsayıları iki tabaka arasında kalan arayüzeyin yansımaya ve iletim etkisini tanımlar. j ' inci arayüzeye ait yansımaya ($R_{du}^{(j)}$, $R_{ud}^{(j)}$) ve iletim katsayıları ($T_u^{(j)}$, $T_d^{(j)}$) aşağıdaki gibi kullanılabilir (Şekil 6).

$$\begin{aligned} C_d^{(j+1)} &= T_d^{(j)} C_d^{(j)} + R_{ud}^{(j)} C_u^{(j+1)} \\ C_u^{(j)} &= R_{du}^{(j)} C_d^{(j)} + T_u^{(j)} C_u^{(j+1)} \end{aligned} \quad (30a)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, N-1$$



Şekil 6. (j)' inci ve (j+1)' inci tabakalar arasında kalan sismik arayüzey için yukarıdan ve aşağıdan gelen dalga alanlarının yansımaya ve iletilmesi

Yüzey dalgaları hesaplamalarında N' inci arayüzey için aşağıdan yukarıya doğru dalga alanlarının gelmediği kabulü ($C_u^{N+1}=0$) yapılırsa, (30a) denklemi N' inci arayüzey için aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\begin{aligned} C_d^{(N+1)} &= T_d^{(N)} C_d^{(N)} \\ C_u^{(N)} &= R_{du}^{(N)} C_d^{(N)} \end{aligned} \quad (30b)$$

Bu aşamadan sonra modelin bütün tabakalarını kapsayan genelleştirilmiş yansıma ve iletim katsayılarının hesaplanması gerekir. Bunu yapmak için (27b) süreklilik koşulunda, (29a) bağıntısı kullanılır ve gerekli düzeltmeler yapılır.

$$\begin{bmatrix} T_d^{(j)} & R_{ud}^{(j)} \\ R_{du}^{(j)} & T_u^{(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11}^{(j+1)} & -E_{12}^{(j)} \\ E_{21}^{(j+1)} & -E_{22}^{(j)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E_{11}^{(j)} & -E_{12}^{(j+1)} \\ E_{21}^{(j)} & -E_{22}^{(j+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_d^{(j)}(z^{(j)}) & 0 \\ 0 & \Lambda_u^{(j+1)}(z^{(j)}) \end{bmatrix} \quad (31a)$$

Benzer bir yolla (27b) süreklilik koşulunda, (29b) bağıntısı yerine konur ve gerekli düzeltmeler yapılırsa (31b) denklemi elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} T_d^{(N)} \\ R_{du}^{(N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11}^{(N+1)} & -E_{12}^{(N)} \\ E_{21}^{(N+1)} & -E_{22}^{(N)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E_{11}^{(N)} \Lambda_d^{(N)}(z^{(N)}) \\ E_{21}^{(N)} \Lambda_d^{(N)}(z^{(N)}) \end{bmatrix} \quad (31b)$$

(31a) ve (31b) bağıntıları tüm arayüzlere ait yansıma ve iletim katsayılarının hesaplanmasında kullanılabilir. Aynı zamanda yayılım koşulu (27c) kullanılarak genelleştirilmiş yansıma ve iletim katsayıları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} C_d^{(j+1)} &= \hat{T}_d^{(j)} C_d^{(j)} \\ C_u^{(j)} &= \hat{R}_{du}^{(j)} C_d^{(j)} \end{aligned} \quad (32)$$

Genelleştirilmiş yansıma ve iletim katsayılarının hesaplanmasında bir formül elde etmek için gerilmesiz serbest yüzey koşulu ($T^{(1)}(0)=0$) kullanılabilir. Sonuç olarak (30a) denkleminde (32) denklemi yerine konur ve gerekli düzeltmeler yapılırsa yansıma ve iletim katsayıları(R/T)' nın hesaplanmasında kullanılacak bir ardışık çözümlü formül elde edilmiş olur.

$$\widehat{T}_d^{(j)} = (1 - R_{ud}^{(j)} \widehat{R}_{du}^{(j+1)})^{-1} T_d^{(j)} \quad (33)$$

$$\widehat{R}_{du}^{(j)} = R_{du}^{(j)} + T_u^{(j)} \widehat{R}_{du}^{(j+1)} \widehat{T}_d^{(j)}$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, N - 1$$

Yukarıdaki tanımlamalarda $\widehat{R}_{du}^{(N)} = R_{du}^{(N)}$ ve $\widehat{T}_d^{(N)} = T_d^{(N)}$, ya karşılık gelmektedir.

(32) denklemi kullanılarak $C_d^{(1)}$ ve $C_u^{(1)}$ katsayıları bulunursa bu katsayılardan yola çıkarak diğer katsayılar hesaplanabilir.

$$C_u^{(1)} = \widehat{R}_{du}^{(1)} C_d^{(1)} \quad (34)$$

$$C_d^{(1)} = \widehat{R}_{du}^{(0)} C_u^{(1)}$$

$C_u^{(1)}$ ve $C_d^{(1)}$ bağıntıları arasındaki ilişkinin kombinasyonundan (35) bağıntısı elde edilebilir.

$$(1 - R_{ud}^{(0)} \widehat{R}_{du}^{(1)}) C_d^{(1)} = 0 \quad (35)$$

(35) denkleminde $C_d^{(1)}$ sıfırdan farklı bir değerdir ve $C_d^{(1)}(c_n)=1$ olabilir. Bu özellik kullanılarak aşağıda verilen (36) dispersiyon denklemi ve (37) başlangıç denklemi elde edilebilir.

$$1 - R_{ud}^{(0)} R_{du}^{(1)} = 0 \quad (36)$$

$$C_u^{(1)}(c_n) = \widehat{R}_{du}^{(1)}(c_n) \quad (37)$$

(37) denklemini (32) denkleminde yerine koyarsak, (38a) ve (38b) bağıntıları elde edilebilir.

$$C_d^{(j+1)}(c_n) = \widehat{T}_d^{(j)}(c_n) \widehat{T}_d^{(j-1)}(c_n) \dots \widehat{T}_d^{(1)}(c_n) \quad (38a)$$

$$C_u^{(j+1)}(c_n) = \widehat{R}_d^{(j+1)}(c_n) \widehat{C}_d^{(j+1)}(c_n)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, N-1$$

$$C_d^{(N+1)}(c_n) = \widehat{T}_d^{(N)}(c_n) \widehat{T}_d^{(N-1)}(c_n) \dots \widehat{T}_d^{(1)}(c_n) \quad (38b)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, M(w)$$

(38a) ve (38b) bağıntılarında n , verilen w (frekans) için hesaplanacak mod sayılarını göstermektedir. (38a) ve (38b) bağıntıları kullanılarak elde edilen $C_u^{(j)}$ ve $C_d^{(j)}$ katsayıları (29a) ve (29b) bağıntılarında yerine konur. Sonuç olarak (35) bağıntısından elde edilen faz hızları için eigen yerdeğiştirmeleri ve eigen gerilmeleri hesaplanabilir.

Şekil 4' deki gibi yarı-sonsuz bir ortam modeli için sentetik sismogramlar kaynak zaman fonksiyonu, yerkabuğu transfer fonksiyonu ve alet tepki fonksiyonunun konvolisyonu sonucunda elde edilir.

$$D(t) = S(t) * I(t) * G(t) \quad (39)$$

Burada $S(t)$ kaynak zaman fonksiyonu, $I(t)$ alet tepki fonksiyonu, $G(t)$ ortamın transfer fonksiyonu (Green fonksiyonu) ve $D(t)$ sentetik sismogram zaman fonksiyonu olarak tanımlanabilir.

2.3 Uygulamalar

2.3.1 Uygulamada kullanılan depremler ve kabuk modeli

TBZ istasyonuna 1996 yılından itibaren dijital geniş-bandlı üç bileşen kayıt alabilecek şekilde işlevsellik kazandırılmıştır. TBZ’ de kullanılan sismometreler 0.05-20 Hz arasında tepki gösterir(Ek şekil 1). Çizelge 1’ de verilen 1. ve 2. nolu depremler TBZ’ de dijital geniş-bandlı üç bileşen olarak kayıt edilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan depremler [34].

No	Oluş Tarihi	Oluş Zamanı	Enlem	Boylam	BAZ	O. D.	Magnitüd
1.	14.08.1996	04:55:04:77	40.73K	35.28D	267	12 km	5.4
2.	14.08.1996	05:59:44:07	40.70K	35.22D	267	6 km	5.2

Kuzey Anadolu fayı Çorum-Amasya civarında iki kola ayrılmaktadır. Çizelge 1’ de verilen depremlerin Kuzey Anadolu fayının ikinci kolu üzerinde meydana geldiği tahmin edilmektedir(Ek şekil 2). Episantr ve istasyon koordinatları kullanılarak 1. nolu deprem için episantr uzaklığı 378 km ve 2. nolu deprem için episantr uzaklığı 385 km olarak hesaplanmıştır.

Sentetik sismogramların, grup hızı, faz hızı ve eigen fonksiyonlarının hesaplanması için kullanılan programlar çok tabakalı yarı-sonsuz bir ortamda Love dalgalarına ait transfer fonksiyonunun elde edilmesi üzerine, ve ayrıca sentetik sismogram hesaplama tekniklerinde karşılaşılan titreşim integrallerinin Filon yöntemine göre hesaplanması esasına dayanmaktadır.

Başlangıçta yapılan sentetik sismogram hesaplamalarında, modellenecek her iki deprem için kaynak fonksiyonu parametreleri M_0 momenti 1.23×10^{24} , $k=1.0$, $atım=0$, $eğim=90$, $doğrultu=30$ ve $azimuth=87$ olarak alınmıştır. Aynı zamanda çizelge 1’ de verilen parametreler ve çizelge 2’ de Mindevallinin Türkiyenin doğusu için önermiş olduğu kabuk modelinin incelediğimiz bölge için de geçerli olduğu kabul edilmiştir. Her iki deprem, kaynağın karmaşıklığı göz önünde bulundurularak Mindevalli tarafından önerilen kabuk modelinin doğruluğunun araştırılması için kullanılacaktır.

Çizelge 2. Mindevalli tarafından Türkiye'nin doğusu için önerilen kabuk modeli

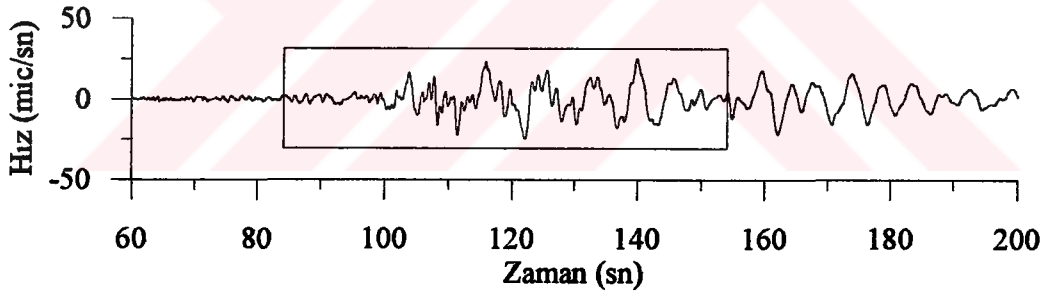
Tabaka kalınlığı (km)	P dalga hızı (km/sn)	Q_α	S dalga hızı (km/sn)	Q_β	Yoğunluk (gr/cm ³)
1.0	4.69	353.0	2.71	157.0	2.43
1.0	4.78	351.0	2.76	156.0	2.45
1.0	4.94	349.0	2.85	155.0	2.49
1.0	5.15	344.0	2.97	153.0	2.53
1.0	5.38	340.0	3.11	151.0	2.58
2.0	5.64	335.0	3.25	149.0	2.63
2.0	5.87	329.0	3.39	146.0	2.67
2.0	6.06	322.0	3.50	143.0	2.72
2.0	6.17	311.0	3.56	138.0	2.75
2.0	6.23	299.0	3.60	133.0	2.77
5.0	6.25	286.0	3.61	127.0	2.78
5.0	6.33	270.0	3.65	120.0	2.80
5.0	6.55	250.0	3.78	111.0	2.86
5.0	6.86	232.0	3.96	103.0	2.94
5.0	7.20	216.0	4.15	96.0	3.04
10.0	7.72	198.0	4.33	88.0	3.22
10.0	8.01	187.0	4.49	83.0	3.31
10.0	8.23	178.0	4.62	79.0	3.39
10.0	8.40	171.0	4.71	76.0	3.45
10.0	8.51	164.0	4.77	73.0	3.49
10.0	8.56	162.0	4.81	72.0	3.51
10.0	8.58	158.0	4.81	70.0	3.52
10.0	8.57	155.0	4.81	69.0	3.51
10.0	8.55	155.0	4.80	69.0	3.51
10.0	8.54	153.0	4.79	68.0	3.50
20.0	8.53	153.0	4.79	68.0	3.50
20.0	8.55	153.0	4.80	68.0	3.51
20.0	8.59	153.0	4.82	68.0	3.52

2.3.2 Kullanılan depremlerin benzerliklerinin araştırılması

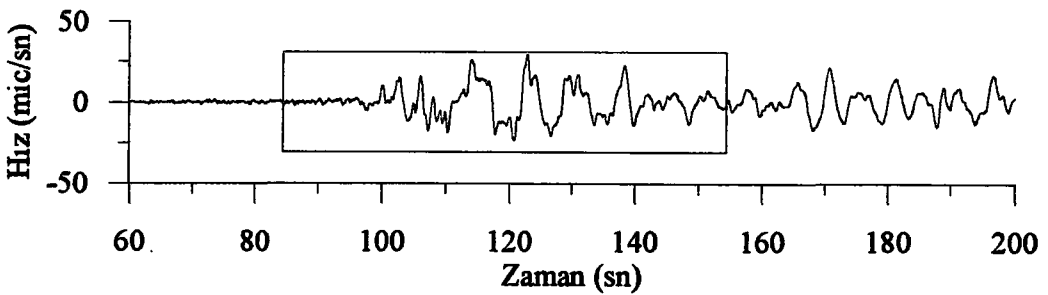
İncelenen herhangi bir bölge için kullanılan deprem kayıtlarının benzerliğinden yola çıkarak deprem sonrası sismik enerjinin hemen hemen aynı ortam içinde seyahat ettiği ve aynı zamanda sismik enerjiyi üreten kaynak mekanizmasının benzer özellikler taşıdığı sonucuna varılabilir. Şekil 7' de gösterilen tanjansiyel bileşen sismogramlarda yaklaşık olarak 0-80 sn zaman aralığı azimut dışı (yayınım yönü dışı) cisim dalgası

varışları ve 160 sn' den sonraki kısım ise yüzey dalgası kodası olarak değerlendirilebilir. Sonuç olarak 1. ve 2. nolu depreme ait tanjansiyel bileşenlerin yaklaşık olarak 80-160 sn arasında kalan ve şekil üzerinde sınırları belirlenen kısımları modelleme amaçlı çalışmalar için kullanılabilir. TBZ' de kullanılan dijital sismograf aleti deprem kaydedilmeye başlanmadan 40 sn önce kayıt almaya başlamaktadır. Bu nedenle sismogramların 0-40 sn zaman aralığının genlik spektrumları gürültü spektrumları olarak kullanılabilir. Şekil 8 her iki kayıt için gürültü seviyesinin yaklaşık olarak 4 Hz' den sonra sinyalin frekans içeriğini bozmaya başladığını göstermektedir. Bu nedenle her iki kayıt için gürültü seviyelerinin kullanılan frekans bandında (0-2 Hz) kaydın frekans içeriğini çok fazla etkilemediği söylenebilir. Aynı zamanda şekil 7' de verilen sismogramların ve şekil 8' de verilen sismogramlara ait genlik-gürültü spektrumlarının karşılaştırılması sonucunda kullanılan birinci ve ikinci depremin birbirine benzer kayıtlar olduğu ve başlangıçtaki modelleme çalışmalarında sadece belirli bir kayıt üzerinde durulabileceği sonucuna varılabilir.

(a)

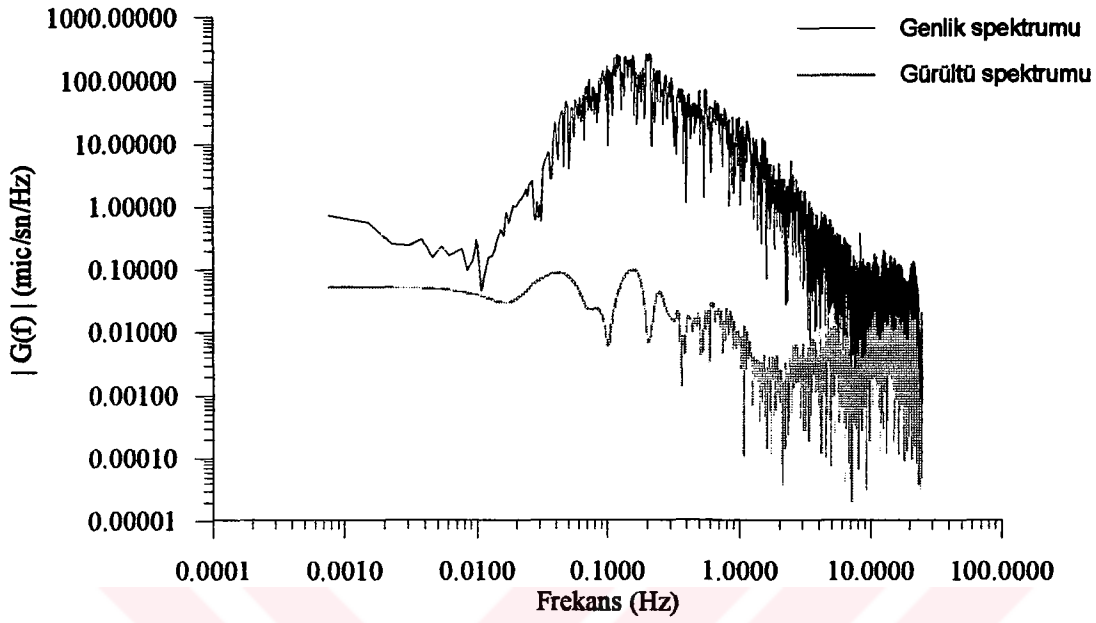


(b)

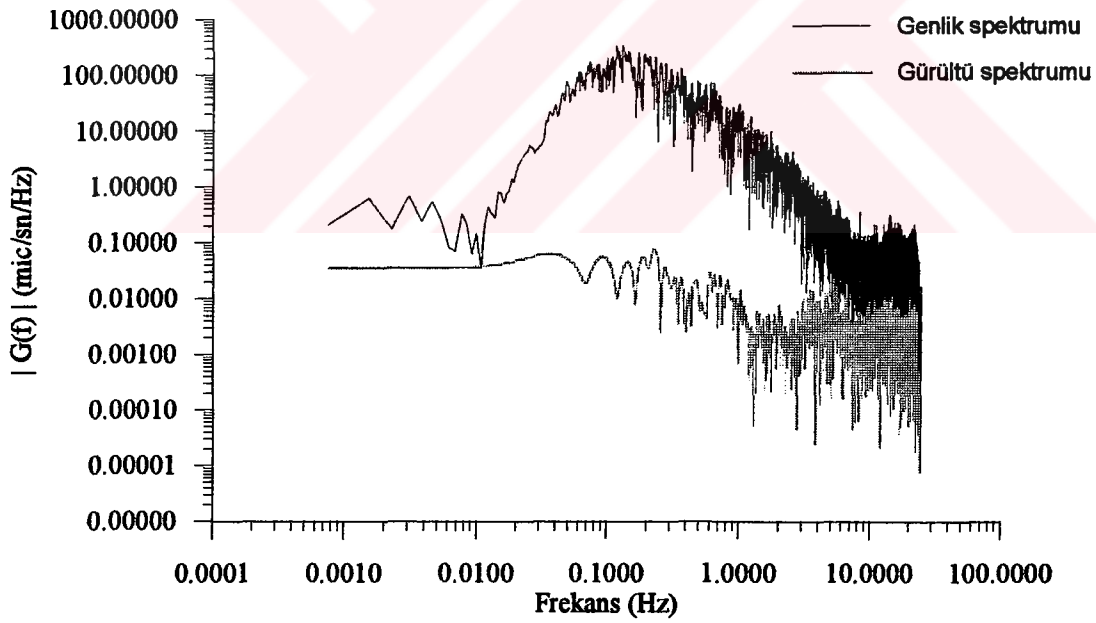


Şekil 7. (a) Çizelge 1' de verilen 1. depremin BAZ=267' ye göre hesaplanan tanjansiyel bileşeni ve (b) Çizelge 1' de verilen 2. depremin BAZ= 267' ye göre hesaplanan tanjansiyel bileşeni

(a)



(b)

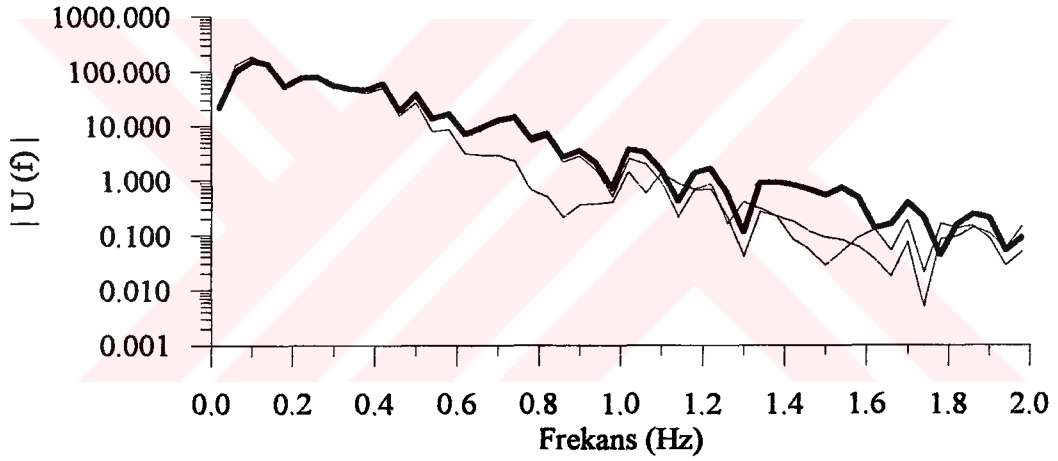


Şekil 8. (a) Çizelge 1' de verilen 1. depremin tanjansiyel bileşenine ait genlik ve gürültü spektrumları ve (b) Çizelge 1' de verilen 2. depremin tanjansiyel bileşenine ait genlik ve gürültü spektrumları

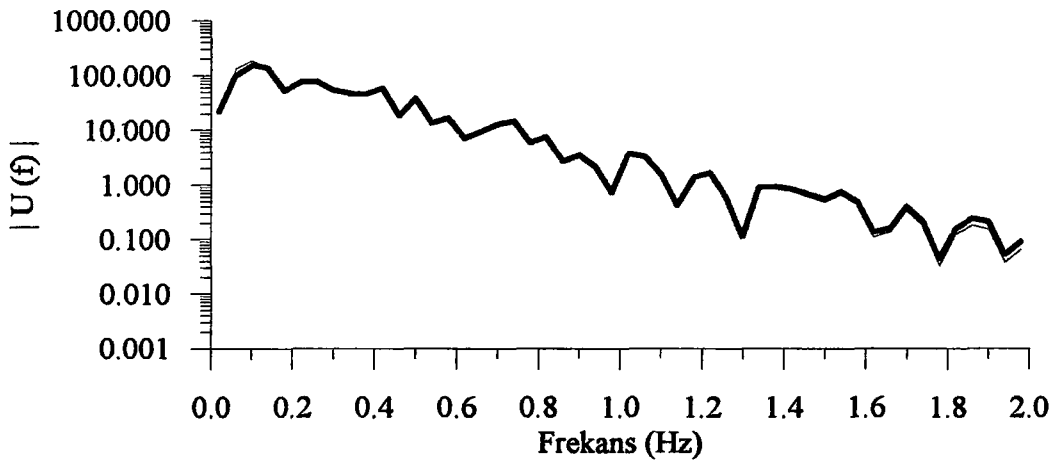
2.3.3 Filon yöntemi kullanılarak titreşim integrallerinin hesaplanması

Sentetik sismogram hesaplama tekniklerinde karşılaşılan titreşim integralleri (oscillatory integrals)' nin sayısal olarak çözümünde Filon-5 nokta yöntemi kullanılabilir. Seçilen frekans bandında küçülen Δu örnekleme aralığıyla birlikte hesaplanan titreşim integrali değerlerinin duraylılık kazandığı Δu örnekleme aralığı kullanılabilir bir örnekleme aralığı olarak seçilebilir. Şekil 9' da görüldüğü gibi 0-2 Hz frekans bandında yapılabilecek hesaplamaların verilen tolerans sınırları içerisinde en doğru sonuçları en kısa bilgisayar zamanı içerisinde üretebilmesi için kullanılacak en büyük Δu örnekleme aralığı 0.008125 ve daha küçük değerler olmalıdır.

(a)



(b)



Şekil 9. (a) $\Delta u=0.065, 0.0325$ ve 0.001 , (b) $\Delta u=0.01625, 0.008125$ ve 0.001 için hesaplanan titreşim integrali değerlerine göre Δu örnekleme aralığı faktörünün gösterilmesi

2.3.4 Kaynak fonksiyonu ve odak parametrelerinin belirlenmesi

Sentetik sismogram hesaplamalarında aşağıda verilen kaynak fonksiyonu kullanılmıştır [35].

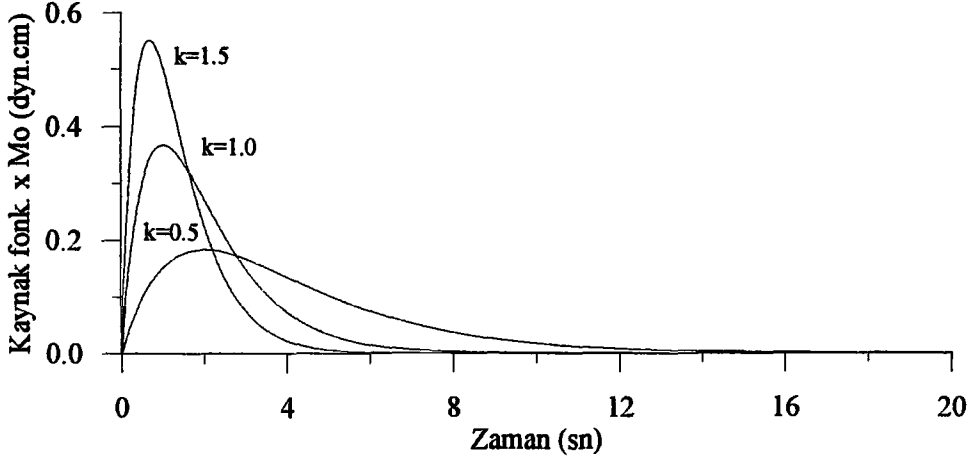
$$M(t) = M_0 \cdot k^2 \cdot t \cdot e^{(-k \cdot t)} \quad (40)$$

Şekil 10' da değişik k değerleri için hesaplanan kaynak fonksiyonları ve bu kaynak fonksiyonları için elde edilen sentetik sismogramlar gösterilmektedir. Kaynak fonksiyonu parametresi k' nın değişimi doğrudan hesaplanan sentetik sismogramın frekans içeriğine etkimektedir. Şekil 10 ve 12a' da artan k değeriyle birlikte hesaplanan sentetik sismogramın frekans içeriğinin yüksek frekanslara doğru kaydığı görülmektedir. Sentetik ve orjinal sismogramlarda yüksek frekans içeriğiyle düşük frekans içeriği hem kendi aralarında hemde birbirleri arasında kıyaslanması sonucunda kullanılacak kaynak fonksiyonu belirlenebilir. Çizelge 1' de verilen 1. ve 2. nolu depreme ait sentetik sismogramlar için kaynak fonksiyonu parametresi $k=1.0$ (rise time $\approx 5-6$ sn) ve başlangıç için M_0 momenti 1.23×10^{23} olarak alınabilir.

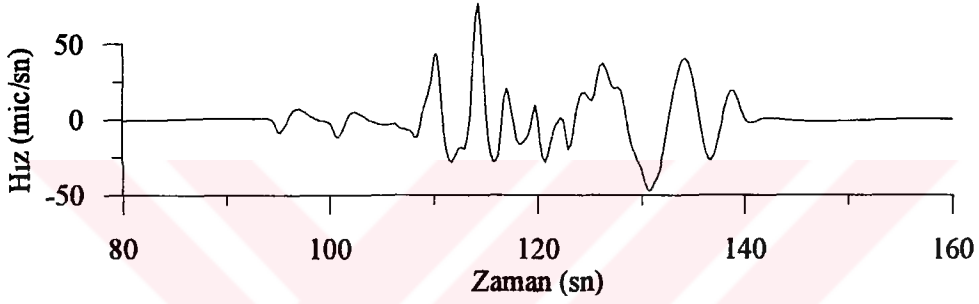
Şekil 11 ve 12b değişik odak derinlikleri için hesaplanan sentetik sismogramları ve bu sismogramların genlik spektrumlarını göstermektedir. Odak derinliği değişimi doğrudan hesaplanan sentetik sismogramın frekans içeriğini ve aynı zamanda ilk varış ile derinlik fazı arasındaki zaman farkını etkilemektedir Azalan odak derinliğiyle birlikte sentetik sismogramın frekans içeriğinin yüksek frekanslara doğru kaydığı ve ilk varışla derinlik fazı arasındaki zaman farkının azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla tek istasyonda kaydedilen depremin frekans içeriği ve ilk varışla derinlik fazı arasındaki zaman farkı hesaplanan sentetik sismogramla kıyaslanarak yaklaşık olarak odak derinliği saptanabilir.

Şekil 13' de görüldüğü gibi kaynak olabilecek herhangi bir fayın atımının, eğiminin, doğrultusunun ve azimudunun değişimi doğrudan fayın üretebileceği yüzey dalgası formuna etkimektedir. Dolayısıyla tek istasyonda kaydedilen yüzey dalgaları kullanılarak odak parametreleri yaklaşık olarak belirlenebilir. Çizelge 1' de verilen birinci ve ikinci deprem için kaynağın atımı 0° , eğimi 90° , doğrultusu 30° ve azimudu 87° olarak belirlenmiştir.

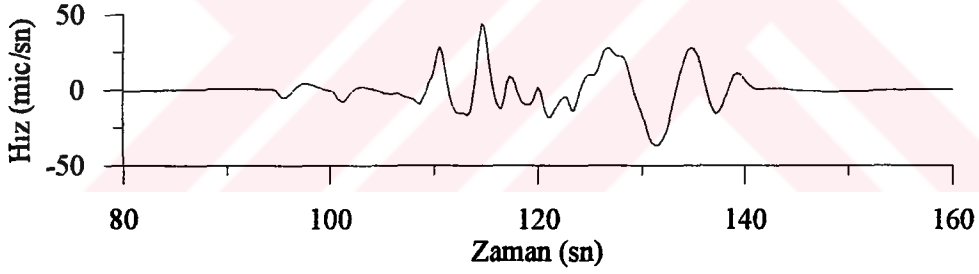
(a)



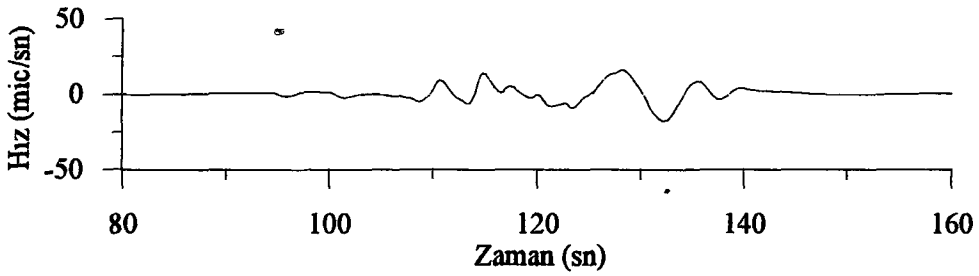
(b)



(c)

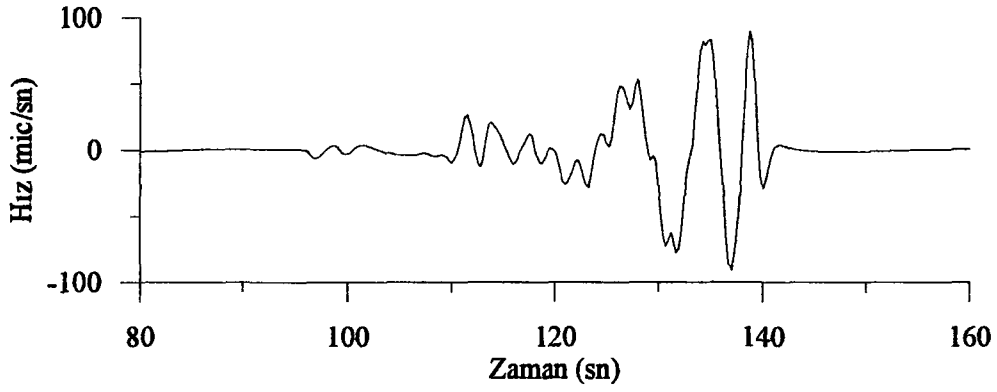


(d)

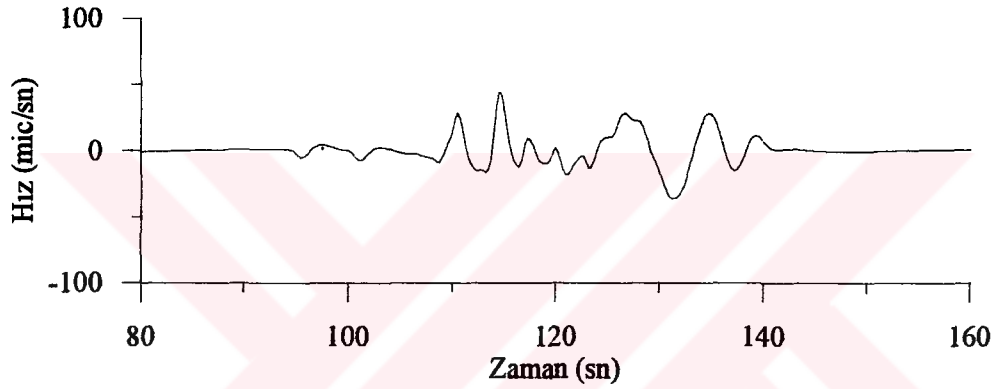


Şekil 10. Kaynak fonksiyonu parametresi k 'nın değişiminin kaynak fonksiyonu ve hesaplanan sentetik sismogramlar üzerine etkisinin gösterilmesi (a) $k=0.5$, 1.0 ve 1.5 için hesaplanan kaynak fonksiyonları, (b) $k=1.5$ için, (c) $k=1.0$ için ve (d) $k=0.5$ için hesaplanan sentetik sismogramlar

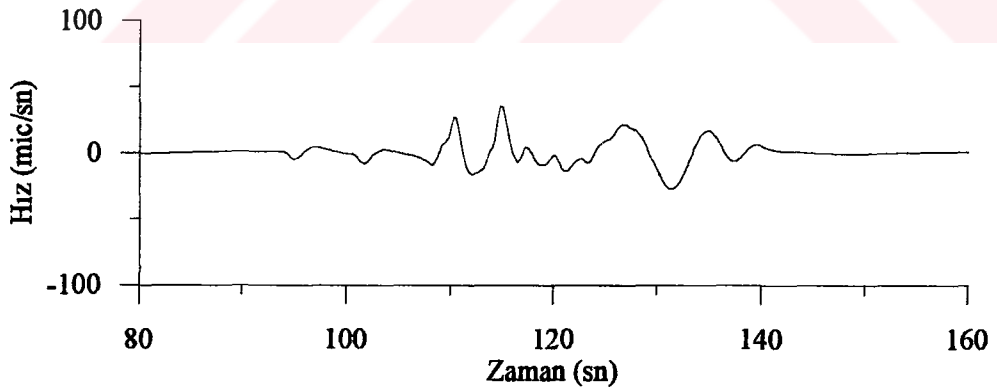
(a)



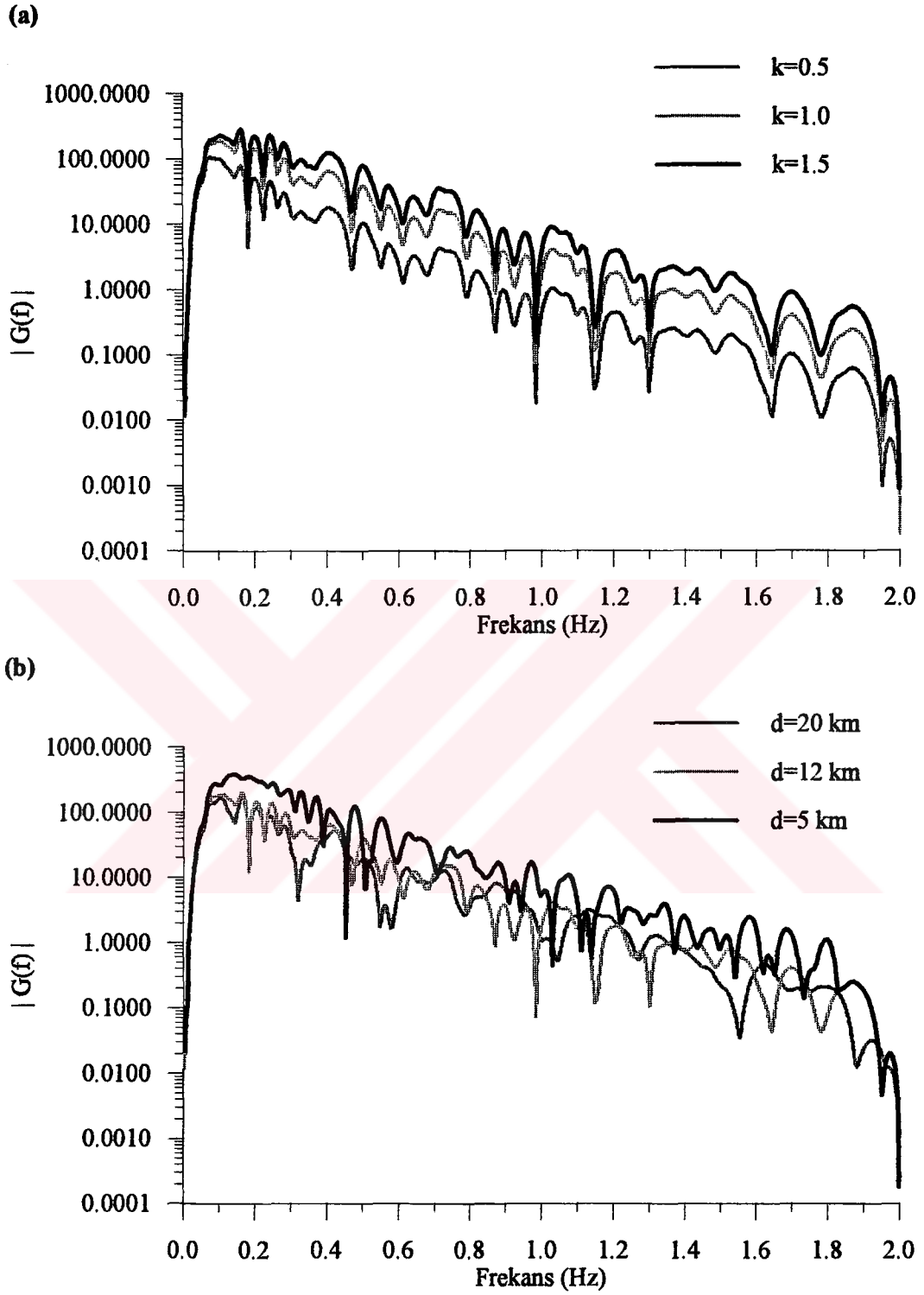
(b)



(c)

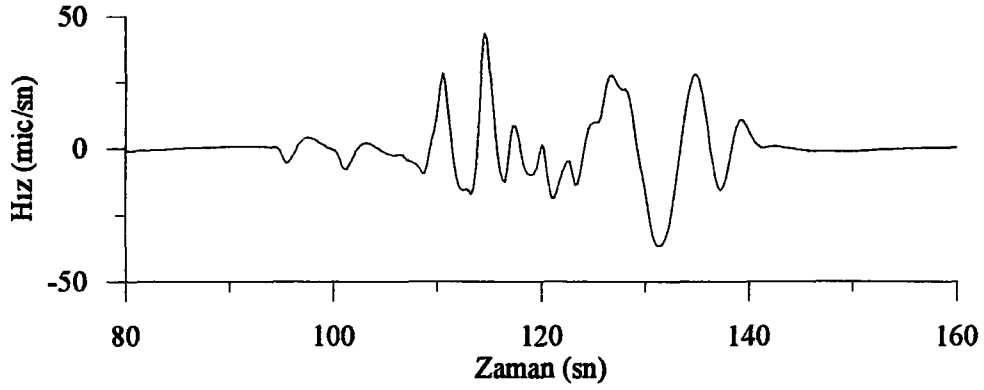


Şekil 11. Odak derinliği değişiminin sentetik sismogramlar üzerine etkisinin gösterilmesi (a) $d=5$ km için hesaplanan sentetik sismogram, (b) $d=12$ km için hesaplanan sentetik sismogram ve (c) $d=20$ km için hesaplanan sentetik sismogram

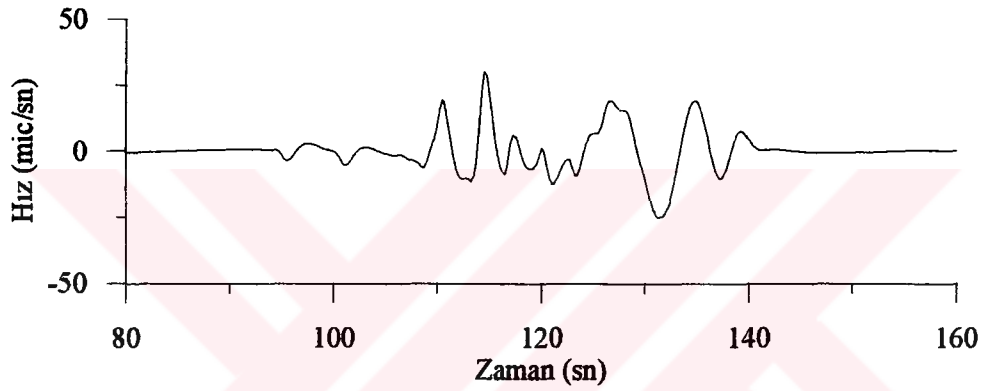


Şekil 12. (a) Şekil 10' da $k=0.5$, 1.0 ve 1.5 için hesaplanan sentetik sismogramların genlik spektrumlarının karşılaştırılması ve (b) Şekil 11'de $d=5$, 12 ve 20 km odak derinlikleri için hesaplanan sentetik sismogramların genlik spektrumlarının karşılaştırılması

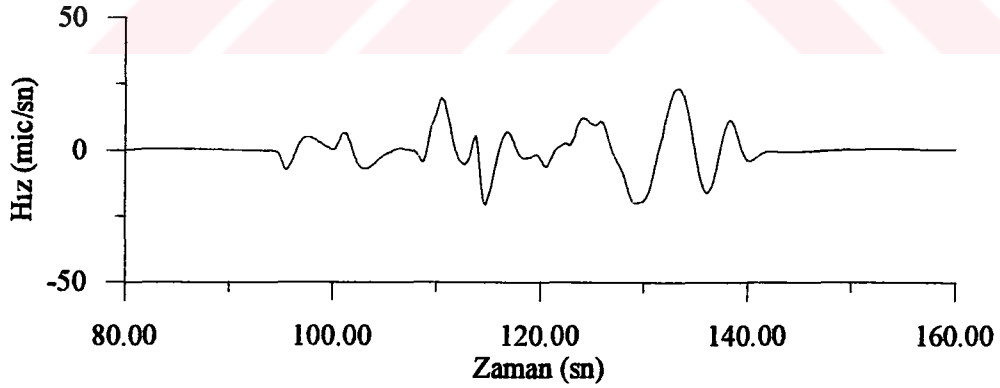
(a)



(b)



(c)



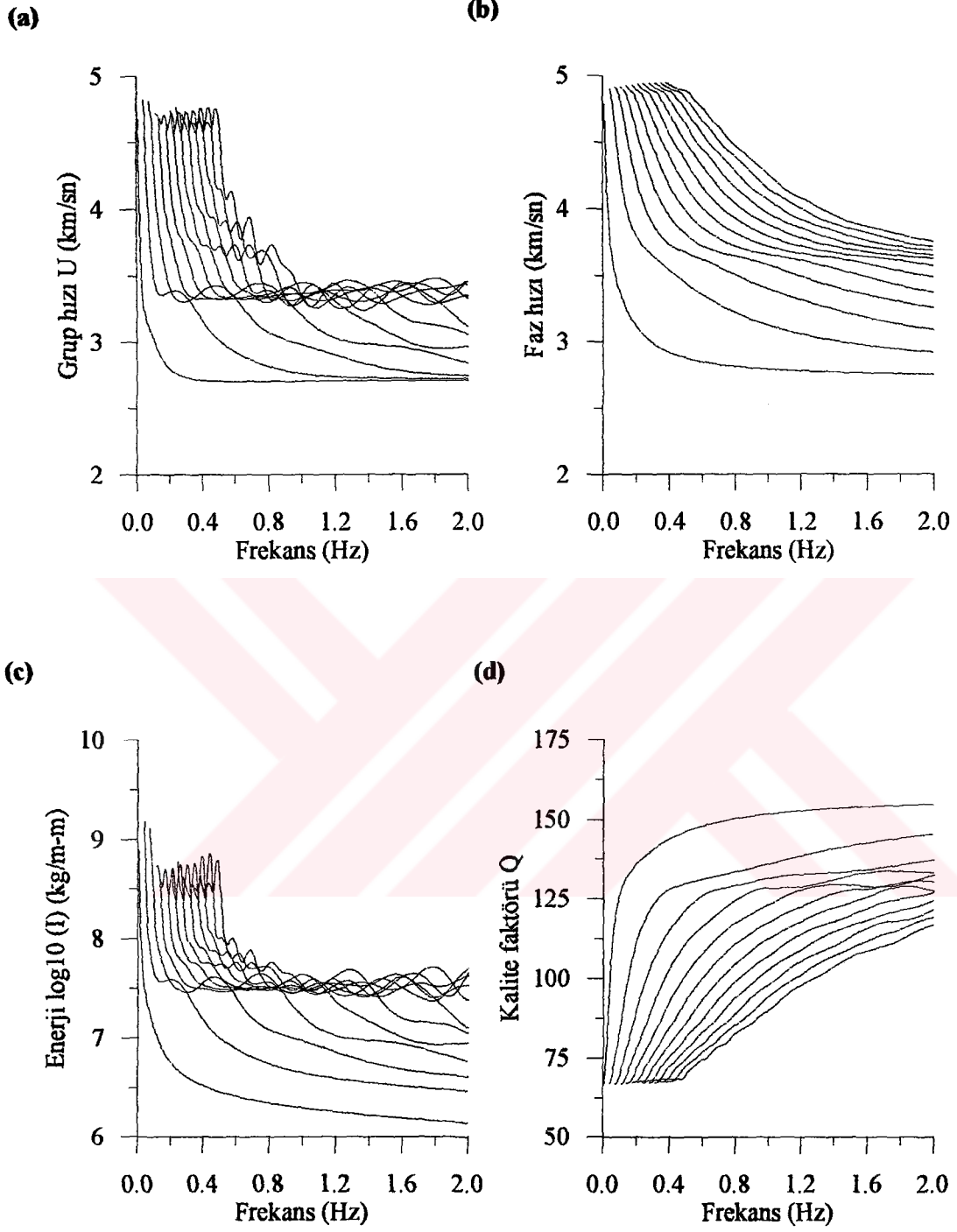
Şekil 13. Doğrultu atımlı, 45° eğimli ve 90° eğimli normal fay modelleri için hesaplanan sentetik sismogramlar (a) Atım=0, Eğim=90, Doğrultu=30, Azimuth=87, (b) Atım=270, Eğim=45, Doğrultu=30, Azimuth=87 ve (c) Atım=270, Eğim=90, Doğrultu=30, Azimuth=87 fay parametreleri için hesaplanan sentetik sismogramlar

2.3.5 Grup hızı, faz hızı ve derinlikle enerji dağılımının araştırılması

Herhangi bir modun herhangi bir frekans, grup ve faz hızında sahip olduğu enerjinin derinlikle değişimini, ve aynı zamanda derinlikle değişim gösteren enerjinin yüzeydeki etkisini ortaya koymak, sentetik sismogram üzerindeki sismik dalga fazlarının daha iyi kontrol edilerek yorumlanabilmesi imkanını verir.

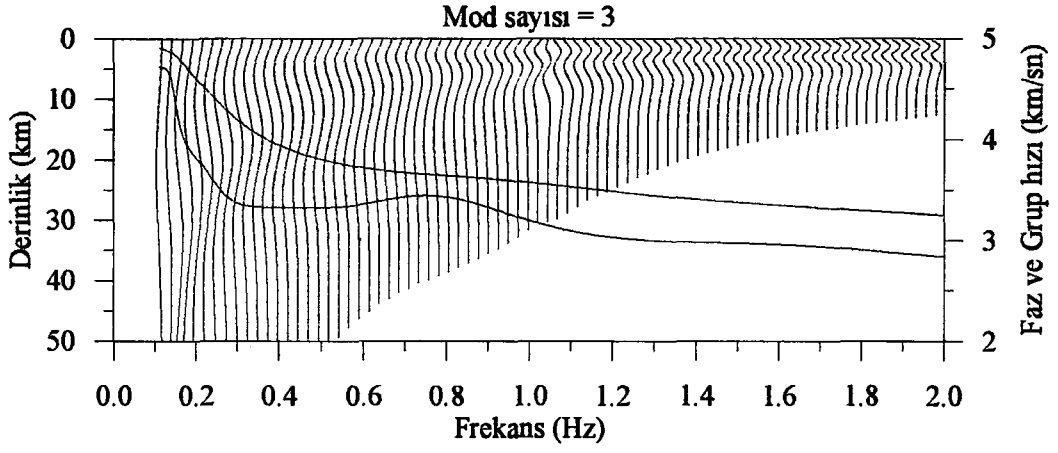
Grup hızı eğrileri artan mod ve frekansla birlikte kendini gösteren sismik dalga fazlarının varış zamanlarına göre sentetik sismogram üzerinde konumunu gösterir. Faz hızları ise herhangi bir frekans ve moddaki sismik enerjinin içinde yayıldığı ortamın hızına ve geliş açısına bağlı olarak sismik dalga cephesinin arayüzey etkileşimleri ve etkileşim sonrası davranışları hakkında bilgi verebilir. Frekansla değişim gösteren enerji eğrileri seçilen frekans bandında belirlenen bir grup ve faz hızı aralığında kendini gösteren bir sismik dalga fazının artan frekansla birlikte derinden yüzeye doğru taşıdığı enerji miktarını ifade eder. Herhangi bir frekans ve moddaki sismik enerjinin soğurmaya bağlı olarak içinde seyahat ettiği ortamın özellikleri kalite faktörü Q ile ifade edilebilir. Düşey hız yapısındaki belirgin değişimler kendini grup hızı, faz hızı, enerji ve kalite faktörü eğrilerinde maksimum ve minimum gruplaşmalar şeklinde gösterebilir. Hız yapısı, hız yapısının derinlikle değişimi ve odak parametrelerinin değişimi hesaplanan sentetik sismogramı ve aynı zamanda hesaplanan sentetik sismograma ait grup hızı, faz hızı, enerji ve kalite faktörünün frekansla değişimini de etkileyecektir. Sonuç olarak şekil 14' de gösterildiği gibi grup hızı, faz hızı, enerji ve kalite faktörü eğrileri ile düşey hız yapısına ve odak parametrelerine bağlı olarak hesaplanan sentetik sismogramların bir arada yorumlanması daha iyi model çalışmalarını ortaya koyabilir.

Eigen fonksiyonlarının derinlikle değişimi herhangi bir modun herhangi bir frekans ve derinlikte meydana getirdiği düşey yerdeğiştirmeyi ve bu yerdeğiştirmenin yüzeydeki etkisini gösterir. Aynı zamanda odak derinliğine bağlı olarak kaynak tarafından tetiklenebilecek yerdeğiştirme hakkında bilgi verir. Şekil 15 ve 16' da sentetik sismogramlar üzerinde gözlemlenebilecek herhangi bir sismik dalga fazının yüksek modlardaki grup hızı, faz hızı, enerji ve kalite faktörünün artan frekansla değişimi gösterilmiştir. Grup hızı ve faz hızı eğrilerinin derinlikle değişim gösteren eigen fonksiyonlarıyla birlikte bir arada incelenebilmesi kaynağın ve ortamın fiziksel mekanizmasının daha iyi açıklanabilmesi imkanını verir.

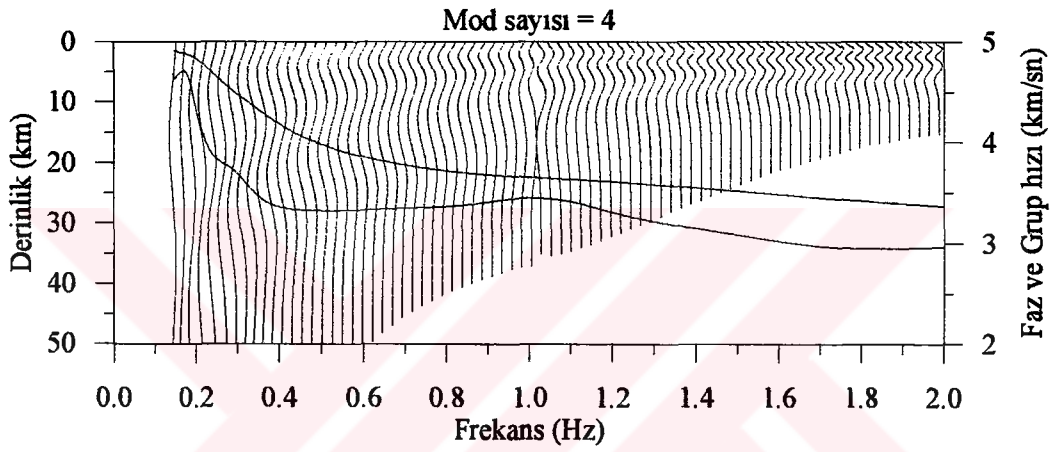


Şekil 14. Çizelge 2' de önerilen kabuk modeli için 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, ve 11. modlar için 0-2 Hz frekans bandında hesaplanan (a) grup hızı eğrileri, (b) faz hızı eğrileri, (c) enerji eğrileri ve (d) kalite faktörü eğrilerinin artan mod sayısı ve frekansla birlikte gösterilmesi

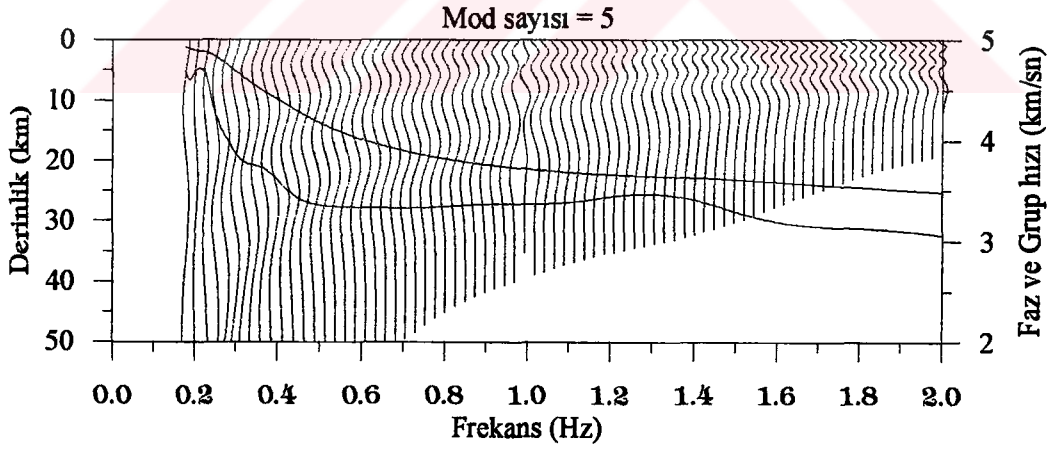
(a)



(b)

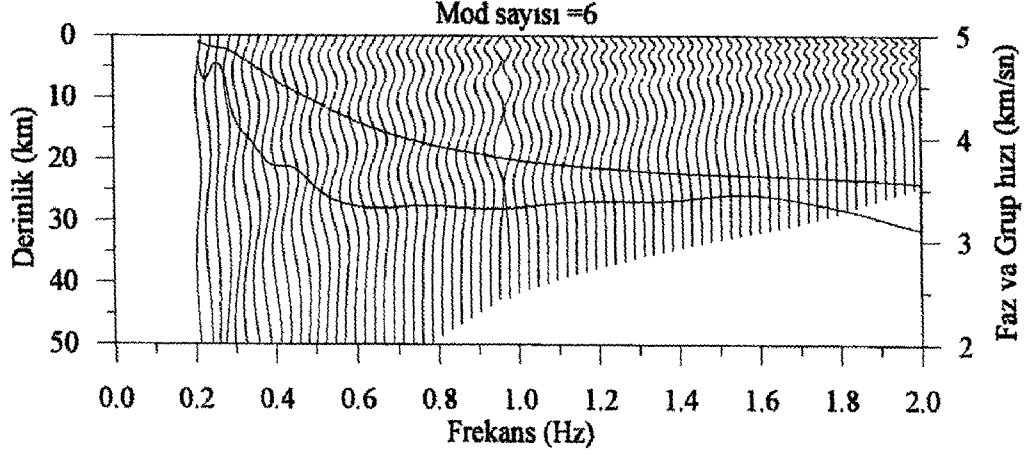


(c)

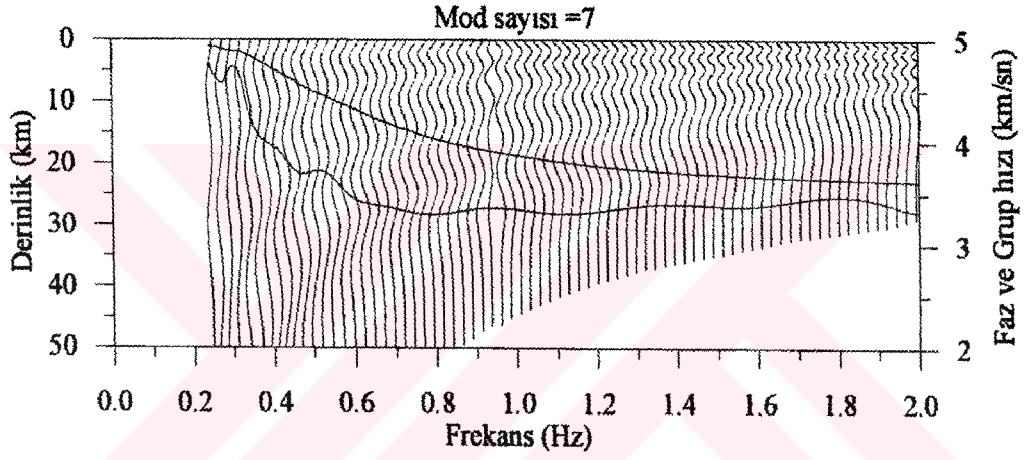


Şekil 15. Çizelge 2’ de verilen kabuk modeline göre (a) 3. mod için, (b) 4. mod için ve (c) 5. mod için hesaplanan eigen fonksiyonlarının derinliğe göre, grup ve faz hızlarının ise frekansa göre değişiminin gösterilmesi

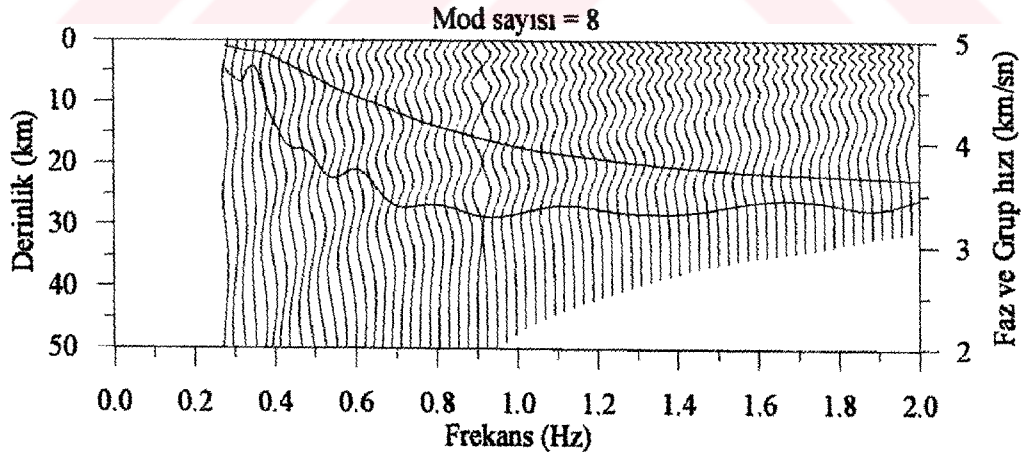
(a)



(b)



(c)



Şekil 16. Çizelge 2' de verilen kabuk modeline göre (a) 6. mod için, (b) 7. mod için ve (c) 8. mod için hesaplanan eigen fonksiyonlarının derinliğe göre, grup ve faz hızlarının ise frekansa göre değişiminin gösterilmesi

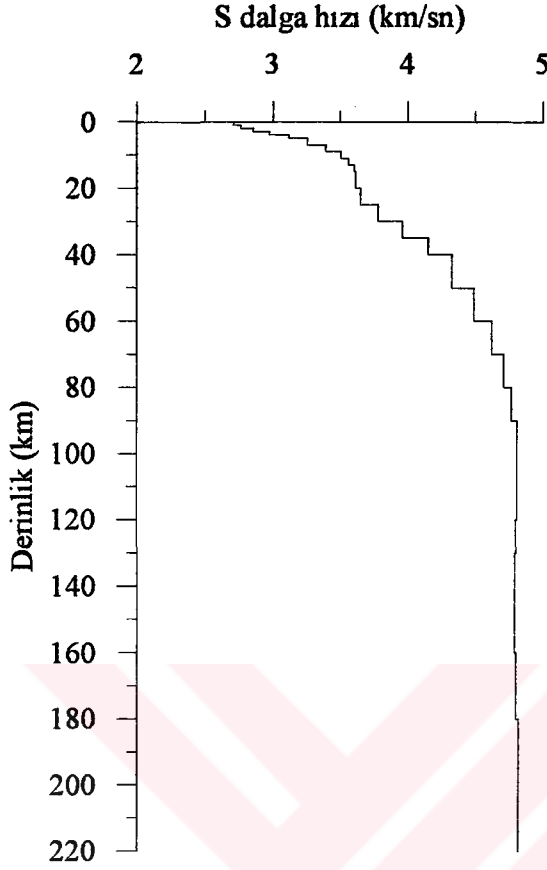
2.3.6 Düşey S dalga hız yapısındaki değişimlerin sentetik sismogramlar üzerine etkisinin araştırılması

Çizelge 1' de verilen depremlerin benzerliği nedeniyle S dalga hız yapısındaki değişimlerin etkisi sadece birinci deprem için hesaplanan sentetik sismogramlar üzerinde incelenmiştir. Çizelge 2' de Türkiye'nin doğusu için Mindevalli tarafından önerilen kabuk modelinin doğruluğunun araştırılması S dalga hız yapısı üzerinde yapılan değişimlerin sentetik sismogramlar üzerine etkisi dikkate alınarak kullanılan deprem kayıtlarıyla karşılaştırılmasına bağlıdır. Çizelge 2' de Mindevalli tarafından önerilen kabuk modeli Türkiye'nin doğusunu kapsamaktadır. Çizelge 1' de verilen depremler kullanılarak ise sadece Türkiye'nin doğusunda bulunan ve aynı zamanda Trabzon-Çorum arasında kalan kabuk yapısı araştırılabilir. Dolayısıyla Türkiye'nin doğusuna göre lokal bir bölge için yapılan model çalışmalarında Mindevalli tarafından önerilen kabuk modeli küçük değişimler gösterebilir. Sonuç olarak önerilen model için sözkonusu olabilecek farklılıkları ortaya koymak amacıyla çizelge 1' de verilen depremler kullanılarak Trabzon-Çorum arasında kalan bölge için model çalışmaları yapılabilir. Aynı zamanda model çalışmalarında hangi sismik dalga fazının düşey S dalga hız yapısının hangi kısmındaki değişimlerden etkilendiği belirlenebilir. Yapılan bu çalışmalar sismogram üzerinde gözlenen sismik dalgaların daha iyi tanımlanması ve sentetik sismogramlar üzerinde daha kolay kontrol edilebilmesi imkanını verebilir.

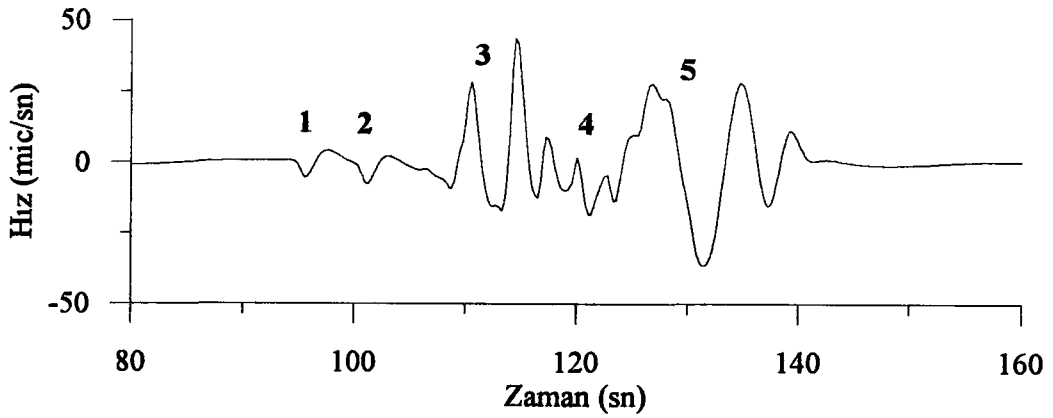
Şekil 17' de çizelge 2' de önerilen düşey S dalga hız yapısı ve bu S dalga hız yapısı için elde edilen sentetik sismogram gösterilmiştir. Şekil 18' de önerilen modelin 0-5 km arasında, şekil 19' da 7.5-35 km arasında, şekil 20' de 35-90 km arasında ve şekil 21' de 70-220 km arasında kalan S dalga hızlarının yaklaşık olarak %2 oranında düşürülmesi sonucu elde edilen S dalga hız modelleri ve bu S dalga hız modelleri için hesaplanan sentetik sismogramların şekil 17b ile karşılaştırılmaları verilmiştir.

Model üzerinde yapılan değişikliklerin hesaplanan sentetik sismogramları çok fazla etkilememesi bir sonraki çalışmaların kaynağın karmaşıklığı üzerinde yoğunlaşması gerektiğini göstermektedir. Yapılan model çalışmalarının sonucunda çizelge 2' de Mindevalli tarafından Türkiye'nin doğusu için önerilen kabuk modelinin inceleme bölgesi olarak seçtiğimiz Trabzon-Çorum arasında bulunan kabuk yapısı için de geçerliliğini koruduğu söylenebilir.

(a)

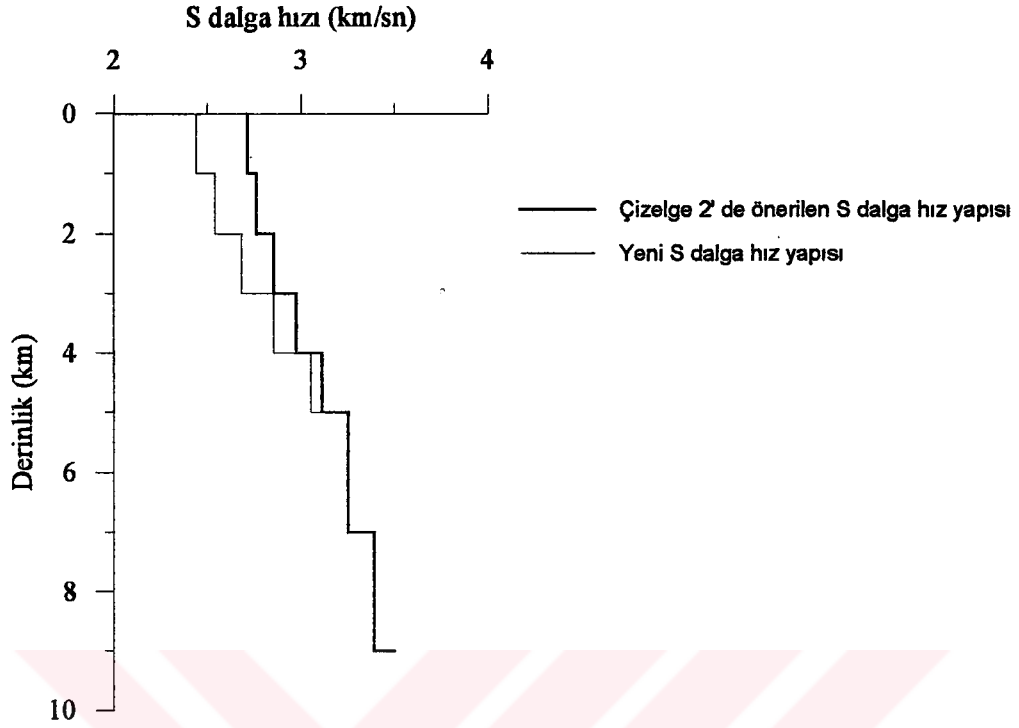


(b)

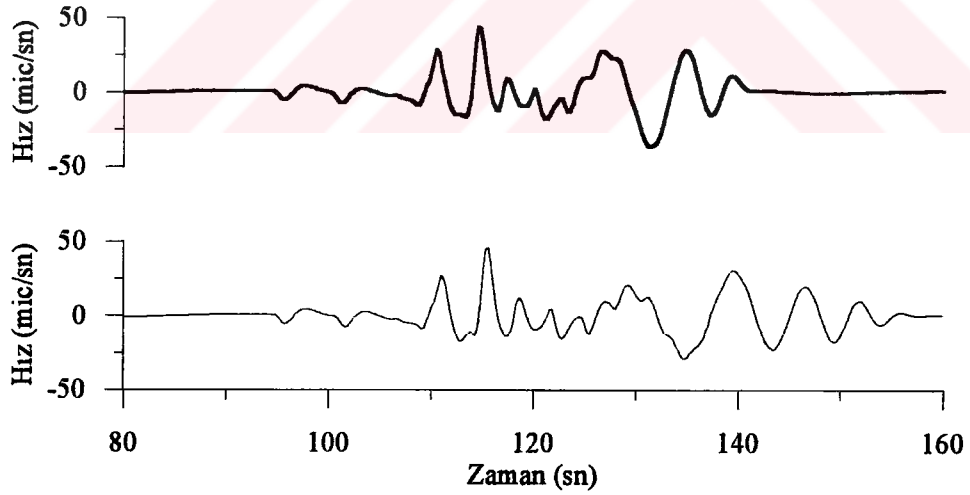


Şekil 17. (a) Çizelge 2' de önerilen kabuk modeli için S dalga hızının derinliğe göre değişimi ve (b) Çizelge 1' de verilen 1. deprem için şekil 17a' daki kabuk modeli kullanılarak elde edilen sentetik sismogram

(a)

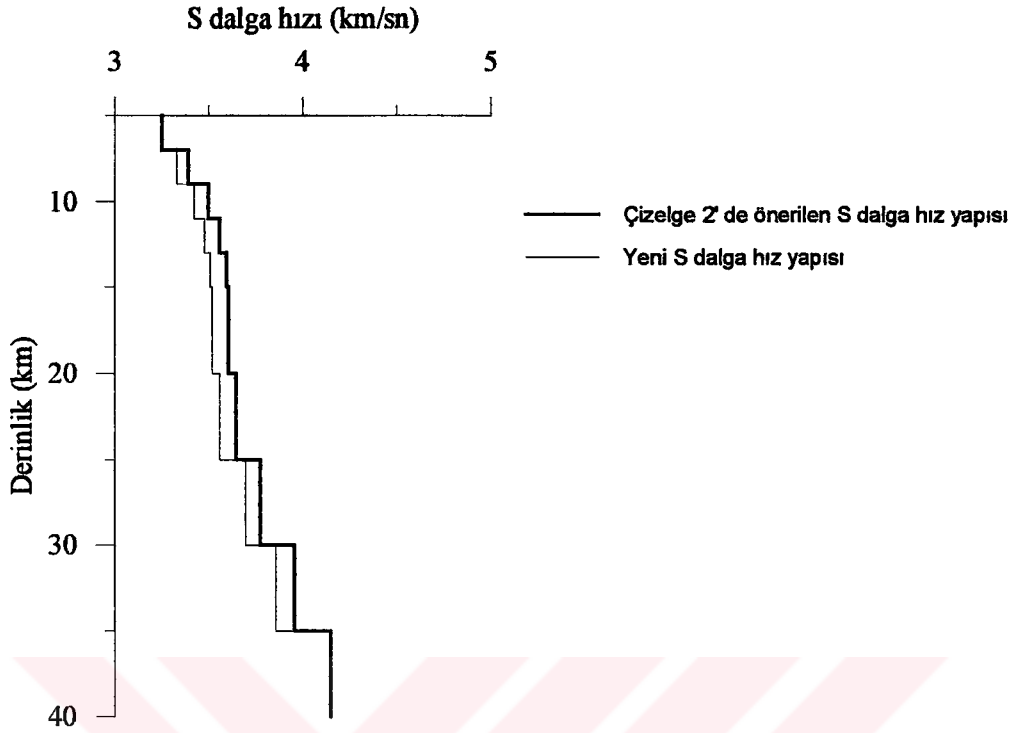


(b)

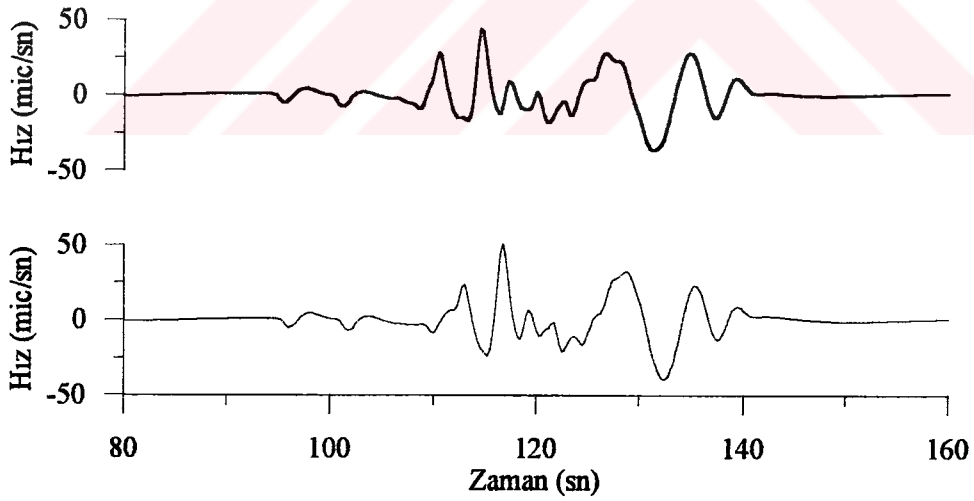


Şekil 18. (a) Çizelge 2' de önerilen S dalga hız yapısının ve bu modelin 0-5 km arasında hızların % 2 oranında düşürülmesiyle elde edilen yeni S dalga hız yapısının 0-10 km arasında kalan kısımlarının gösterilmesi ve (b) Şekil 18a' da verilen S dalga hız modelleri için hesaplanan sentetik sismogramların karşılaştırılması

(a)

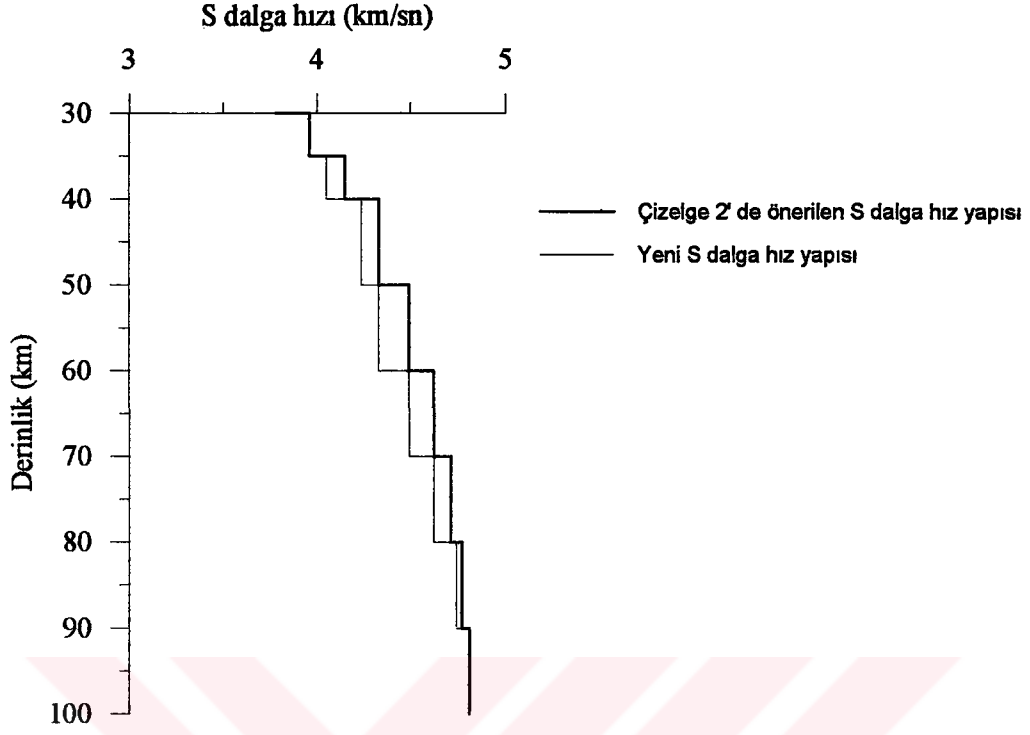


(b)

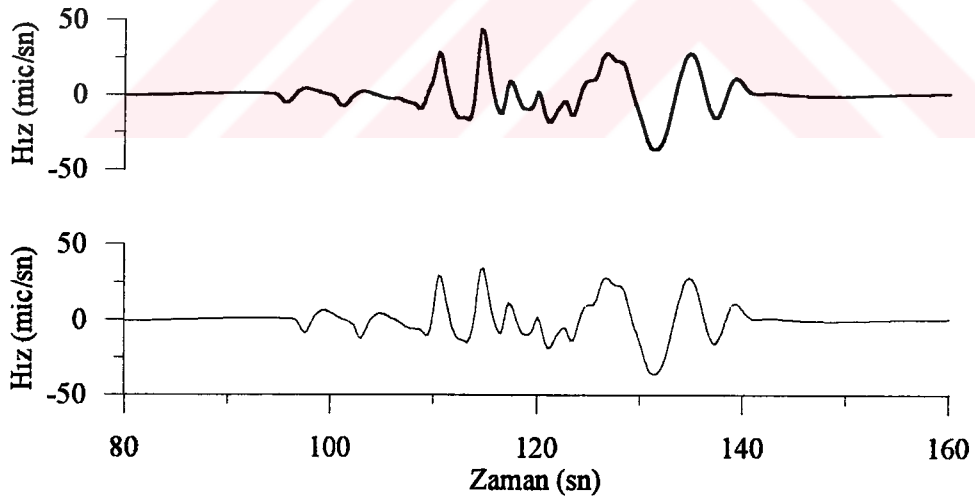


Şekil 19. (a) Çizelge 2' de önerilen S dalgası hız yapısının ve bu modelin 7.5-35 km arasında hızların % 2 oranında düşürülmesiyle elde edilen yeni S dalgası hız yapısının 5-40 km arasında kalan kısımlarının gösterilmesi ve (b) Şekil 19a' da verilen S dalgası hız modelleri için hesaplanan sentetik sismogramların karşılaştırılması

(a)

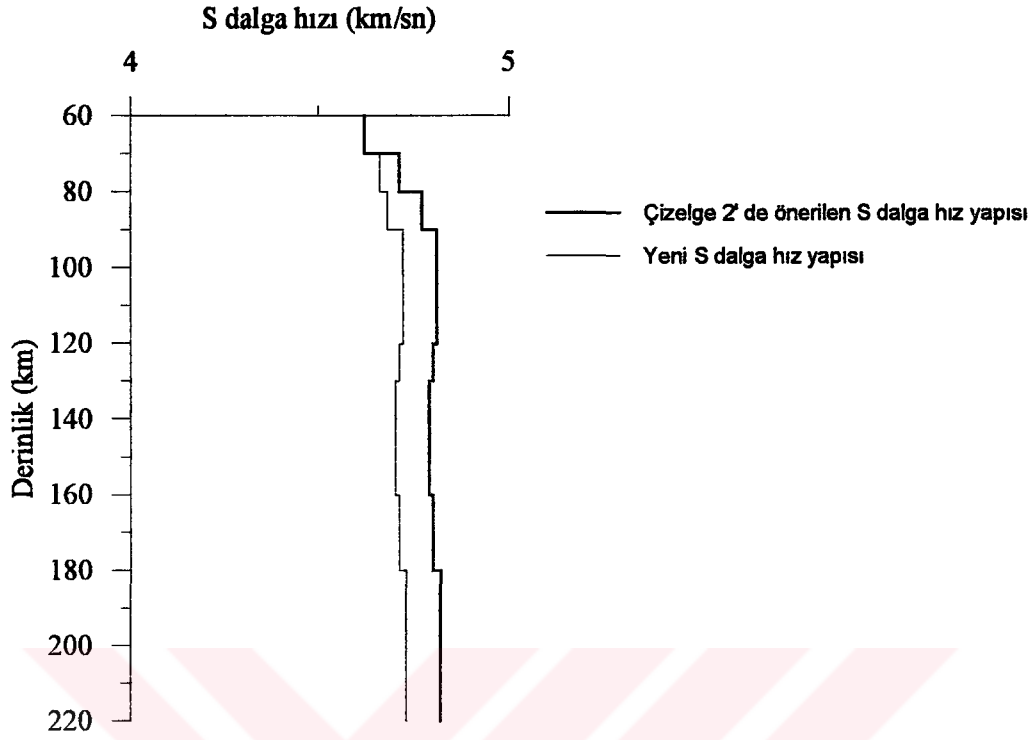


(b)

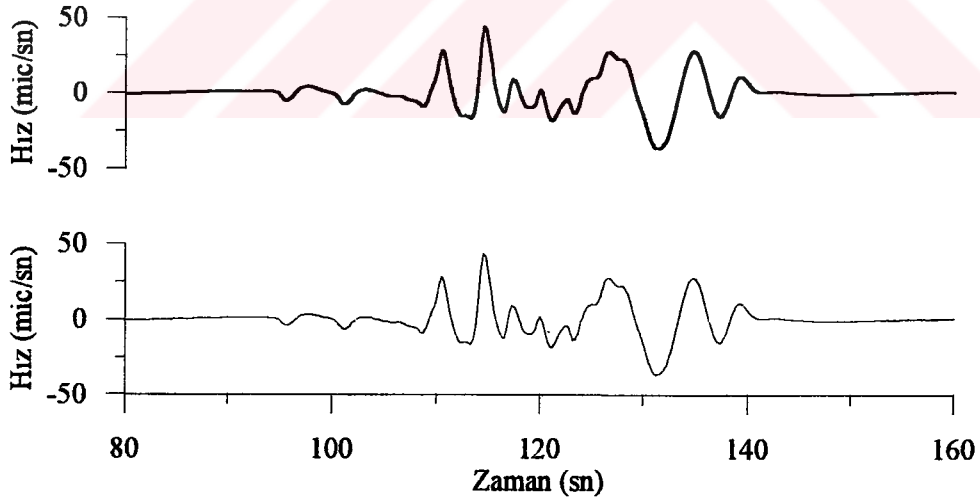


Şekil 20. (a) Çizelge 2' de önerilen S dalga hız yapısının ve bu modelin 35-90 km arasında hızların % 2 oranında düşürülmesiyle elde edilen yeni S dalga hız yapısının 30-100 km arasında kalan kısımlarının gösterilmesi ve (b) Şekil 20a' da verilen S dalga hız modelleri için hesaplanan sentetik sismogramların karşılaştırılması

(a)



(b)



Şekil 21. (a) Çizelge 2' de önerilen S dalga hız yapısının ve bu modelin 70-220 km arasında hızların % 2 oranında düşürülmesiyle elde edilen yeni S dalga hız yapısının 60-220 km arasında kalan kısımlarının gösterilmesi ve (b) Şekil 21a' da verilen S dalga hız modelleri için hesaplanan sentetik sismogramların karşılaştırılması

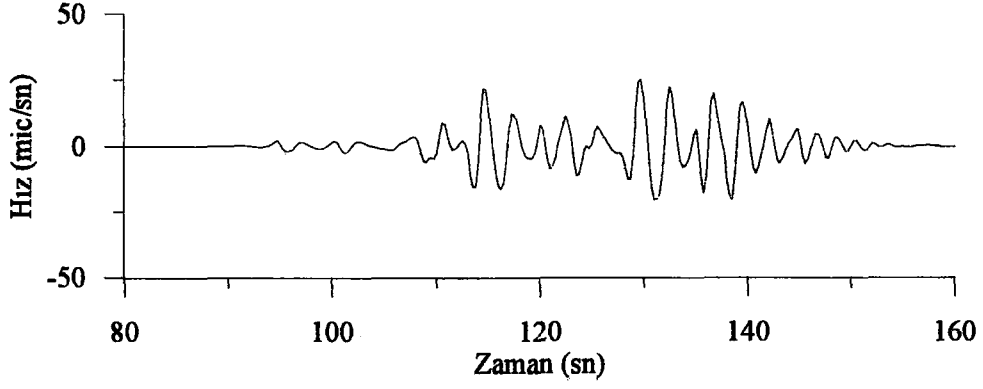
2.3.7 Lg dalgaları kullanılarak kaynak karmaşıklığının araştırılması

Yomogida ve Nakata [36] Hyogo-Ken Nanbu(1995) depremi için ilk P varışlarını kullanarak kaynak karmaşıklığı kavramını araştırmışlardır. Belirli bir episantr uzaklığından sonra doğrultu atımlı bir fayda meydana gelebilecek kırılmaların ürettiği cisim dalgası varışları sismogramlar üzerinde belirgin bir şekilde görülemeyebilir. Ayrıca sığ odak derinliklerinde bir doğrultu atımlı fayda oluşabilecek olası kırılmalar uzun mesafeler boyunca enerjisini kaybetmeyen ve yüksek frekans içeriğine sahip Lg dalga formlarının ard arda varışlar halinde sismogramlar üzerinde kaydedilmesine neden olacaktır. Dolayısıyla kullanılan sismogramlar üzerinde Lg dalga formlarının uygun filtreler kullanılarak ortaya çıkarılması sonucunda doğrultu atımlı fayların temel özelliklerinden biri olarak kabul edilen karmaşık kaynak kavramı araştırılabilir.

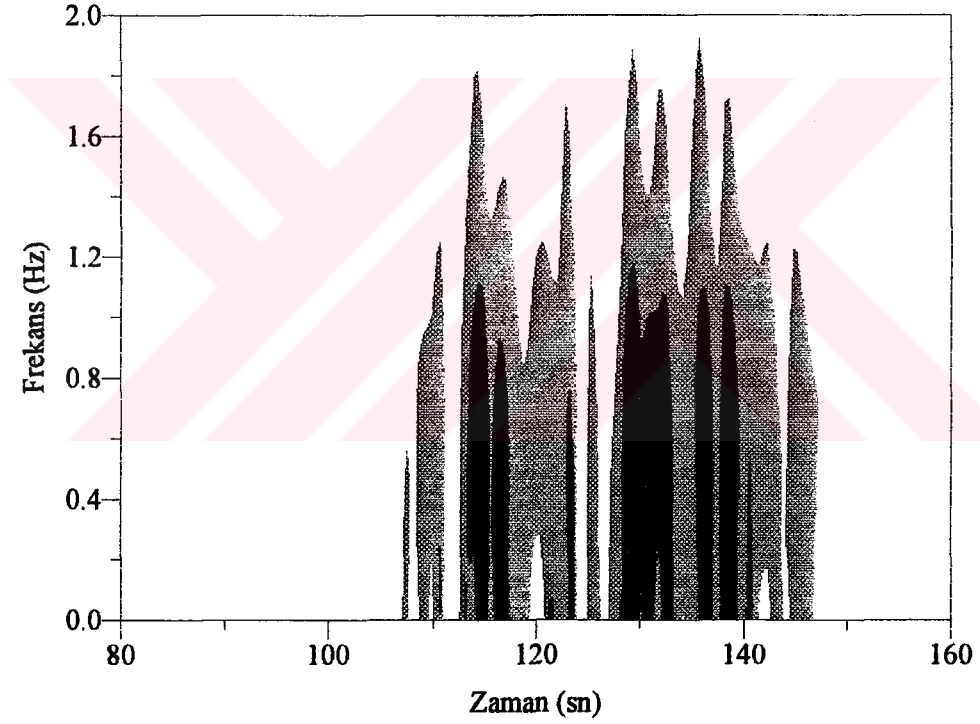
Şekil 14' de Lg dalgası 0.2-2 Hz frekans bandında 3-3.5 km/sn grup hızı ve 3-4 km/sn faz hızı aralığında kendini göstermektedir. Deprem kayıtlarının içerebileceği Lg dalga formlarını daha iyi yorumlayabilmek amacıyla bu grup ve faz hızı aralığında momentleri aynı 0, 15 ve 22 sn ötelenmeye sahip üç kaynaktan meydana gelen bir karmaşık kaynak fonksiyonu düşünülmüştür. Şekil 22' de düşünülen karmaşık kaynak fonksiyonu kullanılarak çizelge 1' de verilen 1. nolu deprem için bir sentetik sismogram ve spektrogram hesaplanmıştır. Sentetik sismogram ve spektrogramda Lg dalga formları maksimum ve minimum grup hızı gruplaşması nedeniyle ikili gruplar halinde verilen ötelenmelerde kendini göstermektedir.

Kullanılan deprem kayıtlarının içerdikleri Lg dalga potansiyeli uygun filtreler yardımıyla ortaya konabilirse sismik enerjiyi üreten kaynağın karmaşıklığı çözülebilir. Şekil 23 ve 25' de her iki depremin içerdikleri Lg dalga formları 0.8-2 Hz köşe frekanslarına sahip bir Butterworth band-geçişli süzgeç kullanılarak kayıt üzerinde belirginleştirilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda filtreden geçirilen deprem kayıtları için elde edilen spektrogramlar da kullanılarak Lg dalga formlarının sismogramlar üzerindeki konumları daha iyi belirlenmiştir. Sismogramlar üzerinde belirlenen Lg dalga formları kullanılarak şekil 24a ve 26a' da her iki deprem için iki farklı karmaşık kaynak fonksiyonu düşünülmüştür. Şekil 24b ve 26b' de ise düşünülen karmaşık kaynak fonksiyonları kullanılarak çizelge 1' de verilen her iki deprem kaynağın karmaşıklığı açısından modellenmeye çalışılmıştır.

(a)

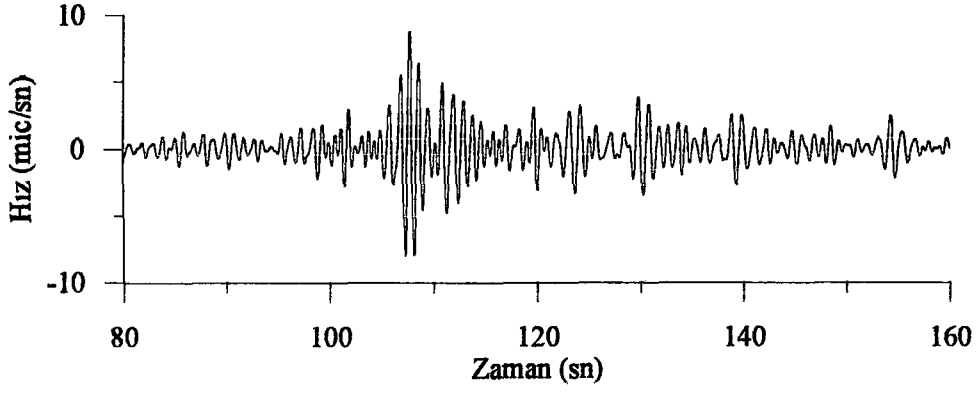


(b)

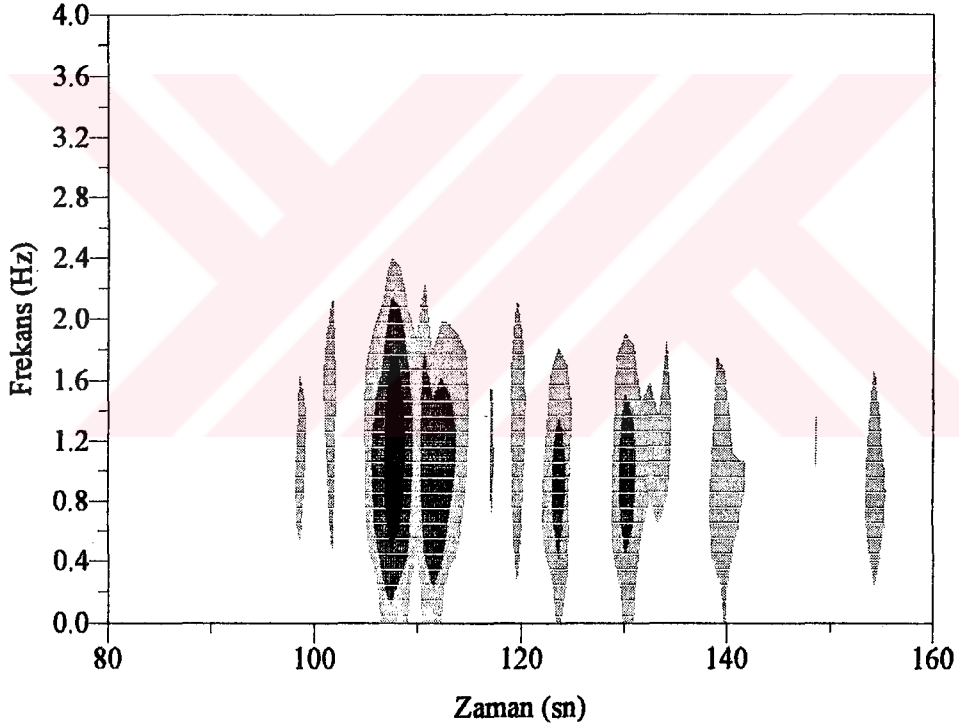


Şekil 22. (a) 3-3.5 km/sn grup hızı ve 3-4 km/sn faz hızı aralığı için 0.2-2 Hz frekans bandında momentleri 1.23×10^{24} ve k' ları 1.0 olarak alınan ve aynı zamanda 0, 15 ve 22 sn ötelenmeye sahip üç farklı kaynaktan oluşan bir karmaşık kaynak fonksiyonu için elde edilen Lg dalgası sentetik sismogramı ve (b) Şekil 22a' da verilen sentetik sismogramın 0.25 sn aralıklarla pencerelenerek 0-2 Hz frekans aralığı için hesaplanan spektrogramı

(a)

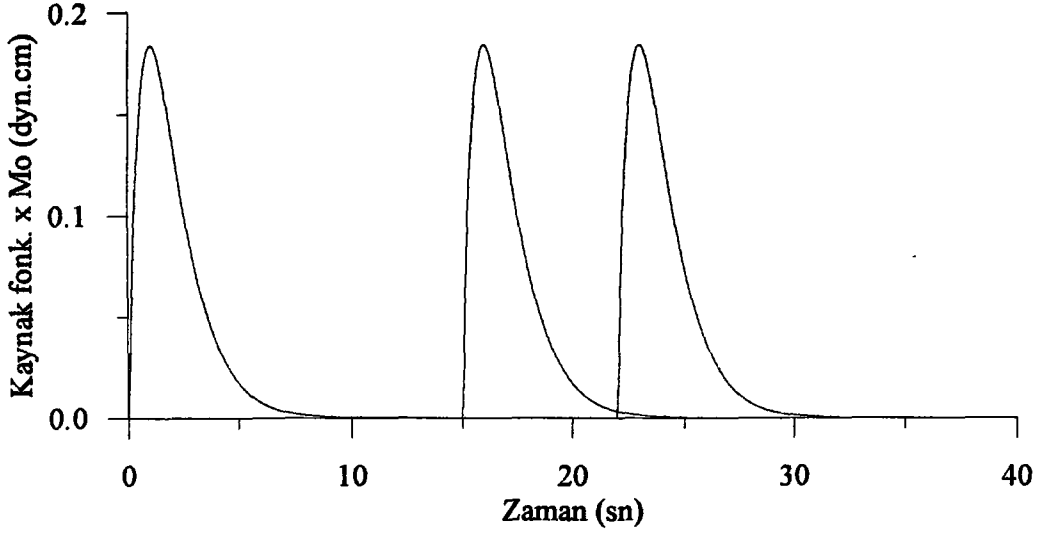


(b)

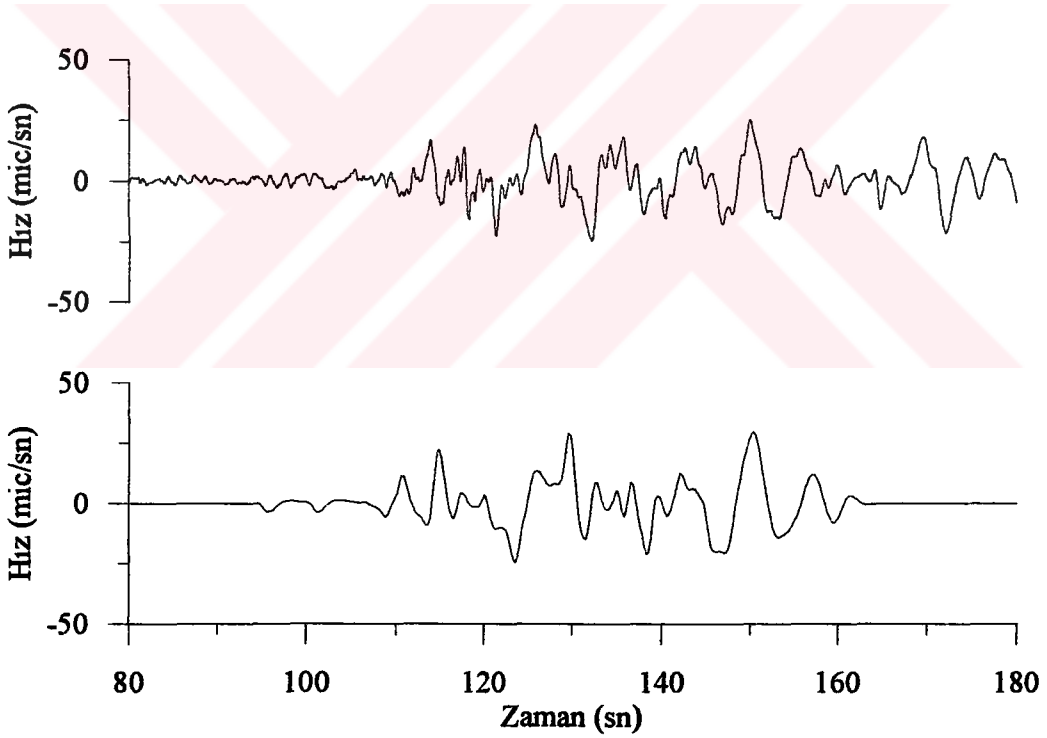


Şekil 23. (a) Çizelge 1' de verilen 1. depreme ait tanjansiyel bileşenin Lg dalga formlarını ortaya çıkarmak için 6 kutuplu ve 0.8-2 Hz köşe frekanslarına sahip bir Butterworth band-geçişli filtreden geçirilerek süzülmesi ve (b) Şekil 23a' da verilen süzülmüş tanjansiyel bileşenin 0.25 sn aralıklarla pencerelenerek 0-4 Hz frekans aralığı için hesaplanan spektrogramı

(a)

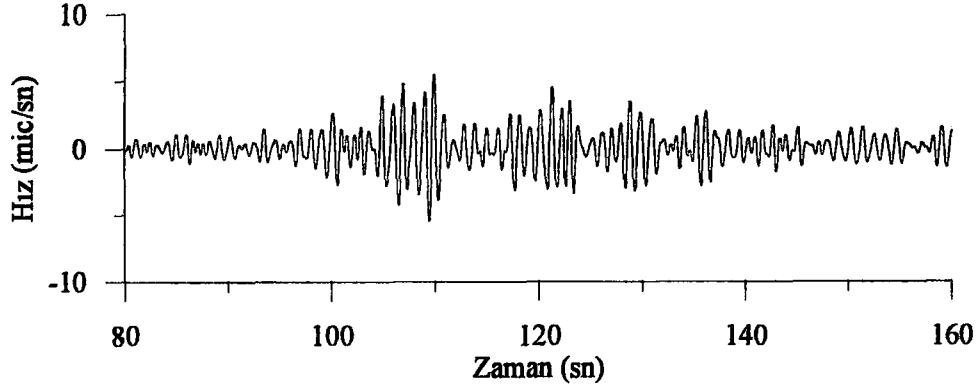


(b)

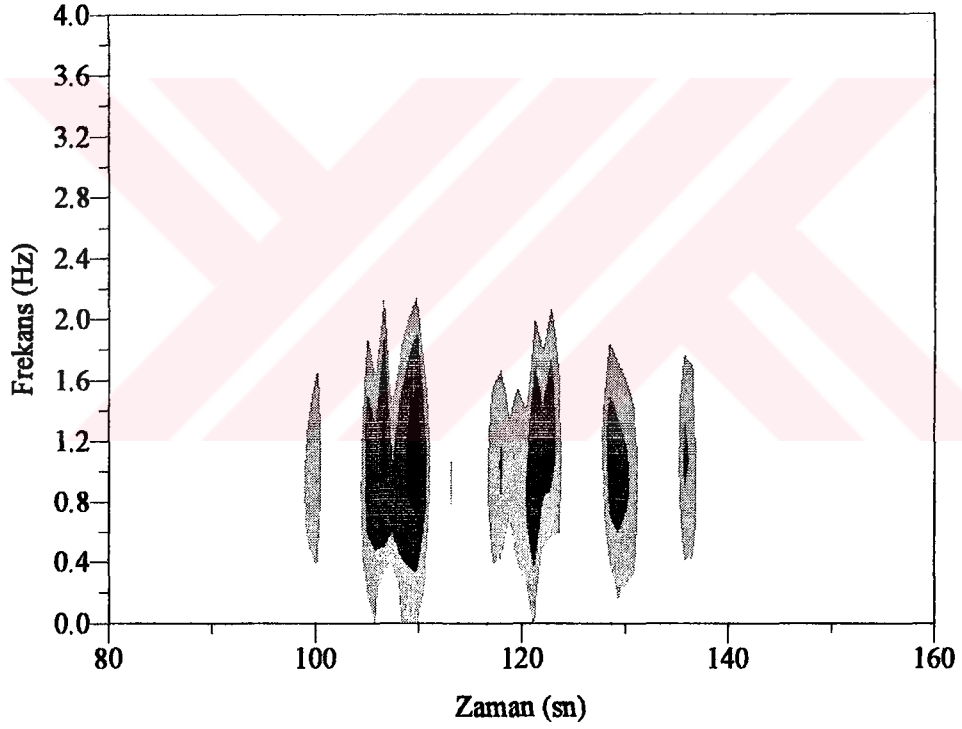


Şekil 24. (a) Şekil 23a ve 23b' de gözlemlenebilen üç ayrı Lg dalga formuna göre momentleri 6.15×10^{23} ve k' ları 1.0 olarak seçilen ve aynı zamanda 0, 15 ve 22 sn ötelenmeye sahip üç farklı kaynaktan meydana gelen bir karmaşık kaynak fonksiyonu ve (b) Çizelge 1' de verilen 1. depremin ve bu deprem için şekil 24a' da verilen karmaşık kaynak fonksiyonu kullanılarak hesaplanan sentetik sismogramın karşılaştırılması

(a)

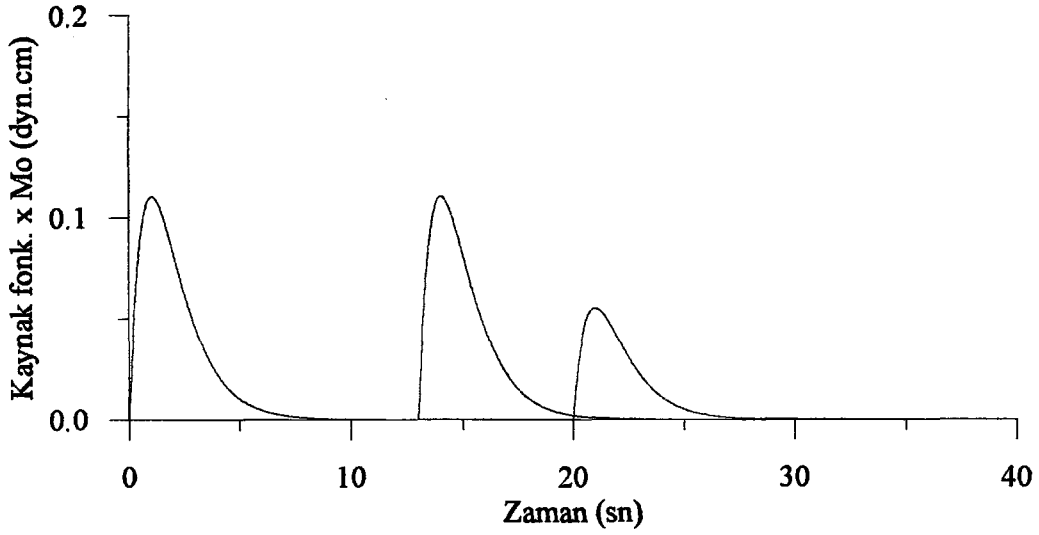


(b)

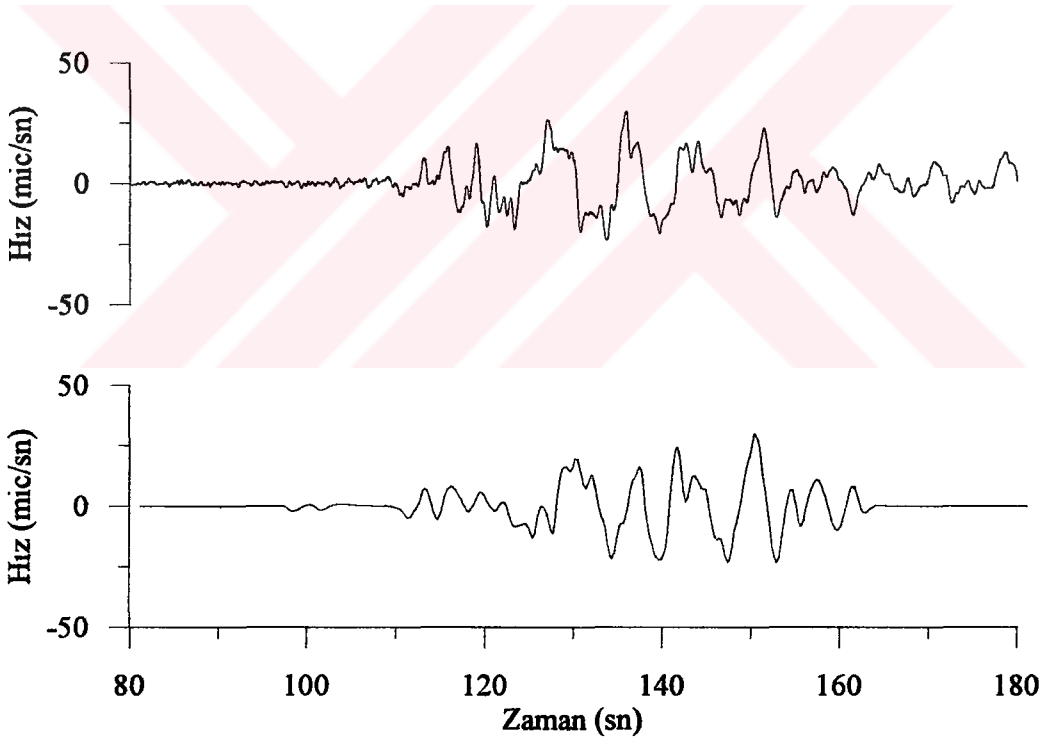


Şekil 25. (a) Çizelge 1' de verilen 2. depreme ait tanjansiyel bileşenin Lg dalga formlarını ortaya çıkarmak için 6 kutuplu ve 0.8-2 Hz köşe frekanslarına sahip bir Butterworth band-geçişli filtreden geçirilerek süzülmesi ve (b) Şekil 25a' da verilen süzölmüş tanjansiyel bileşenin 0.25 sn aralıklarla pencereyenerek 0-4 Hz frekans aralığı için hesaplanan spektrogramı

(a)



(b)



Şekil 26. (a) Şekil 25a ve 25b' de gözlemlenebilen üç ayrı Lg dalga formuna göre momentleri 3.5×10^{23} , 3.5×10^{23} ve 1.75×10^{23} ve k' larını 1.0 olarak seçilen ve aynı zamanda 0, 13 ve 20 sn ötelenmeye sahip üç farklı kaynaktan meydana gelen bir karmaşık kaynak fonksiyonu ve (b) Çizelge 1' de verilen 2. depremin ve bu deprem için şekil 26a' da verilen karmaşık kaynak fonksiyonu kullanılarak elde edilen sentetik sismogramın karşılaştırılması

3. BULGULAR ve İRDELEME

Çizelge 1' de verilen 1. ve 2. depreme ait tanjansiyel bileşenler şekil 7' de karşılaştırıldığı gibi birbirine benzer kayıtlar olduğu görülmektedir. Aynı zamanda şekil 8' de her iki kaydın aynı frekans içeriğine ve her iki kayıt için 0-40 sn zaman aralığı için elde edilen gürültü spektrumlarının aynı genlik seviyesine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca her iki kayıt için gürültü seviyesi yaklaşık 4 Hz' den sonra sinyalin frekans içeriğini etkilemeye başladığı söylenebilir.

Sentetik sismogram hesaplama tekniklerinde karşılaşılan titreşim integrallerinin sayısal olarak çözümünde Filon-5 nokta yöntemi kullanılabilir. Titreşim integrallerinin verilen tolerans sınırları içerisinde en doğru ve bilgisayar zamanı açısından ise en kısa sürede hesaplanması gereklidir. Belirlenen frekans bandından bir kaç örnek frekans değeri seçilir ve en uygun Δu (yatay yavaşlık örnekleme aralığı) değeri bu frekanslarda test edilir. Şekil 9' da sentetik sismogram hesaplamak için kullanılan en uygun Δu örnekleme aralığını tesbit etmek için yapılan hesaplamalar gösterilmektedir. Şekil 9a' da görüleceği gibi 0-2 Hz frekans bandında $\Delta u=0.065$ ve 0.0325 örnekleme aralığı için elde edilen değerler ile $\Delta u=0.001$ için hesaplanan değerler arasında iyi bir yaklaşım söz konusu değildir. Şekil 9b' de $\Delta u=0.01625$, 0.008125 için hesaplanan değerler ile $\Delta u=0.001$ için hesaplanan değerler arasında istenilen tolerans sınırları içerisinde iyi bir yaklaşım olduğu görülmektedir.

Şekil 10a' da kaynak fonksiyonu parametresi k arttıkça kaynak fonksiyonunun enerjisi yüksek frekanslarda artmaktadır. Şekil 10b, 10c ve 10d incelendiği zaman, artan k ile birlikte yaklaşık 110-120 sn arasında kendini gösteren L_g yüzey dalgası fazı genliğinin belirgin bir şekilde arttığı ve ilk varışların ve temel mod yüzey dalgası genliğinin ise belirgin bir şekilde sönümlendiği görülmektedir. Bununla birlikte şekil 12a' da $k=0.5$, 1.0 ve 1.5 için hesaplanan sentetik sismogramların genlik spektrumlarına bakıldığı zaman k parametresi arttıkça sentetik hız kaydının yüksek frekans içeriğinin belirgin bir şekilde arttığı açıkça görülebilir.

Şekil 11 ve 12b' de odak derinliği değişiminin sentetik sismogramlar üzerine etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Şekil 11' de odak derinliği arttıkça ilk S varışı ile derinlik fazı arasındaki zaman farkının arttığı ve sentetik sismogramın yüksek frekans içeriğini

kaybettiği görülebilir. Aynı zamanda odak derinliği azaldıkça temel mod yüzey dalgası genliğinde belirgin bir artış olduğu gözlenmektedir. Şekil 11' e bağlı olarak Şekil 12b incelendiği zaman, odak derinliği azaldıkça hesaplanan sentetik sismogramların genlik spektrumlarının yüksek frekans içeriğinde belirgin bir artış olduğu görülebilmektedir.

Şekil 13b' de, 45° eğimli bir normal fay modeli için elde edilen sentetik sismogram ile şekil 13a' da, 0° atıma sahip bir doğrultu atımlı fay modeli için elde edilen sentetik sismogram karşılaştırılırsa her iki fay modelinin ürettiği sismik dalga formları açısından aralarında önemli bir farkın olmadığı görülebilir. Şekil 13c' de 90° eğime sahip bir normal fay modeli için elde edilen sentetik simogram ile şekil 13a' da 0° atıma sahip bir doğrultu atımlı fay modeli için elde edilen sentetik sismogram karşılaştırılırsa temel mod yüzey dalgası formu ve ilk S varışında önemli bir değişiklik olmazken derinlik fazının ve Lg yüzey dalgası formunun tamamen bozulduğu görülebilir.

Şekil 14a incelendiği zaman, yüksek modlarda 3.25-3.5 km/sn ve 0.1-2 Hz aralığında, 3.5-3.8 km/sn ve 0.4-0.9 Hz aralığında, 3.8-4 km/sn ve 0.5-0.8 Hz aralığında ve 4.0-4.2 km/sn ve 0.5-0.7 Hz aralığında maksimum ve minimum grup hızı gruplaşmasının olduğu görülmektedir. Grup hızı eğrilerinde görülen bu gruplaşma faz hızı eğrilerinde belirgin bir şekilde kendini göstermemektedir. Şekil 14b' deki grup ve faz hızı eğrileri incelendiğinde frekans arttıkça grup ve faz hızı değerlerinin azalma eğiliminde olduğu, herbir modun belirli bir frekans bandında kendini gösterdiği ve aynı zamanda mod sayısı arttıkça grup ve faz hızlarında bir önceki moda göre belirgin bir artışın olduğu görülmektedir. Şekil 14c' de temel ve yüksek modlar için hesaplanan enerji eğrilerinde de grup hızı eğrilerine benzer şekilde maksimum ve minimum gruplaşmaların olduğu açıkça görülebilmektedir. Özellikle yüksek modlu grup hızı eğrilerinde 3.25-3.5 km/sn aralığında kendini gösteren gruplaşma enerji eğrilerinde 7.5-7.75 kg/m-n aralığında ve 0.1-2 Hz frekans bandında da kendini belirgin şekilde göstermektedir. Şekil 14d' de görünür kalite faktörü Q' nun frekans bağımlı olduğu ve artan frekansla birlikte artan değerlere sahip olduğu görülmektedir.

Herhangi bir frekanstaki grup ve faz hızı ile eigen fonksiyonunun derinliğe göre değişimi arasında bir ilişki kurabilmek amacıyla şekil 15 ve 16 da herbir mod için eigen fonksiyonlarının derinliğe göre değişimi faz ve grup hızlarının frekansa göre değişimiyle birlikte gösterilmiştir. Herbir mod için ayrı ayrı hesaplanan eigen fonksiyonlarının derinliğe ve frekansa göre değişimi incelenerek frekans arttıkça sismik enerjinin daha çok

yüzeğe yığılım gösterdiği ve aynı zamanda mod sayısı arttıkça yüksek modların artan frekansla birlikte daha derine enerji taşıyabildikleri gözlenmektedir. Aynı zamanda artan frekansla birlikte grup ve faz hızlarında bir azalma eğilimi artan mod sayısı ile birlikte ise düşük modlara göre grup ve faz hızlarında bir artış eğilimi olduğu gözlenmektedir. Özellikle grup hızı ve enerji eğrilerinde belirli bir frekans bandında kendini gösteren maksimum ve minimum gruplaşmalar eigen fonksiyonlarında artan mod sayısı ile birlikte kendini ters polarizasyonla ortaya koymaktadır.

Şekil 17, 18, 19, 20 ve 21' de Mindevalli tarafından Türkiyenin doğusu için önerilen kabuk modeline ait düşey S dalga hız yapısında yapılan değişikliklerin hesaplanan sentetik sismogramlar üzerine etkisi gösterilmiştir.

Şekil 17b çizelge 1' de verilen birinci deprem için çizelge 2' de verilen kabuk modeli kullanılarak elde edilen sentetik sismogramı göstermektedir. Şekil 18b şekil 17b ile kıyaslandığı zaman ilk S varışı, derinlik fazı ve Lg yüzey dalgası formunda önemli bir değişiklik olmadığı söylenebilir. Aynı zamanda yüzeğe yakın tabaka hızlarındaki değişimin temel mod yüzey dalgası kısmını etkilediği ve şekil 17b ile kıyaslandığında geç varış zamanıyla birlikte daha uzun temel mod yüzey dalgası formunun oluştuğu gözlenmektedir. Şekil 19b ile şekil 17b karşılaştırılırsa en fazla Lg yüzey dalgası formunun 7.5-35 km arasındaki S dalga hız değişiminden etkilendiği görülebilir. Şekil 20b ile şekil 17b karşılaştırıldığında ise sadece S varışı ve derinlik fazının 35-90 km arasındaki S dalga hız değişiminden etkilendikleri ve şekil 17b' ye göre daha geç geldikleri söylenebilir. Son olarak şekil 21b ile şekil 17b karşılaştırılırsa 70-220 km arasında S dalga hız değişiminin hemen hemen hiçbir kabuksal fazı etkilemediği sonucuna varılabilir.

Şekil 22a 3-3.5 km/sn grup hızı, 3-4 km/sn faz hızı aralığında ve 0.2-2 Hz frekans bandında ilk kaynağa göre 15 ve 22 sn ötelenmeye sahip üç farklı kaynaktan meydana gelen bir karmaşık kaynak fonksiyonu için hesaplanan Lg yüzey dalgası sentetik hız simogramını göstermektedir. Yaklaşık olarak birinci kaynağa ait Lg yüzey dalgası 115 saniyede, ikinci kaynağa ait Lg yüzey dalgası 130. saniyede ve üçüncü kaynağa Lg yüzey dalgası formu ise 137 saniyede kendini göstermektedir. Şekil 22b' de hesaplanan spektrogramda ise herbir kaynağa ait Lg dalga formları hemen hemen aynı frekans bandında ve 115, 130 ve 137 saniyelerde ikili gruplar halinde kendini göstermektedir.

Şekil 23a' da çizelge 1' de verilen birinci depremin 0.8-2 Hz frekans bandında süzölmüş tanjansiyel bileşeni görölmektedir. Şekil 23a incelendiğinde Lg dalga formları yaklaşık olarak 105, 120 ve 127 saniyelerde ikili gruplar halinde kendini göstermektedir. Aynı zamanda üç Lg dalga formu da hemen hemen aynı frekans içeriğine sahiptir. 120 ve 127 saniyelerdeki Lg dalga formları 105 saniyede görölen Lg dalga formuna göre daha düşük genlik seviyesinde kendilerini göstermektedirler. Lg dalga formları şekil 23b' de verilen spektrogramda da yaklaşık olarak 105 120 ve 127 saniyelerde birbirini izleyen ikili gruplar halinde görölmektedir. Şekil 23a ve 23b' de kendini gösteren Lg dalga formları kullanılarak şekil 24a' da verildiği gibi bir karmaşık kaynak fonksiyonu düşünölmüştür. Karmaşık kaynak fonksiyonunu, herbir kaynağın momenti 6.15×10^{23} , $k=1$ olarak seçilen ve aynı zamanda 0, 15 ve 22 sn ötelenmeye sahip üç farklı kaynaktan meydana gelmektedir. Şekil 24b düşünölen karmaşık kaynak mekanizması için elde edilen sentetik sismogramı göstermektedir.

Şekil 25a' da çizelge 1' de verilen 2. nolu depremin 0.8-2 Hz frekans bandında süzölmüş tanjansiyel bileşeni görölmektedir. Şekil 23a' da olduğu gibi şekil 25a' da da Lg dalga formları yaklaşık olarak 105, 118 ve 125 saniyelerde ikili gruplar halinde kendini göstermektedir. 125 saniyedeki Lg dalga formu 105 ve 118 saniyelerde görölen Lg dalga formlarına göre daha düşük genlik seviyesine sahiptir. Şekil 25a' da kendini gösteren Lg dalga formları şekil 25b' de verilen spektrogramda da yaklaşık olarak 105 118 ve 125 saniyelerde birbirini izleyen ikili gruplar halinde görölmektedir. Şekil 25a ve 25b' de kendini gösteren Lg dalga formları kullanılarak momentleri 3.5×10^{23} , 3.5×10^{23} ve 1.75×10^{23} olan k' ları 1.0 olarak seçilen ve aynı zamanda 0, 13 ve 20 sn ötelenmeye sahip üç farklı kaynaktan meydana gelen bir karmaşık kaynak fonksiyonu düşünölmüştür. Şekil 26a' da gösterilen kaynak fonksiyonu kullanılarak şekil 26b' de çizelge 1' de verilen ikinci deprem için hesaplanan sentetik sismogram elde edilmiştir. Şekil 24b ve şekil 26b' de çizelge 1' de verilen deprem kayıtlarıyla bu depremlere ait sentetik sismogramlar kıyaslandığı zaman aralarında kayda değeri bir uyumun olduğu görölebilir. Hesaplanan sentetik sismogramların frekans içeriği 0-2 Hz arasında kullanılan depremlerin frekans içeriği ise 0-25 Hz arasında değışim göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Kullanılan her iki depremin benzerliğini kullanarak sismik enerjinin hemen hemen aynı ortam içinde seyahat ettiği ve hemen hemen aynı kaynak mekanizmasına sahip olduğu sonucuna varılabilir.

Sentetik sismogram hesaplama tekniklerinde karşılaşılan titreşim integrallerinin sayısal olarak çözümünde Filon-5 nokta yöntemi kullanılmıştır. 0-2 Hz frekans aralığında yapılan hesaplamaların verilen tolerans sınırları içerisinde doğru sonuçlar üretebilmesi için kullanılacak Δt örnekleme aralıkları 0.008125 ve daha küçük değerler olması gerekmektedir. Bilgisayar zamanının mümkün olduğunca kısa olabilmesi ve aynı zamanda yapılabilecek hesaplamaların verilen tolerans sınırları içerisinde istenilen güvenilirlikte sonuçlar üretebilmesi için en uygun ve en büyük Δt örnekleme aralığı 0.008125 olarak alınmıştır.

Kaynak fonksiyonu parametresi k hesaplanan sentetik sismogramların frekans içeriğini düzenlemektedir. Yapılan kıyaslamalar sonucunda çizelge 1' de verilen 1. ve 2. nolu depremlerin sentetiklerinin üretilmesinde kaynak fonksiyonu parametresi $k=1.0$ (risetime $\approx 5-6$ sn) olarak alınmıştır.

Odak derinliğinin değişimi ilk varış ile derinlik fazı arasındaki zaman farkını, temel mod ve L_g yüzey dalgası formunu ve aynı zamanda tüm sinyalin frekans içeriğini değiştirmektedir. Odak derinliği azaldıkça yüzeye kanalize olan sismik enerji miktarı ve yüksek modlu yüksek frekanslı sismik enerjinin yüzey dalgası oluşumuna katkısı artacaktır. Dolayısıyla odak derinliği azaldıkça sığ odaklı kaynakların ürettiği yüksek frekans içeriğine sahip L_g ve temel mod yüzey dalgası formu daha belirgin şekilde kendini gösterecektir. Bu değişim odak derinliğinin artması yönünde olduğu zaman şekil 12a' da görüleceği gibi sığ odaklı kaynakların ürettiği sismik enerjinin derin odaklı kaynakların ürettiği sismik enerjiden daha yüksek frekans içeriğine sahip olarak alıcılarda kaydedildiği sonucuna varılabilir.

Kaynak parametrelerinden atım, eğim ve doğrultunun değişimi özellikle farklı formlarda yüzey dalgalarının oluşumuna neden olmaktadır. Yapılan kıyaslamalar sonucunda çizelge 1' de verilen depremlere ait sentetiklerin üretilmesinde atımı 0° , eğimi 90° ve doğrultusu 30° olan bir doğrultu atımlı fay modeli düşünülmüştür.

Yüksek modlara ait grup hızı eğrilerinde yaklaşık olarak 3.8-4 km/sn grup hızı aralığında ve 0.5-0.8 Hz frekans bandında kendini gösteren maksimum ve minimum grup hızı gruplaşması Mindevalli tarafından önerilen kabuk modeline göre şekil 17b' de hesaplanan sentetik sismogramda ilk S varışına (1), 3.5-3.8 km/sn grup hızı aralığında ve 0.4-0.9 Hz frekans bandında kendini gösteren grup hızı gruplaşması derinlik fazına (2), 3.25-3.5 km/sn grup hızı aralığında ve 0.1-2 Hz frekans bandında kendini gösteren grup hızı gruplaşması Lg yüzey dalgası fazına (4 ve 3) karşılık gelmektedir. Şekil 14a' da verilen grup hızı eğrilerinde görüldüğü gibi temel mod yüzey dalgası yüksek modlara göre daha düşük grup hızlarına sahiptir. Dolayısıyla temel mod yüzey dalgası şekil 17b' de gösterilen sentetik sismogram üzerinde (5) nolu sismik dalga fazına karşılık gelmektedir. Aynı zamanda şekil 17b' de gösterilen sentetik sismogramın yaklaşık olarak 110-125 sn zaman aralığı için yüksek modların temel mod yüzey dalgası üzerine binerek seyahat ettiği sonucuna varılabilir. Lg yüzey dalgası (4 ve 3) yüksek modlu grup hızı eğrilerinde 3.25-3.5 km/sn grup hızı aralığı ve 0.1-2 Hz frekans bandında yüksek modlu enerji eğrilerinde ise 7.5-7.75 kg/m-n enerji aralığı ve 0.2-2 Hz frekans bandında kendini göstermektedir. Artan frekansla birlikte enerjisini kaybetmediği için yüksek frekans içeriği ile birlikte yüzeye yakın yüksek Q' lu tabakalar içerisinde çok fazla soğrulmadan uzun süre seyahat edebileceği sonucuna varılabilir. (1) ve (2) nolu fazlar yüksek modlarda yüksek grup hızına ve yüksek enerji seviyesine sahip olmakla birlikte yüksek frekanslarda Lg yüzey dalgalarına göre enerjilerini daha çabuk kaybetmektedirler. Dolayısıyla (1) ve (2) nolu fazların Lg yüzey dalgasının içinde seyahat ettiği tabakalara göre yüksek frekansların daha çabuk soğrulanabileceği, aynı zamanda ortam hızının daha fazla olduğu ve daha derinde yeralan tabakalar içerisinde seyahat ettikleri sonucuna varılabilir. Grup hızı ve enerji eğrilerinde yüksek modlarda kendilerini gösteren maksimum ve minimum gruplaşmalar, daha çok yüksek frekanslı yüksek modların düşey S dalga hızı yapısındaki düzensiz hız artımından ve azalımından etkilenmeleriyle oluşabilecekleri sonucuna varılabilir. Temel mod yüzey dalgası içinse modelin düzenli bir S dalga hızı değişimine sahip olduğunu bu nedenle temel moda ait grup hızı eğrilerinde Airy fazı oluşumunun gözlenmediğini söyleyebiliriz.

Eigen fonksiyonları, faz ve grup hızı eğrileri birlikte incelendiğinde çizelge 1' deki birinci deprem için düşünülen 12 km odak derinliğine sahip kaynak modelinin daha çok yüksek frekanslı yüksek modlu yüzey dalgalarını tetikleyebildiği ve aynı zamanda

kaynağın ürettiği enerjinin büyük bir kısmının yüksek modlu Lg dalgaları tarafından taşındığı sonucuna varılabilir. Dolayısıyla yüksek modlarda artan frekansla birlikte enerjisini kaybetmeyen Lg yüzey dalgasının sığ odak derinliğine sahip kaynakların ürettiği sismik enerjinin büyük bir kısmını taşıyabileceği sonucuna varılabilir.

Yüzeye yakın sığ tabakalar (yaklaşık olarak 0-5 km)' in hız gradyentinin artırılması sığ odaklı kaynakların ürettiği sismik enerjinin yüzeye daha fazla kanalize olmaya zorlanmasına neden olur. Aynı zamanda grup hızı eğrilerinin eğimi artar ve düşük frekanslı olaylar daha erken yüksek frekanslı olaylar ise daha geç gelir. Artan hız gradyenti ile birlikte yüksek frekanslı olayların yüzey dalgası oluşumuna katkısı artar ve yüzey dalgası yüksek frekans içeriği düşük frekanslara göre daha geç gelir. Dolayısı ile elde edilen sentetik sismogramın temel mod yüzey dalgası kayıt süresi yüksek frekanslarda artan enerjisi ile birlikte uzama eğilimi gösterir. Sonuç olarak yüzeye yakın sığ tabakalar(düşük hızlı sediment tabakaları)' in kalınlıklarının, bu tabakalara ait hız gradyentinin değişimi yüzey dalgası oluşumunda büyük rol oynamaktadır.

Yaklaşık olarak 7.5-35 km arasında tabaka hızlarının % 2 oranında düşürülmesi 30-40 km arasındaki hız gradyentini artırmış ve Lg yüzey dalgası oluşumuna katkısı olabilecek daha fazla sismik enerjinin daha çok yüzeye kanalize olmasına neden olmuştur. Artan hız gradyenti ile birlikte genişleyen frekans bandında düşük ve yüksek frekanslara ait grup hızı değerlerinin birbirine yaklaşmasına dolayısı ile gözlenen Lg yüzey dalga formunun sıkışıp enerjisinin artmasına neden olmuştur. Sonuç olarak 7.5-35 km arasında tabaka hızlarının değişimi en çok Lg yüzey dalgası şeklini etkilemektedir.

Yaklaşık olarak 35-90 km arasında kalan tabakaların S dalga hızlarının %2 oranında düşürülmesi sadece ilk S varışı ve derinlik fazının etkilendiği 70 km' den sonraki tabaka hızlarının %2 oranında azalması ise hemen hemen hiçbir sismik dalga fazının etkilenmediği görülmüştür. Sonuç olarak verilen modelde 70 km' den daha derinde bulunan tabakaların 12 km odak derinliği ve 378 km episantr uzaklığı için elde edilen sentetik sismogramların hız, frekans ve enerji içeriğini çok fazla etkilemedikleri söylenebilir.

Yerkabuğu model çalışmalarında faylanma mekanizmasının ve odak parametrelerinin tesbit edilebilmesi yapılacak çalışmanın verimini ve sonuç olarak ortaya konacak modelin kullanılabilirliğini artırır. Fay düzlemi çoğu kez homojen bir yapıya sahip değildir. Fay düzlemi üzerinde farklı bölgelerdeki farklı deformasyon enerjisinin

birikimi karmaşık kaynak kavramının temelini oluşturmaktadır. Doğrultu atımlı fayların faylanma mekanizmaları çoğu kez karmaşıktır. Tek istasyon üç bileşen kayıtlar kullanılarak faylanma mekanizmasının tesbit edilmesi oldukça güçtür. Doğrultu atımlı faylarda meydana gelebilecek depremlerde odak çoğu kez sığ derinliklerde yer alır. Dolayısıyla doğrultu atımlı faylar deprem sonrası Lg yüzey dalgası oluşumu açısından iyi bir kaynak modeli olarak düşünülebilir. Lg yüzey dalgaları granitik tabaka içerisinde yüksek frekans içeriğini çok fazla kaybetmeden uzun mesafeler boyunca seyahat edebilirler. Lg yüzey dalgalarının bu özelliğinden yararlanarak karmaşık kaynak mekanizmasını oluşturan her bir kaynağın Lg yüzey dalgası potansiyeli ortaya konabilir. Sonuç olarak karmaşık kaynağı meydana getiren her bir kaynağın ürettiği Lg yüzey dalgası formu kullanılarak karmaşık kaynak mekanizması çözülebilir. Şekil 22a' da 0, 15 ve 22 sn ötelenmeye sahip üç kaynaktan oluşan bir karmaşık kaynak mekanizması için Lg dalga formlarının modellenmesi gösterilmektedir. Her bir kaynağın ürettiği Lg dalga formu karmaşık kaynak fonksiyonunun sahip olduğu ötelenmelerde kendini açıkça göstermektedir. Şekil 22a için hesaplanan spektrogramda Lg dalga formları kendilerini grup hızı eğrilerinde meydana gelen maksimum ve minimum grup hızı gruplaşması nedeniyle verilen ötelenmelerde fakat ikili gruplar halinde göstermektedir. Dolayısıyla her bir ikili Lg dalga formu tek bir Lg dalga formu olarak düşünülebilir.

Birinci ve ikinci depremin modellenmesinde çizelge 1' de verilen parametrelerin ve çizelge 2' de önerilen kabuk modelinin doğru olduğu ve aynı zamanda kaynağın karmaşık bir yapıya sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda her iki depremin modellenmesinde Lg yüzey dalgaları kullanılarak karmaşık kaynak mekanizmasının çözümü üzerinde durulmuştur. Lg yüzey dalgası, grup hızı eğrilerinde de görüldüğü gibi 0.2-2.0 Hz frekans bandında kendini daha belirgin gösterdiği düşünülürse 0.2-2 Hz frekans aralığında birinci ve ikinci depremin içerdiği Lg dalga formlarının değişik band-geçişli filtreler kullanılarak ortaya çıkarılabileceği sonucuna varılabilir.

Şekil 23a' da çizelge 1' de verilen birinci depreme ait transvers bileşen 0.8-2 Hz köşe frekanslarına sahip 6 kutuplu bir Butterworth band-geçişli filtreden geçirilerek süzülmüştür. Sismogramın içerdiği Lg dalga formları yaklaşık olarak 105, 120 ve 127. saniyelerde kendilerini göstermektedir. Aynı zamanda şekil 23b' deki spektrogramda da Lg dalga formları 105, 120 ve 127. saniyelerde kendilerini ikili gruplar halinde göstermektedir. Kendilerini ikili gruplar halinde gösteren Lg yüzey dalgası formları

karmaşık kaynağı meydana getiren kaynakların herbirine ait olduğu düşünülebilir. Dolayısıyla çizelge 1’de verilen birinci deprem için momentleri 6.15×10^{23} , k' ları 1.0 ve ötelenmeleri 0, 15 ve 22 sn olan üç farklı kaynaktan meydana gelen bir karmaşık kaynak fonksiyonu düşünülebilir. Şekil 23b’ de olduğu gibi şekil 25b’ deki spektrogramda da Lg dalga formları 105, 118 ve 125 saniyelerde kendilerini ikili gruplar halinde göstermektedir. Çizelge 1’de verilen ikinci deprem için momentleri 3.5×10^{23} , 3.5×10^{23} , 1.75×10^{23} , k' ları 1.0 ve ötelenmeleri 0, 13 ve 20 sn olan üç farklı kaynaktan meydana gelen bir karmaşık kaynak fonksiyonu düşünülebilir. Çizelge 1’deki 1. ve 2. nolu depremler için elde edilen sentetik sismogramlar şekil 24b ve 26b’ de transvers bileşenleri ile kıyaslandığı zaman toplam kayıt uzunluğu, temel mod ve Lg yüzey dalgası formu, sismik dalgaların istasyona varış zamanları ve aynı zamanda sismik dalga formları arasındaki genlik oranları açısından kayda değer bir uyumun olduğu açıkça görülebilir. Şekil 24b ve 26b’ de her iki olay için hesaplanan sentetik sismogramlar karşılaştırıldığında her iki olaya ait transvers bileşenlerde olduğu gibi elde edilen sentetiklerin de birbirine benzer özellikler taşıdığı görülebilmektedir.

Düşünülen kaynak fonksiyonları için elde edilen sentetik sismogramlar ile kayıtlar arasındaki benzerlikten kaynağın düşünüldüğü gibi karmaşık bir yapıya sahip olduğu ve Lg yüzey dalgası oluşumunun doğrultu atımlı fayların kaynak mekanizmasını açıklamak için kullanılabileceği sonucuna varılabilir.

5. ÖNERİLER

Tek istasyon üç bileşen dijital kayıtlar kullanılarak yapılan yerkabuğu model çalışmalarında sonuç olarak önerilecek modelin kullanılabilirliği kullanılan sismogramın kalitesine, odak mekanizmasının mümkün olduğunca gerçeğe yakın tanımlanmasına, incelenen bölge için daha önce yapılan çalışmaların sayısına ve uygulanan yöntemin geçerliliğine bağlıdır.

Sentetik sismogram hesaplama tekniklerinde karşılaşılan titreşim integrallerinin sayısal olarak verilen tolerans sınırları içerisinde en kısa bilgisayar zamanı kullanılarak çözülebilmesi için Filon-5 nokta yöntemi kullanılabilir. Aynı zamanda diğer mühendislik dallarında da titreşim integralleri (oscillatory integrals)'nde olduğu gibi analitik olarak çözümü yapılamayan ve diğer sayısal yöntemlerle çözümü çok uzun bilgisayar zamanı gerektiren integral formları ile karşılaşılabılır. Bu gibi integral formları da Filon-3, 5 veya 7 yöntemi kullanılarak çözülebilir.

Değişik odak parametreleri kullanılarak elde edilen sentetik sismogramlar incelendiğinde farklı odak parametreleri için farklı yüzey dalgası formlarının oluştuğu görülebilir. Bu nedenle odak mekanizması çözümünde yüzey dalgalarının kullanılabilceği sonucuna varılabilir.

Birden fazla istasyonda kaydedilen depremlere ait sismogramlar kullanılarak elde edilen gözlemsel grup hızı, faz hızı ve enerji eğrileri teorik eğrilerle kıyaslanarak ta yerkabuğu ile ilgili model çalışmaları yapılabilir.

Doğrultu atımlı faylar üzerinde oluşabilecek depremler için kaynak çoğu kez sığ odaklı ve karmaşıktır. Ayrıca doğrultu atımlı faylar Lg yüzey dalgası oluşumu açısından iyi bir kaynak olarak düşünülebilir. Dolayısı ile doğrultu atımlı faylarla ilgili karmaşık kaynak mekanizmalarının çözümünde sismogramın içerdiği Lg yüzey dalgası potansiyeli kullanılabilir. Ortam parametrelerinin bilindiği ve herbir kaynağın frekans içeriğinin aynı olduğu kabul edilirse teorik karmaşık kaynak fonksiyonu $f(t)=m_0f_0(t)+m_1f_1(t+dt)+m_2f_2(t+2dt)+...+m_nf_n(t+ndt)$ olarak düşünülebilir. $f(t)$ fonksiyonu kullanılan sayısal değerlere en küçük kareler yöntemi kullanılarak yaklaştırılır ve sonuç olarak karmaşık kaynak fonksiyonunu oluşturabilecek herbir kaynağa ait momentler ve ötelenmeler bulunabilir.

6. KAYNAKLAR

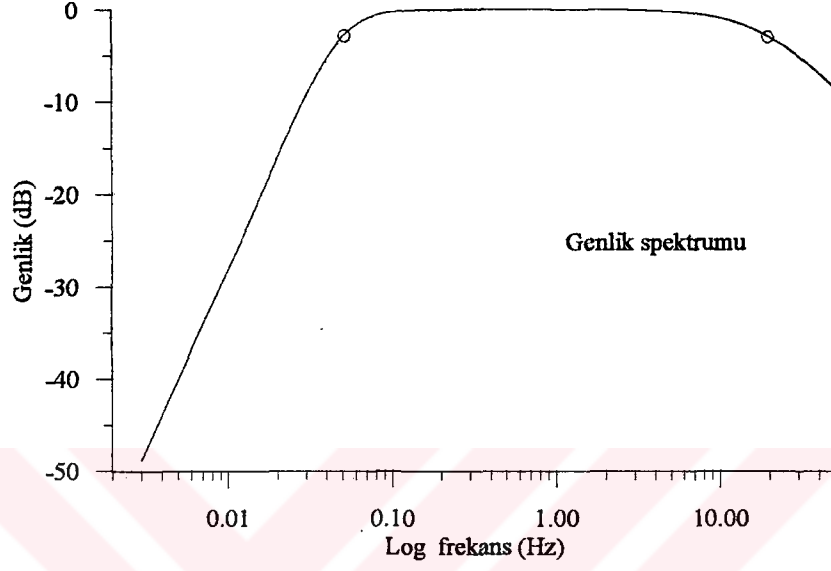
1. Haskell, N. A., The Dispersion Of Surface Waves On Multi-Layered Media, Bull. Seism. Soc. Am., 43, (1953) 17-34.
2. Harkrider, D. G., Surface Waves In Multi-Layered Elastic Media I: Rayleigh And Love Waves From Buried Sources In A Multilayered Half-Space, Bull. Seism. Soc. Am., 54, (1964) 627-679.
3. Knopoff, L., A Matrics Method For Elastic Waves Problems, Bull. Seism. Soc. Am., 54, (1964) 983-993.
4. Oliver, J., And Ewing, M., Higher Modes Of Continental Rayleigh Waves, Bull. Seism. Soc. Am., 47, (1957) 187-204.
5. Oliver, J., And Ewing, M., Normal Modes Of Continental Surface Waves, Bull. Seism. Soc. Am., 48, (1958) 33-49.
6. Kovach, R. L., And Anderson, D.L., Hihgher Mode Surface Waves And Their Bearing On The Structure Of Earth's Mantle, Bull. Seism. Soc. Am., 54, (1964) 161-182.
7. Knopoff, L., Schwab, F., And Kausel, E., Interpretation Of Lg, Geophys. J. R. Astr. Soc., 33, (1973) 983-993.
8. Harvey, D., Seismogram Synthesis Using Normal Mode Superposition: The Locked Mode Approximation, Geophys. J. R. Astr. Soc., 66, (1981) 37-70.
9. Filon, L. N. G., On A Quadrature Method For Trigonometric Integrals, Proc. R. Soc., Edinb., 49, (1928) 38-47.
10. Tranter, C. J., Integral Transforms In Mathematical Physics, 3rd, Methuen, London, (1966).
11. Luke, Y. L., On The Computation Of Ossilatory Integrals, Proc. Camb. Phil. Soc., 50, (1954) 269-277.
12. Flinn, E. A., A Modification Of Filon's Method For Numerical Integration, J. Ass. Comput. Mach., 7, (1960) 181-184.
13. Phinney, R. A., Theoretical Calculation Of The Spectrum Of First Arrivals In Layered Elastic Mediums, J. Geophys. Res., 70, (1965) 5107-5123.

14. Apsel, R. J., Computation Of Complete Theoretical Seismograms In A Multilayered Viscoelastic Half Space, Trans. Am. Geophys. Un., 58, (1977) 1192.
15. Apsel, R. J., Dynamic Green's Functions For Layered Media And Application To Boundary Value Problems, Ph. D. Thesis, University Of California, San Diego, (1979).
16. Brüstle, W., And Müller, G., Moment And Duration Of Shallow Earthquakes From Love-Wave Modelling For Regional Distances, Physics Of The Earth And Planetary Int., 32, (1983) 312-324.
17. Yamanaka, H., Seo, K., And Samano, T., Effects Of Sedimentary Layers On Surface Wave-Propagation, Bull. Seism. Soc. Am., 79, (1989) 631-645.
18. Panza, G. F., Attenuation Measurements By Multimode Synthetic Seismograms, Digital Seismology And Fine Modeling Of The Litosphere, P. Press, (1989).
19. Cheng, C. C., And Mitchell, B. J., Crustal Q Structure In The United States From Multimode Surface Waves, Bull. Seism. Soc. Am., 71, (1981) 161-181.
20. Mindevalli, Ö. Y., Crust And Upper Mantle Structure Of Turkey And The Indian Sub-Continent Surface Wave Studies, Ph. D. Dissertation, Saint Louis Univ., (1988).
21. Kulhanek, O., Anatomy Of Seismograms, Elsevier Science Pub. Co., (1990).
22. Bath, M., Introduction To Seismology, Natur Och Kultur Stockholm, (1973).
23. Fowler, C. M. R., The Solid Earth, Cambridge Univ. Press, (1990).
24. Lay, T., W., T. C., Modern Global Seismology, Academic Press. Inc., (1995).
25. Hanyga, A., Lenartowicz, E., And Pajchel, J., Seismic Wave Propagation In The Earth, PWN-Polish Scientific Pub., (1985).
26. Bullen, K. E., And Bolt, B. A., Fourth Edition, An Introduction To The Theory Of Seismology, Cambridge University Press, (1985).
27. Sikharulidze, L. I., The Structure Of The Earth From Surface Waves, Izd. Mecniereba, Tbilisi In Russian, (1978).
28. Frazer, L. N., And Gettrust, J. F., On A Generalization Of Filon's Method And The Computation Of The Oscillatory Integrals Of Seismology, Geophys. J. R. Ast. Soc., 76, (1984) 461-481.

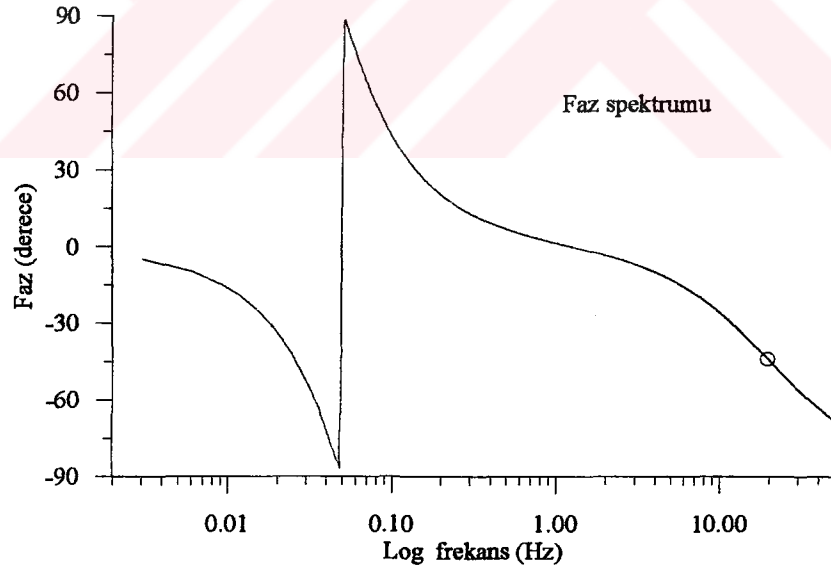
29. Frazer, L. N., Synthesis Of Shear-Coupled PL, Eartq. Notes, 49, No. 4, (1978a) 79.
30. Burden, R. L., And Faires, J. D., Numerical Analysis, Third Edition, PWS Pub., (1985).
31. Chen, X., A Systematic And Efficient Method Of Computing Normal Modes For Multilayered Half-Space, Geophys. J. Int., 115, (1993) 391-409.
32. Luco, J. E., And Apsel, R. J., On The Green's Function For A Layered Half-Space, Bull. Seism. Soc. Am., 73, (1983) 187-204.
33. Aki, K., And Richards, P. G., Quantitative Seismology: Theory And Methods, W. H. Freeman, (1980).
34. Jeofizik Mühendisleri Odası, Jeofizik Bülteni , 30, Ankara, (1996) 7-9.
35. Ohnaka, M., A Physical Understanding Of The Earthquake Source Mechanism., J. Phys. Earth, 21, (1973) 39-59.
36. Yomogida, K., And Nakata, T., Seismograms Explained By The Slip Distribution Of The 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, J. Phys. Earth, 45, (1997) 155-165.

7. EKLER

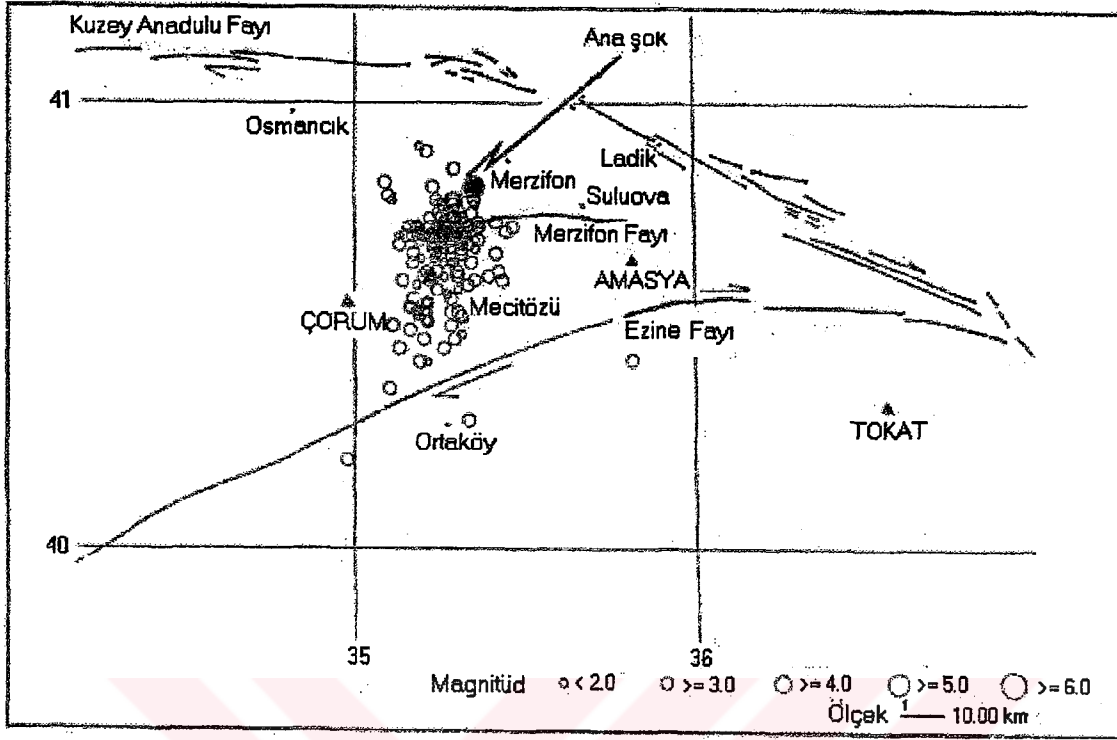
(a)



(b)



Ek şekil 1. CMG-40 hız sensorünün teorisel transfer fonksiyonu. (a) Transfer fonksiyonunun genlik spektrumu ve (b) Transfer fonksiyonunun faz spektrumu



Ek şekil 2. 14 Ağustos-20 Ekim 1996 Çorum-Amasya depreminin artçı sarsıntılarının episantr dağılımları

8. ÖZGEÇMİŞ

27.10.1973 tarihinde Vakfıkebir’ de doğdu. 1994-1995 eğitim öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 1997-1998 eğitim öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans öğrenimini başarıyla tamamlayıp “Yüksek Jeofizik Mühendisi” ünvanını almaya hak kazandı.

