

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

57717
57717

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SOĞURUCU TABAKALI ORTAMLARDA YAPAY
DÜŞEY SİSMİK PROFİLİ SİSMOGRAMLARININ
HESAPLANMASI

Jeofizik Müh. Hakan KARSLI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

" Jeofizik Yüksek Mühendisi "

Ünvanı Verilmesi için Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12.12.1995
Tezin Savunma Tarihi : 18.01.1996

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Kenan GELİŞLİ



Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YILMAZTÜRK



Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Nart ÇOŞKUN



Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN



Aralık 1995

TRABZON

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programında yapılmıştır.

Ayrık dalgasayısı yöntemiyle, soğurma içeren ve değişik doğrultularda kaynak kuvveti kullanarak yapay Düşey Sismik Profil (DSP) sismogramlarını hesapladığım bu tez çalışmasının, sismik soğurma ve sismik kaynak doğrultusu etkilerinin konu olacağı çalışmalara katkı sağlayacağına inanıyorum.

Öncelikle danışmanlığımı üstlenen ve bu çalışmanın başından sonuna kadar karşılaştığım zorlukların aşılmasında yön göstericiliği, bilgileriyle katkısı ve desteği ile hiç bir yardımını esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Kenan GELİŞLİ' ye teşekkür etmeyi ve minnettarlığımı ifade etmeyi zevkli bir görev sayarım. Çalışmamın başlangıç ve süre gelen zamanlarda değerli bilgilerini aldığım ve önerilerinden faydalandığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Özcan ÇAKIR' a çok teşekkür ederim. Yine çalışmalarım sırasında kişisel kütüphanesinden faydalandığım oda arkadaşım sayın Öğr. Gör. Hakan ÇINAR' a ayrıca teşekkür ederim.

Her zaman ve her sıkıntıda maddi-manevi desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Arş. Gör. Yusuf BAYRAK, Arş. Gör. Ali AYDIN, Arş. Gör. Fatih KAZANCI, Arş. Gör. Sedat YILMAZ ve diğer arkadaşlara sonsuz teşekkür ederim.

Bütün öğrenim hayatımda ve özellikle bu çalışmanın başından sonuna kadar bana her türlü imkanı sağlama fedakarlığında bulunan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Trabzon, Aralık 1995

Hakan KARSLI

İÇİNDEKİLER

ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİL LİSTESİ	VII
TABLO LİSTESİ	IX
SEMBOL LİSTESİ	X
1.GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Düşey Sismik Profil (DSP) Yöntemi	3
1.2.1. DSP Sismogramlarını Hesaplama Yöntemleri	4
1.3. Tanımlamalar	7
1.3.1. Soğurma ve Soğrulma Kavramı	7
1.3.2. Kalite Faktörü-Q ve Soğurma Modeli	8
1.3.3. Kayaçlarda Soğurucu Nedenler	11
1.4. Düzlem Dalgaların Soğrulma İlkeleri	11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	15
2.1. Yapay DSP Sismogramlarının Ayrık Dalgasayısı Yöntemi İle Hesaplanması	15
2.1.1. Yöntemin İlkesi	16
2.1.2. Green Fonksiyonlarının Ayrıklanması	19
2.1.3. Tabakalı Ortamda Propagatör Matris Tekniğinin Kullanılması	24
2.1.4. Soğurma ve Dispersiyon Etkilerinin Hesaba Katılması	30
2.2. Sismik Dalgaların Soğrulması	31
2.2.1. Soğurmanın Etkileri	33
2.2.1.1. Soğurmanın Yansıma Kaytsayıları Üzerine Etkisi	36
2.2.1.2. Soğurmanın Sismik Dalgacık Üzerine Etkisi	37
2.2.2. Soğurmada Nedensellik Problemi	42
2.2.2.1. Referans Frekansının Seçiminin Soğurmaya Etkisi	46
2.3. DSP Verilerinin Modellenmesi Çalışmaları	48
2.3.1. Soğurmanın Olduğu ve Olmadığı Ortamlarda Yapay DSP Kesitleri ...	49
2.3.2. Çok Tabakalı Ortam Modeli	62
2.3.3. Kaynak Kuvvetlerinin Modellenmesi	66

3. BULGULAR	71
3.1. DSP Yöntemi ve Ayrık Dalgasayısı Yöntemi İle İlgili Bulgular	71
3.2. Soğurma İle İlgili Bulgular	72
3.3. Kaynak Kuvvetlerinin Modellenmesiyle İlgili Bulgular	74
4. İRDELEME VE DEĞERLENDİRME	75
5. SONUÇLAR	78
6. ÖNERİLER	80
7. KAYNAKLAR	81
8. EKLER	86
9. ÖZGEÇMİŞ	88



ÖZET

Soğurucu Tabakalı Ortamlarda Yapay Düşey Sismik Profil Sismogramlarının Hesaplanması

Son yıllarda elastik ve anelastik ortamlarda dalga yayılımının sayısal hesaplamaları, düşey sismik profil (DSP) verilerinin yorumlanmasında önemi gittikçe artan bir araç olmuştur. Buradaki amaç, arazi verisinin güvenilir bir yorumunu yapmak için, yeraltı ile ilişkili olan DSP verisinin karmaşıklığını açıklamaktır. Bunun yapılabildiği en iyi yol, yapay DSP sismogramlarının hesaplanmasıdır.

Bu çalışmada, elastik dalga alanlarının ayrık dalga sayısı çözümü kullanılarak soğurma ve dispersiyon içeren yapay DSP sismogramları hesaplanmıştır. Ayrık dalgasayısı yönteminin esasını, bir kaynaktan ayrık doğrultularda yayılan elastik düzlem dalgaların sürekli bir toplamı oluşturur. Elastik dalga alanlarının ayrıklanması tek bir kaynak yerine periyodik kaynak diziliminin kullanılmasıyla yapılmıştır. Ayrık dalgasayısı çözümünde, sismogramlar frekans ortamında hesaplandıktan sonra ters Fourier dönüşümü alınarak zaman ortamı sismogramları elde edilir. Yöntem çok tabakalı ortamlarda ve iki boyutlu kaynak alıcı dizilimi için hızlı ve kolay bir şekilde uygulanabilir. Elastik dalga alanlarının tabakalı ortamda ilerletilmesi geleneksel propagatör matris formülasyonunun kullanılmasıyla yapılmıştır.

Soğurma ve dispersiyon etkileri, tabakaların gerçek hızları yerine literatürde geniş olarak kullanılan frekans ve kalite faktörü (Q) bağımlı kompleks hızlar kullanılarak hesaba katılmıştır. Teorik DSP sismogramları elastik ve anelastik dalga yayılımı durumları için değişik düz tabakalı ortamlarda ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kalite faktörü (Q)' nün etkisinin sismik dalgacık ve yansıma katsayıları üzerine etkileri belirlenmiştir. Kullanılan kompleks hız denklemi nedensellik açısından analiz edilmiştir. Hesaplanan DSP sismogramları yansımaları, tekrarlıları, baş dalgalarını, doğrudan varışları, dönüşmüş dalgaları (P' den S' ye yada bunun tersi) ve Rayleigh yüzey dalgalarını tam olarak içerirler.

Ayrıca, kaynak kuvvetinin doğrultusu yatay ve düşey kuvvetler olarak çalışılmıştır. Kaynak kuvvetlerinin uygulama doğrultularının P ve S dalga alanları üzerine etkileri, herbir yatay ve düşey kaynak kuvvetleri için DSP kesitleri hesaplanarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşey Sismik Profil (DSP), Ayrık Dalgasayısı, Soğurma, Kaynak Kuvveti, Yapay Sismogram.

SUMMARY

The Computation of Synthetic Vertical Seismic Profiles Seismograms in the Attenuating Layered Media

For many years, numerical simulations of wave propagation in elastic and anelastic media have become increasingly an important tool in the interpretation of vertical seismic profiles (VSPs). The main purpose of this sort of studies has been to explain complexity of the VSP data in relation to the Earth's subsurface. To obtain a reliable the best way is computation of VSP seismograms.

In this study, we used the method of discrete wavenumber representation of elastic wave fields to compute of synthetic VSP seismograms that include the effects of attenuation and dispersion. The method is based on a superposition of plane waves propagating in discrete directions from a source. Discretization of elastic waves is results from a periodic arrangement of sources rather than using a single source. In discrete wavenumber solution, seismograms incorporating attenuation and dispersion effects initially computed in the frequency domain, are then Fourier transformed to the time domain. The method can be applied to a large number of layers and a two-dimensional source-receiver's geometry. For propagating of elastic waves in layered media have been used to conventionally propagator matrix formulation.

The effects of attenuation and dispersion have been easily included in the calculation of synthetic seismograms by replacing the real elastic velocities with complex frequency and quality factor (Q)-dependent expressions widely used in the current literature. Theoretical seismograms of a medium with flat horizontal layers overlying a half space have been computed for the cases of elastic and anelastic propagation. Effects of quality factor on seismic wavelets and reflection coefficients have been determined. The complex velocity equation used has been analyzed for causality. VSP seismograms calculated include reflections, multiples, head waves, direct waves, converted waves (from P wave to S wave or its inverse) and Rayleigh surface waves exactly.

In addition, the direction of source force has been studied as horizontal and vertical forces. Effects of application direction of source forces on P and S wave fields have been examined by calculating VSP sections for each horizontal and vertical source forces.

Key words: Vertical Seismic Profile (VSP), Discrete Wavenumber, Attenuation, Source Forces, Synthetic Seismograms.

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1. DSP yönteminde arazi dizilimi.
- Şekil 2. DSP yönteminde elde edilen bir arazi kesiti ve model kesiti.
- Şekil 3. Soğrulma ve yayılım vektörleri.
- Şekil 4. Soğurucu bir ortamda bir düzlem dalganın yansıma ve geçişi.
- Şekil 5. Sonsuz tane kaynağın eşit aralıklarda x-ekseni boyunca dizilimi.
- Şekil 6. Ayrıklılık için kaynak alıcı-dizimi.
- Şekil 7. Dalgasayısı geometrisi.
- Şekil 8. Tabakalı bir ortam modeli.
- Şekil 9. P ve S dalgaları için yatay ve düşey dalgasayısı geometrisi.
- Şekil 10. Soğurma etkilerinden dolayı birim genlikli bir sinyalin zamanla soğrulması.
- Şekil 11. 2 tabakalı ortam modeli.
- Şekil 12. Şekil 11' de verilen model için ortamda soğurma olmadığı bir durumdaki düşey bileşen DSP kesiti.
- Şekil 13. Şekil 12' deki DSP sismogramının spektrumu.
- Şekil 14. Şekil 11' de verilen ortama soğurma eklenerek hesaplanan düşey bileşen DSP sismogramı.
- Şekil 15. Şekil 10' daki DSP sismogramının spektrumu.
- Şekil 16. Şekil 11' de tanımlanan yer yapısı modeli için frekansın fonksiyonu olarak yansıma katsayısının frekansla değişimi.
- Şekil 17. Hız ve yoğunluk farkının olmadığı bir durumdaki sismogram (a), Ortamda sadece kalite faktörü farkı olduğu durumdaki sismogram (b).
- Şekil 18. Ricker kaynak dalgacığının zaman ve frekans ortamındaki görünümü.
- Şekil 19. Değişik soğurma değerleri (Q) için dalgacığın spektrumu.
- Şekil 20. Kaynak dalgacığının değişik Q değerleriyle soğurulduktan sonra zaman ortamındaki görünümü.
- Şekil 21. Ricker dalgacığının soğurma değeri (Q) farklı ortamlarda yayılımı.
- Şekil 22. Nedenselsiz soğurma.
- Şekil 23. Nedenselli Soğurma.
- Şekil 24. Dispersif ve dispersif olmayan DSP sismogramlarının hesaplanması için kaynak alıcı dizilimi.
- Şekil 25. Şekil 24' de verilen model için dispersif ve dispersif olmayan sismogramlar.

- Şekil 26. $\omega_r=1$ için (60) denkleminin gerçel bileşeninin $Q=500, 100, 50$ ve 20 değerlerindeki frekansla değişimi.
- Şekil 27. $\omega_r=100$ için (60) denkleminin gerçel bileşeninin $Q=500, 100, 50$ ve 20 değerlerindeki frekansla değişimi.
- Şekil 28. Şekil 24' de verilen ortam için referans frekansının 1 Hz ve 100 Hz olması durumundaki düşey bileşen DSP sismogramları.
- Şekil 29. İki tabakalı ortam modeli.
- Şekil 30. Ricker kaynak dalgacığının zaman ve frekans ortamı görünümleri.
- Şekil 31. Şekil 29' da verilen iki tabakalı yer yapısı modeli için hesaplanan düşey ve bileşen yapay DSP kesiti.
- Şekil 32. Gabor kaynak dalgacığının zaman ve frekans ortamı görünümleri.
- Şekil 33. Tablo 1' de verilen 5 tabakalı ortam modeli için soğurmanın olmadığı yapay DSP kesiti.
- Şekil 34. Tablo 1' de verilen 5 tabakalı ortam modeli için soğurmanın olduğu yapay DSP kesiti.
- Şekil 35. Tablo 2' de verilen 3 tabakalı ortam modeli için soğurmanın olmadığı bir durumda düşey ve yatay yerdeğiştirme DSP kesitleri.
- Şekil 36. Model 2' de tanımlanan Q değerleri için hesaplanan yapay yerdeğiştirme DSP kesitleri.
- Şekil 37. Model 3' de tanımlanan Q değerleri için hesaplanan yapay yerdeğiştirme DSP kesitleri.
- Şekil 38. Model 4' de tanımlanan Q değerleri için hesaplanan yapay yerdeğiştirme DSP kesitleri.
- Şekil 39. 47 tabakalı DSP verisinin soğurmanın olmadığı durum için hesaplanmış yapay kesitleri.
- Şekil 40. 47 tabakalı DSP verisinin soğurmanın olduğu durum için hesaplanmış yapay kesitleri.
- Şekil 41. Tabakalı ortamda kaynak kuvvetleri için kaynak-alıcı dizilimi.
- Şekil 46. Tablo 2' de verilen 3 tabakalı ortamda aynı kaynak-alıcı dizilimi kullanılarak Z-doğrultusunda uygulanan bir kaynak kuvveti için yerdeğiştirme DSP kesitleri.
- Şekil 47. Tablo 2' de verilen 3 tabakalı ortamda aynı kaynak-alıcı dizilimi kullanılarak X-doğrultusunda uygulanan bir kaynak kuvveti için yerdeğiştirme DSP kesitleri.
- Şekil 48. Tablo 3' de verilen 47 tabakalı ortamda aynı kaynak-alıcı dizilimi kullanılarak X-doğrultusunda uygulanan bir kaynak kuvveti için yerdeğiştirme DSP kesitleri.

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Beş tabakalı bir modelin ortam parametreleri.

Tablo 2. Kalite faktörü Q' nun değişimi için 3 tabakalı ortam parametreleri.

Tablo 3. 47 tabakalı ortam modeli.



SEMBOL LİSTESİ

Q	Kalite faktörü.
ΔE	Kaybedilen enerji miktarı.
E	Toplam enerji miktarı.
ΔA	Genlik azalma miktarı.
A	Maksimum genlik.
dx	Birim yol.
x	Dalganın seyahat ettiği yol.
dA/dx	Birim yola düşen genlik değişimi.
λ	Dalga boyu.
V	Dalga hızı.
ω	Açısal frekans.
A_0	Sisteme giriş genliği.
$S(\omega)$	Frekans ortamı kaynak fonksiyonu.
$E(\omega)$	Frekans ortamı yansıma ve geçiş katsayıları.
$C_{ph}(\omega)$	Frekans bağımlı faz hızı.
$\alpha(\omega)$	Frekans bağımlı soğurma katsayısı.
K	Dalgasayısı vektörü.
\vec{P}	Dalganın yayılma doğrultusu vektörü.
\vec{A}	Dalganın soğrulma vektörü.
θ	\vec{P} ve \vec{A} vektörleri arasındaki açı.
k	Yatay dalgasayısı.
L	Ayrık kaynaklar arasındaki uzaklık.
ω_r	Açısal frekansın gerçel bileşeni.
ω_1	Açısal frekansın sanal bileşeni.
v	P dalgasının düşey dalgasayısı.
γ	S dalgasının düşey dalgasayısı.
k_α	P dalgasının yayılma yönündeki dalgasayısı.
k_β	S dalgasının yayılma yönündeki dalgasayısı.
$J_n(kr)$	n. dereceden Bessel fonksiyonu.
ϵ_n	Neumann faktörü.
k_z	Genel olarak z yönündeki dalgasayısı (düşey dalgasayısı).

$Q_{\alpha}(r, z, \omega)$	P dalgası için kaynak dalga alanının ayrıkklanma fonksiyonu.
α	P dalga hızı.
β	S dalga hızı.
ϕ	P dalga potansiyeli.
ψ	S dalga potansiyeli.
Q_{α}	P dalgası kalite faktörü (soğurma faktörü).
Q_{β}	S dalgası kalite faktörü (soğurma faktörü).
f	Kaynak kuvveti.
U^T	Yerdeğiştirme ve gerilme matrisi.
F	Rayleigh dispersiyon matrisi.
$A(z)$	Tabakalı ortamdaki elastik parametrelerin oluşturduğu matris.
$P(z_{i+1}, z_i)$	Propagatör matrisi.
U	Yerdeğiştirmeler.
R_i	Yansıma katsayısı.
ρ_i	Ortamın yoğunluğu.
f_p	Kaynak dalgacığının merkez frekansı.
ω_p	Açısal merkez frekansı.
q	Gabor kaynak dalgacığı için sönüm sabiti.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. GİRİŞ

Günümüze kadar yapılan jeofizik çalışmaların ortak amacı yer yapısının tanımlanmasıdır. Yer yapısının tanımlanması ancak onun vereceği etkinin doğru yorumlanması ile sağlanabilir. Bunun için yıllarca değişik jeolojik yapıların verecekleri sismik etkiler uygun hesaplama teknikleri kullanarak yapay sismogramlarla elde edilmeye çalışılmıştır. Buradaki esas amaç, yeraltı yapısı ile ilgili sismik verinin karmaşıklığını açıklamaktır. Araştırılması istenen bir yer yapısının vereceği cevap, yerinin bir çok etkisininide içerir. Genel olarak bu etkiler yerin elastik özellikleri ile ilişkilidir. Elastiklik yer içinde yayılan bir dalga için iyi bir modeldir. Bununla birlikte yeryapısını oluşturan materyaller gerçekte tam olarak elastik değildirler. Bu amaçla yeryapısının özelliklerinin tam olarak ortaya konulması için yapay sismogramlara ihtiyaç duyulmuştur.

Yapay sismogramlar sismik arama çalışmalarında verilerin yorumlanmasına önemli katkılar sağlaması açısından çok önemlidir. Peterson ve diğ. [1] tarafından yapay sismogramların hesaplanmaya başlandığı ilk yıllarda, jeofizik arama çalışmalarındaki kullanımları deprem sismolojisine oranla daha az olmuştur. Fakat tabakalı ortamların fiziksel ve mekanik özelliklerinin (gözeneklilik, doygunluk, kayaç yapısı v.b) ortaya konulması ve özellikle de petrol havzalarının geniş bir araştırmasını yapmak gerekliliği arama jeofiziğinde yapay sismogramların hesaplanması ile hız kazanmıştır. Bundan dolayı uzun yıllar yorumlamada karşılaşılan önemli zorluklar (tabaka sınırlarının ve diğer süreksizliklerin belirlenmesi) büyük oranda giderilmiştir. Yapay sismogramların ilk hesaplanmaya başladığı yıllarda tabakalı ortamda sismik dalganın dik gidip-gelen bir düzlem dalga olduğu kabulü yapılmış ve hesaplamalar bu kabul üzerine geliştirilmiştir [2], [3]. Bu haliyle yoruma katkı sağlanabilmiştir.

Çeşitli araştırmacılar özellikle açılmış olan petrol kuyularının veriminin artırılması ve kuyunun yakın civarının daha iyi araştırılması için **Düsey Sismik Profil (DSP) Yöntemi** 'ni kullanarak, hesapladıkları yapay sismogramlarla yorumlamada daha başarılı olmuşlardır. Bu amaçla yapay yansıma sismogramları için kullandıkları hesaplama tekniklerini DSP sismogramları içinde kullanmışlardır [4]. Temme ve Müller [5], Silva [6], Fuchs ve Müller [7] ofset bağımlı sismogramları ve DSP sismogramlarını tabakalanmış ortamları modellemek için ilk olarak yansıtılabilirlik yöntemini geliştirmişlerdir.

Genel olarak yapay sismogramların hesaplamasında küresel açılım, tüm arayüzey dalgaları, tekrarlı yansımalar ve soğurmayı içeren tam hesaplamalar istenir. Bu tür yapay sismogram hesapları üç boyutlu dalga denklemi çözülerek elde edilebilir. DSP yönteminin dalga

alanlarının üçüncü boyutta modellenmesine tam doğrulukla izin vermesi onun önemli bir avantajıdır. Ayrıca DSP hem aşağıya hemde yukarıya giden dalga alanlarını içerdiği için yer içindeki dalga yayılımının iyi bir görünümünü verir. Klasik yapay sismogram hesaplamaları tam olarak elastik yatay tabakalanmış bir ortamdaki düzlem dalga yayılım temeline dayanır [2], [3]. Ancak Trorey [8] yapay sismogram hesaplamalarına dalgaların frekans içeriği ve genliğinin etkili olarak değiştiği anelastik soğurulmayı eklemiş ve gerçek ortama biraz daha yaklaşılmaya çalışmıştır. Nielsen [9] bir kaynaktan yayılan düzlem dalgalar için soğurucu ortamda dalga denklemini çözerek soğurma içeren yapay sismogramları hesaplamıştır. Kennet [10] bir çizgi kaynak için iki boyutlu Fourier dönüşümünü ve Ganley [4] genel bir kaynak için bir boyutlu Fourier dönüşümünü kullanarak soğurma ve dispersiyon içeren yapay DSP sismogramlarını hesaplamışlardır. Soğurmanın etkilerinin daha çok yüksek frekanslarda belirgin olması yapay DSP sismogramlarının hesaplanmasını kaçınılmaz yapmıştır. Bundan dolayı yapay sismogram hesaplamaları DSP sismogramlarının hesaplanmasına doğru yönelmiştir [11].

Yapay sismogramların çok değişik amaçlar için sismik arama çalışmalarında kullanılması tamamen yeryapısının karmaşıklığını ortaya koymak içindir. Yer içi çoğu kez homojen, izotrop kabul edilse de aslında karmaşık bir yapıya sahip olduğu açıktır. Bu yüzden yapay sismogramlar bu tür yeryapılarda kaynaktan-alıcıya bir dalga seyahati sırasında ortamın fiziksel özelliklerini açığa çıkarmada oldukça kullanışlı olmuşlardır. Özellikle 1970' li yıllarda bilgisayar imkanlarının artması ile yapay sismogramların dalga yayılımının modellenmesi çalışmalarında önemini artırmıştır. DSP sismogramları yansıma sismogramlarına oranla yeryapısı hakkında daha detaylı bilgi verirler. Çünkü DSP yönteminde yere verilen sismik dalga daha az yol katettiği için enerjisini az kaybedecektir. Bunun böyle olması alıcıların düşey olarak dizili olmasından kaynaklanmaktadır. Alıcıların düşey olarak dizili olması, yüzey gürültülerinin aza indirilerek verinin daha sağlıklı şekilde elde edilmesini sağlar.

Bu çalışmanın amacı tabakalanmış soğurucu ortamlarda DSP sismogramlarını hesaplamaktır. Buna bağlı olarak x, y, z yönlerinde uygulanan kaynak kuvvetlerinin sismogramlardaki etkilerini incelemektir. DSP sismogramları Bouchon ve Aki [12] tarafından verilen ayrık dalgasayısı sayısal çözüm yöntemiyle hesaplanmıştır. Yapay sismogram hesaplamaları için Prange [13] tarafından geliştirilen algoritma amaca göre düzenlenerek kullanılmıştır. Tabakalı ortamlarda soğurmanın hesaba katılması gerçek hızlar yerine frekans ve kalite faktörü bağımlı kompleks hızların kullanılmasıyla yapılmıştır. Kompleks hız denklemi olarak Bouchon ve Aki [12]' in geliştirdiği hız denklemi kullanılmıştır. Elastik dalga alanları soğurucu tabakalanmış ortamlarda propagatör matris tekniği kullanılarak yapılmıştır. Orjinal Thomson-Haskell matris yöntemi olarak bilinen bu yöntemin, cisim dalgası sismogramlarının hesaplanmasında yüksek frekanslardaki sayısal karasızlıklar giderilmiştir [13].

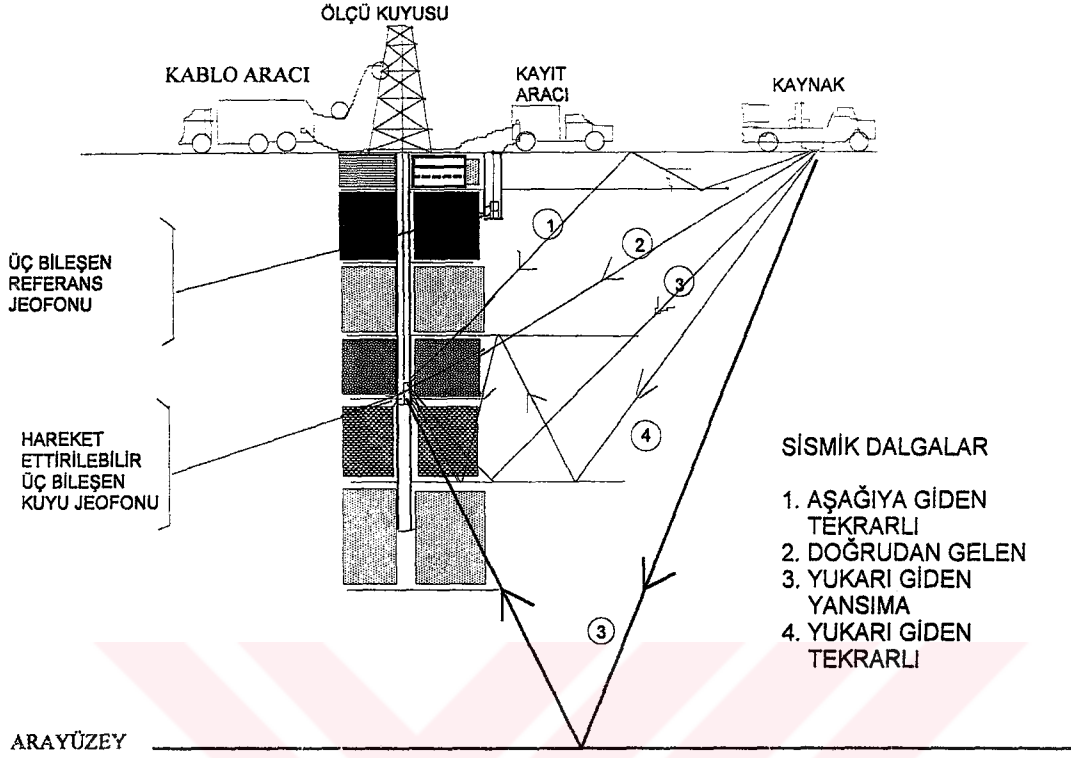
1.2. Düşey Sismik Profil (DSP) Yöntemi

Düşey sismik profil yöntemi arama ve rezervuar mühendisliği problemleri için sınırsız uygulamaları ile çok ümit verici bir teknik olarak ortaya çıkmıştır. Günümüze kadar yüzeyde kaydedilen sismik veri, artan karmaşıklara rağmen yeraltının yorumlanması için yıllardır kullanılmaktadır. Ancak araziden elde edilen sismik kesitlerin yorum aşamasında yüzey sismik verisi yetersiz kalmakta ve yorum hatalarına sebep olmaktadır. Çünkü yüzey sismiğinde iki boyutlu veri elde edilirken, DSP' de üç boyutlu veri elde edilerek yer yapısı hakkında daha doğru ve net sonuçlar elde edilebilmektedir.

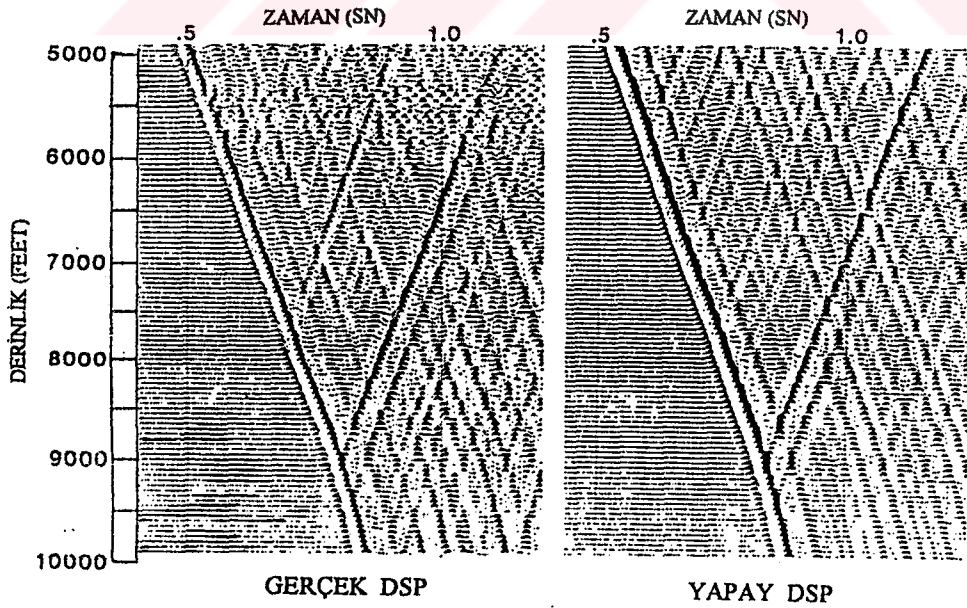
DSP yöntemi ilk olarak, Fesseden [14] tarafından iki kuyudan alınan kayıtlardan yer yapısının belirlenmesi amacıyla başlatılmıştır. Daha sonraları McCollum ve LaRue [15] yüzeydeki bir enerji kaynağından çıkan dalgaların jeofonlara seyahat zamanlarını ölçerek yer yapısı hakkında bilgi edinmeye çalışmışlardır. Bu çalışma bugünkü DSP ölçümlerinin önemli bir uygulamasıdır. DSP yönteminin yeraltı problemlerinin çözümünde kullanılması Sovyet jeofizikçiler tarafından başlatılmış ve 1960-1970' li yıllarda yaygın olarak kullanılmıştır. O yıllarda Gal'perin [16] Sovyetler birliğinde yapılmış olan çalışmaları yazdığı "Vertical Seismic Profiling " adlı kitabında toplayarak özetlemiştir.

DSP yöntemi batılı jeofizikçiler tarafından 1960-1970' li yıllar arasında pek kullanılmamış fakat 1970 yılından sonra bu yöntem Avrupa ve Amerika' da büyük bir gelişme göstermiştir. Son 15 yıl içerisinde DSP yöntemi sismik arama ve yorumlamada , ileri ve ters çözüm problemlerinde bir çok jeofizikçi tarafından kullanılmakta ve önerilmektedir. Özellikle açılmış olan petrol kuyularının yakın civarının üç boyutlu görünümünün elde edilmesi ve buna bağlı olarak dalga yayılımının modellenmesi açısından oldukça kullanışlı bir yaklaşımdır. Wyatt [17] yaptığı bir çalışmada yapay DSP sismogramlarını zaman ortamında hesaplamıştır. Kennet ve diğ. [18] DSP yönteminin araştırma jeofiziğindeki uygulamalarını geniş bir şekilde özetlemiştir. DSP' de veri kaydının derinliğin fonksiyonu olarak yapılması, yüzey sismiğine karşılık önemli bir özelliktir. DSP' nin bu özelliği yerde yayılan sismik dalgaların hem aşağıya gideninin ve hemde yukarıya gideninin kaydedilmesini sağlar. Ayrıca DSP' de tekrarlı, birincil yansımaları ve sismik dalgacığın yüksek ayrımlılıkla kaydedilmesi onun diğer bir yorumlama avantajıdır. DSP' de kaynak-alıcı dizilimi Şekil 1' de ve aynı hız logu için hem gerçek bir arazi kaydı hem de bu kaydın model sismogramı Şekil 2' de verilmektedir.

DSP' nin sürekli olarak gelişmesine bağlı olarak kullanım alanlarında artma göstermiştir. McDonald ve diğ. [19] DSP yöntemini Pierre şeyllerine uygulayarak bu sahadaki soğurma yapısı hakkında bilgi elde etmeye çalışmıştır. Tullos ve diğ. [20] benzer bir çalışmayı sedimanlar üzerine uygulayarak soğurmanın frekansla değişimini incelemiş ve soğurmanın kayaç yapısına bağlı olduğu sonucuna varmıştır.



Şekil 1. DSP yönteminde arazi dizilimi [21]. Jeofonlar kuyu boyunca dizilir. Kaynak yüzeyde herhangi bir yerde uygulanabilir.



Şekil 2. DSP yönteminde elde edilen bir arazi kesiti ve model kesiti [17]. Aşağıya ve yukarıya giden dalgalar, tekrarlılar kesitlerde kolaylıkla seçilebilmektedir.

Yine, Spencer ve diğ. [22] ve Hauge [23] DSP yöntemi ile soğurmanın ileri ve ters modellenmesi üzerine çalışma yaparak, yöntemin soğurma çalışmaları için kullanılabilirliğini göstermişlerdir. DSP' nin tüm bu özellikleri ayrıntılı olarak Hardage [24] tarafından özetlenmiştir.

1.2.1. DSP Sismogramlarını Hesaplama Yöntemleri

Günümüzde etkili olarak sismik yorumlamalar DSP verisiyle çok daha detaylı olarak yapılabilmektedir. Bununla birlikte yinede yerçi arazi verisinin karmaşıklığından dolayı tam olarak açıklanamamaktadır. Burada problem yeraltının tabakalanmasından kaynaklanan karmaşık dalga cepheleri, dalga mod dönüşümleri, gürültü ve kaynağın frekans band sınırlaması ile ilgilidir. Bu problemler arazi verisinin yorumlanmasını kolaylaştırmak için yapay sismogramların hesaplanmasıyla ortadan kaldırılabilir. Bu noktadan hareketle çeşitli araştırmacılar DSP kesitlerinin karmaşıklığını açıklamak için yapay sismogramları hesaplama yöntemleri geliştirmişlerdir. Bu hesaplama yöntemlerinin gelişimine bağlı olarak yapay sismogram hesaplamalarında bir artış gözlenmiştir. Yapay sismogramların temel olarak yer içindeki küçük veya büyük boyuttaki değişimlerin dalga yayılımını (dalga biçimlerini) nasıl etkilediğini belirlemede ve sismik yapının yorumlanmasında katkıları büyüktür. Yer içi; çoğu kez elastik, homojen tabakalardan oluştuğu kabul edilsede aslında karmaşık olan bir yapıya sahiptir. Özellikle kaynaktan alıcıya seyahat eden dalganın geçtiği ortamların fiziksel özelliklerini belirleyebilmek için yapay sismogramlara ihtiyaç vardır. Hesap yöntemlerinin duyarlılığı sismogramların hesaplanma aşamasında çok önemli yer tutmaktadır. Çünkü, yer içindeki dalga hareketi bir çok yer etkisini de içerdiğinden bu etkilerin bütünü en iyi şekilde hesaba katılması uygun sayısal çözüm yöntemleri ile mümkündür. Mesela tam elastik bir ortamın vereceği etkiler, herhangi bir çözüm yöntemiyle tam doğrulukla hesaplanırken, soğurucu (anelastik) bir ortam için aynı çözüm yöntemiyle hesaplanamayabilir..

Bu amaçla kabul ettiğiniz yer modeline göre çözüm yönteminizi belirlemeniz gerekir. Yapay DSP sismogramları,

- Fourier dönüşümü yöntemi
- Hartley dönüşümü yöntemi
- Sonlu farklar yöntemi
- Sonlu elemanlar yöntemi
- Işın izleme yöntemi
- Yansıtabilirlik yöntemi
- Ayrık dalgasayısı yöntemi

gibi sayısal çözüm yöntemleri ile hesaplanabilir. Bu yöntemler zaman ortamı (sonlu-farklar, sonlu elemanlar, ışın izleme) ve frekans ortamı (Fourier ve Hartley dönüşümü, yansıtabilirlik, ayırık dalgasayısı) çözümleri olarak gruplandırılabilir.

Frekans ortamı çözüm yöntemleri soğurma içeren yapay DSP sismogram hesaplamaları için oldukça kullanışlıdır. Çünkü, frekans ortamı soğurma ve dispersiyon etkilerinin kesin ve açık olarak içerilmesi avantajına sahiptir [6]. Kennet [25] soğurmanın sismogramlar üzerine etkilerini yansıtabilirlik yöntemini kullanarak modellemiştir. Silva [6] soğurucu ortamda cisim dalgalarını incelemek için Thomson [26]-Haskell [27] tarafından geliştirilen tabakalı ortamlarda dalga yayılım matrislerini kullanarak dalga denkleminin frekans-dalgasayısı ortamında bir çözümünü sunmuştur. Yine Martinez ve McMechan [28] viskoelastik ortamda τ -p (zaman-ışın parametresi) sismogramlarını yansıtabilirlik yöntemini kullanarak değişik yer modelleri için hesaplamıştır.

DSP sismogramlarının hesaplanması için ışın izleme yöntemi oldukça kullanışlıdır. Bu yöntemde yansıma ve kırılma, tekrarlı yansıma, geometrik açılamdan kaynaklanan soğurma hesaba katılır. Bu yöntemin esası dalga alanlarının doğrusal hatlar boyunca yayıldığıdır. Dolayısıyla, ışınlar şeklinde gösterilen bu dalga alanları bir sınıra geldiğinde yansıma ve kırılmaya uğrarlar. Yansıma ve kırılma Snell yasasına göre olur. Wyatt [17] ışın izleme yöntemini kullanarak, bir kuyuda alınmış sonik logdan DSP sismogramlarını hesaplayan bir zaman ortamı yöntemi geliştirmiştir. Bu hesaplamada ışınların dik gidip geldiği (sıfır offset DSP) kabul edilmiş yani, aşağıya ve yukarıya giden dalgalar tüm arayüzelere diktir.

Yapay DSP sismogramlarını hesaplamak için Temme ve Müller [5] tarafından yansıtabilirlik (reflectivity) yöntemi kullanılmış ve ofset bağımlı sismogramlar tabakalanmış ortamlar için hesaplanmıştır. Temme ve Müller [5]' in bu çalışmasında, tüm arayüzey etkileri, yansıma ve kırılma dalgaları ile tüm tekrarlı yansımalar, küresel açılım ve anelastik soğurma hesaba katılarak DSP sismogramları hesaplanmıştır.

DSP sismogramları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak da hesaplanabilir. Sonlu elemanlarla yapılan modelleme çalışmalarında, hem gidiş-geliş, hem de offset DSP sismogramları hesaplanabilmektedir. Yöntem, eğriliğe sahip arayüzeylerde önemli bir avantaja sahiptir. Bu durum, hesaplama zamanının artmasına neden olabilir. Bunun için yatay tabakalanmış ortamlar gözönüne alınarak bu zaman azaltılabilir.

DSP sismogramlarının hesaplanmasında çokça kullanılmış ve halen kullanılan bir diğer önemli yöntem de sonlu farklar yöntemidir [29]. Sonlu-farklar yöntemi, DSP verisinin ileri modellemesi için iyi bir yöntemdir. Genel olarak offset-bağımlı ve diğer tüm heterojenitelerinin hesaba katıldığı tam sismogramların hesaplanması için oldukça fazla kullanılmaktadır. Ancak yöntemde, tabaka sayısının artması hem bilgisayar zamanı açısından hemde duyarlılık açısından problem oluşturmaktadır.

Son yıllarda Bouchon ve Aki [12] ve Bouchon [30, 31] tarafından geliştirilen ve yatay tabakalanmış ortamlarda dalga denklemini frekans-dalgasayısı üzerine çözen ayrık dalgasayısı çözüm yöntemi, yapay yansıma ve DSP sismogramlarının hesaplanmasında önemli bir yöntemdir. Bu yöntemin uygulanabilirliği Gelişli [32] tarafından arazi verisinin modellenmesiyle gösterilmiştir. Yöntem yatay tabakalanmış ortamlarda tam DSP sismogramlarını hesaplamak için oldukça kullanışlıdır. Yöntem bu çalışmada yapay DSP sismogramlarını hesaplamak için kullanılacağından, bütün özellikleri ve uygulanabilirliği, çalışmanın 2. bölümünde detaylı olarak anlatılacaktır.

1.3. Tanımlamalar

1.3.1. Soğurma ve Soğrulma Kavramı

Bir kaynaktan çıkan sismik dalgalar yer içindeki seyahati boyunca; küresel açılma, iletim kayıpları, mod dönüşümleri ve ısıya dönüşme gibi sebeplerden dolayı enerji kaybına uğrarlar. Bu olaya sismik dalganın "**soğurulması**" ve dalganın soğurulmasına sebep olan ortama ise "**soğurucu ortam**" yada ortamda "**soğurma**" var denir. Her iki durumun tanımlanabildiği tüm davranışlar yerin "**elastik olmayan (anelastite)**" özellikleri ile temsil edilebilir.

Genel olarak sismik dalga soğrulması, litolojik parametrelere bağlı anelastik soğurma etkisi ve litolojik parametrelere bağlı görünür soğurma etkisinin bileşimi olarak ifade edilir. Sismik dalganın görünür soğrulması; arayüzeylerin etkilerinden ve zayıf olarak tabakalanmış litolojik birimler gibi hız ve yoğunluk heterojenitelerinden olan dağılmalardan kaynaklanmaktadır. Çalışmalar göstermiştir ki, eğer detaylı hız bilgisi varsa görünür soğurma etkisi, anelastik soğurmadan ayırt edilebilir. Dolayısıyla kolaylıkla nedenleri ortaya konulabilir. Sismik dalganın anelastik soğrulmasının potansiyel kullanımının daha fazla olması, araştırma jeofiziğinde daha çok kullanılmasını sağlamıştır [33].

1.3.2. Kalite Faktörü-Q ve Soğurma Modeli

Bilindiği gibi kayaçların kalitelerine bağlı olarak ifade edilen ve genel olarak hem sismolojide hemde araştırma jeofiziğinde soğurma parametresi olarak kullanılan nicelik "**Kalite faktörü-Q**" yada "**Sismik-Q**" değeridir. Kalite faktörü Q değeri yerin anelastitesinden kaynaklanan sismik dalga soğrulmasının tanımlayıcısıdır. Bu özelliği ile Q değeri sismik çalışmalarda yerin soğurma özelliklerinin araştırılmasında ileri ve ters çözümde önemli bir parametredir. Dolayısıyla, Q değeri yer içerisinde yayılan dalgaların soğrulmasının önemli bir

nedeni olarak; bu yeryapısını oluşturan kayaçların fiziksel özelliklerinin daha doğrulukla ortaya konulmasında sismik hız bilgisine yardımcı olarak ikinci bir ortam parametresidir.

Soğurmanın modellenmesi çalışmaları kalite faktörü Q' nun tanımlanmasıyla ortaya konulmuştur. Arazi ve teorik çalışmalarda soğrulma özelliklerinin ortaya konulması Q' nun belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Model çalışmalar ya etkisi bilinen bir yapıyı belirlemek için (ters modelleme) ya da yapı bilinirse vereceği etkiyi belirlemek için (ileri modelleme) yapılır. Soğrulmanın modellenmesinde bu esasa dayandırılarak ya etkiden hareketle yer yapısının soğurma özellikleri tanımlanır yada yer yapısı soğurucu tanımlanıp vereceği cevap elde edilmeye çalışılır. Arazi verisinden soğrulmanın belirlenmesi ve soğurmanın modellenmesi dikkatli analiz ve uygun bir soğurma modelini gerektirir. Bunun için ilgilenilen frekans bandında frekanstan bağımsız kalite faktörü Q kullanılabilir. Kalite faktörü Q' nun soğurma ve soğrulma özelliklerinin belirlenmesiyle ilgili detaylı bilgiler Jhonston ve Toksöz [34]' de bulunabilir. Ayrıca Ecevitoğlu [35]' nun " Sismik-Q ve Modellenmesi " adlı çalışmasında soğurmanın ileri ve ters modellemesi ayrıntılı olarak ele alınmış ve irdelenmiştir. Bizim bu tez çalışmasındaki amacımız, soğurma ve dispersiyon içeren yapay DSP sismogramlarını hesaplamak olduğu için soğurmanın yada soğucu ortamların modellenmesiyle ilgileneceğiz.

Genel olarak verilen bir ortamdaki soğurulma pratik amaçlar için kalite faktörü Q' ya bağlı olarak tanımlanır [36]. Bir sisteme giren E enerjisi, sistem içerisinde ΔE kadarını kaybediyorsa Q değişkeni (Elektrik mühendisliğinde kullanılır şekliyle);

$$\frac{1}{Q} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E} \quad (1)$$

olarak tanımlanmıştır. Eğer bu enerjinin genliği A ile tanımlanırsa, enerji ile genlik arasında $E \propto A^2$ gibi bir ilişki olacaktır. Çok küçük ΔE değeri için enerji-genlik ilişkisini,

$$\Delta E \propto 2 \cdot A \cdot \Delta A \quad (2)$$

şeklinde yazabiliriz. Bu durumda (1) denklemi, aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir.

$$\frac{1}{Q} = -\frac{1}{\pi} \frac{\Delta A}{A} \quad (3)$$

Genliği A olan bir dalgacığın soğurucu ortam içerisinde ilerlerken genliğindeki ΔA azalma miktarı, katedilen x yolunun doğrusal bir fonksiyonu ($\Delta A \propto x$) olarak ifade edilebilir. Yani,

$$\Delta A = \frac{dA}{dx} x \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır. Buradaki $\frac{dA}{dx}$ diferansiyel ifadesi birim yola düşen genlik azalım miktarıdır. Eğer bir sismik dalga tarafından geçilen x yolu özellikle bir dalga boyu ise (4) denklemi,

$$\Delta A = \frac{dA}{dx} \lambda \quad (5)$$

olurki, bu durumda ΔA kendi boyu kadar ilerlemiş bir dalganın genliğindeki azalma miktarı olacaktır. Şimdi dalga boyunun genel olarak bilinen ifadesi ,

$$\lambda = \frac{2\pi V}{\omega} \quad (6)$$

şeklinde yazılıp yerine konulursa aşağıdaki yeni ifade elde edilmiş olur.

$$\frac{1}{Q} = -\frac{1}{\pi A} \frac{dA}{dx} V \frac{2\pi}{\omega} \quad (7)$$

Burada ω , açısal frekans, V ortamın hızını göstermektedir. Gerekli sadeleştirme ve gruplandırma yapıp x yolu boyunca belirsiz integral alınırsa aşağıdaki ifade elde edilmiş olur.

$$A(x) = A_0(x_0) \exp\left(-\frac{\omega x}{2QV}\right) \quad (8)$$

(10) denklemi x yolu boyunca seyahat eden A_0 genliğindeki bir dalgacığın basit olarak soğurulmasını temsil eder. Burada, x_0 dalga hareketinin başlangıç noktasıdır. $x=v.t$ olduğuna göre (10) denklemi sabit bir ω frekansında zamanın fonksiyonu olarak yeniden ifade edilebilir.

$$A(t) = A_0(t_0) \exp\left(-\frac{\omega t}{2Q}\right) \quad (9)$$

Burada, t seyahat süresi, t_0 başlangıç zamanı, $A_0(t_0)$ t_0 anındaki sinyalin genliği ve $A(t)$ t süresince kayıt noktasında kaydedilen sinyalin genliğidir. (11) denklemi zaman bağımlı olarak kullanılır ve bir sinyalin zamanla soğurulmasını tanımlar.

Sismik sinyalin genliğinin soğurulmasını etkileyen önemli bir faktörde tabakalanma etkileridir. Bu etkinin hesaba katılması için (9) denkleminin frekans ortamı ifadesine ihtiyaç vardır. Çünkü frekans ortamında yapılan işlemlerde bu etkiler daha kolay hesaba katılır. Buna göre (9) denklemi,

$$A(\omega) = S(\omega) \exp\left(-\omega t / 2Q\right) \quad (10)$$

Burada, $S(\omega)$ birim genlikli sinyalin yada kaynak zaman fonksiyonunun spektrumudur. Tabakalanma etkileri için $E(\omega)$ gibi bir fonksiyon tanımlayabiliriz. $E(\omega)$ fonksiyonu tabakalanmadan kaynaklanan geometrik açılım, yansıma ve geçiş gibi etkileri içermektedir. Bu durumda (10) denkleminin sağ tarafını $E(\omega)$ fonksiyonu ile çarpılması bu etkilerin hesaba katılmasını sağlar. Buna göre,

$$A(\omega) = S(\omega)E(\omega) \exp\left(-\omega t / 2Q\right) \quad (11)$$

ifadesi yazılabilir. Dikkat edilirse (11) denklemi, bir sismik sinyalin spektral genliğinin doğrusal süzgeçlerin bir seri sıkışı olarak ifade edilmiş halidir. Aslında buradaki işlem alçak geçişli bir süzgeç düzeneğini oluşturmaktır. Öyleki böyle bir süzgeç sismik sinyalin yayılımı ve soğurulmasını içeren faktörlerin seri bir çarpımıdır.

1.3.3. Kayaçlarda Soğurucu Nedenler

Kayaçlarda elastik olmayan davranışları oluşturabilecek ve sismik dalganın soğurulmasına neden olan birbirinden tamamen bağımsız soğurma mekanizmaları aşağıdaki gibi tanımlanabilir [34].

- Dokusal (matrix) elastik olmayan ve sürtünmenin neden olduğu soğurma,
- Viskozite (akışkanlık) ve sıvı akışkanların neden olduğu soğurma,
- Enerji kaybettirici diğer nedenler.

Bu mekanizmalardan sismik çalışmalarda en çok ilgilenileni yerin elastik olmayan davranışlarından ileri gelen dalga soğurulmasıdır. Yer yapısının elastik olmayan davranışlarının

anelastik olarak ifade edilmesi, soğurma çalışmalarına önemli bir ivme kazandırmıştır. Sismik soğurma çalışmalarında genel kabul; yerin anelastik davranışlarının sismik dalganın frekansı ve faz içeriği ile ilgili olarak tanımlanmış olmasıdır. Yerin anelastitesinden kaynaklanan soğurma sismik Q değeri ile temsil edilmiştir. Ayrıca, sismik Q değeri yer içinde yayılan dalganın sürtünmeden dolayı ısıya dönüşerek soğurulmasının önemli bir nedenidir. Dolayısıyla, kayaçların yada tabakalanmış ortamların kalite faktörü Q değeri soğurma ve sismik dalganın soğurulmasının önemli bir nedeni olarak çalışılmıştır [37].

1.4. Düzlem Dalgaların Soğrulma İlkeleri

Bir kaynaktan çıkan elastik dalga alanları düzlem dalgalar olarak tanımlanabilir. Dalga yayılım teorisinin temelini oluşturan dalga alanları sonsuz, homojen ve izotrop bir ortamda düzlem dalga potansiyeli olarak,

$$U(x,t) = U_0 \exp(Kx - \omega t) \quad (12)$$

şeklinde ifade edilebilir. U_0 giriş dalgacığının genliği, k dalgasayısı, ω açısal frekansdır. (12) denklemi ile tanımlanan düzlem dalganın soğurucu ortamdaki ifadesi, dalgasayılarının kompleks yapılmasıyla yazılabilir. Dalgasayısı bir dalga hareketinin herhangi bir ortam içindeki yayılımını tanımlayan çok önemli bir parametredir. Dalga sayısı frekansın ve dalganın yayılma hızına bağlı olarak ifade edilebilir.

$$K = \frac{\omega}{c} \quad (13)$$

Burada dalga sayısının kompleks olarak ifade edilmesi için iki durum söz konusudur. Bunlardan biri frekansın kompleks yapılması diğeri ise dalga yayılım hızının kompleks yapılmasıdır. Sismogram hesaplamalarında frekans terimi genel olarak hesaplama değişkeni olarak kullanılır. Öyleki bu tanımlama çözüm ortamınızı belirler. Hız terimi modelleyeceğiniz ortamı tanımlamak için kullanılan bir parametredir. Soğurma çalışmalarında da ilgilenilen terim hız terimi olduğuna göre onun kompleks olarak kullanılması daha uygun ve doğru olacaktır. Buna göre (13) denklemini gerçel ve sanal bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi yazabiliriz.

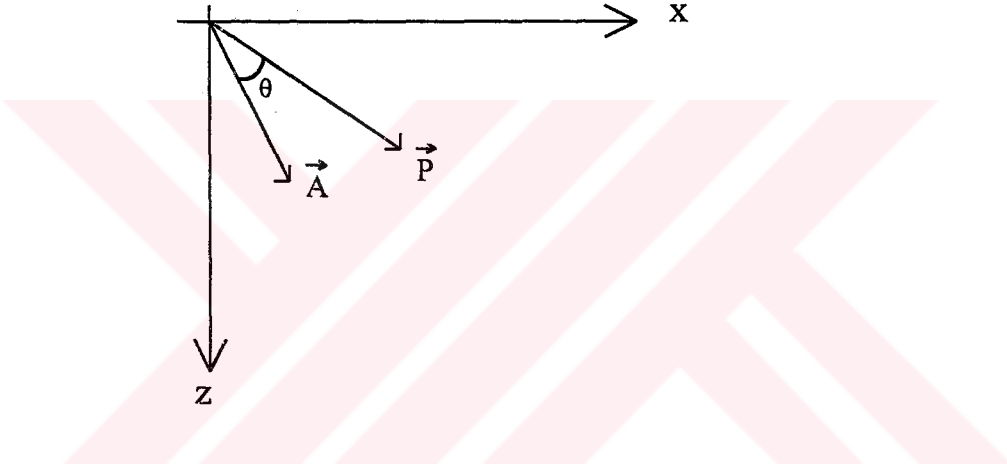
$$K(\omega) = \frac{\omega}{c(\omega)} = \frac{\omega}{c_{ph}(\omega)} + i\alpha(\omega) \quad (14)$$

şeklinde verebiliriz. Burada, $c_{ph}(\omega)$ faz hızı ve $\alpha(\omega)$ soğurma katsayısıdır. Burada kompleks dalgasayısı teriminin gerçel bileşeni dalganın yayılımını, sanal bileşeni ise dalganın soğurulmasını temsil eder. O halde dalga sayısını yayılım ve soğurulma vektörleriyle gösterebiliriz.

$$K = \vec{P} + i\vec{A} \quad (15)$$

Burada, $\vec{P} \rightarrow$ dalganın yayılım vektörü,
 $\vec{A} \rightarrow$ dalganın soğurulma vektörüdür.

Bu iki vektörü basit olarak x-z düzleminde Şekil 3' deki gibi gösterebiliriz.



Şekil 3. Soğurulma ve yayılım vektörleri. P dalganın yayılmasını, A dalganın soğurulmasını gösteren vektörlerdir.

Burada, θ soğurulma vektörü ile yayılım vektörü arasındaki açıdır. θ açısı yayılan dalganın homojenitesi ile ilgilidir. Yani, $\theta=0$ veya $\theta \neq 0$ olup olmamasına göre dalga alanları homojen veya inhomojen olarak isimlendirilir.

Şimdi dalgasayısının kompleks olmasından kaynaklanan düzlem dalgaların soğurulmasını, (15) denklemini (12) denkleminde yerine yazarak ifade etmeye çalışalım.

$$U(x,t) = U_0 \exp i \left((\vec{P} + i\vec{A})x - \omega t \right) \quad (16)$$

$$U(x,t) = U_0 \exp i \left(\vec{P}x + i\vec{A}x - \omega t \right) \quad (17)$$

(15) denklemini düzenleyerek gruplandırırız aşağıdaki sonuç ifadeyi elde etmiş oluruz.

$$U(x,t) = U_0 \exp i(\vec{P}x - \omega t) \exp(-i\vec{A}x) \quad (18)$$

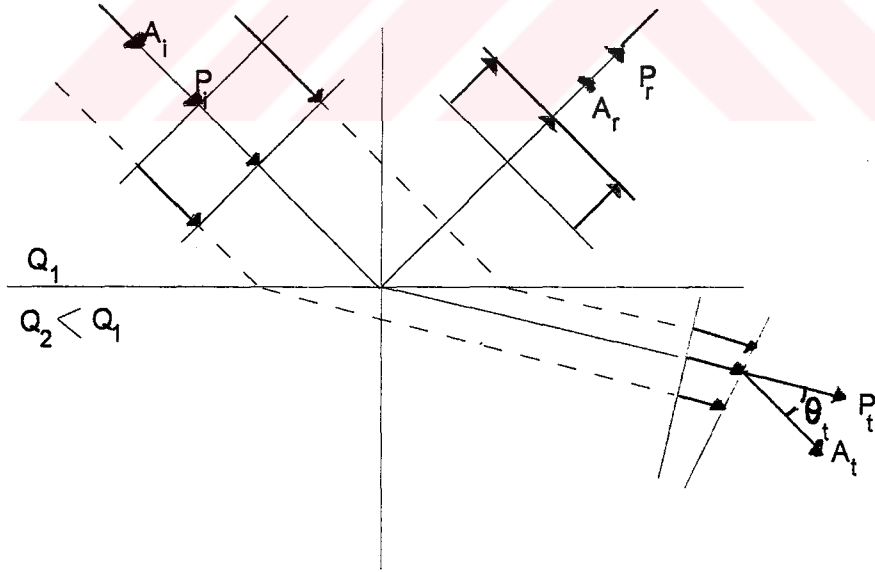
Burada, U_0 genliğindeki dalga $\exp i(\vec{P}x - \omega t)$ faktörü ile yayılırken, $\exp(-i\vec{A}x)$ faktörü ile soğurulmaktadır.

θ açısı \vec{P} ve \vec{A} vektörleri arasında aşağıdaki ilişkiyi kurar.

$$\vec{p} \cdot \vec{a} = |\vec{P}| |\vec{A}| \cos \theta \quad (19)$$

Sıfır olmayan θ inhomojen dalgalara sebep olur [38], [39], [40], [41].

Elastik ve soğurucu olmayan ortamlar için soğurma ($\vec{A}=0$) sıfır veya $\theta = \pi/2$ olmalıdır. Fakat soğurucu bir ortam için, soğurma sıfırdan farklı ($\vec{A} \neq 0$) veya $\theta \neq \pi/2$ dir. Biz bu çalışmada soğurma vektörünün sıfırdan farklı ($\vec{A} \neq 0$) ve $\theta=0$ olma durumuna göre yapay sismogramlarımızı hesaplayacağız. Bunun anlamı \vec{P} ile \vec{A} vektörünün aynı doğrultuda olmasıdır [42]. Buna göre bir sınıra gelen düzlem dalganın aynı doğrultudaki yayılım ve soğurulma vektörlerinin konumunu Şekil 4 ile açıklayabiliriz.



Şekil 4. Soğurucu bir ortamda bir düzlem dalganın yansıma ve geçişi. Okların boyu yerdğiştirme genlikleri ile orantılıdır. A ve P sırasıyla soğurulma ve yayılma vektörlerini gösterirler [36].

Şekil 4' de dalga arayüzeyde kırıldıktan sonra, P_t ile A_t arasındaki θ_t açısı sıfırdan farklı duruma gelmiştir. Bu durum tamamen düşey yöndeki inhomojeniteden kaynaklanmıştır. Ancak dikkat edilirse, Q' nun sabit olduğu birinci ortamda $\theta_t=0$ dır. Bu da tabakaların kendi içinde homojen olduğunu dolayısıyla, soğurmanın homojen olduğunu gösterir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Yapay DSP Sismogramlarının Ayırık Dalga Sayısı Yöntemi İle Hesaplanması

Ayrık dalgasayısı çözüm yöntemi tabakalanmış bir ortamda bir nokta kaynaktan yayılan elastik dalga alanlarının yakın alan çözümünü elde etmek için ilk önce deprem sismolojisinde uygulanmış ve daha sonraları arama jeofiziğinde kullanım alanı bularak geliştirilmiştir. Yöntemin sismolojideki ilk uygulamaları, yakın alan depremlerini modellemek amacıyla Aki ve Richards [12] tarafından yapılmıştır. Daha sonraları, yöntemin tabakalı ortamlarda yüksek frekanslı yapay sismogramları hesaplamak için uygulanabileceği, yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Buna bağlı olarak yöntem, birçok araştırmacı tarafından tabakalı ortamlarda elde edilen arazi verisinin modellenmesi için kullanılmıştır [30], [31], [32], [43], [44], [45], [46], [47], [48] ve [49]. Ayırık dalgasayısı yöntemi tabakalanmış soğurucu ortamlarda yapay DSP sismogramlarının hesaplanmasına tam doğrulukla izin veren kullanışlı bir sayısal çözüm yöntemi olarak da kullanılabilir. Yöntem tekrarlı yansıma ve dönüşümleri içeren gerçek DSP sismogramlarının tam olarak hesaplanmasını sağlar [47].

Ayrık dalgasayısı yönteminin temelini düzlem dalga teorisi oluşturur. Bir kaynaktan ayırık doğrultularda yayılan elastik düzlem dalga alanları tabakalanmış bir ortamda sonlu toplama ile ifade edilebilir. Kaynaktan yayılan elastik düzlem dalga alanları ayırık faz hızları ile yayılacağı için tek bir kaynak yerine periyodik bir kaynak dizisi kullanılarak dalga alanlarının sürekli bir toplamı sağlanır. Yöntemde sismogramlar önce frekans-dalgasayısı-derinlik (ω, k, z) ortamında hesaplanır. Sismogramların frekans-dalgasayısı-derinlik ortamında hesaplanması soğrulmanın hesaba katılarak yapay DSP sismogramlarının hesaplanmasını sağlar. Bu durum, bu çalışmada esasını teşkil eden yöntemin önemli bir özelliğidir. Tabakalı ortamlarda yöntemin uygulanabilirliği Prange [13] tarafından geliştirilen programın Gelişli [32] tarafından düzenlenip değişik yatay tabakalı ortamların modellenmesi ve arazi verilerinin yorumlanmasında kullanımı gösterilmiştir. Tabakalı ortamlarda dalga alanları Thomson-Haskell [26, 27] tarafından sismolojiye sunulan propagatör matris tekniği kullanılarak yapılmıştır. Hesaplama tabakalı ortamda ilerletilen elastik dalga alanlarının herbir tabaka içindeki etkisi toplanır ve son toplamın ters Fourier dönüşümü alınarak zaman-uzaklık ortamı yapay DSP sismogramları hesaplanabilir. Ayırık dalgasayısı yöntemi istenilen herhangi bir zaman uzunluğunda yapay DSP sismogramlarını hesaplama avantajına sahiptir. Yöntemin önemli bir özelliği de değişik doğrultularda uygulanan karmaşık kaynak kuvvetleri için tam yapay DSP sismogramlarının hesaplanmasında kullanışlı olmasıdır.

2.1.1. Yöntemin İlkesi

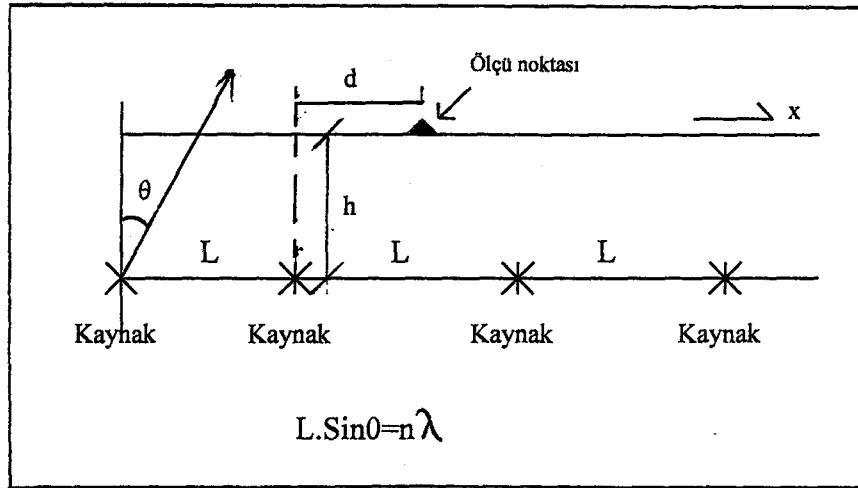
Homojen sonsuz bir ortamda genel bir kaynaktan yayılan kararlı (steady-state) dalgalar, sürekli olarak düzlem dalgaların üstüste toplamı şeklinde ifade edilebilir. Yatay eksenini x , düşey eksenini z ile gösterirsek, ölçülebilir yerdeğiştirme ya da gerilme ifadesini aşağıdaki gibi verebiliriz.

$$F(x, z; \omega) = e^{i\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} f(k, z) e^{-ikx} dk \quad (20)$$

Burada integral yatay dalgasayısı üzerine olup $e^{i\omega t}$ zaman bağımlıdır. (20) denklemini aşağıdaki gibi yeniden düzenlenip yazılabilir.

$$F(x, z; \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k, z) e^{i(\omega t - kx)} dk \quad (21)$$

(21) denklemini açık olarak homojen, izotrop ve sonsuz yatay bir düzlem üzerine yayılan düzlem dalgaların sürekli bir toplamını ifade etmektedir. Yatay eksen boyuca sonsuz sayıdaki kaynak ve alıcı dizilimi Şekil 5 de verilmektedir.



Şekil 5. Sonsuz tane kaynağın eşit aralıklarla x -ekseni boyunca dizilimi [43]. Burada d , ölçü noktasının kaynaklardan biri ile olan uzaklığı. θ , ayrıklılık açısı ve λ , yayılan dalga boyudur.

Şimdi sonsuz tane kaynağın x eksenini boyunca eşit L aralıklarda yatayda dağıldığını düşünürsek (Şekil 5) (20) denklemi aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$G(x, z; \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k, z; \omega) e^{-ikx} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{ikmL} \quad (23)$$

Burada, k yatay dalga sayısı ($k=2\pi/L$) ve L oluşan yalancı kaynaklar arası uzaklık. (20) ve (21) denklemindeki $e^{i\omega t}$ teriminin şimdilik işlemlere katılmamasının nedeni, frekansın daha sonra kompleks formda yazılarak kullanılacak olmasıdır. Ayrıca şu anda sadece dalgasayısı üzerine olan integral değerlendirilmektedir.

(23) denklemindeki integrali sonlu bir toplama dönüştürmemiz gerekmektedir. Bunun için integral toplamını Schwarz [50]'in dağılım teorisini kullanarak sonlu toplam faktörü şeklinde yazabiliriz.

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{ikmL} = \frac{2\pi}{L} (\delta(kL))_{\text{modulo } 2\pi} \quad (24)$$

δ , Dirac delta (birim tepki) fonksiyonunu gösterir.

Burada, (24) ifadesindeki $(\delta(kL))_{\text{modulo } 2\pi} = 1$ dir. Buna göre (23) denklemi,

$$G(x, z; \omega) = \frac{2\pi}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(k_n, z) e^{-ik_n x} \quad (25)$$

şeklinde yeniden ifade edilebilir. Burada $k_n = \frac{2\pi n}{L}$ ($n=0,1,2,\dots,N$) olarak kullanılır.

(25) denkleminde verilen sonsuz toplamı sonlu olan bir seri toplamına dönüştürebiliriz. Buna göre serinin yakınsayacağı bir N değeri için, (25) denklemi,

$$G(x, z; \omega) = \frac{2\pi}{L} \sum_{n=-N}^N f(k_n, z) e^{-ik_n x} \quad (26)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada seri toplamının yakınsaması için gerçek k-ekseninden $f(k,z)$ 'nin tekilliklerini kaldırmak gereklidir. Bu işlemi frekansa küçük ve sabit bir sanal kısım ekleyerek frekansı kompleks düzleme taşımakla yapabiliriz [31].

$$\omega = \omega_r + i\omega_1$$

$$\omega_1 > 0$$

ω_r , açısal frekansın gerçel kısmı ve ω_1 sanal kısmı olarak tanımlanabilir. Frekansın sanal kısmının etkisi zaman ortamı çözümünden kaldırılabilir.

Biz kaynaktan $x=d$ uzaklığında (Şekil 5), (26) denkleminin zaman ortamı çözümünü elde etmek istiyoruz. Bu durumda frekans ortamı çözümünü zaman ortamına aktarmak için Fourier dönüşümünü kullanabiliriz. Buna göre (26) denkleminin Fourier dönüşümünü aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$G(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x, z; \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (27)$$

buradan,

$$G(t) = \frac{2\pi}{L} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} d\omega \sum_{n=-N}^N f(k_n, z) e^{-ik_n x} \quad (28)$$

elde edilir. (28) denkleminde ω açısal frekansı yerine kompleks ifadesini yazarsak,

$$G(t) = \frac{2\pi}{L} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\omega_r + i\omega_1)t} d\omega \sum_{n=-N}^N f(k_n, z) e^{-ik_n x} \quad (29)$$

denklemini elde edilir. Buradan son olarak,

$$G(t) = \frac{2\pi}{L} e^{\omega_1 t} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega_r t} d\omega \sum_{n=-N}^N f(k_n, z) e^{-i\frac{2\pi}{L} x} \quad (30)$$

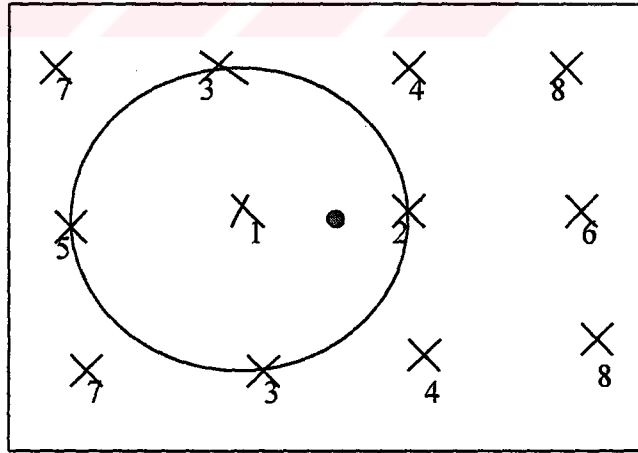
yazılabilir ve aranan zaman ortamı çözümü bu denklemle elde edilir.

Burada, $e^{i\omega_1 t}$ ifadesi sismogramın zaman uzunluğuna bağlıdır. Bouchon [31] frekansın sanal kısmı için $\omega_1 = \pi/t_0$ değerini tavsiye etmiştir. t_0 sismogram hesaplamasında ilgilenilen zaman penceresidir. İlke olarak ω_1 'nin büyüklüğü çözüme etki etmez. Ancak çok küçük seçilmesi oluşacak olan Rayleigh kutuplarından uzaklaşmayı sağlar. (30) denkleminde hesaplanması gereken ifade, $f(k_n, z)$ yer değiştirmesi veya gerilme dağılımıdır. (30) denkleminde yer değiştirmeler istenilen kaynakların etkisinde dalgasayısı ayrıklılığına bağlı olarak hesaplanır. Frekans ortamında her bir kaynağın etkisi ayrık toplamla hesaplandıktan sonra hızlı

Fourier dönüşümü (FFT) kullanılarak gerçek frekans üzerinden zaman ortamı çözümü hesaplanmış olur. Sanal frekansın etkisi zaman ortamı çözümünden kolaylıkla kaldırılabilir. İlkesi anlatılan ayrık dalgasayısı çözümünün, bir kaynak tepkisinin hesaplanmasında kullanılabilmesi için, önce kaynak noktasında elastik dalga alanlarının ayrıklanması gereklidir. Ayrıklama işlemi Green fonksiyonları ile yapılabilmektedir.

2.1.2. Green Fonksiyonlarının Ayrıklanması

Green fonksiyonları elastik bir ortam için frekans ve dalgasayısı üzerine olan bir çift katlı integral olarak ifade edilebilir. Bu fonksiyonların değerlendirilmesi sismoloji ve arama jeofiziği alanlarında temel bir problemdir. Green fonksiyonları başlangıçta kaynak dalga alanının basit olarak tanımlanmasını sağlar. Lamb [51]'in ilk çalışmalarından sonra bir nokta kaynaktan yayılan elastik dalga alanlarının geçtikleri ortamların tepkilerini hesaplamak için çeşitli yaklaşımlar yapılmıştır. Green's fonksiyonlarının tanımlanması bir kaynak tarafından yayılan elastik dalga alanlarının tam bir ayrıklılık esasına dayanır. Bunun için merkezleyen bir kaynak etrafında oluşacak olan sonsuz tane dairesel kaynağın etkilerinin merkezdeki nokta kaynağa eklenmesi yeterli olacaktır [31]. Örnek bir kaynak dizilimi şekil 6' da verilmektedir.



Şekil 6. Ayrıklılık için kaynak-alıcı dizilimi geometrisi [31]. (X) işareti kaynak noktalarını (•) işareti ise, alıcı konumunu göstermektedir.

Homojen sonsuz bir ortamda bir kaynak tarafından oluşturulan sıkışma (P dalgaları) dalgaları için yerdeğiştirme potansiyeli,

$$\phi(R; \omega) = \frac{e^{i\omega\left(t - \frac{R}{\alpha}\right)}}{R} \quad (31)$$

şeklinde verilir [31]. Burada $R = \sqrt{r^2 + z^2}$ kaynak-alıcı arasındaki uzaklık, ω açısal frekans, t dalganın seyahat zamanı ve α sıkışma (P dalgası) dalgasının yayılma hızını gösterir. Silindirik koordinatlar (r, θ, z) sisteminin merkezindeki bir kaynak için (31) denklemini Sommerfeld integrali şeklinde yazabiliriz.

$$\phi(x, z; \omega) = -ie^{i\omega t} \int_0^{\infty} \frac{k}{v} J_0(kr) e^{-iv|z|} dk \quad (32)$$

$$v = \sqrt{k_\alpha^2 - k^2}, \quad \text{Im}(v) < 0;$$

$$k_\alpha = \frac{\omega}{\alpha}$$

Burada integral yatay dalgasayısı (k) üzerindedir. $J_0(kr)$ sıfıncı dereceden Bessel fonksiyonunu gösterir. v düşey dalgasayısıdır. Sommerfeld [52] tarafından geliştirilen integral, aşağıda yazılan silindirik koordinatlarda dalga denkleminin merkez (orijin) dışındaki özel çözümdür.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (33)$$

(33) denkleminin genel çözümü ω ve k 'nin fonksiyonu olan g_n 'e bağlı olarak verilir.

$$\phi(r, \theta, z; \omega) = e^{i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\theta} \int_0^{\infty} g_n(\omega, k) J_n(kr) e^{-iv_n|z|} dk \quad (34)$$

(34) denkleminin özel bir durumu için,

$$\phi_s(r, \theta, z; \omega) = -\frac{i}{\pi} e^{i\omega t} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \varepsilon_n e^{i2n(\theta - \theta_s)} \int_0^{\infty} \frac{k}{v} J_{2n}(kr) e^{-iv_n|z|} dk \quad (35)$$

denklemini yazılabilir. Burada ε_n Neumann faktörünü gösterir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\begin{aligned}\varepsilon_n &= 2 & n \neq 0 \text{ için,} \\ \varepsilon_n &= 1 & n = 0 \text{ için}\end{aligned}$$

(33) denkleminin özel çözümü olan ϕ_s merkeze yerleştirilen bir kaynaktan yayılan elastik sıkışma dalga alanını tanımlar. $(L, \theta_s, 0)$ noktasına yerleştirilmiş bir kaynak ve $(r, 0, z)$ noktasına yerleştirilmiş bir alıcı için (35) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\phi_s(r, z; L, \theta_s; \omega) = -\frac{i}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \varepsilon_n e^{i2n\psi} \int_0^{\infty} \frac{k}{v} J_{2n} \left(k \sqrt{r^2 + L^2 - 2rL \cos \theta_s} \right) e^{-iv_n|z|} dk \quad (36)$$

Burada ψ kaynağın merkezi ile alıcı arasındaki açısal uzaklıktır. Zaman faktörü $e^{i\omega t}$ atılmıştır. Bessel fonksiyonları için Graff toplama teorisi kullanılırsa,

$$e^{i2n\psi} J_n \left(k \sqrt{r^2 + L^2 - 2rL \cos \theta_s} \right) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(kr) J_{2n+m}(kL) e^{im\theta_s} \quad (37)$$

elde edilir. (37) denklemi (36) denkleminde yerine konular ve gerekli düzenlemeler yapılırsa, merkezdeki bir kaynağın etrafında oluşan L yarıçaplı dairesel kaynakların bir çember üzerindeki sürekli olarak ve düzenli bir şekilde dağılımı $\phi_s d\theta_s$ ile verilir.

$$\phi_c(r, z; L; \omega) = \int_0^{2\pi} \phi_s(r, z; L, \theta_s; \omega) d\theta_s \quad (38)$$

ve buradan,

$$\phi_c(r, z; L; \omega) = -2i \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \varepsilon_n \int_0^{\infty} \frac{k}{v} J_0(kr) J_{2n}(kL) e^{-iv|z|} dk \quad (39)$$

elde edilir.

(32) denklemi ile tanımlanan ve merkezdeki bir kaynak etrafındaki kaynaklar için, tam elastik dalga alanlarını ifade edebiliriz. Bunun için

$$\phi_a(r, z; \omega) = -i \int_0^{\infty} \frac{k}{v} J_0(kr) \left(1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \varepsilon_n J_{2n}(kmL) \right) e^{-iv|z|} dk \quad (40)$$

denklemini yazılabilir. Burada integral içindeki seri toplamları Jacobi açılımları yapılarak trigonometrik fonksiyonların Bessel katsayılarının seri açılmasıyla yapılabilir. Burada (40) denklemini Dirac dağılımı ile ilişkilendirilirse,

$$\phi_{\alpha}(r, z; \omega) = -2\pi i \int_0^{\infty} \frac{k}{v} J_0(kr) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(kL - 2n\pi) e^{-i|v|z} dk \quad (41)$$

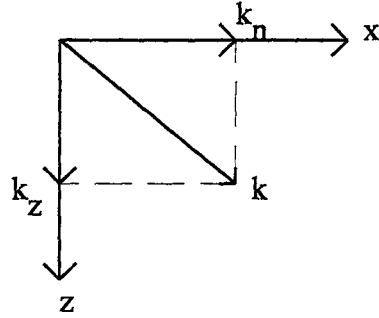
elde edilir. Son olarak,

$$\phi_{\alpha}(r, z; \omega) = -\frac{i\pi}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \frac{k_n}{v_n} J_0(k_n r) e^{i v_n |z|} \quad (42)$$

yazılır ve burada,

$$k_n = \frac{2\pi n}{L}; \quad v_n = \sqrt{k_{\alpha}^2 - k_n^2}, \quad \text{Im}(v_n) < 0$$

şeklinde tanımlanır. (42) denklemini bir kaynaktan yayılan sonsuz tane elastik dalga alanını gösterir. Buradan itibaren, periyodik bir kaynak diziliminin tepki cevabının t zamanları ve r uzaklıklarında (31) veya (32)' de tanımlanan tek bir kaynağın tepki cevabına benzer olduğunu söyleyebiliriz. Yukarıda tanımlanan dalgasayıları geometrisini x-z ortamında aşağıdaki gibi gösterebiliriz.



Şekil 7. Dalgasayıları geometrisi.

İstenilen bir zaman uzunluğunda ve istenilen kaynakların etkisini içeren tam çözümü elde etmek için kaynak-alıcı arası mesafeyi R olarak tanımlayıp Green fonksiyonunu ifade edebiliriz.

$$\frac{\delta\left(\frac{R}{\alpha}-t\right)}{R} = -\frac{\pi i}{L} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} d\omega \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \frac{k_n}{v_n} J_0(k_n r) e^{-iv_n|z|} \quad (43)$$

burada r ve t için,

$$r < \frac{L}{2} \quad \text{ve} \quad \alpha t < \sqrt{(L-r)^2 + z^2}$$

ifadeleri yazılabilir. Dolayısıyla, ayrıklılık boyu L' nin uygun bir seçimi arzu edilen zaman aralığında bir nokta kaynak cevabına izin verir. Ayrık dalgasayısı yönteminin önemli bir özelliği olan kompleks frekans kullanımı, zaman uzunluğu seçiminden kaynaklanan frekans katlanması (aliasing) olayını en aza indirmek içindir. Bunun için (43) denklemi kompleks frekanslar için yeniden yazılabilir.

$$\frac{\delta\left(\frac{R}{\alpha}-t\right)}{R} = -\frac{\pi i}{L} e^{-\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega_r t} d\omega_r \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \frac{k_n}{v_n} J_0(k_n r) e^{-iv_n|z|} \quad (44)$$

Burada integral hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak değerlendirilebilir. (44) denklemi bir noktadaki nokta kaynak için elastik dalga alanının P dalga potansiyelinin ayrıklanmış ifadesidir. Bir nokta kaynak için yapılan ayrıklama işlemi birim genlikli düşey ve yatay kaynak kuvvetleri içinde kaynak noktasında oluşan kaynak kuvvetleri Green fonksiyonları ile ayrıklandırılabilir [53]. Buna göre birim genlikli düşey yönde uygulanan bir kaynak kuvveti için elastik potansiyelleri,

$$\begin{aligned} \phi(r, z; \omega) &= \frac{\text{sgn}(z - z_0)}{2L\rho_s\omega^2} \sum_{n=0}^N k_n e^{-iv_n|z-z_0|} J_0(k_n r) \\ \psi(r, z; \omega) &= \frac{-i}{2L\rho_s\omega^2} \sum_{n=0}^N \frac{k_n}{v_n} e^{-iv_n|z-z_0|} J_0(k_n r) \end{aligned} \quad (45)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, P dalga potansiyeli ϕ , S dalga potansiyeli ψ ile gösterilmiştir. γ_n S dalgasının düşey dalgasayısıdır. Burada çözümler silindirik koordinatlar sisteminde yapıldığı için eksenele simetriklik vardır. Birim genlikli yatay nokta kuvvet için elastik dalga potansiyelleri de aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\phi(r, z; \omega) = \frac{-i}{2L\rho_s\omega^2} \sum_{n=0}^N \frac{k_n^2}{v_n} e^{-iv_n|z-z_0|} J_1(k_n r) \quad (46)$$

$$\psi(r, z; \omega) = \frac{\text{sgn}(z - z_0)}{2L\rho_s\omega^2} \sum_{n=0}^N e^{-iy_n|z-z_0|} J_1(k_n r)$$

(45) ve (46) denklemleri açık olarak elastik dalga alanlarını kaynak noktasında tarifleyen potansiyellerdir. Green fonksiyonları kullanılarak ayrık hale getirdiğimiz dalga alanlarını tabakalanmış ortamlarda ilerletmek için propagatör (dalga yayılım) matrisleri yöntemini kullanabiliriz.

2.1.3. Tabakalı Ortamda Propagatör Matris Tekniğinin Kullanılması

Tabakalanmış ortamlarda dalga yayılımı önemli bir problemdir. Özellikle tüm etkilerin içerildiği (yansıma, kırılma, tekrarlılar, saçılmalar, inhomojenite, soğurma, v.b.) bir durumda yüzeyde herhangi bir noktada tanımlanmış bir dalga alanının tabakalı ortamda ilerletilmesi ve kayıtçıda kaydedilmesi son zamanlarda dalga yayılımı çalışmalarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki bunun en iyi yapılabildiği ve buna bağlı olarak yapay sismogramların hesaplanabildiği çözüm şekli dalga denkleminin sayısal çözümdür. Sayısal çözüm yöntemleri dalga denkleminin uygun sınır şartlarında en iyi sonuç veren yöntemlerdir.

Propagatör matris tekniği sismolojide kendi adlarına ithafen Thomson-Haskell [26, 27] metodu olarak bilinir. Bu teknik, yüksek frekanslarda cisim dalgası yapay sismogramlarının hesaplanmasında, bazı sayısal kararsızlıklar göstermektedir. Bu probleme çeşitli çözümler getirilmiştir. Prange [13] bu problemi frekansa küçük bir sanal kısım ekleyerek, propagatör matrisi çarpanlarına ayırma ile gidermiştir. Genel bir nokta kaynak tarafından oluşturulan dalga alanlarını (32) denklemiyle tanımlamıştık. (32) denklemi dalga alanını tarifleyen bir integral olduğu için ayrık hale getirilerek, serbest bir yüzeyde istenilen bir noktadaki etkisi hesaplanabilmektedir (44 denklemi).

Homojen, izotrop ve tam elastik bir ortamda çok küçük yerdeğiştirmeler için elastodinamik dalga denklemini aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\alpha^2 \text{graddiv}u - \beta^2 \text{curlcurl}u + f = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (47)$$

Burada, P dalgası hızı α , S dalgası hızı β ve kaynak kuvveti f ile gösterilmiştir. U yerdeğiştirmeyi gösterir. (47) denklemi zaman ortamı çözümü için konvolüsyon gerekli olduğu için oldukça karmaşıktır. Bunun için bu diferansiyel dalga denkleminin çözümünü frekans ortamında yapmak daha kolay ve hızlı olacaktır. (47) denklemindeki bütün terimlerin Fourier dönüşümü alınarak frekans ortamı ifadesi yazılabilir. Buna göre,

$$\alpha^2(\omega) \text{graddiv} \bar{u} - \beta^2(\omega) \text{curlcurl} \bar{u} + \bar{f} = -\omega^2 \bar{u} \quad (48)$$

denklemini elde edilir [6]. Burada üst çizgi (–) terimlerin frekans ortamındaki ifadeleri için kullanılmıştır. Görüldüğü gibi çözüm frekans bağımlı duruma gelmiştir. Çözümün yapılabilmesi için P dalgası potansiyelini ϕ ve S dalga potansiyelini ψ ile gösterirsek yerdeğiştirmenin dalga potansiyelleri cinsinden ifadesini aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\bar{u} = \nabla \bar{\phi} + \nabla \Delta \bar{\psi}, \quad \nabla \cdot \bar{\psi} = 0 \quad (49)$$

Burada, $\bar{\phi}$ ve $\bar{\psi}$ sırasıyla P ve S dalga potansiyellerinin frekans ortamı ifadeleridir. (47) ve (48) denklemleri uygun şekilde birbirleriyle ilişkilendirilirse , bir ω frekansındaki çözüm dalgasayılarna bağlı olarak yazılabilir.

$$\begin{aligned} (\nabla^2 + k_\alpha^2) \bar{\phi} &= 0 \\ (\nabla^2 + k_\beta^2) \bar{\psi} &= 0 \end{aligned} \quad (50)$$

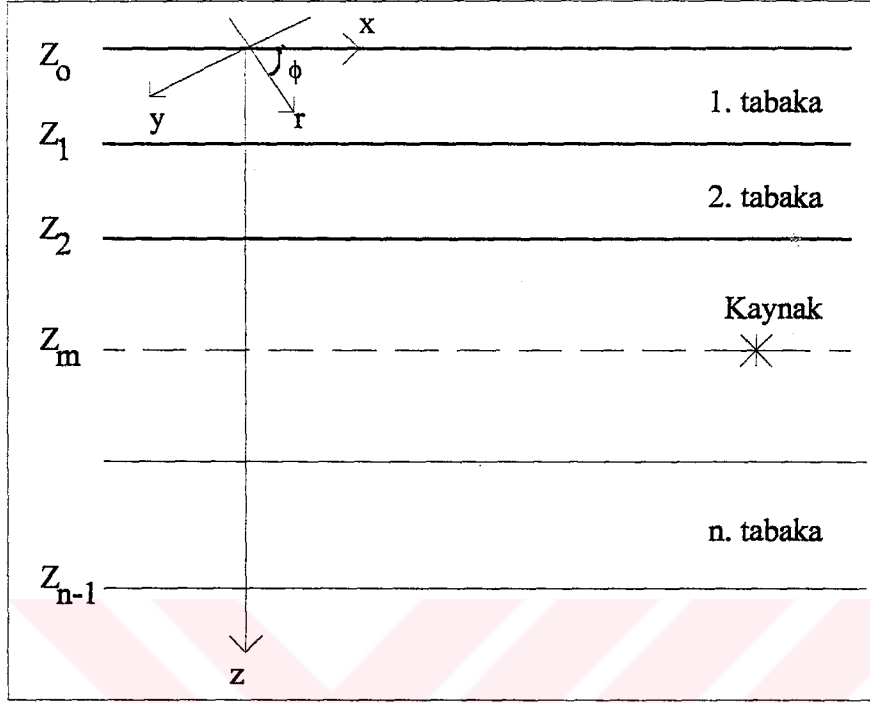
Burada,

$$k_\alpha = \frac{\omega}{\alpha}, \text{ P dalgasının yayılma doğrultusundaki dalgasayıdır.}$$

$$k_\beta = \frac{\omega}{\beta}, \text{ S dalgasının yayılma doğrultusundaki dalgasayıdır.}$$

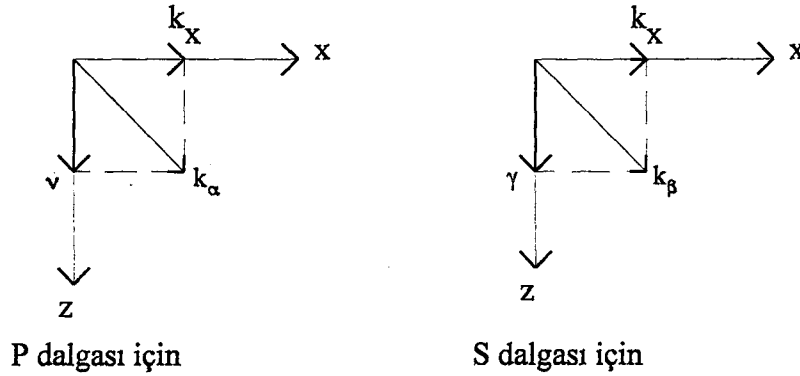
(50) denklemlerinin çözümleri kaynak tipine göre kaynak noktasındaki ayrık olarak (45) ve (46) denklemleriyle daha önce verilmiştir.

Tabakalı bir ortam modeli Şekil 8' de dalgasayılarn geometrisi Şekil 9' da verilmektedir. Şekil 8' den de görüldüğü gibi ortamın bir seri düzgün arayüzeylere sahip tabakalardan oluştuğu kabul edilmektedir. Çözüm için kabul edilen eksen takımı silindirik eksen takımıdır.



Şekil 8. Tabakalı bir ortam modeli. Kaynak $z=z_m$ derinliğine ve r uzaklığına konulmuştur. Herbir tabaka için α , β , ρ , Q_α ve Q_β ortam parametreleri tanımlanmalıdır [32].

Şekil 8' de tanımlanması gereken Q_α ve Q_β parametreleri ortamın soğurma özelliğini belirler. Genel olarak hızlarla ilişkili olan bu parametreler sırasıyla P dalgası ve S dalgası kalite faktörü olarak isimlendirilirler. Kalite faktörleri kayaç litolojisi ile doğrudan ilişkili olduğu için, tabakaların bir çok fiziksel özelliğinin belirlenmesinde kullanılabilir. Genel olarak ters çözümle hesaplanan bu değerler kayaç yapısına göre de tahmin edilebilir.



Şekil 9. P ve S dalgaları için yatay ve düşey dalgasayıları geometrisi.

Şekil 9' daki geometrilere bakılarak P ve S dalgaları için, yatay ve düşey dalgasayıları ifade edilebilir. Bunun için öncelikle yatay dalgasayısını tanımlamak gerekir. Buna göre ,

$$k_x = \frac{2\pi x}{L} \quad (x=1,2,3,\dots,N)$$

L, periyodik iki kaynak arasındaki uzaklıktır.

$$v = \sqrt{k_\alpha^2 - k_x^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{\omega^2}{\alpha^2} - k_x^2} \quad \text{Im}(v) < 0$$

$$\gamma = \sqrt{k_\beta^2 - k_x^2} \Rightarrow \gamma = \sqrt{\frac{\omega^2}{\beta^2} - k_x^2} \quad \text{Im}(\gamma) < 0$$

v ve γ sırasıyla P ve S dalgalarının düşey dalgasayılarıdır.

Green fonksiyonları ile kaynak noktasında tanımlanan elastik dalga potansiyellerinin ilgili doğrultularda türevlenmeleriyle yatay ve düşey bileşenler elde edilebilir.

$$\begin{aligned} \bar{u}_x &= \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial z} \\ \bar{u}_z &= \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x} \end{aligned} \quad (51)$$

Burada, \bar{u}_x ve \bar{u}_z sırasıyla frekans ortamı yatay ve düşey yerdeğiştirmelerdir. Çözüm dalgasayısı-derinlik-frekans bağımlı olarak elde edilir. Üç boyutlu görünen problem Hankel dönüşümü (Bessel fonksiyonları ile ilgili) kullanılarak iki boyuta indirgenir. İki integral üzerinden θ' dan bağımsız çözümler aşağıda verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} u_x(x, z, t) &= -\frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \int_0^{\infty} \bar{u}_x(k, z; \omega) J_1(kr) k dk d\omega \\ u_z(x, z, t) &= -\frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \int_0^{\infty} \bar{u}_z(k, z; \omega) J_0(kr) k dk d\omega \end{aligned} \quad (52)$$

(52) denklemlerinin çözümü oldukça basittir. Ancak burada bütün problem \bar{u}_x ve \bar{u}_z yerdeğiştirmelerinin tabakalı ortamda hesaplanmasıdır. Bunun için serbest yüzeyde bir kaynak

tarafından oluşturulan yerdeğiştirme ve gerilmeleri içeren bir U^T matrisini tanımlayabiliriz.

$$U^T = [u_x u_z \tau_{zx} \tau_{zz}] \quad (53)$$

burada, u_x ve u_z yerdeğiştirmeleri, τ_{zx} ve τ_{zz} gerilme bileşenlerini ve T matrisin transpozisini göstermektedir. U matrisi sınır şartları ile ilgili (Dalga alanlarının yansıma ve geçiş ile ilgili) fiziksel parametreleri içerir. (47) denklemini tabakalı ortamda U matrisi elemanlarının oluşturduğu bir matris şeklinde yazabiliriz.

$$\frac{dU(z)}{dz} = A(z)U(z) \quad (54)$$

Burada, $A(z)$ ortamın elastik özellikleri (herbir tabaka için hız, yoğunluk, derinlik ve Lamé's sabitleri), yatay yavaşlık ve frekansa bağlı $n \times n$ boyutunda bir matristir. Bu çalışma için $n=4$ kullanılmıştır. Çünkü (54) denkleminin en genel çözümü Rayleigh dispersiyonundan hesaplanacağı için 4×4 lük bir F matrisi bunu karşılar.

$$F = \begin{bmatrix} c_1 e^{k_\alpha z} & c_2 e^{k_\beta z} & c_3 e^{-k_\alpha z} & c_4 e^{-k_\alpha z} \end{bmatrix} \quad (55)$$

Dikkat edilirse, F matrisinin elemanları aşağıya ve yukarıya giden dalga alanlarını içermektedir. C sabitleri genlik olarak düşünülebilir. F ' in bileşenleri Aki ve Richards [42] (s. 276) da ayrıntılı olarak verilmiştir. Buna göre F matrisi, dalga alanları matrisi olarak isimlendirilir. Şimdi, z_0 noktasında başlatılan bir yerdeğiştirmenin bir z noktasındaki etkisini hesaplamak için bir ilerletme matrisine ihtiyaç vardır. Buna göre,

$$U(z) = P(z, z_0)U(z_0) \quad (56)$$

(56) denklemindeki $P(z, z_0)$ ifadesine propagatör (ilerletme, yayıcı) matris denir [42] (s.274). Şekil 8 de verilen tabakalı ortam için n tabakasındaki $U(z)$, m tabakasındaki $U(z_0)$ ile aşağıdaki gibi propagatör matris yardımıyla ilişkilendirilebilir [42] (s.276).

$$U(z) = P(z, z_{n-1})P(z_{n-1}, z_{n-2}) \dots P(z, z_0)U(z_0) \quad (57)$$

(57) denklemi en genel haliyle propagatör matrisi olarak isimlendirilir. P' nin elemanları 4*4 lük bir matrisi oluşturur ve Thomson-Haskell [26, 27] deki yayılım matrisini verir [42]. (57) denkleminde dalğanın her arayüzeyi geçişinde U' nun sürekliliği sağlanmıştır. Yayılım matrislerinin kullanımı arayüzeylerdeki sınır şartlarını sağlama işlemlerini bir seri matris çarpımına indirgemesi açısından kolaylıklar sağlar. Propagatör matris genel bir nokta kaynak için de geçerlidir. Kaynak fonksiyonu g(z) ile tanımlanırsa (57) denkleminin g(z) fonksiyonu ile çarpımı gerekir. U_z ve U_x serbest yüzeyde hesaplandıktan sonra z derinliğindeki değeri U(z₀)' ın P(z, z₀) ile çarpılmasıyla hesaplanabilir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus, kaynağın konumunun dikkate alınmasıdır. En genel haliyle aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz.

$$\begin{bmatrix} u_x(z_{i+1}) \\ u_z(z_{i+1}) \end{bmatrix} = P(z_{i+1}, z_i) \begin{bmatrix} u_x(z_i) \\ u_z(z_i) \end{bmatrix} \quad (58)$$

Burada P(z_{i+1}, z_i)' nin elemanları yeraltı ve serbest yüzey Eigen fonksiyonlarının hesaplanmasıyla ilgilidir. Bu konu ile ilgili daha detaylı bilgi [32]' de bulunabilir. Tabakalı ortamda u_x ve u_z hesaplanabildiğine göre, her bir tabaka için elastik katkılar toplanarak son toplam ortamın tepkisi olarak hesaplanabilir. Bunun için (52) denklemindeki dalgasayısı üzerine olan integrali ayrık bir toplama dönüştürebiliriz.

$$u_x(x, z, t) = -\frac{1}{2\pi L} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{u}_x(k_n, z; \omega) J_1(k_n r) k_n d\omega \quad (59)$$

$$u_z(x, z, t) = -\frac{1}{2\pi L} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{u}_z(k_n, z; \omega) J_0(k_n r) k_n d\omega$$

Burada, J₀ ve J₁ sıfıncı ve birinci dereceden Bessel fonksiyonlarını gösterir. Frekans integralinde integrasyon yörüngesi üzerinde bulunan Rayleigh kutuplarının \bar{u}_x ve \bar{u}_z deki tekillikler sayısal bir problem oluşturur. Bouchon [31] bu problemi daha önceden de bahsedildiği gibi, frekansa küçük bir sanal kısım ekleyerek büyük oranda halletmiştir. (59) denklemleri yapay DSP sismogramlarını hesaplamak için sayısal olarak çözülmesi gereken son denklemlerdir. Denklemlerin sayısal çözümü için kullanılan programın akış şeması Şekil Ek 1' de verilmiştir.

2.1.4. Soğurma ve Dispersiyon Etkilerinin Hesaba Katılması

Düzlem dalgaların soğurulması bahsinde anlatıldığı gibi soğurma ve dispersiyon etkilerinin hesaba katılması için en doğru yaklaşım gerçek hızlar yerine frekansın ve kalite faktörünün fonksiyonu olan kompleks hız profilleri kullanmak yada kompleks dalgasayıları kullanmaktır [54]. Genel olarak dispersiyon sismik dalğanın hızının frekansa bağlı olarak değişmesi şeklinde tanımlanır. Dispersif ortamlar, sismik dalgayı saçıcı ve sismik dalğanın enerjisini kaybettirici özellik gösterirler. Bu haliyle dispersiyon ile soğurma birbirlerini tamamlayıcı iki özelliştir. Yani, soğurmanın sismogramlar üzerindeki etkileri hızı dispersif olarak kullanmakla belirlenebilir.

Soğurma ve dispersiyon olayı yayılan dalğanın frekans içeriği ile ilgili olduğu için, frekans ortamında yapılan çalışmalarda hesaba katılmaları oldukça kolaydır. Başlangıçta yayılma vektörü (P) ile soğurma vektörü (A) arasındaki açı (θ) tanımlanmalıdır. Biz bu çalışma için homojen olan soğurmayla uğraşacağımız için her iki vektör arasındaki açıyı ($\theta=0$) olarak kullanacağız. Kompleks hızlar için birçok denklem verilmekle birlikte burada Aki ve Richards [42] tarafından verilen dispersif hız denklemi kullanılacaktır. İlgili denklem aşağıda verildiği gibidir.

$$C(\omega) = C(\omega_r) \left[1 + \frac{1}{\pi Q} \ln \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right) - \frac{i}{2Q} \right] \quad (60)$$

Burada, $C(\omega_r)$ ω_r frekansındaki faz hızı, Q ortamın soğurma parametresi olan kalite faktörü dür. ω_r frekansı keyfi olarak seçilebilir. (60) denklemleri P ve S dalgaları için ayrı ayrı yazılabilir.

$$\alpha(\omega) = \alpha(\omega_r) \left[1 + \frac{1}{\pi Q} \ln \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right) - \frac{i}{2Q} \right] \quad (61)$$

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_r) \left[1 + \frac{1}{\pi Q} \ln \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right) - \frac{i}{2Q} \right] \quad (62)$$

(60) denkleminin soğurucu etkisi Q değerine bağlıdır. Q değeri frekansın fonksiyonu olarak kullanılabilceği gibi sabit olarak kullanılabilir. Q değerinin (60) denklemi için sabit olarak kullanılması geniş frekans aralıkları için oldukça uygundur [42]. (60) denklemi açık olarak dalğanın herbir frekansta yeni bir hız değeri ile yayılacağını göstermektedir. Bu

özellik ayrık dalgasayısı çözümünün karakterine uygundur. Herbir tabaka içinde tanımlanan kalite faktörü Q ve dispersiyonu belirleyen ω_T değeri soğurmanın hesaba katılmasını sağlar.

2. 2. Sismik Dalgaların Soğurulması

Yer içersinde yayılan sismik dalgalar elastik enerjisinin bir kısmının ısıya dönüşmesi ile soğurulurlar. Son yıllarda sismik araştırma ve yorumlamada sismik dalgaların soğurulması, önemi gittikçe artan bir konu olmuştur. Sismik hızlar kontrolündeki elastik özellikler için bilinen önemli tanımlamalar (young modülü, hacim modülü, katılık, v.b.) kullanılarak soğurma özellikleri "elastik olmayan (anelastik)" olarak karakterize edilir. Soğurma verisi kayaç özelliklerini tanımlamak için diğer fiziksel özellikleri tamamlayıcıdır.

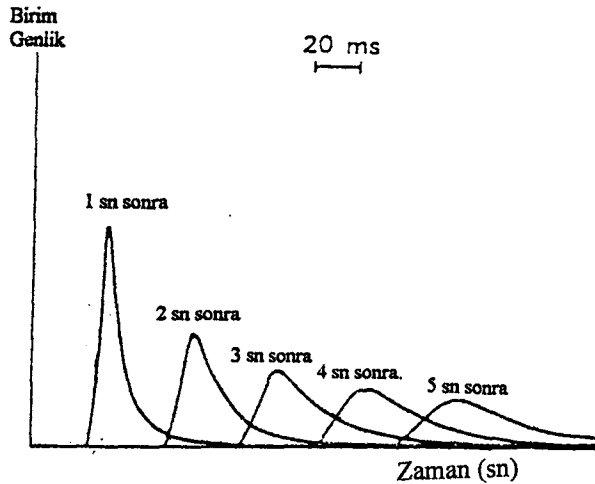
Yerin soğurucu özelliklerini anlamamanın iki önemli esası vardır [34]. Bunlardan birincisi, sismik dalga genliklerinin elastik olmayan (soğurucu, anelastik) ortamda yayılan dalgalar olarak azalmasıdır ve bu azalım genellikle sismik dalganın frekans içeriği ile ilgilidir. İkincisi ise, soğurma karakteristiklerinin kayaçların doygunluk derecesi, fiziksel yapı ve litoloji gibi çoğu bilgiyi açığa çıkarmasıdır. Soğurmanın bu özellikleri sismik dalga yayınının elastik görünümünden çok daha karmaşıktır. Soğurmanın belirlenmesinde hem laboratuvar hemde arazi ölçümleri yapmak oldukça zordur ancak soğurmanın belirlenmesine yardımcı mekanizmalar bir hayli geniştir ve bazı şartlardaki küçük değişimler yeterli derecede soğurmayı etkiler. Bununla birlikte soğurmanın sıvı doygunluğu gibi parametrelere duyarlılığı, çoğu uygulamalar için yüksek derecede önemli olan soğurmanın belirlenmesi ve anlaşılmasını sağlar. Kayaç fiziği ve sismoloji alanlarında soğurma ile ilgili araştırmalara ve beklentilere, arazi ve model veri üzerindeki etkilerine bakılarak cevap verme özelliği çok güçlüdür ve bu iş soğurma bilgisi ile daha çabuk yapılabilir.

Son zamanlarda laboratuvarlarda, kayaç örnekleri üzerinde değişken basınç, sıcaklık, gerilme, frekans ve doygunluk şartları altında soğurma ölçümleri yapılmaktadır. Buna bağlı olarak soğurma etkilerinin daha ayrıntılı olarak incelenmesine teorik ve arazi çalışmalarıyla halen daha devam edilmektedir. Yerdeki soğurma ölçümleri, direk ve kırılmış sıkışma (P dalgası) ve kesme (S dalgası) dalgaları, yüzey dalgaları, yansıma sismogramları, düşey sismik profili (DSP) ve tam akustik dalga kuyu ölçümleri kullanılarak hızlı bir şekilde belirlenmeye çalışılmaktadır. Arazi, laboratuvar ve teoriksel çalışmaların net sonuçları yerin kabuğundaki sismik dalgaların soğurulması ile ilgili bizim bilgimizin hızlıca genişlemesine yardımcı olmaktadır. DSP yöntemi bir sismik dalgacığın yer içersinde gözlenmesi hız ve soğurma analizi yapmak için oldukça kullanışlıdır.

Soğurmanın belirlenmesi ve etkilerinin açığa çıkarılması için teorik çalışmaların önemli

bir yeri vardır. Soğurma nedeniyle oluşan etkilerin doğru yorumlanabilmesi için yapılan teorik çalışmaların temelini yapay sismogramların hesaplanması oluşturmaktadır. Öyleki yapay sismogramların hesaplaması ile yer içinde dalga yayılımının modellenmesi ve buna bağlı olarak dalganın geçtiği ortamların fiziksel ve mekaniksel özelliklerinden ne derece ve nasıl etkilendiğini daha açık olarak belirleyebilmektedir. Böylece, dalganın seyahati boyunca karşılaştığı etkilerin açığa çıkarılması, gerçek arazi sismogramlarının yorumlanmasında çok büyük katkılar sağlamıştır. Sismik dalga soğurulması kayaçların fiziksel özelliklerinin anlaşılması için kullanışlı ve değerli bir kaynaktır. Bu durum kaydedilen dalganın yapısal olarak değerlendirilmesini kolaylaştırdığından dolayı DSP yöntemiyle kolaylıkla ortaya koyulabilir. Çünkü DSP yönteminde, aşağıya giden dalga alanlarının bulunması, ilgilenilen litolojik bölgeler içerisinde daha yüksek kalitede bilgi almayı sağlar.

Bir çok araştırmacı soğurucu ortamda sismogramları elde etmek için, doğrusal elastik olmayan yeryapısı modelleri kurarak ortamı sismik dalgalar için tam olarak ifade edebilmişlerdir. Soğurucu ortam modellerini kurmak ortamı soğurucu tanımlamayı gerektirir. Sismik dalgaların yer içerisindeki yayılışı sırasındaki soğurulması kısmi olarak elastik olmayan, kısmi olarak da diğer etkilerden (küresel açılım, tekrarlı yansımalar, geçiş kayıpları, v.b.) , özellikle inhomojenitelerden kaynaklanan dağılmalardan meydana gelmektedir. Tüm bu etkilerin bileşimi olarak ortamın **kalite faktörü-Q** soğurucu ortamın tanımlanması için önemli bir parametre olarak yıllardır soğurma çalışmalarında kullanılmıştır. Bir sismik dalganın soğurulması olayı için basit olarak şekil 10' u gösterbiliriz. Şekil 10' da birim genlikli bir sinyalin herbir zaman adımında soğurulduktan sonraki durumu verilmektedir.



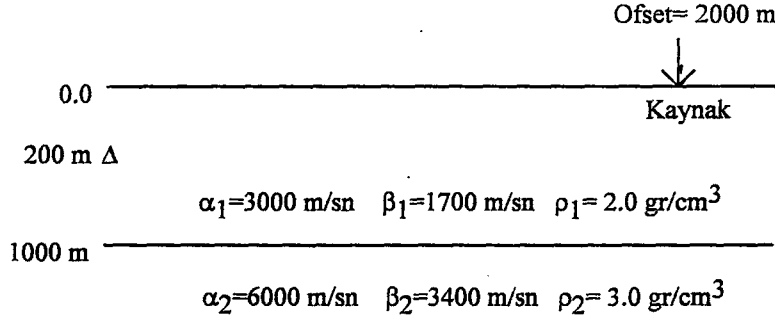
Şekil 10. Soğurma etkilerinden dolayı birim genlikli sismik dalgacığın zamanla soğurulması [55].

2.2.1. Soğurmanın Etkileri

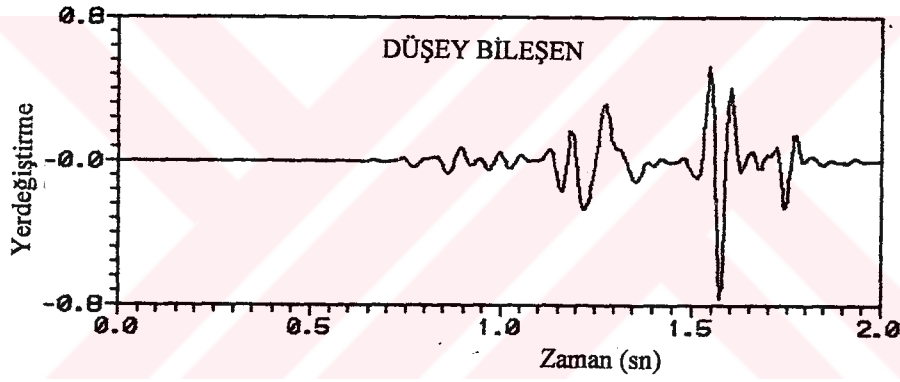
Sismik dalga soğurulmasının en iyi bilinen etkisi, soğurucu bir ortamda yayılan bir dalğanın genliğinde ve frekans içeriğindeki değişim etkisidir. Sismik dalğanın seyahati sırasında enerjisinin bir kısmı toplam enerji grubundan ayrılır. Bu durum yerin soğurucu özelliklerinin bir sonucudur. Yayılan dalğanın soğurulması bu durumlarda oldukça belirgindir. İleri ve ters çözümde soğurma ihmal edilirse hatalı sonuçların kaynağı olabilir [10]. Bir sismogramdaki kayıt zamanı gecikmeleri oldukça yüksek soğurma veya soğurucu kayalar için tanımlanabilmektedir (mesela, $Q=20$). Soğurmadan kaynaklanan bu gecikmeler hız yapısının belirlenmesine etki eder ve jeolojik yorumlamayı etkileyebilir [56]. Genel olarak soğurma etkileri (genlik ve fazda) yansıtabilirlik için Q dağılımı küçük olduğu zaman daha belirgindir. Bununla birlikte soğurma etkisi toplamdır; derin yansımaların genlikleri Q tarafından daha çok etkilenmeye meyillidir.

Soğurmanın bilinen diğer bir önemli etkisi, yer içerisinde yayılan dalgayı dispersiyona uğratmasıdır. Dispersiyon yayılan dalğanın hızı ile frekans arasındaki ilişki olarak düşünüldüğünde, soğurulma sonucunda sismik dalğanın frekans içeriği değişir ve aynı zamanda da fazı değişir. Soğurucu bir ortamda yayılan bir sismik dalga, soğurulmanın neden olduğu bir gruplaşma gösterecektir. Yani frekans içeriği değişen dalğanın farklı frekansları farklı hızlarda yayılacaktır. Eş frekanslar aynı hızlarda yayılım göstereceğinden gruplaşma olayı frekans içeriği aynı olan dalga fazlarının toplamı şeklinde tanımlanabilir. Genel olarak sismik dalga yayılırken soğurulması, gruptan ayrılan yüksek frekanslı enerji grubuna teka-bül eder. Dolayısıyla, soğurucu, ortam dalğanın yüksek frekanslarına karşı duyarlılık gösterirken (dalgayı soğurucu yönde), düşük frekansların yayılmasına izin verecektir. Bu olay sismik dalğanın frekansının daralmasına periyotunun genişlemesine dolayısıyla genliğinin azalmasına sebep olacaktır. Soğurmanın bu etkilerini daha iyi gözlemek için soğurmanın olduğu ve olmadığı bir ortam için uygun bir model kurularak her iki durumu gösteren bir sismogram hesaplamak yararlı olacaktır. Bunun için 2 tabakalı bir ortam modeli yeterli olacaktır. DSP sismogramlarının hesaplanması için oluşturulan ortam modeli şekil 11 de verilmiştir.

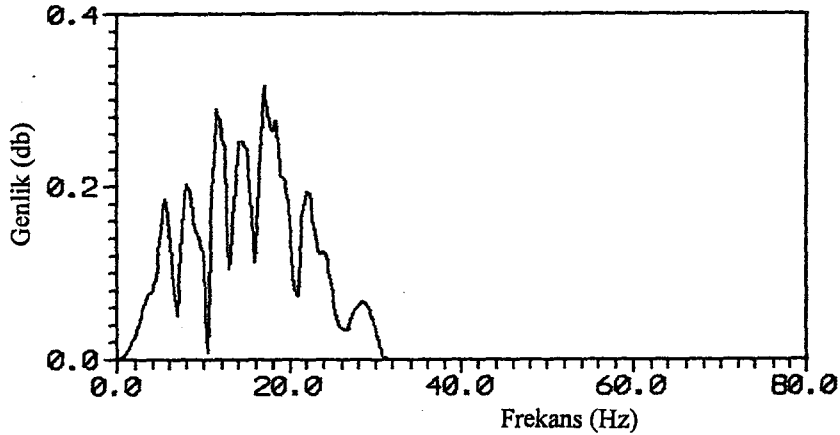
Şekil 11' de verilen basit iki tabakalı ortam için ilk olarak ortamda soğurma yok kabul edilerek (ortam elastik) yapay DSP sismogramı ayrık dalgasayısı çözümü kullanılarak hesaplandı (şekil 12). Görüldüğü gibi sismogram belirgin olarak yüksek frekanslı bileşenlerin etkisi altındadır. Bunu daha açık olarak bu sismogramın spektrumundan görebiliriz. Öyleki spektrumun büyük genlikleri yüksek frekanslarda yığılmıştır (şekil 13).



Şekil 10. 2 tabakalı ortam modeli. Kaynak-alıcı uzaklığı 2000 m ve alıcının derinliği 200 m dir. Yüzeyden düşey nokta kuvvet uygulanmıştır. Kaynak dalgacığı olarak 15 Hz' lik Ricker dalgacığı kullanılmıştır. Kesme frekansı 30.25 Hz olarak alınmıştır. Δ işareti alıcıyı göstermektedir.

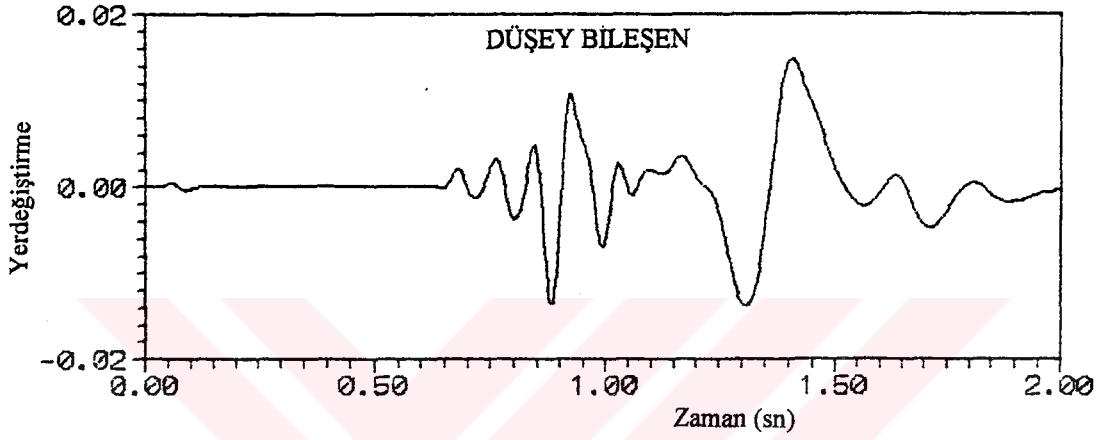


Şekil 12. Şekil 11' de verilen model için ortamda soğurma olmadığı bir durumdaki düşey bileşen DSP sismogramı. Sismogramın zaman boyu 2sn dir. Sismogram 256 noktada hesaplanmıştır.



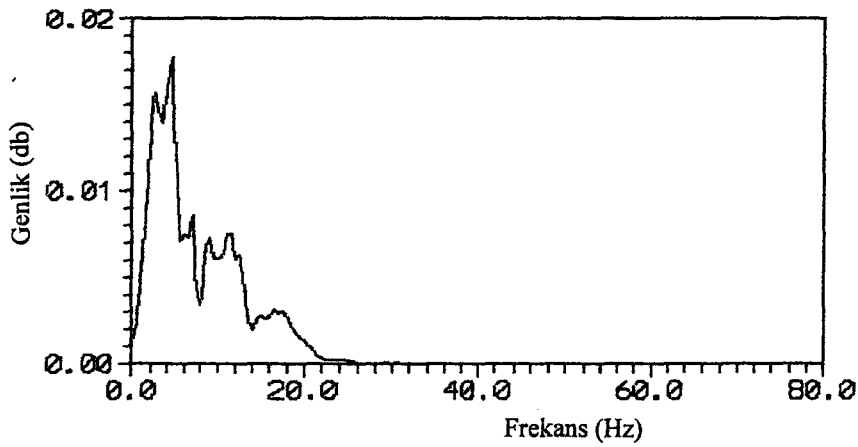
Şekil 13. Şekil 12' daki DSP sismogramının spektrumu.

İkinci olarak ortama soğurma ekleyerek aynı parametreler için DSP sismogramı yeniden hesaplandı (Şekil 14). Ortamda soğurma kalite faktörü-Q değeri ile temsil edilmiştir. 1. ve 2. tabaka için P ve S dalgası Q-değerleri sırasıyla $Q_{p1}=20$, $Q_{p2}=50$ ve $Q_{s1}=10$, $Q_{s2}=30$ olarak alınmıştır. Şekil 14' deki DSP sismogramı tamamen yüksek frekanslardan arınık bir hale gelmiştir. Ayrıca sismogramda eş zamanlara denk gelen dalga şekillerinde meydana gelen önemli bozulmalar soğurmanın diğer önemli bir etkisini ortaya koymaktadır.



Şekil 14. Şekil 11' de verilen ortama soğurma eklenerek hesaplanan düşey bileşen DSP sismogramı.

Eğer sismogram düşük frekansların etkisinde kalmışsa o halde spektrumunda bunu gözlemliyoruz. Buna göre sinyalin spektrumuna bakalım (şekil 15).



Şekil 15. Şekil 14' deki sismogramın spektrumu.

Şekil 15' dende açık olarak görüleceği gibi spektrumun yüksek genlikleri soğurmanın etkisiyle hızlı bir şekilde düşük frekans bileşenlerine doğru kaymış ve burada yığınlık göstermişlerdir. Aslında bu işlem yerin alçak geçişli bir süzgeç gibi davrandığı ilkesinin sonucudur. Yer içerisinde yayılan sismik dalgaların aynı etkilerle karşılaşması beklenir. Bundan dolayı yer içerisinde yayılan sismik dalganın tabaka sınırlarında ve tabaka içinde karşılaştığı durumların incelenmesi gerekmektedir.

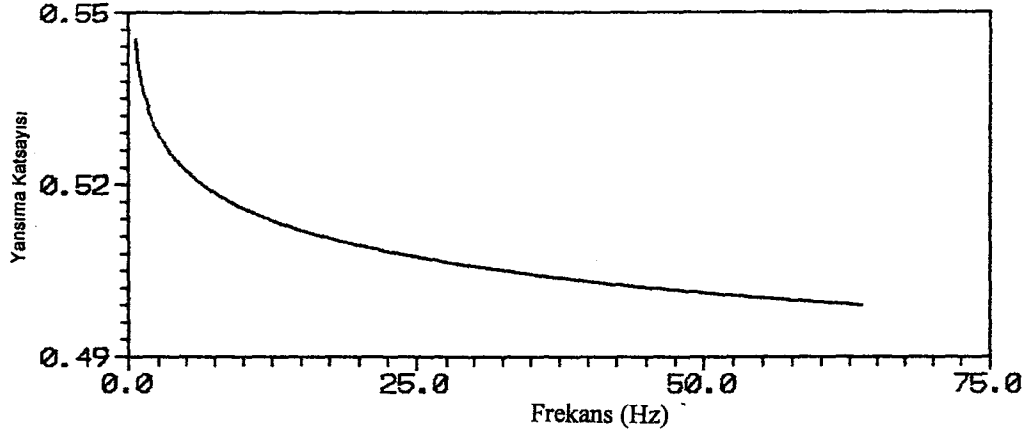
2.2.1.1. Soğurmanın Yansıma Katsayıları Üzerine Etkisi

Soğurma olayı aynı zamanda yansıma, geçiş ve tekrarlı yansıma kayıplarının bir bileşimi olarak tabakanlanmanın bir sonucu şeklinde de ele alınabilir. Bilindiği gibi tabakalanmış bir ortamda yayılan sismik dalgalar tabaka sınırlarında yansıma ve geçiş yaparlar. Bu olayın yansıma katsayılarının kontrolünde olduğu açıktır. Dolayısıyla sismik dalga genlikleri yansıma ve geçiş katsayıları ile doğrudan ilişkilidir.

Düzlem dalgalar için elastik ortamda yansıma katsayısı yoğunluk ve hızın bir fonksiyonudur. Dik geliş için iyi bilinen yansıma katsayısı formülü,

$$R_i = \frac{\rho_{i+1}c_{i+1} - \rho_i c_i}{\rho_{i+1}c_{i+1} + \rho_i c_i} \quad (63)$$

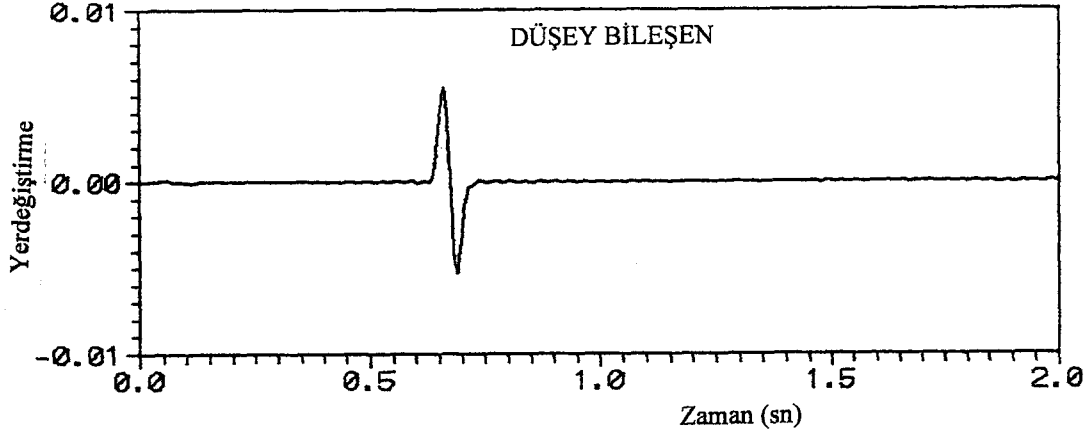
şeklinde verilir. Burada ρ_i , c_i i. ortamın yoğunluk ve hızlarıdır. Bu formül, iki ortam arasında akustik empedans farkı ($\rho_i c_i$) yoksa yansıma katsayısının sıfır olduğu yani yansımanın olmayacağını gösterir. Soğurmanın olmadığı ortamlarda hızlar ortamın gerçek hızları oldukları için buna bağlı olarak yansıma katsayıları da gerçektir. Ancak soğurucu ortamlar sismik dalgayı dispersiyona uğrattıkları için hızlar frekansın ve kalite faktörünün fonksiyonu olarak karmaşıklaşır. Bu durumda sismik dalga aynı tabaka sınırına her gelişte yeni bir yansıma ve geçiş katsayısıyla karşılaşacaktır. Yani (63) denkleminde hızlar frekansın fonksiyonu olarak kullanılırsa yansıma ve geçiş katsayıları da frekansın fonksiyonu olacaktır. Dolayısıyla yer yapısının cevabı tam elastik ve anelastik (soğurucu) ortamda aynı değildir. Yansıma ve geçiş katsayıları üzerine hız dispersiyonu ve soğurma etkisi oldukça küçük görülebilir (çoğu zaman böyledir) ve pratikte bu etkiler ihmal edilebilir. Şekil 16' da Q' nun fonksiyonu olarak yansıma katsayısının frekansla değişimi hesaplanmıştır. Ortam parametreleri Şekil 11' dekinin aynısıdır. Yansıma katsayısı artan frekanslarda üstel azalan bir fonksiyon şeklinde davranmaktadır. Dolayısıyla yer içinde yayılan dalganın yüksek frekansları düşük yansıma katsayıları ile çarpılacağı için dalganın frekans içeriğindeki yüksek frekans bileşenleri hızlı bir şekilde soğrulur.



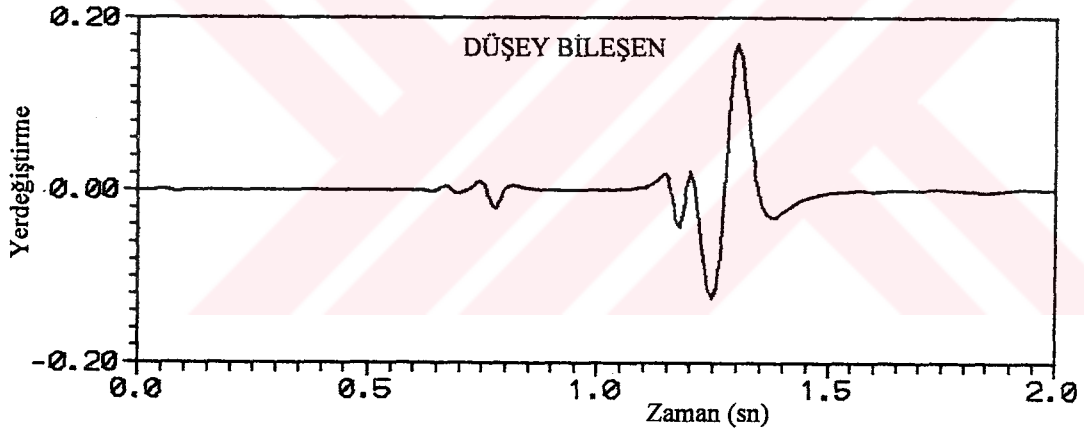
Şekil 16. Şekil 15' de tanımlanan yer yapısı modeli için frekansın fonksiyonu olarak yansıma katsayısının değişimi. Hesaplama için frekans örnekleme aralığı $\Delta f=0.49609375$ ve $\omega_r=100$ alınmış ve hesaplama 128 noktada yapılmıştır.

Eğer elastik parametreleri tanımlanmış bir ortamda akustik empedans farkı (ortamın hızı ve yoğunluğuna bağlı olarak) yoksa, tabaka sınırına gelen sismik dalganın yansıma ve geçişi, ortamların soğurma parametresi olan kalite faktörleri arasındaki farklılığa bağlı olarak gerçekleşir. Buradaki yansıma ve geçiş Snell yasasına uygun şekilde olur. Bunun anlamı, sismik dalga ortamda tanımlı hız ile yayılırken tabaka sınırına geldiğinde, sınırdaki enerji paylaşımı kalite faktörü Q' nun büyüklüğüne göre belirlenir.

Şekil 17' de basit iki tabakalı bir ortam için hız ve yoğunluklar tanımlanarak; önce ortam parametreleri (hız ve yoğunluk) eşit alınarak bir sismogram hesaplandı (şekil 17a), daha sonra ortama kalite faktörü eklendi, fakat hız ve yoğunluklar değiştirilmeden aynı kaynak alıcı dizilimi için yeni bir sismogram hesaplandı (şekil 17b). Genel olarak ilk durum için hesaplanan sismogramda, yansıyan, kırılan, başdalgaları gibi fazların olmaması gerekir. Şekil 17a' daki sismogramda sadece doğrudan gelen dalga fazının görülmesi bu kabulü doğrulamaktadır. İkinci durum için hesaplanan sismogramda, ortamda kalite faktörü empedansı olduğu için doğrudan gelen dalga fazları dışında diğer fazları da gözlemliyoruz. Şekil 17b ile verilen sismogramda görülen dalga fazları soğurmanın özellikle yansımalar üzerine olan etkisini açık olarak göstermektedir. Martinez ve McMechan [28] yaptıkları soğurma ve dispersiyon etkilerinin analizi ile ilgili çalışmalarında değişik yer modelleri kurarak soğurma etkilerini ayrıntılı olarak incelemiş ve özellikle Q değerinin değişiminin sismogramlardaki etkilerinin soğurucu ortamların modellenmesi ve tanımlanması açısından ne kadar çok önemli olduğunu ortaya koymuşlardır.



(a)



(b)

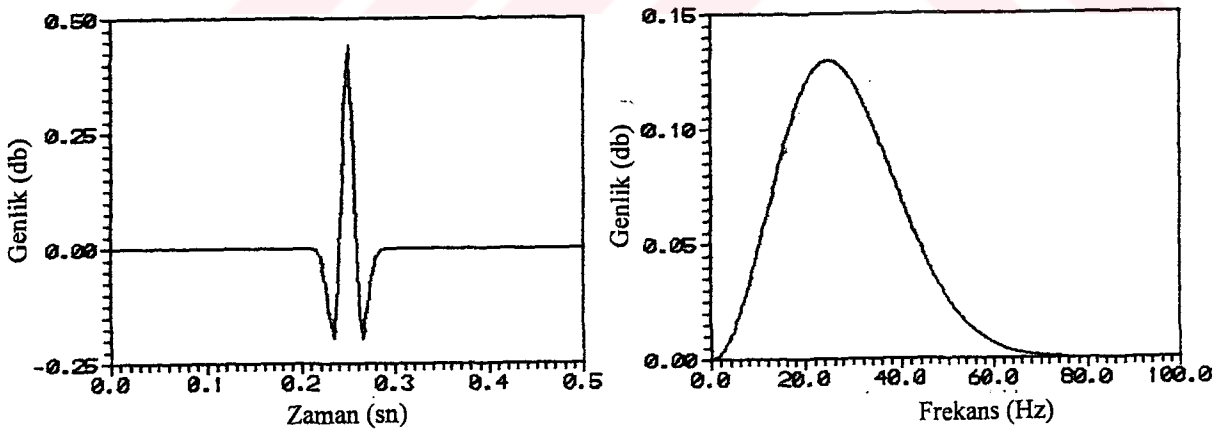
Şekil 17. (a) Hız ve yoğunluk farkının olmadığı bir durumdaki sismogram, (b) Ortamda sadece kalite faktörü farkı olduğu durumdaki sismogram.

2.2.1.2. Soğurmanın Sismik Dalgacık Üzerine Etkisi

Sonsuz homojen bir ortamda yayılan sismik dalgalar gerçek soğrulmanın sonucu olarak dispersif özellik gösterirler. Sonlu Q' ya sahip bir ortamda yayılan bir dalgacığın şekli uzaklıkla veya zamanla değişecektir. Olay frekans ortamında ele alındığında, farklı frekans

bileşenleri farklı faz hızı ve grup hızı ile yayılacaktır. Frekansın fonksiyonu olarak verilen soğurma özellikleri, sismik dalgacığın dispersif karakteristikleri, faz ve grup hızının frekans bağımlılığı hesaplanabilir. Soğurucu ortamda sismik dalgacığın yayılımı için iki temel yaklaşım vardır [34]. Birincisi, viskoelastik (akışkanlık) tanımlamayı gerektirir ve bir sismik dalgacığın yayılımı sırasındaki etkileri değerlendirir [57], [58], [59], [60]. İkinci yaklaşım, bir yeryapısı için kalite faktörü Q' yu sabit yada sabite yakın kabul eder. O halde kalite faktörü Q faz genişlemesini ve dispersiyonunu hesaplamak için kullanılabilir. Bu yaklaşım için Ganley [4], Temme ve Müller [5], Futterman [61], Kjartanson [62] ve Carpenter [63] çeşitli çalışmalar yaparak sismik dalgacığın soğurma özelliklerini incelemişlerdir. İkinci yaklaşım son yıllarda kabul edilebilir bir büyüklükte ilerleme göstermiştir.

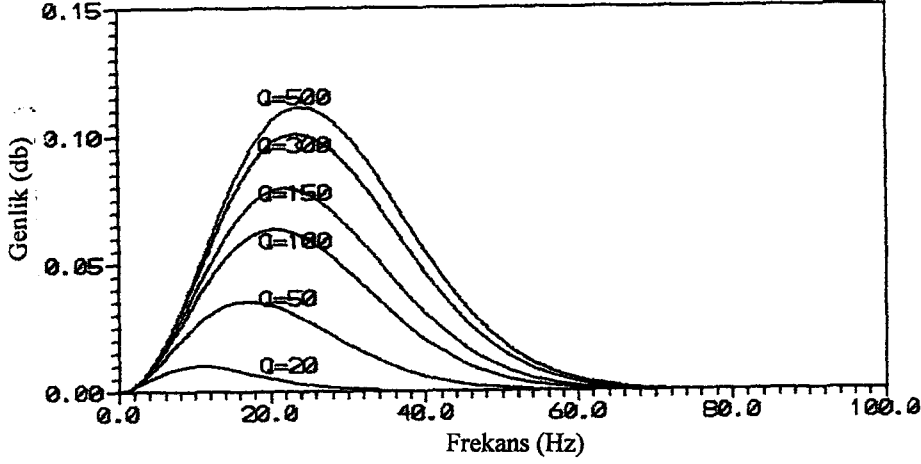
Soğurma ile ilgili yapılan bütün çalışmalarda ortak görüş, soğurmanın sismik dalgacık üzerine **alçak geçişli süzgeç** gibi davranmasıdır. Söz konusu süzgeç (11) denklemindeki üstel fonksiyondur. Böyle bir süzgeç uygulamasını Ricker kaynak dalgacığı kullanarak yapabiliriz. Bunun için, Ricker kaynak dalgacığını zaman ve frekans ortamında hesaplamak gerekir. 0.005sn zaman örnekleme aralığı ile 0.5sn' lik Ricker dalgacığı Şekil 18' de görülmektedir. Kaynak dalgacığının merkez frekansı 25 Hz alınmıştır. Görüldüğü gibi Ricker dalgacığı yan salınımları olmayan simetrik özellik gösteren ve çoğu uygulamalarda kullanılan bir dalgacıktır. Ricker kaynak dalgacığı yüksek frekanslarda dar spektrum gösterdiği için mümkün olduğu kadar uygun bir merkez frekansı seçilmesi sismogram hesaplarında kolaylık sağlar. Kaynak dalgacığının spektrumu Şekil 18 ile verilmektedir.



Şekil 18. Ricker kaynak dalgacığının zaman ve frekans ortamı görünümüleri.

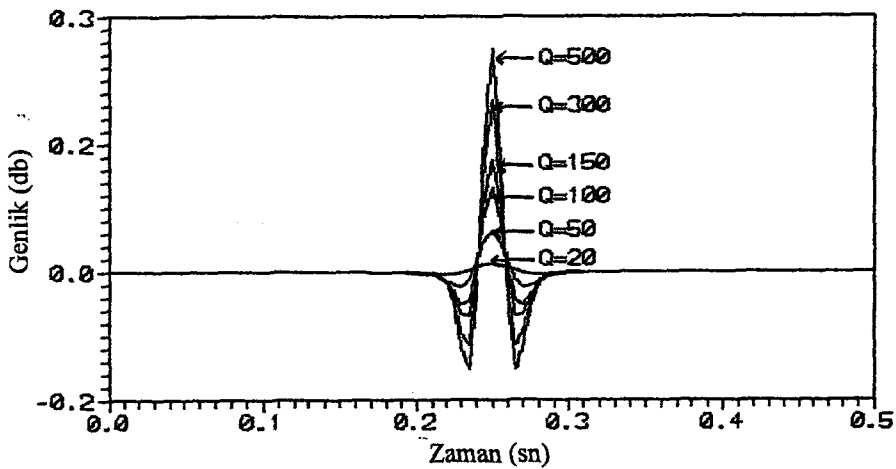
Şimdi değişik soğurma değerleri için Ricker dalgacığının spektrumundaki ve zaman ortamındaki görünümüne bakalım. Sırasıyla, $Q=500$, 300 , 150 , 100 , 50 , 20 değerleri için Ricker dalgacığının spektrumu Şekil 19 ile göstermiştir. Şekilden spektrumun yüksek

genlikleri Q ' dan dolayı düşük frekans bileşenlerine doğru kayma göstermiştir.



Şekil 19. Değişik soğurma (Q) değerleri için dalgacığın spektrumu.

Frekans ortamında verilen Q değerleri için hesaplanan spektrumlar kullanılarak zaman ortamına geri dönüldüğünde, dalgacığın genliğindeki azalma belirgin olarak şekil 20'de görülmektedir. Aslında burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, düşük frekansların etkisinde kalan dalgacığın periyodunun büyümesidir. Periyotun büyümesiyle dalgacık zaman ekseninde bir yayılma gösterecektir. Dolayısıyla, ilk anda sivri uçlu görülen genlikler soğurmanın artmasıyla gittikçe yuvarlaklaşır. Bu tamamen soğurmanın artmasıyla ilişkili bir olaydır. Yapılan soğurma çalışmalarında, hesaplanan sismogramların bu özellikleri göstermesi beklenir. Çünkü gerçek yerde genliği arttıracak (yada enerjiyi arttıracak) herhangi bir etki yoktur.

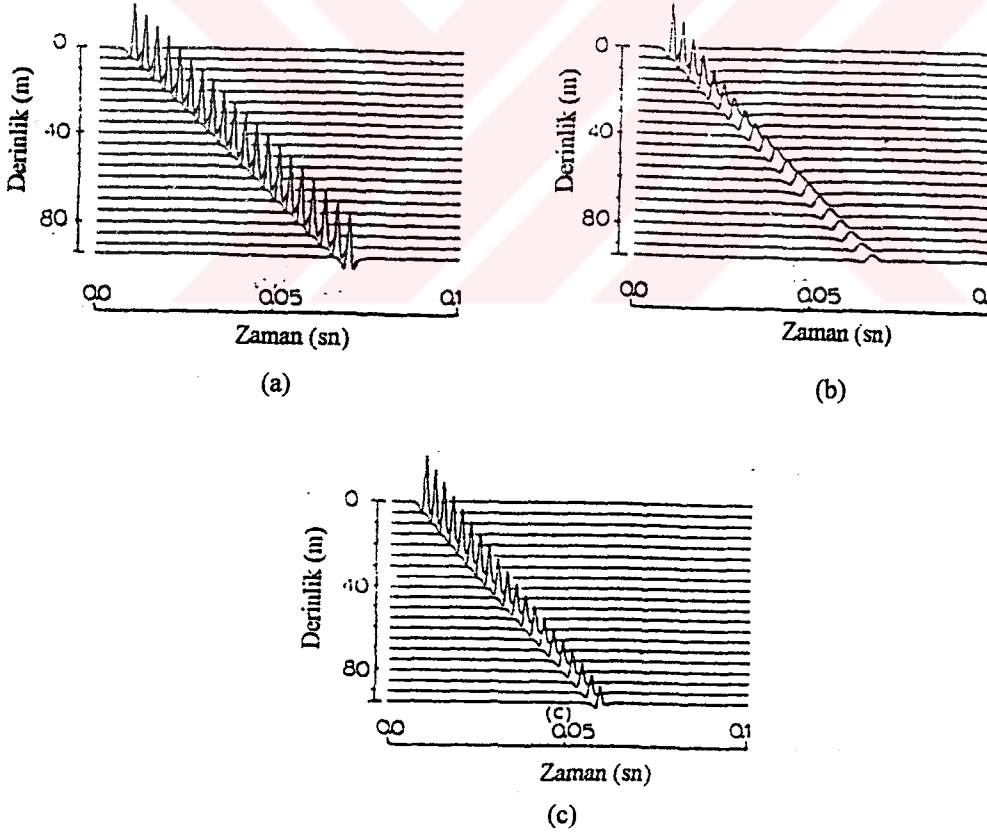


Şekil 20. Kaynak dalgacığının değişik soğurma (Q) değerleriyle soğulduktan sonra zaman ortamındaki görünüşleri.

Soğurmanın derecesinin bir kayaç türünden diğerine değişim göstermesi kayacın kalitesi ile direkt ilişkilidir [35]. Gerçekte granit içerisinde ilerleyen sismik dalgaların soğurulması, kum içerisinde ilerleyen sismik dalgaların soğurulmasından daha az olmaktadır. Bu tamamen kayaç yapısının dalgayı kayıpsız olarak iletebilecek yapıya sahip olup olmadığına bağlıdır.

Soğurmanın dalgacık üzerindeki etkisini daha açık olarak görmek için merkez frekansı $f_0=400$ Hz'lik bir Ricker dalgacığının soğurulması farklı soğurma parametresine sahip kayaçlar için Şekil 25' de gösterilmiştir.

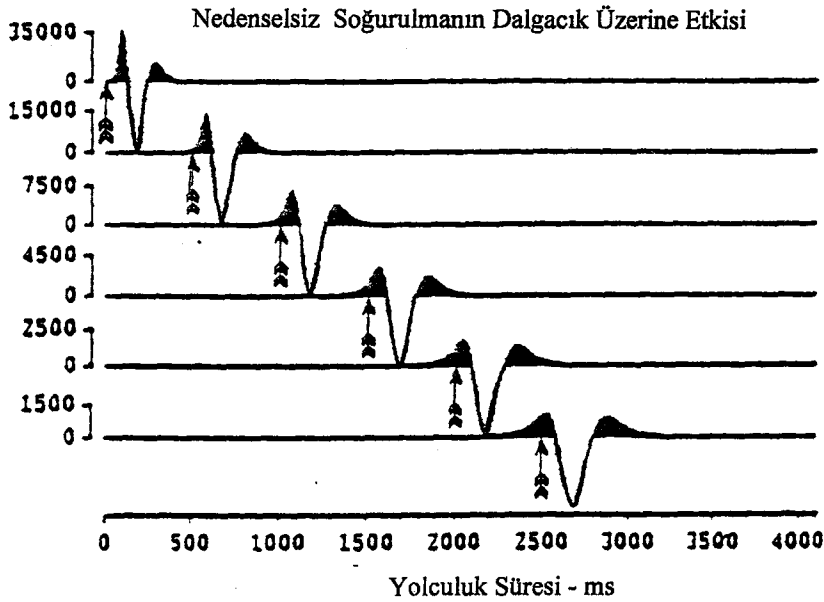
Ricker dalgacığı çok yüksek frekanslı olmasına rağmen özellikle kum (ayrık malzeme ve düşük kalite faktörü Q biriminin yüksek soğurmaya sahip olması sismik dalgacığın etkili olarak genliğini azaltmıştır. Ancak silt biriminin düşük soğurma (yüksek kalite faktörü Q)'ya sahip olması yayılan dalgacığın genliğini pek etkilememiştir. Açık olarak şekilden de görüleceği gibi soğurmanın derecesi sismogramlarda etkisini göstermektedir.



Şekil 21. Ricker dalgacığının soğurma (Q) değeri farklı ortamlarda yayılımı. (a) silt, (b) kum, (c) kalın kum ortamlarında elde edilmiş sismogramlar [64].

2.2.2. Soğurmada Nedensellik Problemi

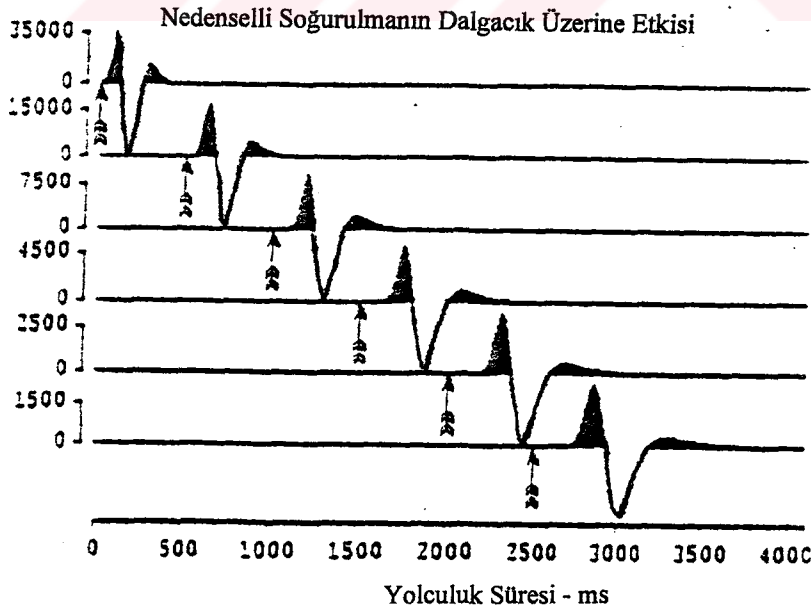
Sismik soğurma çalışmalarında karşılaşılan önemli bir problemde sismik dalganın soğurulmasındaki nedensellik (causality) dir. Nedensellik sismik dalgacığın kayıt zamanlarını görünür olarak bozan ve yanılgılara sebep olan bir problemdir. Özellikle bir dalgacığın bir kayıtcıya beklenen zamandan önce yada sonra gelip gelmemesi dalgacığın nedensel olarak soğrulup soğrulmaması ile ilgilidir. Bilindiği gibi ortamın dispersif özellik göstermesi bu ortamın soğurma karakteristiklerini ortaya koyar. Soğrulamaya uğrayan bir sismik dalgacık yüksek frekanslarını kaybederek ilerlerken periyodu genişleyecek bu durumda kaydedilen bir dalgacık sanki kayıtcıya daha erken gelmiş gibi bir durum olacaktır. Bu durum önemli derecede yorum hatalarına sebep olabilmektedir. Basit olarak böyle bir olayı şekil 22 ile gösterebiliriz. Şekil 22' de 520 ms uzunluğundaki bir dalgacığın 500 ms aralıklarla seyahati boyunca aldığı Şekiller görülmektedir. Veri 4 ms' de bir örneklenmiş ve Q değeri oldukça yüksek soğurma için 10 alınmıştır. Şekilde oklar dalgacıkların kaydedilmesi gereken zamanları göstermesine rağmen, açık olarak dalgacıklar bu kuralı yani nedenselliği bozmuştur. Bu durum tamamen nedenselsiz soğurmada kaynaklanmaktadır. Genel kural olarak meydana gelen bir olayın sonucu yada sonuçları olay oluşundan sonra ortaya çıkar. Buna göre Şekil 22' deki nedenselsizlik problemi ortadan kaldırılarak dalgacıkların beklenen zamanda yada daha sonra gelmeleri (kayıt edilmeleri) sağlanmalıdır. Yani dalgacıklar geciktirilerek nedensel hale getirilmelidir. Bu problem giderildiğinde soğurma çalışmalarında önemli bir problem ortadan kaldırılmış olur.



Şekil 22. Nedenselsiz soğurulma [35].

Sismogram hesaplamalarının önemli bir problemi olan nedenselliğin sağlanması değişik yöntemlerle yapılabilmektedir. Değişik olan bu yöntemlerin temelini sismik dalgacığın frekans içeriği oluşturur. Bunun için Hilbert dönüşümü kullanılarak sismik dalgacığın fazı belli oranda kaydırılarak zaman ortamına geri dönülerek nedensel sismogram elde edilmiş olur. Hilbert dönüşümünün geniş bir uygulaması [35]' de bulunabilir. Ancak, herhangi bir sinyalin spektrumunda yapılacak bir işlem sonuçta istenmeyen hatalara sebep olabilir. Bu açıdan genel olarak sinyalin frekans içeriği ile ilgili yapılacak işlemler çözümün özünde oluşturulmalıdır. Bu düşünceden hareketle bir çok araştırmacının kullandığı ve önerdiği gibi dalga hızının frekans bağımlı ve kompleks kullanılması nedenselliği garantiler. Bunun anlamı ortamın dispersif yapılmasına karşılık gelmesidir. Çünkü dispersif ortamlar bu ortamda yayılan sismik dalgaları geciktirmeli olarak soğuracaktır.

Genel olarak minimum fazlı sistemler nedenselliği garantilemiş sistemlerdir. Anstey [55] tarafından belirtildiği üzere yerdeki bir olayı minimum fazlı bir sistem şeklinde düşünersek, gerçek sismogramlar nedenselliği sağlamıştır. Şekil 23' de nedenselliği sağlamış bir sismik dalgacığın zamanla yayılımı görülmektedir. Hesaplama için kullanılan parametreler Şekil 22' nin aynısıdır. Buradaki okların gösterdikleri zamanlar dalgacığın beklenen kayıt zamanıdır. Dikkat edilirse dalgacık beklenen zamanda ve zaman ilerledikçe daha sonra gelmeye başlamışlardır. Yani beklenen zamanla gözlenen zaman arasında dalgacığın yüksek frekanslarına tekabül eden genlikler soğurulmuştur.



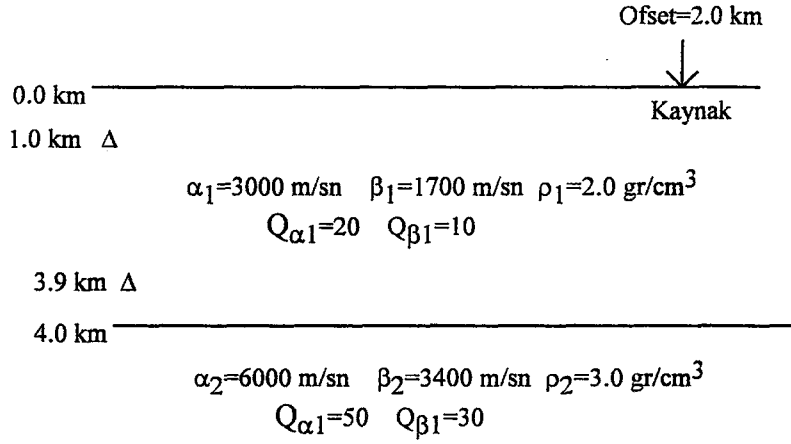
Şekil 23. Nedenselli soğurulma [35]

Şekil 22 ve 23' ye dikkat edilirse, hem zaman ilerledikçe ve hemde derinlere doğru nedenselsizlik ve nedensellik daha çok belirginleşmektedir. Bunun kaynağı, dalganın her ilerlemesinde aynı soğurma etkisiyle yeniden karşılaşması yada eğer ortam tabakalı ise, yeni soğurma etkileri ve ek olarak olarak küresel açılamdan kaynaklanan soğurma etkileriyle karşılaşmasıdır. Nedensel soğurmanın diğer bir etkiside, dalganın kendini oluşturma süresinin gecikmesidir. Böylece soğurma etkileri arttıkça dalgacık kendini oluşturmak için daha çok zamana ihtiyaç duyacaktır. Bu durum tamamen soğurucu ve dispersif ortamların sismik dalgacığın yayılımı üzerine etkisidir.

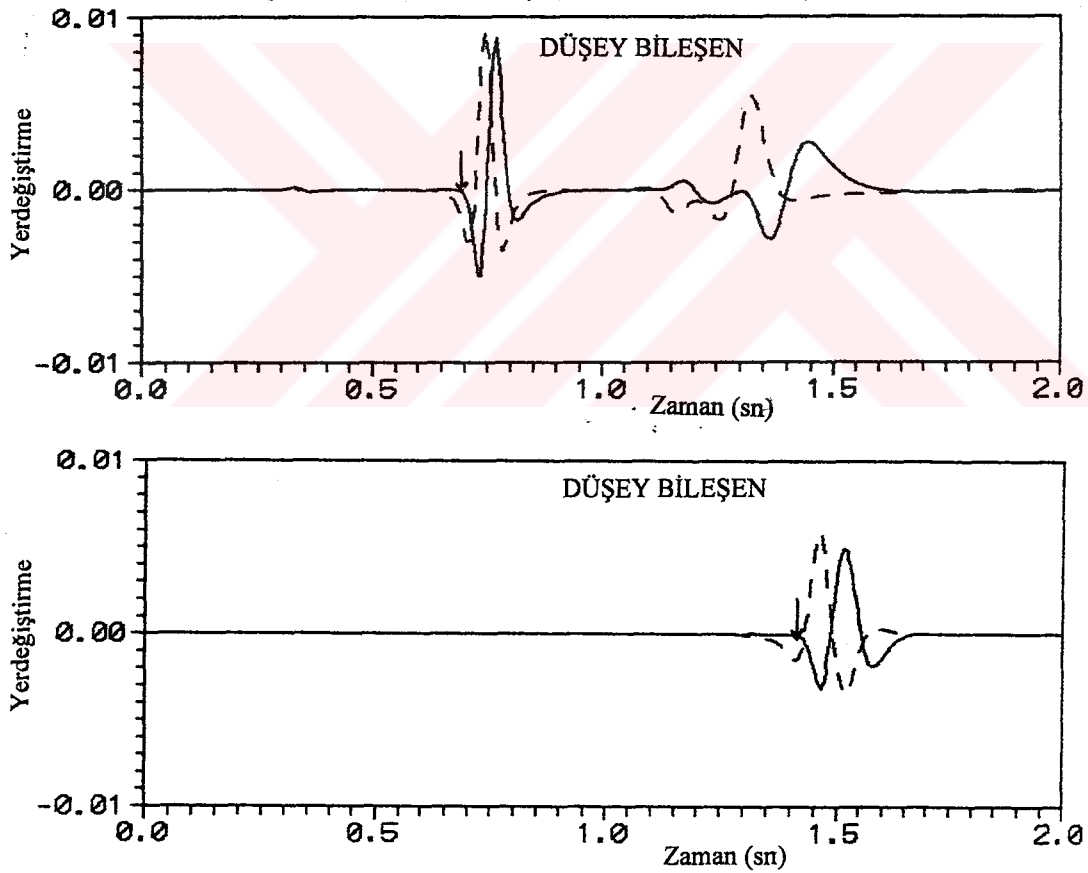
Basit olarak bir sismik dalgacık için gözlediğimiz nedensellik olayını aynı dalgacığı kullanarak yapay sismogramlarda elde etmeye çalışalım. Sismogram hesaplamalarında nedenselliği sağlamak için kompleks hız profillerini frekansın fonksiyonu olarak kullanmak en doğru yaklaşımdır. Frekansın fonksiyonu olarak kullanılan hızlar dispersiyon etkisini hesaba katar. Dispersiyon dalganın yayılmasını ve şeklini etkiler. Çünkü, hız dalganın içerdiği bütün frekanslarda aynı değere sahip olursa dalganın her fazı aynı yavaşlığa sahip olacaktır. Artan frekanslarda hızın artması yüksek frekanslı bileşenlerin daha erken kaydedilmesi anlamına gelir. Ancak bu durum sismik dalganın nedensel olarak soğurulma-sına aykırıdır. Soğurma çalışmalarında bu özelliğin hesaplamalarda gözönüne alınması gerekir. Bu amaçla kullandığımız dispersif hız denkleminin (60 denklemi) bunu sağladığını göstermek için; hesapladığımız yapay sismogramlarla dispersif olmayan bir hız denklemiyle hesapladığımız sismogramları karşılaştırmak gerekir. Dispersif olmayan hız denklemi olarak Keho ve diğ. [65] tarafından verilen denklem kullanılacaktır.

$$k^2 = 2 \frac{\omega^2}{c^2} \frac{1+iQ^{-1}}{1+(1+Q^{-2})} \quad (64)$$

(60) denklemi ile (64) denkleminin farkını görmek için Şekil 24' de iki tabakalı bir ortam modeli düzenlenmiştir. Dikkat edilirse, yüksek soğurma için düşük Q değerleri alınmıştır. İki ortam arasındaki Q kontrastı küçük alınarak sismik dalga kısa sürede soğurmaya uğratılmak amaçlanmıştır. Dolayısıyla sismik dalgaların kayıt zamanlarında belli oranda gecikme olacaktır. Özellikle jeofonların derinliğinin etkilerinin de hesaba katılması için, tabaka sınırı oldukça derin alınmıştır. Jeofonlar arasındaki uzaklık fazla alınarak herbir sismogram arasındaki kayıt zamanlarındaki farklılık açık olarak gözlenmiştir. Burada diğer bir kriter de referans frekansının büyük seçilmesidir. Bu seçim tamamen (60) denkleminin nedensel soğurmayı tam olarak garanti altına alması içindir. Öyleki referans frekansının sismogramın maksimum frekans içeriğinden büyük seçilmesi yavaşlığı artırarak kayıt zamanlarını geciktirir.



Şekil 24. Dispersif ve dispersif olmayan DSP sismogramlarının hesaplanması için kaynak-alıcı dizilimi. Kaynak dalgacığı 15 Hz' lik Ricker dalgacığıdır.



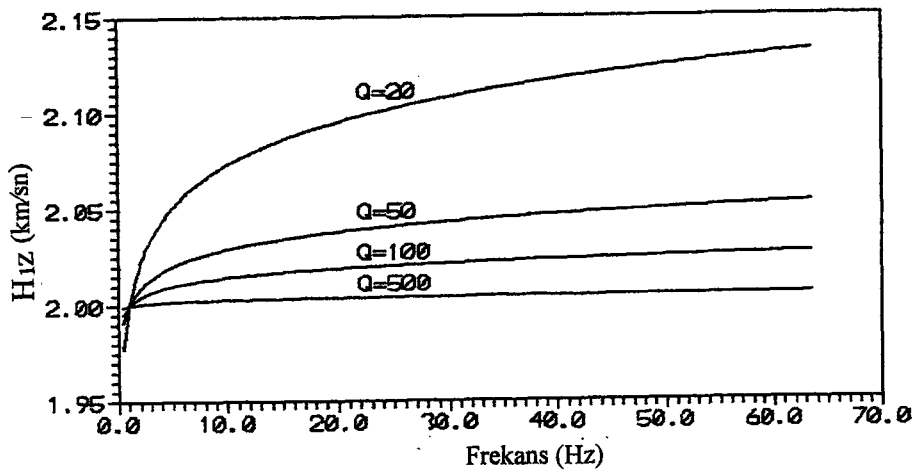
Şekil 25. Şekil 24 ile verilen model için dispersif ve dispersif olmayan simogramlar. Sürekli çizgiyle gösterilen sismogramlar dispersif hız denklemiyle, kesikli çizgiyle gösterilen sismogramlar dispersif olmayan hız denklemiyle hesaplanmıştır. Simogramlar üzerinde gösterilen oklar olayların kaydedilme zamanlarını göstermektedir.

Zaman ilerledikçe ve derinlik arttıkça dispersif ve dispersif olmayan hız denklemiyle hesaplanan sismogramlar arasındaki zaman farkı artmaktadır. Dispersiyonun etkisinden kaynaklanan dalgacıktaki erken bozulmalar açık olarak görülmektedir. Özellikle Şekil 24' de 3.9 km daki sismogramda sinyalin açık olarak beklenen zamandan önce gelmesi (kesikli çizgiyle gösterilen) nedensel olmayan soğurmayı açıklamaktadır.

2.2.2.1. Referans Frekansının Seçiminin Nedensel Soğurmaya Etkisi

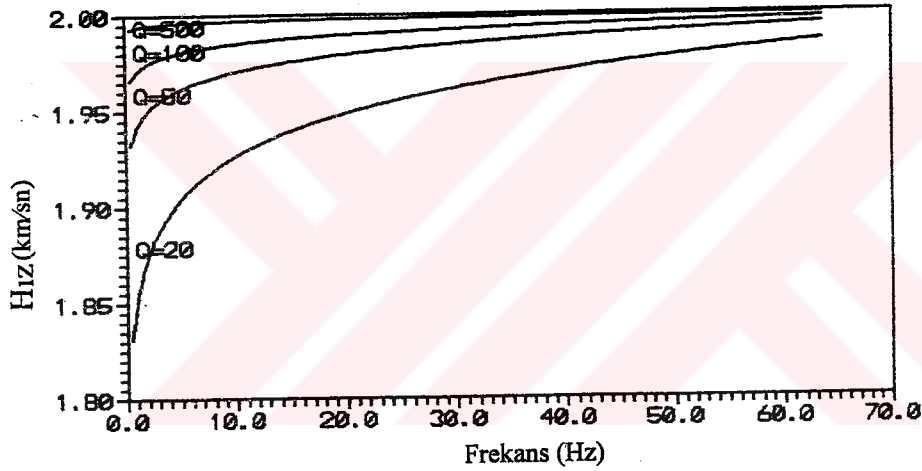
Referans frekansı terimi, frekans ortamında yapılan bütün hesaplamalarda önemli bir niceliktir. Öyleki, çözümün karakteristik davranışını belirler. Frekansın fonksiyonu olarak kullanılan (60) denkleminde referans frekansı nedenselliğin bir göstergesidir ve seçimi genel olarak keyfidir. Başlangıçta çözüm için gerekli parametrelerin tanımlanması referans frekansına göre yapılması çözümün bu frekans civarında oluşacağını göstergesidir. Genelde sismogramlar yapay olarak hesaplanırken, ortamın yoğunluğu, hızı, kalite faktörü belli bir referans frekansında tanımlanır ve buna bağlı olarak bu değerler değişebilir.

Referans frekansının seçiminde, çözümde kullanılan frekans aralığı önemlidir. Öyle ki referans frekansı çözümde kullandığımız en büyük frekanstan daha büyük seçilebileceği gibi, küçük bir değerde seçilebilir. Aki ve Richards [42] bu değeri 1 Hz, Ganley [4] ve Futterman [61] frekans örnekleme aralığının ($\Delta\omega$)' dan küçük ($\Delta\omega < \omega_r$) seçmiştir. Dietrich ve Bouchon [48] bu değeri 100 hz olarak kullanmış ve yapay DSP sismogramlarını buna bağlı olarak hesaplamıştır. Bu çalışmada referans frekansı olarak Dietrich ve Bouchon [48]' in önerdiği değer kullanılacaktır.



Şekil 26. $\omega_r=1$ Hz için (60) denkleminin gerçel bileşeninin $Q=500, 100, 50$ ve 20 değerlerindeki frekansla değişimi. Referans hız 2 km/sn alınmıştır. Hesaplamalar 128 noktada 63.5 Hz' e kadar yapılmıştır.

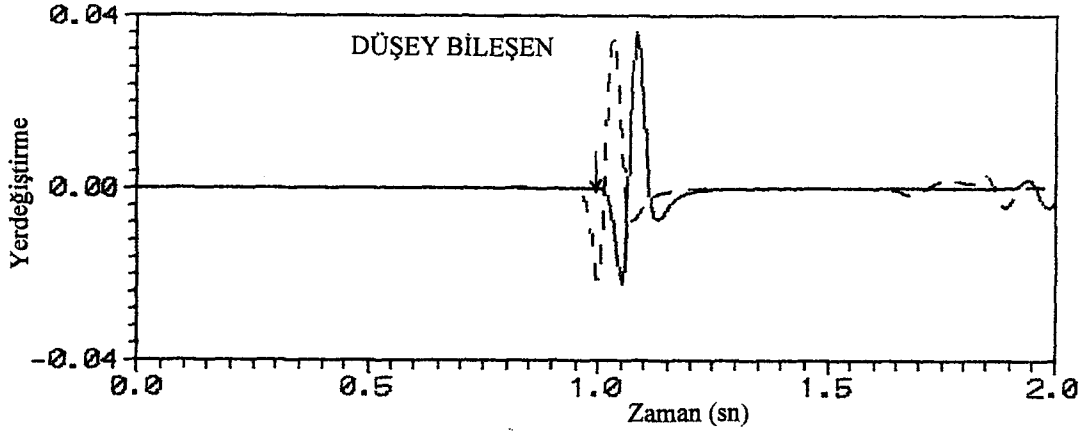
Genel kural olarak yüksek kalite faktörüne sahip ortamlarda dalga yayılımı daha hızlı olur. Ya da tabaka içinde tanımladığımız faz hızı, o tabaka içinde dalganın ulaşabileceği en yüksek hız olmalıdır. Buradaki amaç, yavaşlığın artırılması içindir. Eğer hız değerleriniz artan frekanslarda referans hızından büyük olursa yavaşlık azalacağından dalga kayıtçıya daha erken gelecektir. Ancak bir dalganın kayıtçıda kaydedilmesi gereken en erken zaman referans hızında olmalıdır. Şekil 26' daki dispersiyon eğrileri artan frekans değerlerinde, özellikle düşük Q değerlerinde referans hızından büyük değerleri göstermektedir. Bu yüksek frekanslı bileşenlerin hızlı yayılması anlamına gelirki bu nedensel soğurmayı ihlal eder. Aslında en yüksek Q değeri ortamın elastikliğinin en iyi olduğu zamandır. Yani ortam da anelastisiden kaynaklanan soğurma ya yoktur yada en azdır.



Şekil 27. $\omega_r=100$ Hz için (60) denkleminin gerçel bileşeninin Q=500, 100, 50 ve 20 değerlerindeki frekansla değişimi. Referans hız 2 km/sn alınmıştır. Hesaplamalar 128 noktada 63.5 Hz' e kadar yapılmıştır. Eğrilerin Q değerleri eğriler üzerine işaretlenmiştir.

Şekil 27 nedensellik için doğru dispersif hız eğrilerini göstermektedir. Görüldüğü gibi hiç bir hız değeri referans hızından büyük değildir. Ayrıca Q değerleri arttıkça (soğurma azaldıkça) hız eğrisi referans hız değerlerine yaklaşmaktadır.

Soğurmanın nedenselliğini sağlamak açısından ω_r 'in çözümün frekans aralığından büyük seçilmesi doğru ve uygundur. Referans frekansının bu özelliğini yapay sismogramlar üzerinde görmek için şekil 24' de verilen ortam parametrelerini kullanarak referans frekansının 1 Hz ve 100 Hz olması durumundaki sismogramları hesaplayalım...



Şekil 28. Şekil 24 ile verilen ortam için referans frekansının 1 Hz ve 100 Hz olması durumundaki düşey bileşen DSP sismogramları. Kesikli çizgiyle gösterilen sismogram $\omega_r=1$ Hz olma durumunda, sürekli çizgiyle gösterilen sismogram $\omega_r=100$ Hz olma durumunda hesaplanmıştır. Şekildeki ok işareti sinyalin gelmesi gereken zamanı göstermektedir.

Kesikli çizgiyle gösterilen sismogram sürekli çizgiyle gösterilen sismograma göre hem daha erken kaydedilmiş hemde daha az dispersiyona uğrayarak dalga şeklini muhafaza etmiştir. Ortam parametrelerine göre 1.0 sn' de gelmesi gereken sinyal $\omega_r=1$ Hz olma durumunda, bu zamandan daha erken gelerek nedenselliği ihlal etmiştir. Bu durum yapay DSP sismogramların gerçek sismogramlarla karşılaştırılması durumunda yorumlama hatalarına neden olabilir.

2.3. DSP Verilerinin Modellenmesi Çalışmaları

Bilindiği gibi yeraltı şekli ve özellikleri bilinen yer yapılarının verecekleri sismik etkinin hesaplanması modelleme çalışması olarak tanımlanır. Sismik modelleme çalışmalarının temelini yapay sismogramların hesaplanması oluşturur. Yapay sismogramlar yer içinde yayılan bir sismik dalganın kayıtçıya kadar geçtiği ortamları ve bu ortamların özelliklerini içermesi açısından, gerçek arazi sismogramlarının yorumlanmasına önemli katkılar sağlar. Bilindiği gibi yapay yüzey sismiği sismogramları (YSP) yer içindeki bir yansımayı yada tekrarlıyı tanımlama imkanı verirken, yapay DSP sismogramları bununla kalmaz aynı zamanda yayılan enerjinin tekrarlı yansımayı meydana getirmek için yer içindeki izlemiş olduğu yolun üçüncü boyutta tespit edilmesine imkan verir.

Yapay DSP sismogramları sismik dalganın tabakalar içinde yayılışı esnasındaki tüm etkilenmelerin belirlenebilmesi açısından yorumcuya önemli kolaylıklar sağlar. DSP kesitlerinde aşağıya ve yukarıya giden dalga alanlarının her ikisinde bulunması DSP' nin tabiatından kaynaklanır. Bu dalga alanları istenirse ayırt edilebilir. Bu ayırım yansıma ve kırılmalarındaki sıralamanın daha iyi görülmesini sağlar. Yapay DSP kesitleri, tüm tekrarlı yansımaları, tabaka sınırlarındaki yansıma ve kırılmaları mod dönüşümlerini (P' den S' ye veya S' den P' ye), ortamın özelliklerini ve buna bağlı diğer litolojik özelliklerin (doymuşluk, geçirimsizlik, gözeneklilik, çatlaklılık v.b.) görülmesi ve analiz edilmesi açısından çok önemlidir. Öyleki yapılan DSP ölçümlerinden sonra elde edilen verilerden yeraltının jeolojik yapısı oluşturulur ve oluşturulan bu yeryapısının belirlenen bir kaynak için yapay DSP kesiti hesaplanarak gerçek kesitte görülemeyen olaylar belirlenir aynı zamanda görülememenin nedenleri ortaya koyulur. Kesitlerde bazı olayların görülememesinin başlıca nedenleri olarak kaynağın seçimi, soğurma ve kayıt aralıkları verilebilir. Arazi çalışmasında bu işlerin yeniden tekrarı zaman ve maddi açıdan zordur. Böylece yapay modelleme yapılarak bir çok kayıt işleminden kaynaklanan fazla masraf önlenmiş olur.

Yapay DSP kesitleri uygun bilgisayarlarda kolaylıkla hesaplanabilir. Bu çalışma için VAX-6520 sistemi kullanılarak modeller hesaplanmıştır. Modelleme de kurulan tabaka modeli kolayca değiştirilebilir. Meselâ, tabaka adeti artırılabilir-azaltılabilir, kalınlaştırılabilir-inceltilebilir, kuyu-kaynak uzaklığı kolaylıkla değiştirilebilir. Yeraltındaki karmaşıklıkların nedenlerinin belirlenmesi için DSP modellemesi bu tür çalışmalarda ilk adım olmalıdır [32].

2.3.1. Soğurmanın Olduğu ve Olmadığı Ortamlarda Yapay DSP Kesitleri

Burada teorik esasları daha önce verilen ayrık dalgasayısı yöntemi kullanılarak yapay DSP kesitleri hesaplanmıştır. Bilgisayar programı olarak Prange [13] tarafından geliştirilen algoritma amaca göre düzenlenerek kullanılmıştır. Yapay DSP kesitleri iki bileşenli olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar aynı yer modeli için soğurma varken ve yokken hesaplanarak gösterilmiştir. Soğurma Aki ve Richards [42] tarafından verilen kompleks hız denklemi kullanılarak hesaba katılmıştır. Tabaka sayısının artırılmasının algoritmaya ve soğurmaya etkisi sınanmıştır. Ortamın soğurma parametresi olarak kullanılan kalite faktörü Q' nun değişiminin sismogramlara ve kesitlere etkileri değerlendirilmiştir. Bununla birlikte yüzeyde uygulanan kaynak kuvvetlerinin değişik uygulama doğrultuları için, yapay DSP kesitleri hesaplanarak kaynak kuvvetleri modellenmiştir.

Kurulan modellerde tabaka parametreleri keyfi olarak seçilmiştir. Ancak bu seçimde P ve

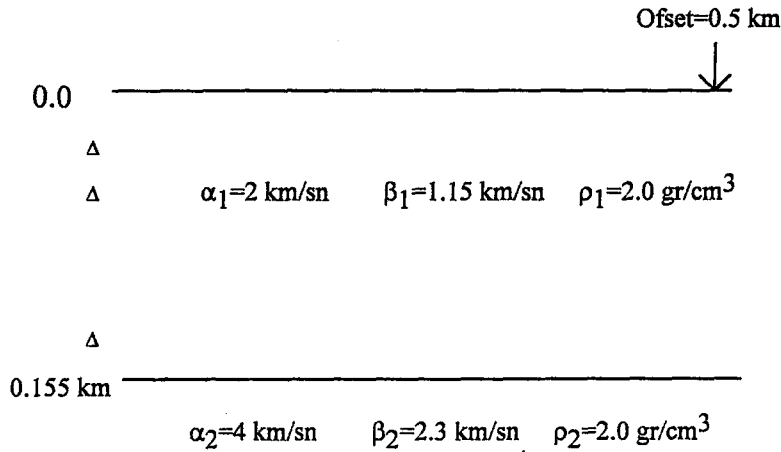
S dalga hızları arasında geleneksel olarak kabuk içinde kullanılan ilişki esas alınmıştır. Bu ilişkiler Silva [6]' da kullanıldığı şekilde kullanılmıştır. Buna göre,

Hızlar için, $\frac{\alpha}{\beta} = \sqrt{3}$ (kabuk içinde), kalite faktörleri için, $Q_\alpha = \frac{3}{4} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 Q_\beta$ ilişkileri kullanılmıştır. Burada sırasıyla α , β , P ve S dalga hızlarını; Q_α , Q_β , P ve S dalgası kalite faktörlerini gösterir.

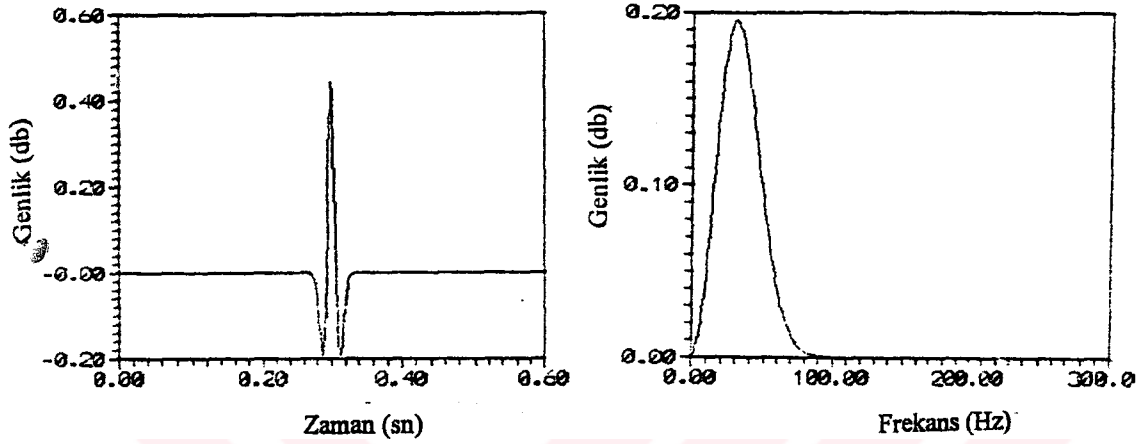
İlk olarak DSP sismogramlarında muhtemel tüm dalga fazlarının (baş dalgaları, direk varışlar, yansımalar ve Rayleigh dalgaları) tanınabileceği bir model düzenlenmiştir. Bu model şekil 29' de verilmektedir. Modelde 50-150 m' ler arasında eşit aralıklarda 10 adet alıcı kullanılmış ve 500 m' lik kaynak ofseti alınmıştır. Kaynak olarak yüzeyde düşey nokta kuvvet, kaynak dalgacığı olarak,

$$f(t) = \left[1 - 2(f_p t)^2 \right] \exp\left(-(\pi f_p t)^2 \right) \quad (64)$$

şeklinde sıfır fazlı Ricker dalgacığı kullanılmıştır. Dalgacığın merkez frekansı $f_p=30$ Hz olarak alınmıştır. Sismogramlar 0-0.6sn zaman aralığında 512 noktada hesaplanmıştır. Kaynak dalgacığının zaman ve frekans ortamı görünümü şekil 30' de verilmiştir. Kurulan bu model için hesaplanan yatay ve düşey DSP kesiti şekil 31' de verilmektedir.



Şekil 29. İki tabakalı ortam modeli. Alıcı yerleri Δ ile gösterilmiştir. Ortamda soğurma yok kabul edilmektedir.

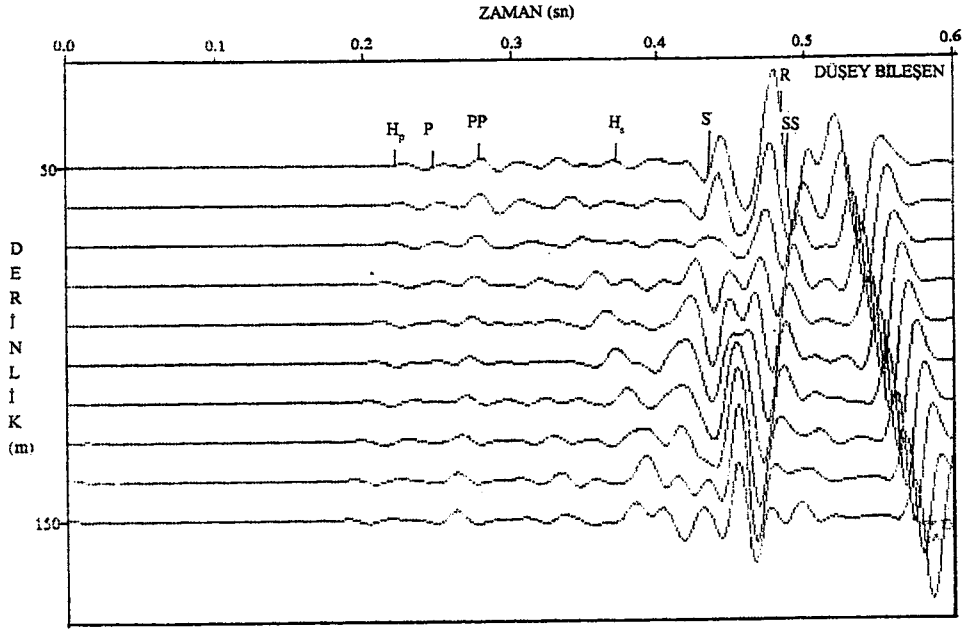


Şekil 30. Şekil 31' de verilen yapay sismogramların hesaplanmalarında kullanılan Ricker kaynak dalgacığının zaman ve frekansı ortamındaki görünümü.

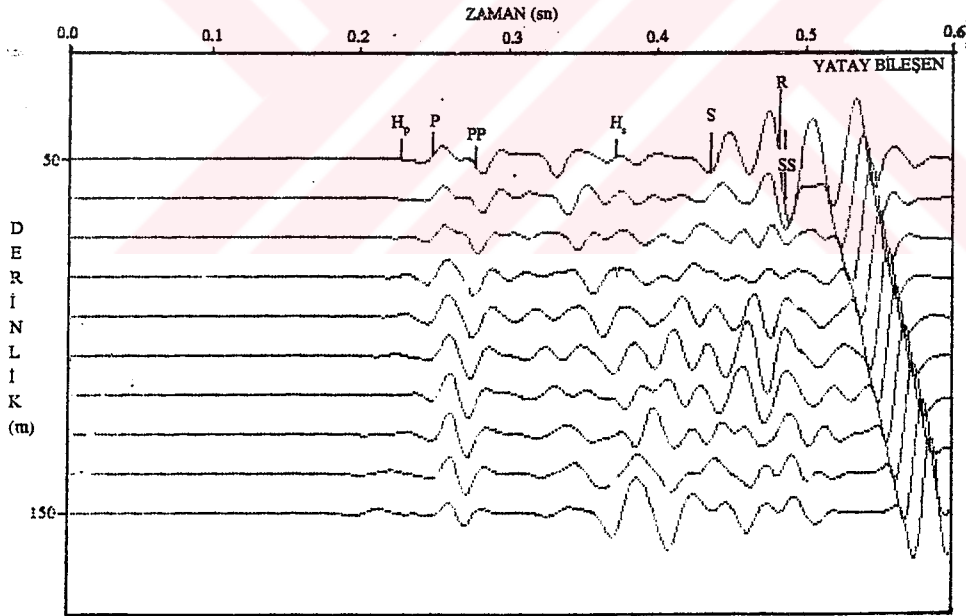
Bir DSP sismogramında gözlenebilecek muhtemel tüm temel varışlar şekil 31' deki DSP kesitleri üzerinde işaretlenmiştir. Buna göre,

- H_p, P dalgasının tabaka sınırında kırılarak bu sınırdan ilerleyip tekrar kırılarak alıcıda kaydedilen baş dalgası (Head wave),
- P, Alıcıda doğrudan kaydedilen P dalgası,
- PP, Tabaka sınırında yansyarak alıcıda kaydedilen P dalgası,
- H_s, S dalgasının tabaka sınırında kırılarak bu sınırdan ilerleyip tekrar kırılarak alıcıda kaydedilen baş dalgası (Head wave),
- S, Alıcıda doğrudan kaydedilen S dalgası,
- SS, Tabaka sınırında yansyarak alıcıda kaydedilen S dalgası,
- R, Rayleigh yüzey dalgası,

fazları muhtemel olarak bir DSP sismogramında ve kesitinde gözlenmesi gereken fazlardır.



(a)



(b)

Şekil 31. Şekil 29' da verilen iki tabakalı yer yapısı modeli için hesaplanan düşey ve yatay bileşen yapay DSP kesiti. Hesaplama 255.5 Hz kesme frekansına kadar yapılmıştır. Sismogramlar maksimum genliğe göre normalize edilmiştir.

Burada fazların işaretlenmeleri kaynak-alıcı geometrisine bağlı olarak varış zamanları ve polaritelere göre yapılmıştır. Bir çok olayın gözlemlendiği bu DSP kesitinde faz girişmesinden kaynaklanan bozulmalar Şekil 31' deki DSP kesitinden görülmektedir.

İkinci olarak, DSP yönteminde dalga alanlarının yer içinde yayılışının en iyi şekilde görülebileceği yani aşağıya ve yukarıya giden dalga alanları, tekrarlılar ve mod dönüşümlerinin açık olarak ayırt edilebildiği bir model oluşturuldu. Modelin ortam parametreleri tablo 1' de verilmektedir.

Tablo 1. Beş tabakalı bir modelin ortam parametreleri.

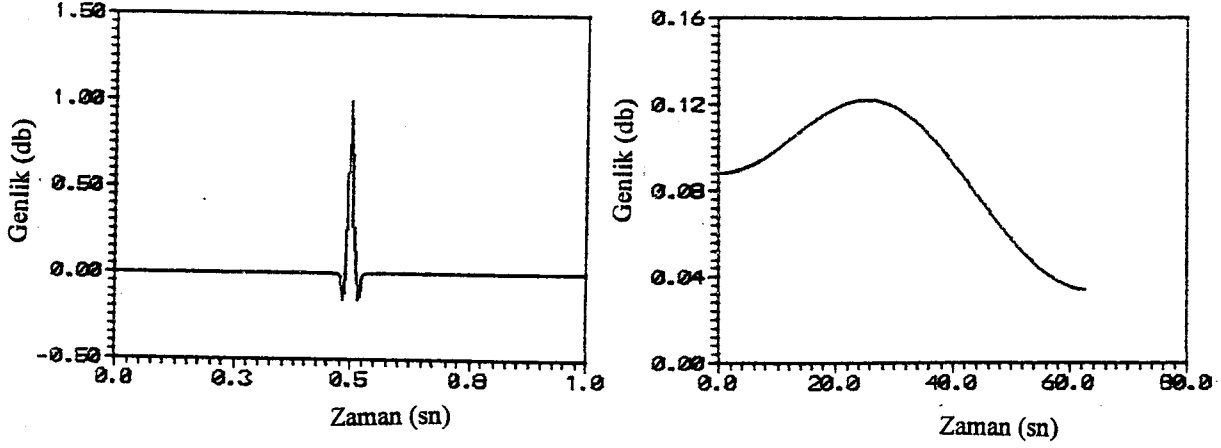
No	Z(m)	α (km/sn)	β (km/sn)	ρ (gr/cm ³)	Q_α	Q_β
1	0.0	2500	1500	2.00	40	20
2	700	1000	600	1.50	100	50
3	800	5500	2800	2.80	200	100
4	900	3000	1700	2.00	300	150
5	1000	6000	3400	2.80	400	200

Tablo 1' de Z(m) tabakaların üst yüzlerinin derinliğini, P dalgası hızı α , S dalgası hızı β ve ortamın yoğunluğu ρ ile gösterilmektedir.

Böyle bir model için DSP sismogramları elastik ve soğurucu ortamlar için hesaplanmıştır. Hesaplama 50 tane alıcı kullanılmış ve alıcılar 490-990 m' ler arasında eşit aralıklarda kuyu boyunca yerleştirilmiştir. Kaynak ofseti 50 m olup kaynak olarak düşey nokta kuvvet alınmıştır. Kaynak dalgacığı olarak 25 Hz merkez frekanslı bir Gabor kaynak dalgacığı kullanılmıştır. Dalgacığın zaman ve frekans ortamı görünümü şekil 32' de verilmektedir. Bu kaynak dalgacığı,

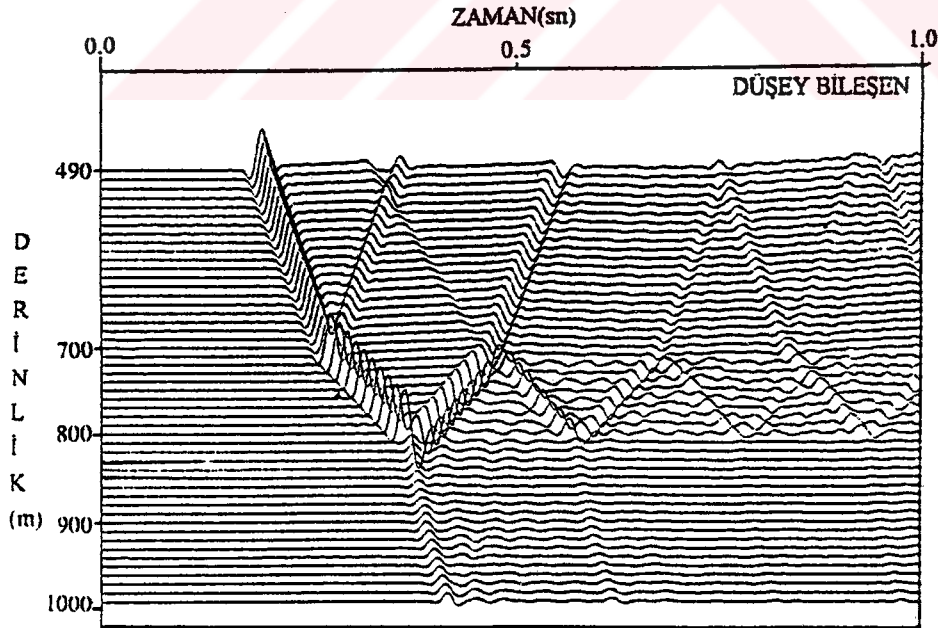
$$f(t) = \exp\left(-\left(\frac{\omega_p t}{q}\right)^2\right) \cos(\omega_p t) \quad (65)$$

olarak verilir. Burada, q dalgacığın sönüm sabiti, ω_p dalgacığın merkez frekansıdır. Genel olarak dalgacığın genişliği ile ilgili olduğu için ayrımlılıkta önemlidir. Bu model için $q=2$ alınmıştır. Hesaplanan DSP kesitleri şekil 33 ve şekil 34' de görülmektedir.

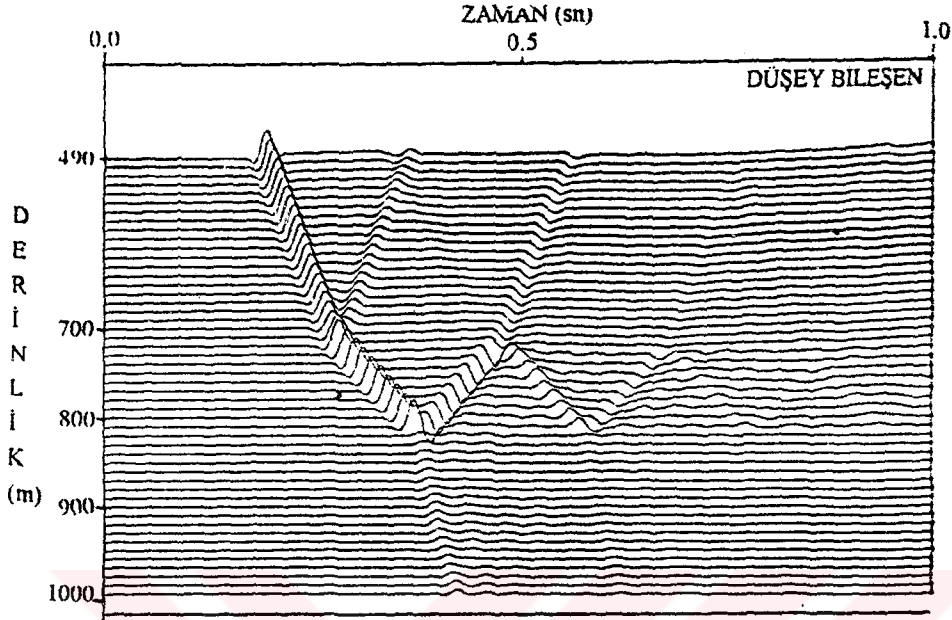


Şekil 32. Şekil 33 ve 34' de verilen yapay sismogramların hesaplanmasında kullanılan Gabor kaynak dalgacığının zaman ve frekans ortamı görünüşleri.

Sismogramlar 0-1 sn için 512 noktada 60 Hz kesme frekansına kadar hesaplanmıştır. Şekil 33' deki DSP kesiti soğurmanın hesaba katılmadığı bir ortamda, Şekil 34 ise soğurmanın hesaba katıldığı bir ortamda hesaplanmıştır.



Şekil 33. Tablo 1' de verilen 5 tabakalı ortam modeli için soğurmanın olmadığı yapay DSP kesiti.



Şekil 34. Tablo 1' de verilen 5 tabakalı ortam modeli için soğurmanın olduğu yapay DSP kesiti.

Bilindiği gibi DSP verisi için doğrudan varışların genliklerini etkileyen önemli faktörlerden biri sismik dalganın soğurulması (enerjinin ısıya dönüşmesi ile), diğeri ise küresel açılmadır [65]. Gerçek yeryapısının soğurucu ve sismik dalgayı dispersiyona uğraticı özelliğinin en iyi şekilde gözlenebilmesi gerçek ve yapay DSP sismogramları ve kesitleri ile üçüncü boyutta mümkün olabilmektedir. Sismik dalganın yeriçinde yayılışındaki karşılaştığı etkileri bir bütün olarak düşünmek gerekir. Ancak bu çalışmada daha önceden de ifade edildiği gibi tabakalı ortamların soğurma etkileri kalite faktörü Q ile temsil edilmiştir. Dolayısıyla soğurmanın olmadığı elastik bir ortam kabulü için yapılan hesaplamalarda sınırda yansıma ve geçişlerden yada tabakalanmadan kaynaklanan enerji kayıplarıyla ilgilenilmemektedir. O halde kalite faktörü Q ' nun değişiminin etkilerini sismogramlarda görmek için uygun bir yeryapısı modeli tablo 2' de verilmiştir.

Soğurma değerleri her bir hesaplama için değişeceğinden tabloda verilmeyecektir. Ancak tabakalı ortamın elastik parametreleri ve hesaplama için kaynak-alıcı geometrisi ile diğer parametrelerde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bütün DSP kesitleri için aynı büyütme kullanılarak sırayla artan soğurma için hesaplamalar yapılmıştır. Modelde 400-900 m' ler arasında 50 tane alıcı kuyu boyunca eşit aralıklarda yerleştirilmiştir. Kaynak yüzeyde 100 m' lik bir ofsette düşey nokta kuvvet olup, kaynak dalgacığı olarak 20 Hz' lik Gabor dalgacığı

kullanılmıştır. Dalgacığın sönüm sabiti 4' dür. Kesitlerdeki sismogramlar 0-2 sn için 256 noktada 63.5 Hz kesme frekansına kadar hesaplanmıştır.

Tablo 2. Kalite faktörü Q' nun değişimi için üç tabakalı ortam parametreleri

No	Z(m)	α (km/sn)	β (km/sn)	ρ (gr/cm ³)
1	0.00	1500	860	1.90
2	700	6000	3470	2.50
3	1000	3000	1720	2.00

Model I

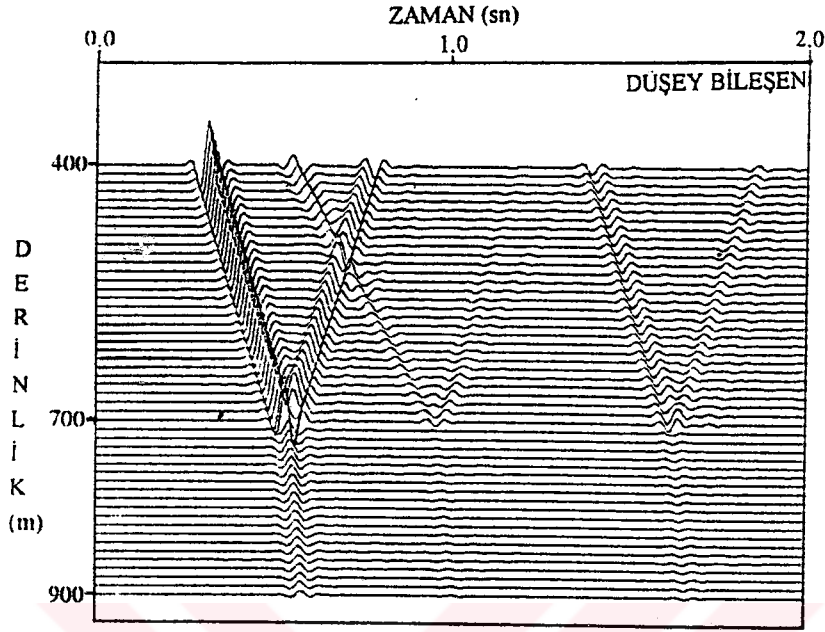
Bu modelde ortam elastik kabul edilerek düşey ve yatay bileşen yapay DSP sismogramları hesaplanmıştır. DSP kesitlerinde P ve S dalgalarına ait doğrudan varışlar açık olarak tespit edilebilmektedir. Ayrıca S dalga alanlarının yanıldıktan sonra P dalgasına dönüştüğü ve bu P dalgasının yüzeyden güçlü bir yansıma yaptığı Şekil 35a' da açık olarak görülmektedir. Özellikle 1. ve 2. tabakalar arasına güçlü bir yansıtıcı koyularak yansımalar belirginleştirilmiştir. Hesaplanan yapay yerdeğiştirme DSP kesitleri şekil 35' de verilmiştir.

Model 2

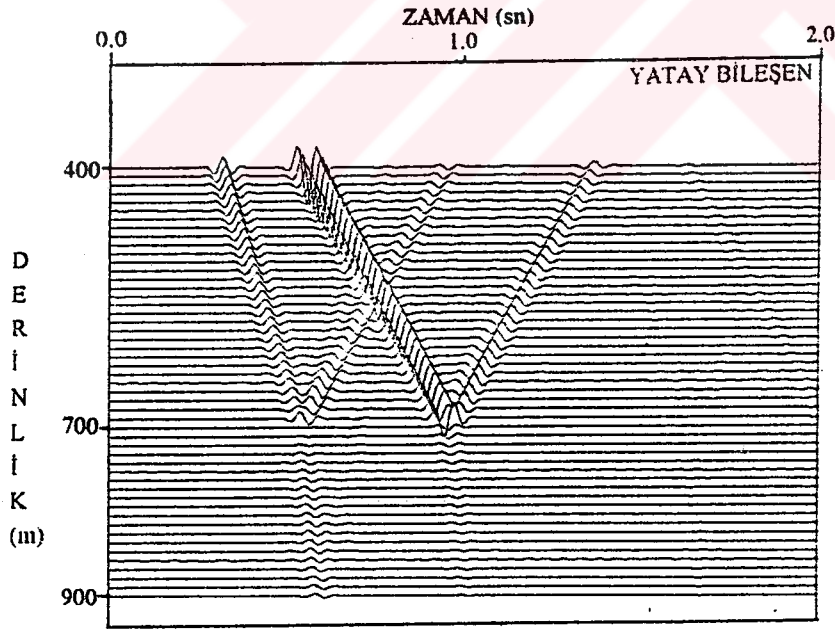
Bu modelde ortama yüksek Q değerleri verilerek ortam az miktarda soğurucu duruma getirilmiştir. Buna bağlı olarak DSP kesitleri aşağıdaki Q değerleri için hesaplanmıştır.

Q_α	Q_β
100	80
150	120
200	180

DSP kesitlerindeki yansımalar ve yüzeyden olan yansımadaki genlik kaybı açık olarak görülmektedir.

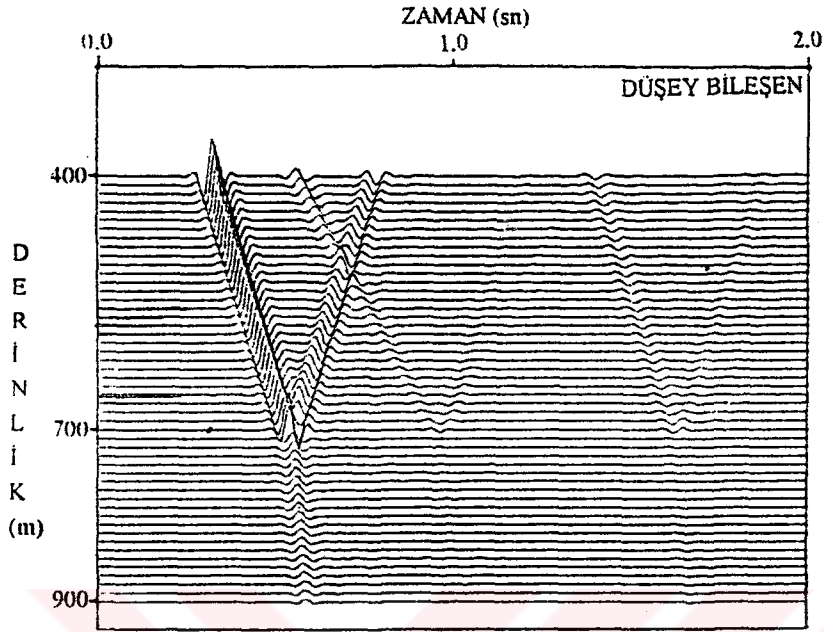


(a)

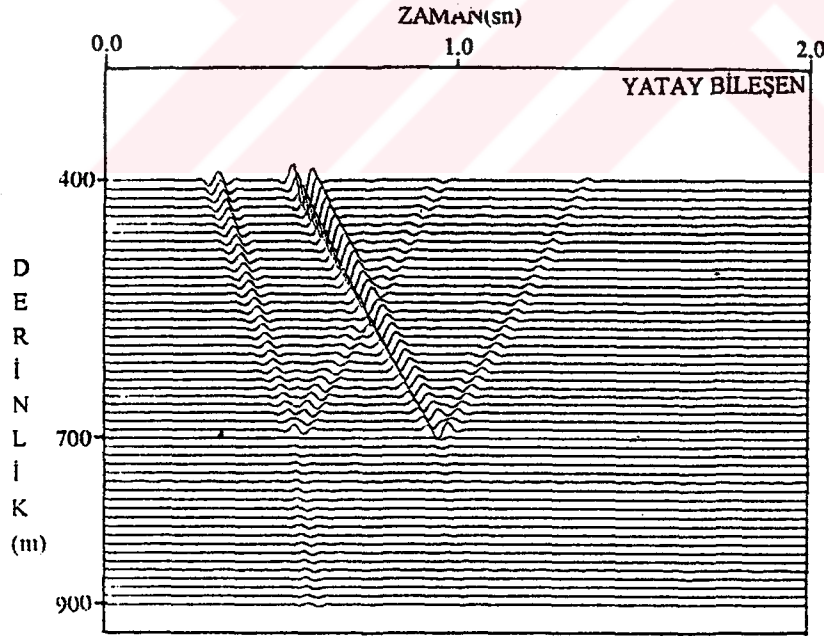


(b)

Şekil 35. Soğurmanın olmadığı elastik bir ortam için düşey ve yatay yerdeğiştirme yapay DSP kesitleri. (a) düşey, (b) yatay bileşen.



(a)



(b)

Şekil 36. Model 2' de tanımlanan Q değerleri için hesaplanan Yapay yerdeğiştirme DSP kesitleri. (a) düşey, (b) yatay bileşen.

Model 3

Bu modelde ortamın soğurma etkisi biraz daha arttırılmıştır. Yani Q değerleri bir önceki modele göre düşüktür. Bu durumda kesitteki direk varışlarda zamanla ve derinlikle düşük Q'nun etkisiyle genlik kayıpları artmıştır. Aynı zamanda kesitlerde görülen dalga fazlarının peritotlarındaki genişleme soğurmanın sismik dalğanın frekansını etkilediğın aşık bir delilidir.

Q_{α}	Q_{β}
50	40
75	60
100	90

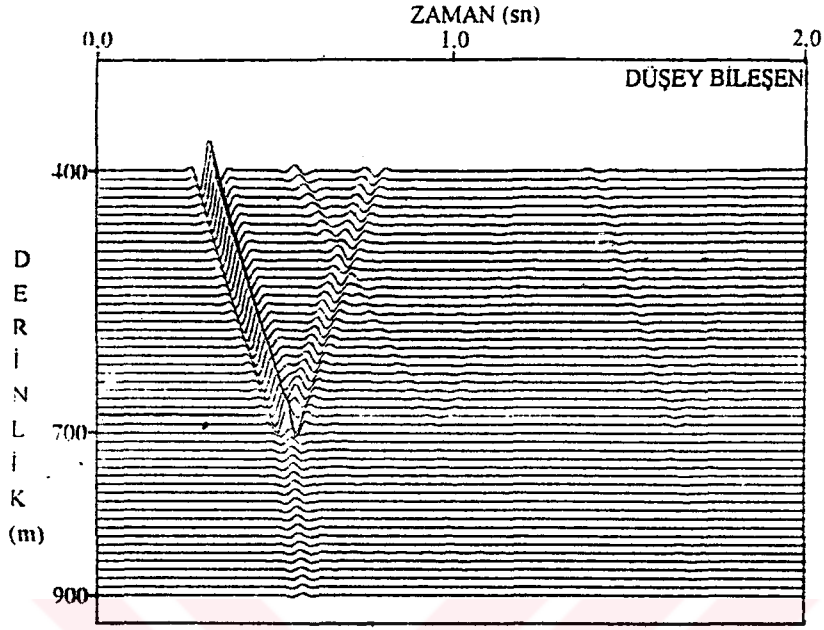
Bu Q değerlerine bağılı olarak hesaplanan yapay yerdeğıştirme DSP kesitleri şekil 47' de verilmektedir.

Model 4

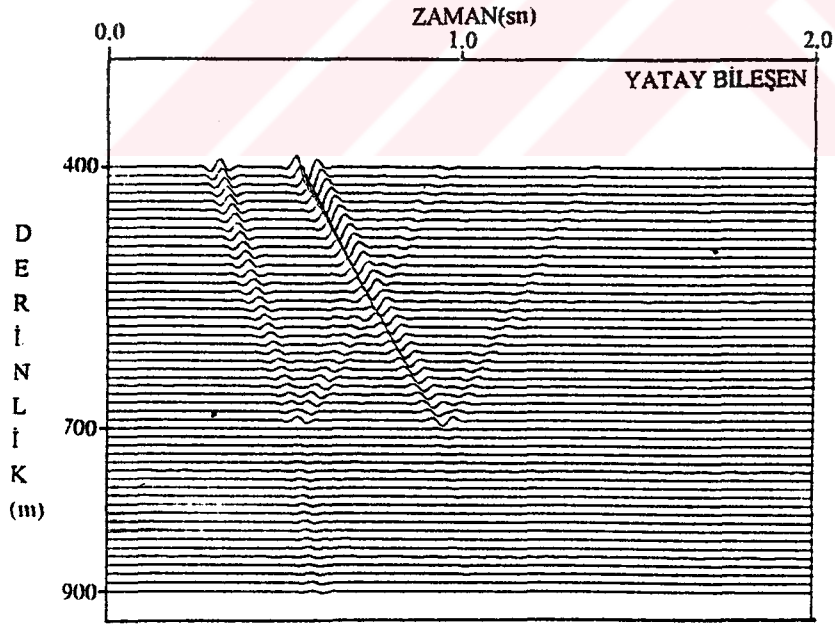
Son olarak bu modelde de ortamda yüksek derecede soğurma olacak şekilde Q değerleri seçilmiştir.

Q_{α}	Q_{β}
20	10
30	20
50	40

Çok yüksek soğurmanın olduğı bu Q değerleri için hesaplanan DSP kesitleri Şekil 42' de verilmektedir. Kesitlerde direk gelen dalga alanları az yol katetmelerine rağmen, önemli derecede genlik kayıpları ve S dalga alanlarının kesitlerde seçilememeleri, Q' dan kaynaklanan soğurmanın nedenli önemli olduğunu göstermektedir.

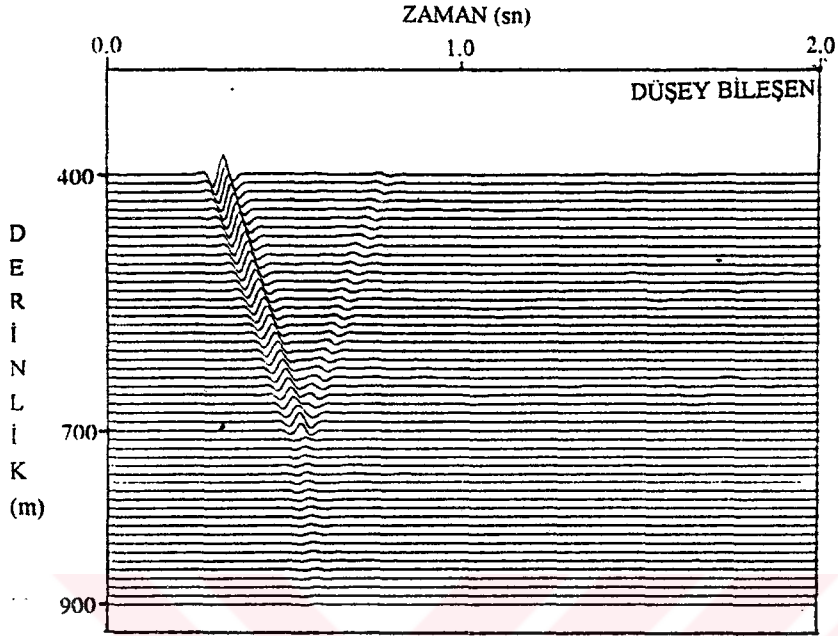


(a)

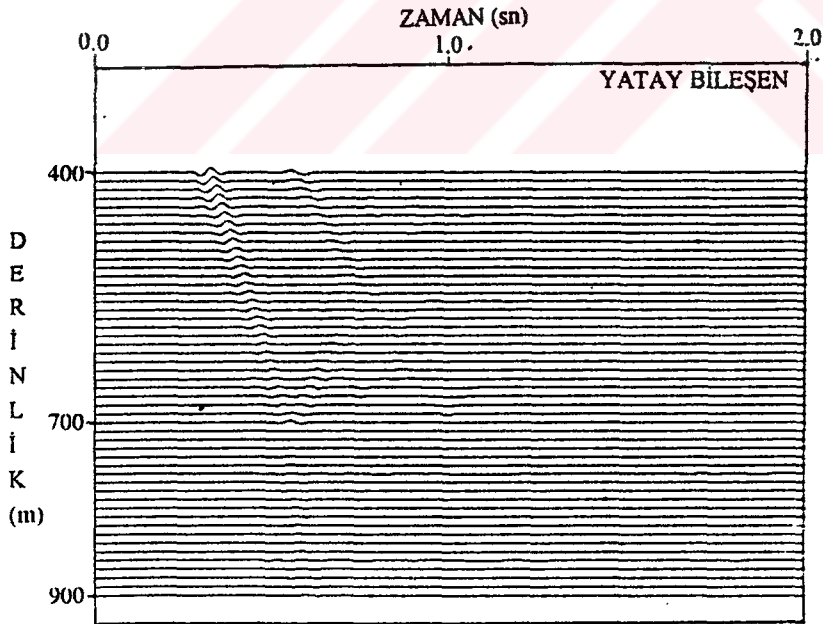


(b)

Şekil 37. Model 3' de verilen Q değerleri için hesaplanan yapay yerdeğiştirme DSP kesitleri. (a) düşey, (b) yatay bileşen.



(a)



(b)

Şekil 38. Model 4' de verilen Q değerleri için hesaplanan yapay yerdeğiştirme DSP kesitleri. (a) düşey, (b) yatay bileşen.

2.3.2. Çok Tabakalı Ortam Modeli

Burada kullanılan yöntemin ve algoritmanın çok tabakalı ortamlarda soğurmayı da hesaba katarak yapay DSP sismogramlarını doğrulukla hesaplayabildiğini göstermek açısından 47 tabakalı bir DSP verisi soğurmanın olmadığı (elastik) ve olduğu (anelastik) durumlarda modellenmiştir. Bu DSP verisi Gelişli [32], Bouchon ve Dietrich [48] ve Dietrich, Prange ve Bouchon [53] tarafından da kendi çalışmalarında kullanılmıştır. Hesaplama da kullanılan DSP verisi Tablo 3' de verilmiştir.

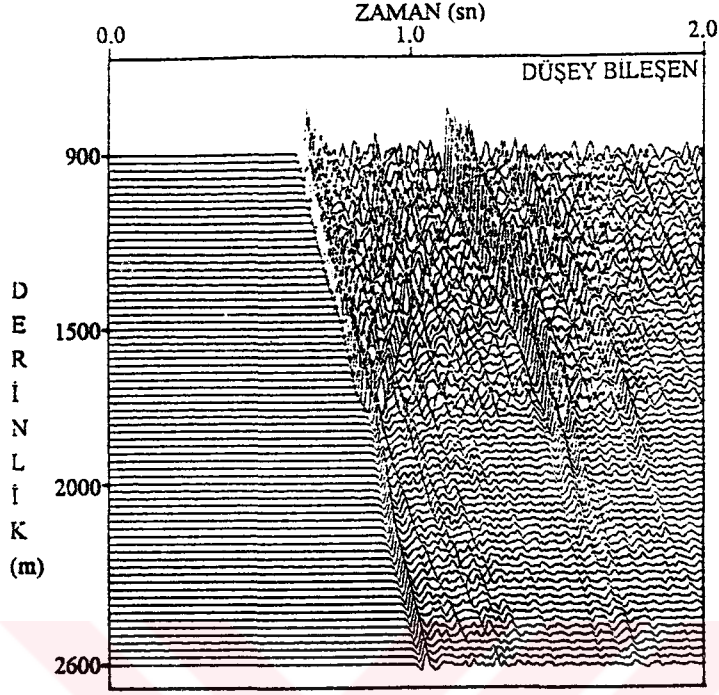
Tablo 3. 47 tabakalı ortam modeli [30], [48] ve [68].

No	Z(m)	α (km/sn)	β (km/sn)	ρ (gr/cm ³)	Q_α	Q_β
1	0.000	700.0	404.1	1.60	30.0	14
2	10.00	1600.0	923.7	1.64	30.0	14
3	20.00	2000.0	1154.7	1.76	30.0	14
4	70.00	1800.0	1039.2	1.70	60.0	27
5	120.00	2050.0	1183.5	1.80	60.0	27
6	150.00	2300.0	1327.9	1.88	30.0	14
7	230.00	2100.0	1212.4	1.84	60.0	27
8	350.00	2200.0	1270.1	1.86	60.0	27
9	430.00	2496.3	1441.2	1.87	60.0	27
10	542.50	3127.3	1805.5	2.15	60.0	27
11	551.70	2650.2	1530.1	1.94	30.0	14
12	627.90	3086.1	1781.7	2.14	30.0	14
13	640.10	2590.8	1495.8	1.93	30.0	14
14	646.20	2749.1	1587.1	2.00	30.0	14
15	762.00	2656.7	1533.8	1.96	40.0	18
16	786.40	3570.7	2061.5	2.29	50.0	22
17	798.60	2849.9	1645.3	2.05	45.0	20
18	810.80	3474.7	2006.1	2.26	50.0	22
19	816.90	2873.7	1659.1	2.06	45.0	20
20	1005.0	2873.7	1659.1	2.06	45.0	20

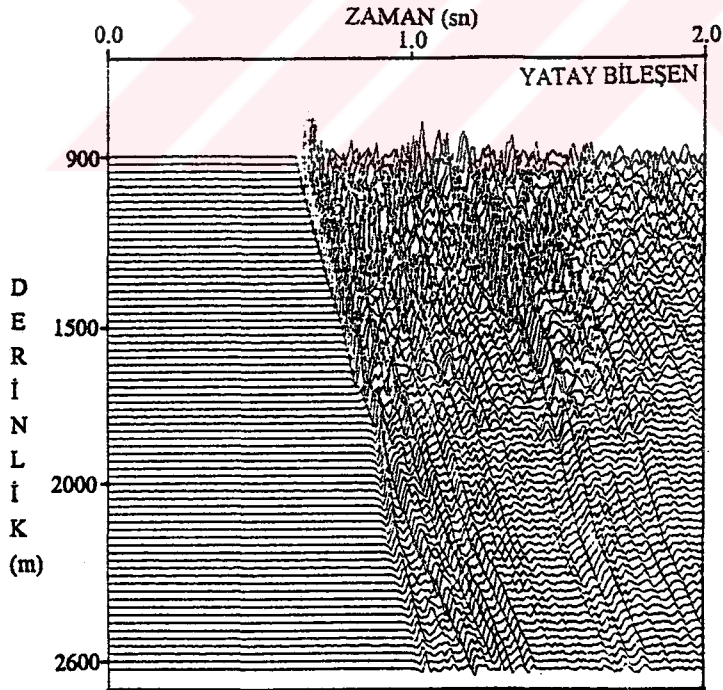
Tablo 3' ün devamı,

21	1246.6	2570.5	1484.0	1.91	40.0	18.0
22	1255.8	3058.2	1765.6	2.13	48.0	21.0
23	1301.5	3368.8	1944.9	2.23	45.0	20.0
24	1313.7	1939.7	1119.9	1.88	20.0	9.0
25	1328.9	3192.0	1842.8	2.17	50.0	22.0
26	1341.1	3259.2	1881.6	2.20	50.0	22.0
27	1371.6	2514.6	1451.8	1.89	30.0	14.0
28	1377.7	3529.6	2037.8	2.28	50.0	22.0
29	1408.2	2438.4	1407.8	1.84	30.0	14.0
30	1414.3	3093.7	1786.1	2.14	35.0	16.0
31	1420.4	3480.8	2009.6	2.26	50.0	22.0
32	1533.1	3973.8	2294.2	2.39	60.0	27.0
33	1649.0	4894.7	2825.9	2.55	80.0	36.0
34	1725.2	4024.7	2323.6	2.40	60.0	27.0
35	1767.8	4509.7	2603.6	2.49	65.0	29.0
36	1789.2	3447.3	1990.2	2.25	50.0	22.0
37	1795.3	5026.9	2902.2	2.57	85.0	38.0
38	1807.5	5562.0	3211.1	2.63	90.0	40.0
39	2045.2	4715.9	2722.6	2.52	80.0	36.0
40	2060.5	5360.8	3095.0	2.61	80.0	36.0
41	2158.0	3833.6	2213.3	2.35	60.0	27.0
42	2313.4	3534.9	2040.8	2.28	50.0	22.0
43	2325.6	4093.1	2363.1	2.41	60.0	27.0
44	2441.5	4871.7	2812.6	2.54	80.0	36.0
45	2450.6	3659.1	2112.5	2.31	50.0	22.0
46	2499.4	5033.8	2906.2	2.57	85.0	38.0
47	2645.7	6000.0	3464.0	2.68	100.0	45.0

Alicılar kuyu boyunca 900-2600 m' ler arasında eşit aralıklarla 69 tanedir. Sismogramlar 0-2 sn için 256 noktada 100 Hz kesme frekansına kadar hesaplanmıştır. Kaynak yüzeyde düşey nokta kuvvet olup 1000 m ofsette uygulanmıştır. Kaynak dalgacı olarak 30 Hz' lik Ricker kaynak dalgacı kullanılmıştır.

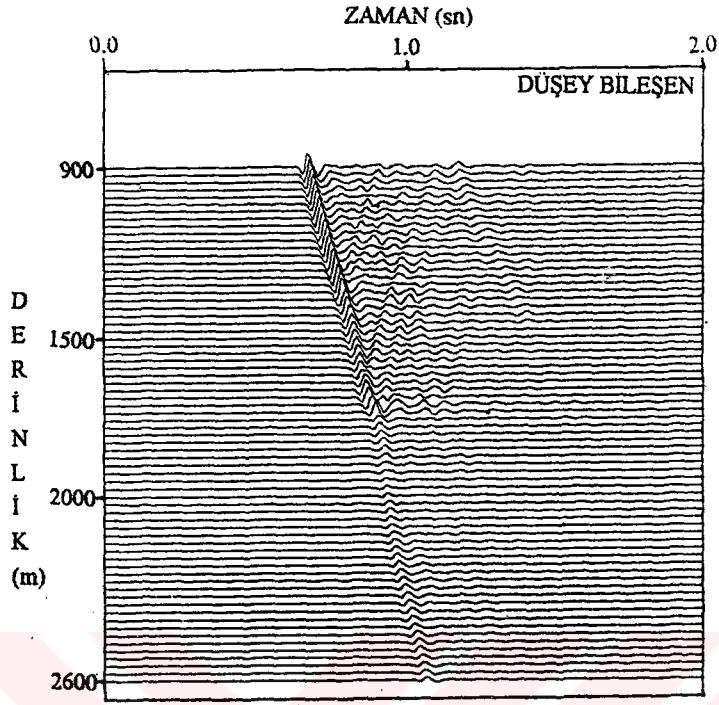


(a)

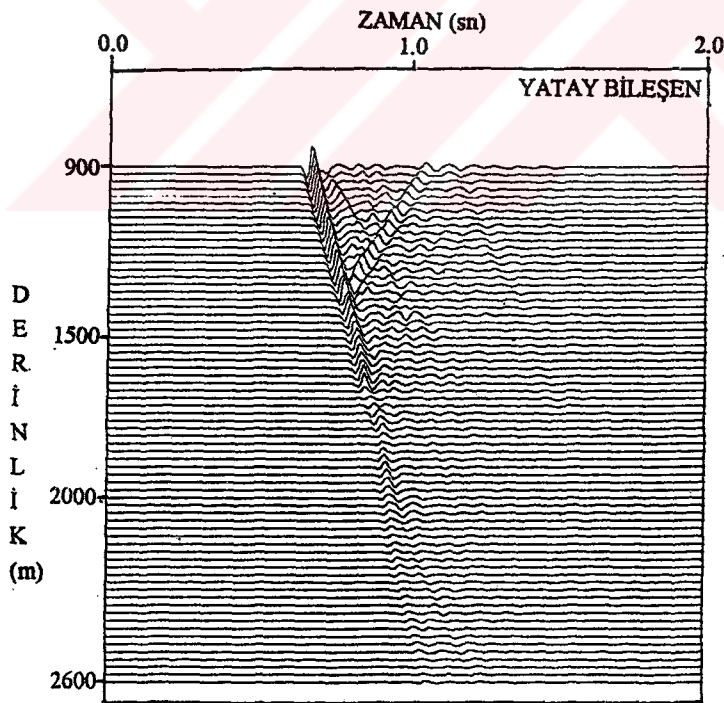


(b)

Şekil 39. 47 tabakalı DSP verisinin soğurmanın olmadığı durum için hesaplanmış model kesitleri. (a) düşey, (b) yatay bileşen.



(a)



(b)

Şekil 40. 47 tabakalı DSP verisinin soğurma olduğu durum için hesaplanmış model kesitleri. (a) düşey, (b) yatay bileşen.

Dikkat edilirse, Şekil 39' deki yapay DSP kesitleri bir çok tabakalanma etkisini içermektedir. 47 tabaka verisi çok ince tabakalardan oluştuğu için DSP kesitleri çok karmaşık görünmektedir. Aslında bu DSP verisiyle yüksek ayrımlılıkta veri elde edilebildiğinin bir sonucudur. Bu açıdan değerlendirildiğinde ayrık dalgasayısı yöntemiyle çok ince tabakalanmanın kolaylıkla modellenebileceği Şekil 39' da gösterilmiştir. Şekil 40' da ortama soğurma eklenerek 47 tabaka verisi yeniden modellenmiştir. Tabakaların Q değerleri yüksek sayılacak soğurmayı göstermektedir. Öyleki hesaplanan DSP kesitleri Şekil 39' la karşılaştırıldığında bir çok olay artık DSP kesitinde görülememektedir. Şekil 40' daki DSP kesiti aşağıya giden dalga alanlarının hakimiyetindedir. Gerçekte araziden elde edilen ham DSP verisi (herhangi bir veri-işlem aşamasından geçmemiş) bu şekildedir. Özellikle S dalga alanlarının Şekil 40' daki DSP kesitlerinden seçilememesi yorumlamada önemli bir problem olmaktadır. Bunun nedeninin ortaya konulmasının yolu ise bu şekilde yapılacak yapay DSP hesaplamaktır.

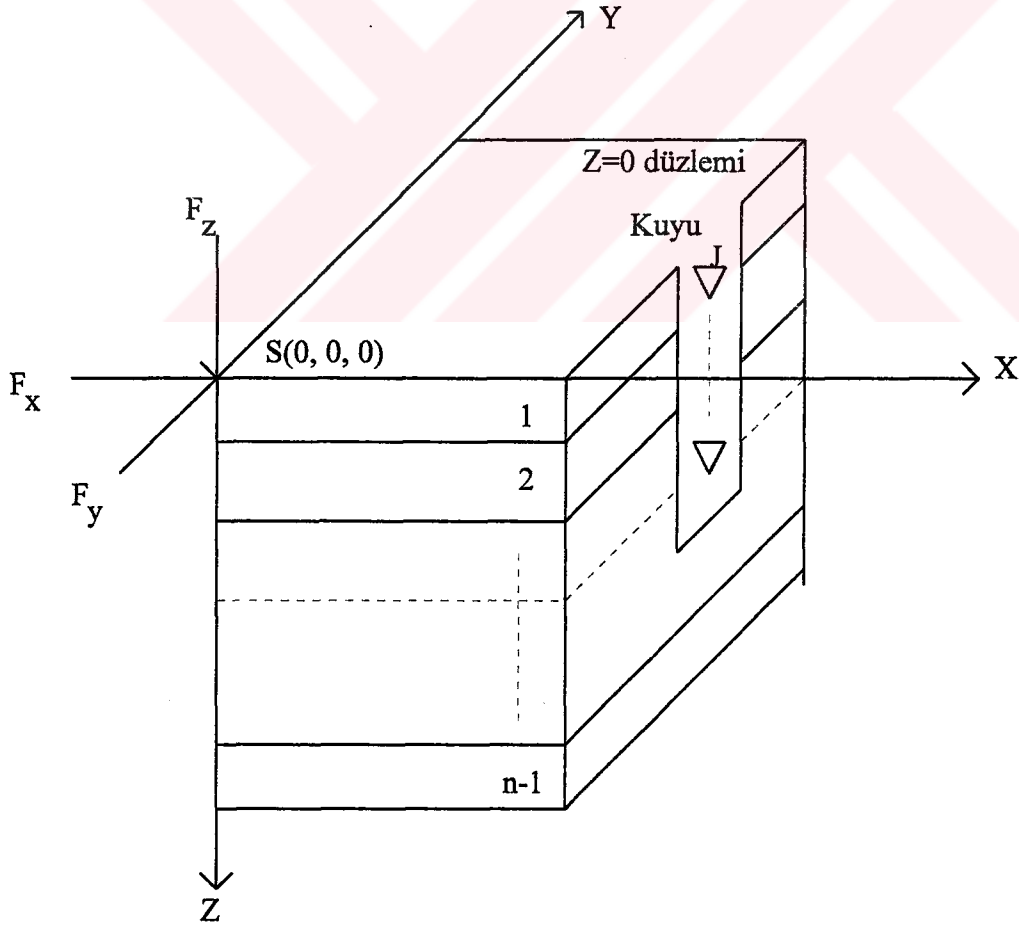
2.3.3. Kaynak Kuvvetlerinin Modellenmesi

Sismik modelleme çalışmalarında önemli bir yer tutan kaynak kuvvetlerinin etkilerini görmek için yapay DSP kesitleri hesaplanabilir. Üç temel doğrultuda uygulanabilecek olan kaynak kuvvetlerinin tabakalı ortamda kaynak-alıcı dizilimine göre düzenlenmiş bir şekli şekil 41 ile verilebilir.

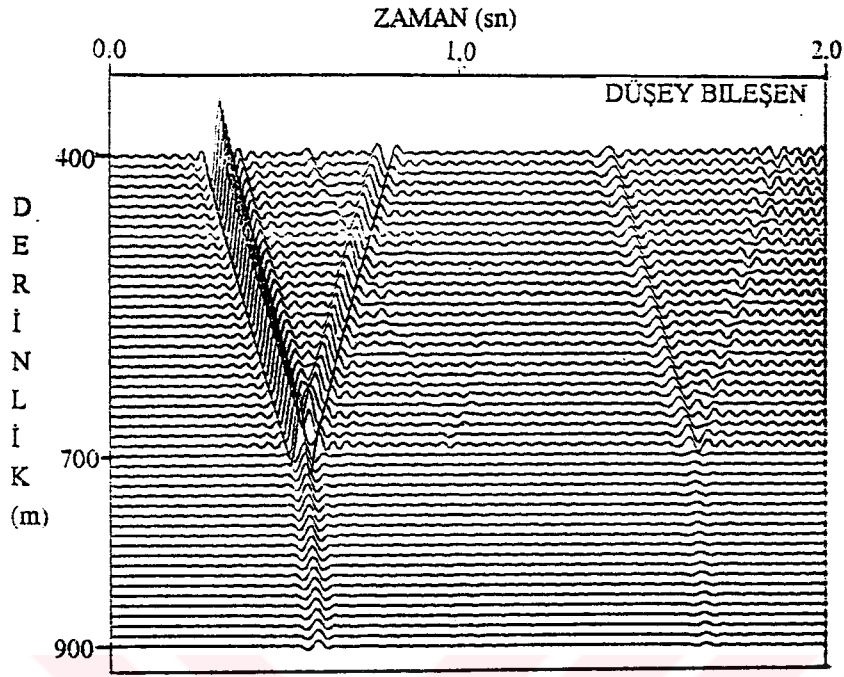
Yapay DSP sismogramları şekil 41' de gösterilen herbir kaynak kuvveti için hesaplanabilir. Ancak bu çalışmada, tabakalar homojen ve izotrop olduğu için değişim düşey (z) ve yatay (x) yönündedir. Bu amaçla DSP kesitleri Z ve X yönündeki kaynak kuvvetleri için hesaplanmıştır. Nokta kuvvet için DSP kesiti Şekil 35 ile verilmiş olduğu için burada tekrar gösterilmemiştir. Şekil 35' daki DSP kesitlerinde, aşağıya ve yukarıya giden P ve S dalga alanları, yansımış ve kırılmış P-S dalga alanları açık olarak görülebilmektedir. Kullanılan kaynak genel bir nokta kaynak olduğu için, DSP kesitlerinde görülmesi gereken temel dalga alanları kolayca tanınabilmektedir. Ancak kaynak kaynak kuvvetini yön bağımlı olarak kullanılırsa, P ve S dalga alanlarından biri diğerine göre kesitlerde daha belirginleşecektir. Mesela, Şekil 42' da düşey (z yönünde) yönde uygulanan bir kuvvet için hesaplanan DSP kesitinde, P dalga alanlarının S dalga alanlarına göre daha yüksek genlikte olduğu görülmektedir. Bu tamamen P dalgalarının düşey yöndeki kaynak kuvvetlerine karşı duyarlılığından kaynaklanır. Teorik olarak bu işlem, kaynak kuvvetinin uygulama doğrultusunun seçimine bağlı olarak, dalga potansiyelinin oluşturulmasıyla yapılmaktadır. Buna göre P dalga potansiyelleri düşey kuvvetlerin etkisinde daha yüksek genlikte oluşurlar ve tabakalı ortamlarda S dalgalarına göre daha yüksek genlikte yayılırlar.

Şekil 43' de yatay (x yönünde) yönde uygulanan bir kaynak kuvveti için hesaplanmış DSP kesitleri görülmektedir. Her iki bileşende S dalga alanlarının kesitlerde tanınan dalga alanlarını oluşturduğu açık olarak görülmektedir. P dalga alanları düşey bileşende çok az görülürken yatay bileşende yalnızca S dalga alanları görülmektedir. Bu durum da S dalgalarının yatay kuvvetlere karşı olan duyarlılığından kaynaklanır. Genel olarakda arazide S dalgaları kaydedilmek istendiğinde uygulanan kaynak kuvveti yeryüzeyine paraleldir. Şekil 43b' de (yatay bileşen) DSP kesitinde yalnızca S dalga alanının yansımasının görülmesi, S dalgalarının karakteristik özelliklerini temsil etmektedir.

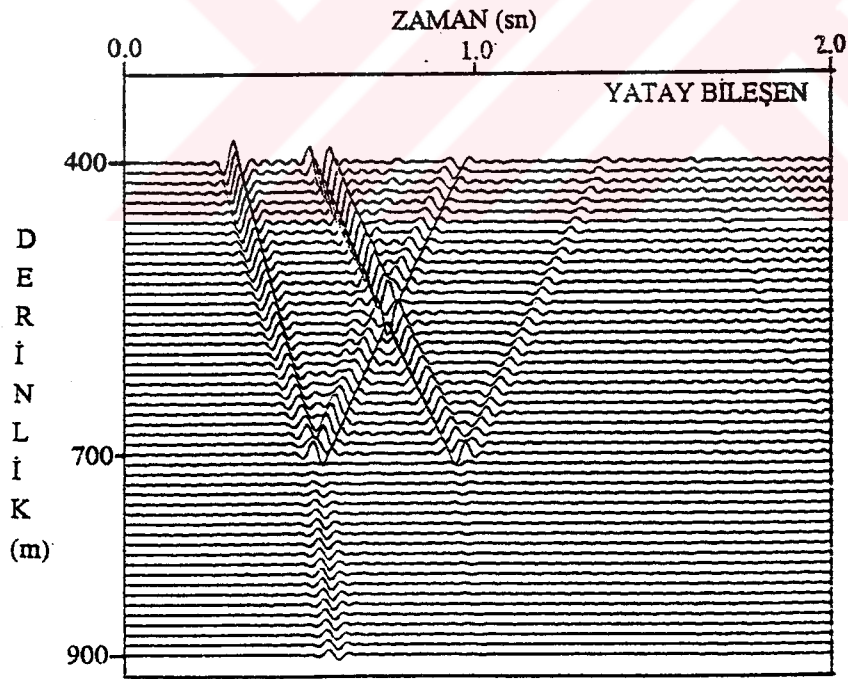
Yatay kaynak kuvvetinin kesitlerdeki etkisini daha iyi açıklamak için, 47 tabakalı DSP verisi modellenmiştir. Hesaplanan DSP kesitleri şekil 44' de gösterilmektedir. Hesaplanan DSP kesitlerinin her iki bileşeninde de S dalga alanları daha belirgindir. Aynı verinin bir nokta kaynak için hesaplanan DSP kesitleriyle (şekil 43) karşılaştırıldığında, S dalgaları için yatay kuvvet kullanmak gerekliliği sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 41. Tabakalı ortamda kaynak kuvvetleri için kaynak-alıcı dizilimi.

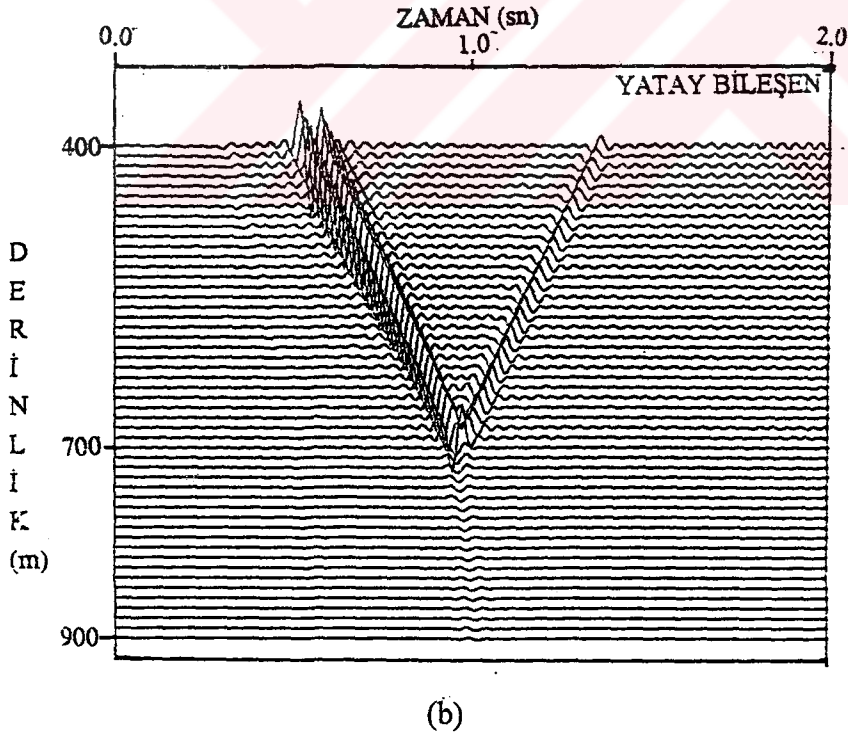
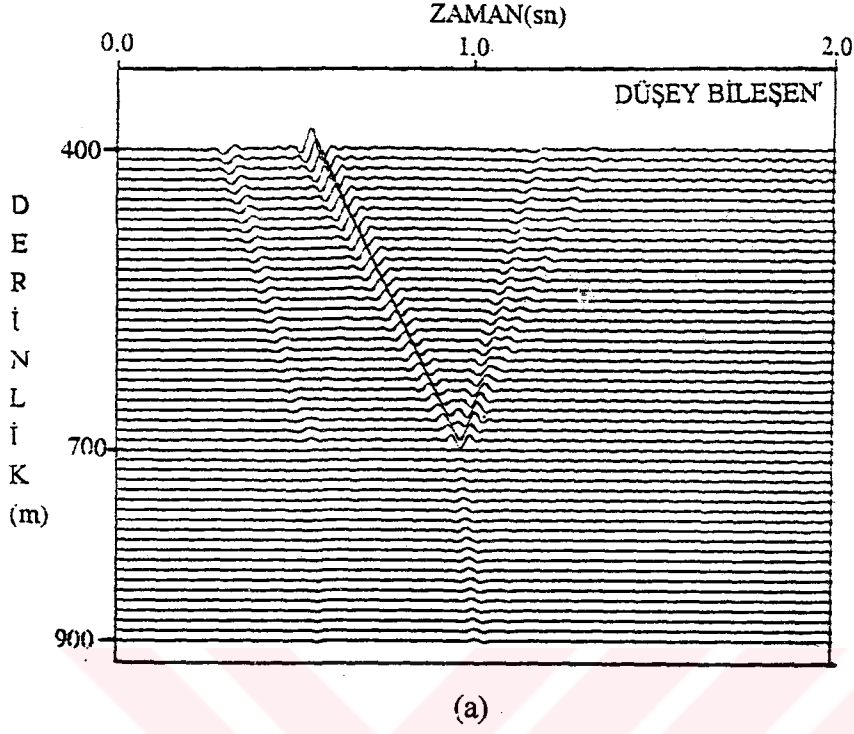


(a)

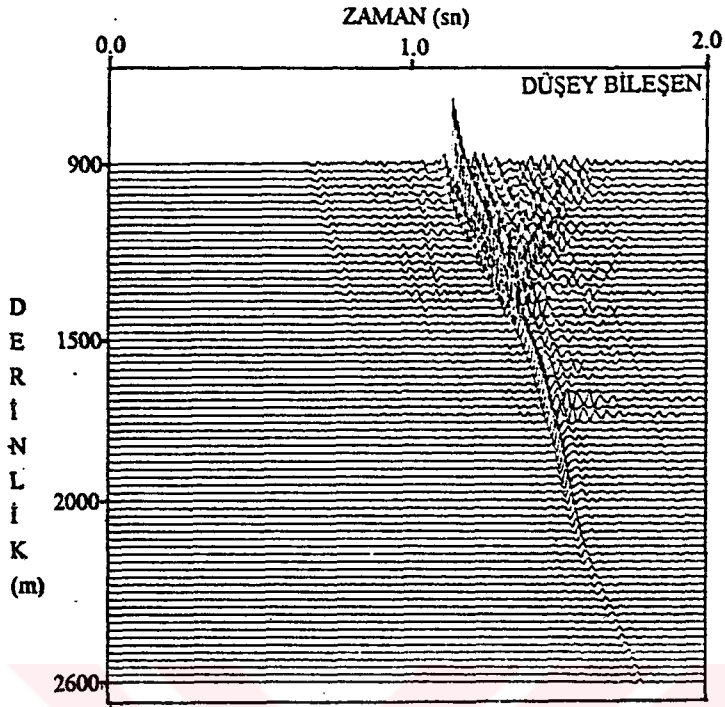


(b)

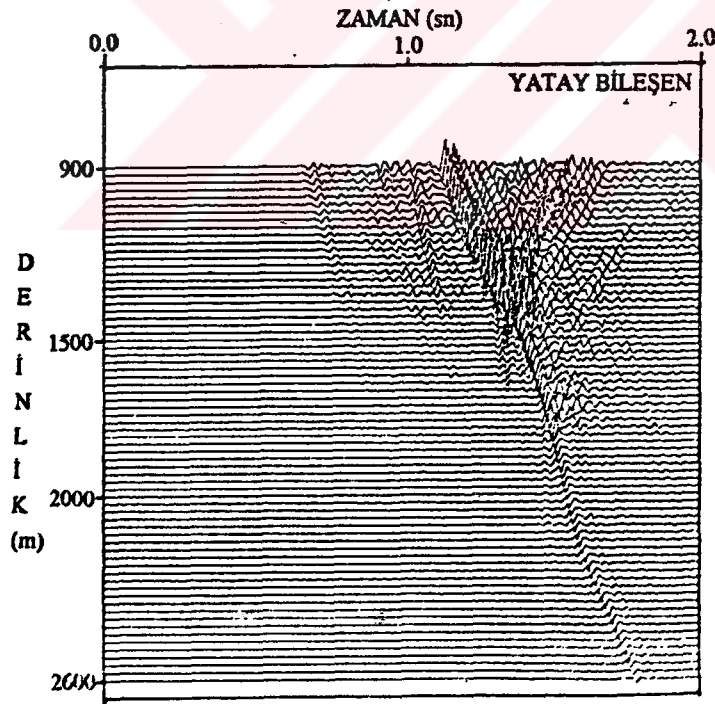
Şekil 42. Tablo 2 ile verilen 3 tabakalı ortamda aynı kaynak-alıcı dizilimi için Z doğrultusunda uygulanan bir kaynak kuvveti için; (a) düşey, (b) yatay bileşen yerdeğiştirme DSP kesitleri. Kaynak dalgacığı olarak Gabor dalgacığı kullanılmıştır.



Şekil 43. Tablo 2 ile verilen 3 tabakalı ortamda aynı kaynak-alıcı dizilimi için X doğrultusunda uygulanan bir kaynak kuvveti için; (a) düşey, (b) yatay bileşen yerdeğiştirme DSP kesitleri. Kaynak dalgacığı olarak Gabor dalgacığı kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 44. Tablo 3 ile verilen 47 tabakalı ortamda aynı kaynak-alıcı dizilimi için X doğrultusunda uygulanan bir kaynak kuvveti için; (a) düşey, (b) yatay bileşen yerdeğiştirme DSP kesitleri. Kaynak dalgacı olarak Gabor dalgacı kullanılmıştır.

3. BULGULAR

Bu çalışmada, ayrık dalgasayısı çözüm yöntemi kullanılarak soğurucu tabakalanmış ortamlarda DSP sismogramları hesaplanmıştır. Soğurmanın hesaba katılması, tabakaların gerçek hızlar yerine frekans ve kalite faktörü bağımlı kompleks hızların kullanılmasıyla yapılmıştır. Ayrıca, kaynak kuvvetinin uygulama doğrultusunun DSP kesitlerine etkisi, değişik doğrultularda uygulanan kaynak kuvvetlerinin modellenmesiyle gösterilmiştir. Yapılan teorik hesaplamalarda elde edilen bulgular, DSP yöntemini, soğurmayı ve kaynak kuvvetini ihtiva ettiği için, ayrı ayrı başlıklar altında toplanmıştır.

3.1. DSP yöntemi ve Ayrık Dalgasayısı Yöntemi ile ilgili Bulgular

Yapay DSP kesitleri, ayrık dalgasayısı yöntemiyle elastik dalga alanlarının ayrıklaşmasıyla hesaplanabileceği bu çalışmada yeniden gösterilmiştir.. DSP kesitlerinin hem aşağıya giden hemde yukarıya giden dalga alanlarını içermesinden dolayı yeriçindeki bir dalga seyahati, zaman-derinlik ortamında kolaylıkla DSP kesitlerinin hesaplanmasıyla gösterilmiştir. Yapay DSP ile, bir sismik dalgacığın tabaka sınırlarında ve içinde karşılaştığı etkilerin modellenebileceği gösterilmiştir. Yapay DSP kesitlerinin bir çok yöntemle hesaplanabileceği daha önce ifade edilmişti. Burada yapay DSP kesitlerinin soğurucu ortamda ayrık dalgasayısı sayısal çözüm yöntemiyle hesaplanabileceği gösterilmiştir. Frekans-dalgasayısı ortamında yapılan bu çözüme soğurmanın kolaylıkla eklenebileceği, frekans ve kalite faktörü (Q) bağımlı kompleks hız denkleminin kullanılmasıyla belirtilmiştir.

Ayrık dalgasayısı çözümü kullanılarak yapılan bu modelleme çalışmasında çözümün bilinen diğer çözümlere göre üstünlükleri uygun tabakalı modeller kurularak belirtilmiştir. Tam olarak elastik dalga alanları çözülmüştür. Hesaplamalar yapay DSP kesitlerinin gerçek arazi sismogramlarına benzer şekilde bir çok olayı içermektedir (Şekil 31). Yöntemde istenilen zaman uzunluğunda, kaynak uzaklığında (offsette) ve tabaka sayısında çözüm yapılabilirdiği 47 tabakalı DSP verisinin modellenmesiyle belirlenmiştir (Şekil 39, 40). Aynı veri kullanılarak yöntemin çok ince tabakalanmalara da duyarlı olduğu yapılan modelleme ile belirlenmiştir (Şekil 39). Alıcıların kuyu boyunca dizili olması dalganın seyahat yolunu kısaltmıştır. Bu durumda yapay DSP kesitleri yüksek ayrımlılıkta hesaplanabilmiştir. Dolayısıyla DSP kesitlerinde yüzey sismiğine oranla daha çok bilgi edilebileceği belirlenmiştir (Şekil 33, 34).

3.2. Soğurma ile ilgili Bulgular

Bu çalışmanın önemli bir bölümünü oluşturan soğurmanın DSP kesitlerini ne şekilde etkilediği yapay olarak modellenerek belirlenmiştir. Soğurmanın temel etkisi olan bir "alçak geçişli süzgeç" gibi davranma özelliği sismogramlar soğurucu ortamda hesaplanarak belirlenmiştir. Aki ve Richards [42]' in verdiği frekans ve kalite faktörüne bağlı olan kompleks sismik hız denklemi (60 denklemi)' nin soğurma ve dispersiyon etkilerinin modellenmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

İlk olarak soğurma parametresi olan kalite faktörü Q değerinin bir sismik dalgacığı nasıl etkilediği, bir Ricker dalgacığı üzerinde gösterilmiştir. Dalgacığın değişik Q değerleri için hesaplanan spektrumlarında, genlik-frekans ilişkisinin nasıl değiştiği belirlenmiştir. Bu ilişkiye bakılarak soğurmanın yüksek frekanslara tekabül eden genlikleri daha çabuk soğurduğu görülmüştür. Spektrumda meydana gelen daralmanın, zaman ortamına dönüldüğünde dalgacığın periyodunun genişlemesine, dolayısıyla dalgacığın genliğinin azalmasına sebep olduğu, diğer bir belirleme olmuştur.

Yapay DSP kesitleri hesaplanmadan önce kullanılan hız denkleminin sismik dalganın soğurulması sırasındaki nedensellik gibi temel özelliği sağlayıp sağlamadığı tespit edilmiş ve buna bağlı olarak referans frekansının (ω_r) soğurma açısından önemi belirlenmiştir. Hız denkleminin ve referans frekansının nedensel olarak soğurmayı garanti altına aldığı bulunmuştur. Çalışmada ortam elastik olarak düşünülüp gerçek hızlar yerine kompleks hızlar kullanılarak ortam kolayca soğurucu duruma getirilmiştir.

İlk olarak soğurulmuş ve soğurulmamış iki sismogramın frekans spektrumları incelenerek soğurmanın sismogramların frekansına olan etkisi belirlenmiştir (Şekil 12, 13, 14, 15). Şekil 11 ile verilen yer modeli için soğurma olmadığı bir durumda hesaplanan DSP sismogramlarının yüksek frekans bileşenlerinin etkisinde olduğu görülmüştür. Aynı yer modeli için ortam soğurma eklenerek hesaplanan DSP sismogramlarının ise düşük frekanslı bileşenlerin etkisinde olduğu görülmüştür. Soğurmanın olmadığı durumdaki sismogramın, spektrumunun maksimum genliklerinin yere verilen kaynak dalgacığının merkez frekansı civarında yığılma gösterdiği, buna karşılık soğurmanın olduğu durumdaki sismogramın spektrumunun maksimum genliklerinin düşük frekanslara doğru kaydığı açık olarak görülmüştür. Buna göre, yerin alçak geçişli bir süzgeç gibi davrandığı, burada modellemede kullanılan soğurma denkleminin (60 denklemi) soğurma çalışmalarında kullanılabilirliği belirlenmiştir. Buna bağlı olarak seçilen referans frekansının yapay DSP kesitlerini hesaplamada kullanılan kesme

frekansından (f_c ' den) büyük seçilmesinin hem soğurmayı hemde nedenselliği sağladığı belirlenmiştir.

Soğurmanın ortamdaki yansıma katsayıları üzerine olan etkileri incelenerek yansıma ve geçişlerdeki yüksek enerji kayıplarının nedenleri belirlenmiştir. Elastik ortamda sabit olan yansıma katsayılarının soğurucu ortamlarda (60) denklemine bağlı olarak üstel azalan bir fonksiyon olduğu belirlenmiştir (Şekil 16). Buna göre enerji kayıplarının süreksizlik sınırlarında neden yüksek olduğu görülmüştür. Çünkü frekans ortamı çözümlerinde çarpma işleminin kullanılması düşük yansıma katsayılarının yüksek frekanslı bileşenlere tekabül etmesini sağlar. Tabakalanmış elastik bir ortamda hız ve yoğunluğa bağlı empedans farkı olmadığı için, yansıma ve kırılma yada yere verilen kaynak dalgacığında herhangi bir bozulma olmaz. Ancak, eğer ortamda soğurma faktörüne bağlı empedans farkı varsa tabaka sınırlarında enerji paylaşımı vardır (Şekil 21). Yani hız ve yoğunluk farkı olmasa da sınırda enerji paylaşımı beklenir.

Kullanılan hız denkleminin sismogramlar üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için, dispersif olmayan (frekanstan bağımsız) bir soğurma denklemiyle kıyaslanmıştır. Kullanılan soğurma denkleminin sismik dalgayı nedensel olarak, diğerinin ise bu kuralı ihlal ederek soğurduğu bulunmuştur. Özellikle artan derinlik ve zamanda bu olayın daha belirgin olduğu görülmüştür (Şekil 25). Bunun referans frekansına bağlı olduğu dispersif hız eğrileri hesaplanarak belirlenmiştir. Buna göre,

$$f_c > \omega_r \text{ durumunda nedensellik ihlal edilmiştir,}$$

$$f_c < \omega_r \text{ durumunda soğurmanın nedenselliği sağlanmıştır.}$$

Böylelikle, $\omega_r = 100$ Hz seçiminin doğruluğu belirlenmiştir.

Bu belirleme ve bulgulara bağlı olarak yapay DSP kesitleri soğurma olmadığı ve olduğu durumlarda aynı yer modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Tabakalanmış ortamlarda soğurmanın etkisi kalite faktörü Q değerine bağlı olarak yapay DSP kesitleri hesaplanmıştır. Q değerinin tabakaların soğurma özelliklerini temsil ettiği hesaplanan DSP kesitleriyle modellenmiştir. Kullanılan hız denklemi için tabaka içinde Q değerinin sabit kullanılmasının uygun ve doğru olduğu belirlenmiştir. Aynı ortam modeli için Q değeri yüksek değerlerden küçük değerlere doğru değiştirilerek DSP kesitleri hesaplanmıştır. Şekil 35, 36, 37 ve 38 sırasıyla Q değerinin azalmasının (soğurmanın artmasının) iyi modellendiği kesitlerdir. Kesitlerde enerji kayıplarının yansıma, tekrarlı yansıma, kırılma

ve özellikle S dalgaları üzerine daha çok olduğu belirlenmiştir. Buna göre Q değerinin kesme kayıpları üzerine daha çok etkili olduğu ilkesi burada doğrulanmıştır. Çok yüksek Q değerlerinde dahi ($Q \geq 500$) soğurmanın etkisi kesitlerde görülmüştür. Bütün bunların sismik dalğanın yüksek frekanslarını kaybederek büyük periyotlu bileşenlerinin etkisinde kalarak zaman ortamında genliğinin azalmış olarak görülmesinin ispatıdır. Elastik bir ortamda sadece küresel açılım ve tabakalanmadan kaynaklanan genlik kaybının dalğanın frekans içeriğini etkilemediği 47 tabakalı DSP verisi modellenerek gösterilmiştir (Şekil 39). Buna bağlı olarak aynı veriye Q değeri eklenerek yapay DSP hesaplandığında sismogramda görülen bir çok olay hızlı bir şekilde sönümlenmiştir. Bu durumda kesite baktığımızda soğurmanın kesitin değerlendirilmesini zorlaştırdığını ve sismogramları bozduğu görülmüştür.

3.3. Kaynak Kuvvetlerinin Modellenmesiyle İlgili Bulgular

Hesaplanan DSP kesitlerinde kaynak kuvvetlerinin uygulanma yönlerine bağlı olarak, P ve S dalga alanlarının birbirlerine göre daha baskın olduğu belirlenmiştir. Gerçekte yatay kuvvetlerin kesitlerde S dalga alanlarının daha hakim olmasını sağladığı tespiti buradaki modelleme çalışmalarıyla belirlenmiş ve arazide yapılacak olan çalışmalarda kullanılan kaynak kuvvetlerinin kolayca modellenebileceği gösterilmiştir. Arama amaçlı çalışmalarda kayaç özelliklerinin daha iyi belirlenmesi için ihtiyaç duyulan S dalgaları teorik olarak DSP kesitleriyle modellenebileceği yapılan hesaplamalarla belirlenmiştir. Kaynağın uygulanma yönüyle yerin etkilenmesi ve dalğanın yayılarak seyahatinde hangi dalgaların daha yüksek genlikte ve belirgin olarak kaydedilebileceği belirlenmiştir. Şekil 42' de yalnızca düşey yönde uygulanan kuvvetin oluşturduğu DSP kesitinde P dalga fazlarının daha belirgin olması P dalgalarının düşey kuvvetlere karşı duyarlı olduğunu göstermiştir. Aynı şekilde S dalgaları için yatay kuvvet uygulanarak hesaplanan yapay DSP kesiti Şekil 43' de gösterilmektedir. Kullanılan kaynak kuvvetlerinin tek tek ve birlikte kullanılmaları kesitlerde etkisini göstermiştir. Şekil 44' de bu durum açık olarak görülmektedir. Buna göre ayrı dalgasayısı çözümü kullanılarak kaynak kuvvetlerinin modellenebileceği gösterilmiştir. Bundaki esas gaye teorik olarak düşünülen kaynak tipinin çözüme nasıl katılacağına bulunmasıydı. Yapılan çalışmada bu gerçekleştirilerek modeller hesaplanmıştır.

4. İRDELEME ve DEĞERLENDİRME

Yapılan bu çalışmada amacımız DSP yönteminde soğurma ve kaynak kuvvetleri modellenerek yapılacak bir arazi çalışmasında öncü çalışmalara ve yorumlama çalışmalarına katkı sağlamak olmuştur. Özellikle günümüze kadar soğurmanın hem arazi verisinden belirlenme hemde yapay modellenmesinde halen daha belirsizlikler olması soğurma çalışmalarının bundan sonrada devam edeceğini göstermektedir. Bundan dolayı çalışmanın önemli bir kısmı soğurma içerikli olmuştur. Bilindiği gibi soğurma çalışmalarının temelini frekans içerikli hesaplamaların oluşturması kullandığımız algoritmanın önemini belirtmektedir. Soğurma olayı sadece tek bir sebebe bağlanamaz. Ancak küresel açılım ve tabakalanmadan kaynaklanan enerji kaybı ihmal edildiğinde geriye kalan soğurma etkileri kalite faktörü Q ile temsil edilmesi birçok araştırmacı tarafından kabul edilmiş ve önemli derecede meydana gelen enerji kayıplarının nedeni olarak Q değeri değerlendirilmiştir.

Çalışmada tam dalga alanının çözümü elde edilmiştir. Öyleki çok küçük ofsetlerde bile çok karmaşık olaylar yapay DSP kesitlerinde kolayca elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak elastik dalga alanlarının tabaka içinde tam olarak yayılımı esasına dayanır. Elastik dalga alanları bir süreksizlik sınırına geldiğinde dalga alanlarının birbirine dönüşümünden kaynaklanan karmaşık dalga alanlarını oluşturmaktadır. Gerçekte yerinde bu şekilde oluşan olayların modellenmesi sismik çalışmalara oldukça yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada hesaplanan DSP kesitlerinin bu özellikleri içermesi yapay DSP modellemesinin önemini ortaya koymaktadır. Yapay DSP sismogramları hesaplanırken sismogramların zaman boyu, kaynaklar arası uzaklık ve frekans içeriğinin iyi seçilmesi gereklidir. Eğer iyi seçilmezse yapay DSP kesitlerinde hesaplama hatası olarak istenmeyen olaylarla karşılaşılabilir. Önemli derecede etkili olan bu olaylar çok yüksek frekanslı olarak görülürler. Bu açıdan değerlendirildiğinde soğurma içeren sismogramların hesaplanması bu etkilerin en aza indirilmesini sağlar.

Çalışmada soğurma etkilerinin hesaba katılması ayrık dalgasayısı çözümü ve algoritmanın duyarlılığından dolayı kolay olmuştur. Soğurmanın hesaba katılması algoritmanın işleminde herhangi bir engel teşkil etmemiştir. Gerçek hızlar yerine kompleks hızların kullanılmasına bağlı olan soğurma etkilerinin hesaba katılması işlemi, hız fonksiyonu frekans ve kalite faktörü Q ' ya bağlı olarak kullanılmıştır. Hız denkleminin dezavantajı Q ' nun

frekanstan bağımsız olarak kullanılması olmuştur. Ancak genel olarak katılarda geniş frekans aralıklarında sabit olan Q değerinin frekans bağımlı kullanılması sıvılar için daha uygundur. DSP sismogramlarının yüksek frekanslı olması hız denkleminde geniş frekans aralıkları (0.001-100) için geçerli olmasıyla ilişkilendirildiğinde arama amaçlı çalışmalarda bu hız denkleminin kullanılabilirliğini göstermiştir. Q değerinin soğurucu özelliği ricker kaynak dalgacığı üzerinde deneyerek kayıp enerjilerin frekans içeriğinin yüksek frekans olmasının DSP kesitlerinde de aynı şekilde gözlenmesi yapılan işin doğruluğunu ortaya koymuştur. Bunun tersine Q değerleri arttırıldıkça ideal (elastik) ortama yaklaşılması yani enerji kayıplarının en aza indirgenmesi soğurma nedenlerinin belirlenmesi açısından oldukça değerli bilgiler vermiştir.

Soğurmanın hesaba katılması ve buna bağlı olarak soğurma içeren sismogram hesaplarının doğruluğu bu konu ile ilgili literatürde yapılmış çalışmaların sonuçlarıyla kıyaslanarak belirlenmiştir. Mesela Ganley [4], Silva [6], Kennet [25], Martinez [28], Ecevitoğlu [35] ve Bourbie [36] çalışmalarında soğurmanın önce sismik dalgacık üzerine ve buna bağlı olarak hesapladıkları sismogramlar ve kesitler üzerine etkilerinin; sismik dalganın periyodunu genişleterek genliğini azalttığı sonucu bu çalışmada da gösterilmiştir. Hesaplanan DSP kesitlerinin düşey ve yatay bileşende elde edilmiş olması soğurmanın hangi dalga alanları üzerine daha etkili olduğunun açık olarak görülmesini sağlamıştır. Özellikle yatay bileşende S dalga alanları daha hakim olduğu bir gerçektir. Fakat soğurma çalışmalarında soğurmanın bu dalga alanları üzerine daha çok etkili olması soğurmanın derecesi arttıkça kesitlerde görülmemesini sağlamaktadır. Bunun nedeni olarak S dalga hızlarının P dalga hızlarından daha küçük olması ve Q' nun kesme kayıpları üzerine daha etkili olması, dalganın enerjisini zaman ve derinlik arttıkça muhafaza edememesi gösterilebilir.

Çalışmada kullanılan bilgisayar programının oldukça kullanışlı ve kolay kullanılır olması hesaplamalarda zaman açısından önemli olmuştur. Kullanılan yer modelleri yatay ve düz arayüzeyli tabakalanmalardan oluştuğu için algoritma hızlı çalışmaktadır. Kaynak alıcı geometrisi kolayca değiştirilebilmektedir. Programda aynı anda üç ayrı kaynak ofseti ve buna bağlı olarak bir kaynak ofsetinde üç ayrı kaynak kuvveti kullanabilme imkanı vardır. Kuyu boyunca yerleştirilmiş olan alıcıların istenilen derinliğe düzenli veya gelişigüzel şekilde yerleştirilme imkanının olması diğer bir kullanım avantajıdır. Tabaka sayısının ve alıcı sayısının arttırılması işlem hacmini arttırmaktadır. Buna rağmen eşdeğer programlara göre daha hızlıdır. Program orjinal Thomson-Haskell [26, 27] matris yöntemini kullandığı için, tabaka içindeki tüm tanımlamaları dikkate alır. Bu durumda, tam dalga alanı bir ω frekansı

ile çözülebilir.

Çözüm nyquist frekansına (kesme frekansı) kadar devam eder. Çözümün frekans ortamında yapılmasından dolayı çarpım tipi çözüm kullanılmıştır. Çözümde herbir frekans adımı için kaynaktan çıkan dalga alanları propagatör matrislerle tabakalı ortamda ilerletilir ve ayrık bir toplamla son çözüm hesaplanır.

Program Vax-6520 sisteminde' de çalıştırılmıştır. Normal olarak PC' lere göre hızlı ve bellek kapasitesi fazla olan bu sistemde 47 tabakalı bir DSP verisinin modellenmesi sistemin boş olduğu bir zamanda 2 saat 52 dakika, sistemin dolu sayılabileceği bir durumda bu süre 2 saat daha gecikmektedir. Ancak hesaplama zamanları her zaman için sabit değildir. Bu zamanlar programda kullanılan parametrelerde bağlı olarak değişmektedir. Ortamın soğurucu olması ile olmaması arasında hesaplama zamanı olarak fark yok denecek kadar azdır.



5. SONUÇLAR

Yapay DSP modellemesi sismik çalışmalarda önemli bir yer alarak gelişmekte olan bir tekniktir. DSP yöntemi bugün arama ve dalga yayılımı çalışmalarında kabul edilen ve kullanılan bir yöntem olmuştur. Yeraltı yapılarının dalga şekillerini ve frekans içeriklerini nasıl değiştirdiğini açık olarak belirlemede ve tam olarak görüntülemeye dolayısıyla arazi verilerinin ve kesitlerinin yorumlanmasında yapay DSP modellemesinin faydalarının olacağı bu çalışmanın en önemli sonucudur. Ayrıca DSP modellemesi yapılarak, arazide veri toplama düzeni hızlı ve kolay bir şekilde belirlenebilir.

Çalışmada ortam soğurucu tabakalardan oluşturularak modellenmiştir. Karmaşık hız denklemlerinin kullanılmasıyla ortamların soğurma özelliklerinin modellenebileceği diğer bir sonuc olarak elde edilmiştir. Soğurmanın yapay DSP sismogramları üzerine etkileri açık olarak görülmüştür. Aynı model ortamlar için hem elastik hemde soğurma etkilerinin olduğu DSP sismogramları hesaplanarak aradaki farklar görülmeye çalışılmıştır. Bu özelliği ile yapay DSP kesitlerinin, arazi çalışmalarında ortamın soğurma özellikleri ve buna bağlı olarak kayaç yapısı ve hız yapısı hakkında ayrıntılı olarak bilgi vereceği sonucu çıkmıştır. DSP kesitlerinde aşağıya ve yukarıya giden dalga alanlarının belirgin olarak görülmesi soğurmanın hangi dalga alanları üzerinde daha etkili olduğu açık olarak görülmüş ve sonuçta yukarı giden dalga alanları ve tekrarlıların üzerine etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Yeraltı yapılarının bu soğurma özelliğinin açık olarak kalite faktörü Q değerinden kaynaklandığı bu çalışmanın sonuçlarının özünü oluşturmuştur.

Sismik kaynaklar her zaman arazi çalışmalarında önemli bir araç olmuştur. Hangi kaynağın kullanılması gerektiği problem deneme atışlarıyla alınan ilk verilerin kalitesine bakılarak karar verilir. Bu maddi olarak ve arazi şartları açısından bir problem oluşturmaktadır. Bu problemin her arazi çalışmasında olduğu gibi öncelikle yapılacak modelleme çalışmalarıyla çözümü bugün en çok kullanılan yoldur. Bundan hareket edilerek bu çalışmada ek olarak kaynağın modellenmesiyle ilgilenilmiş ve sağlıklı sonuçlar alınmıştır. Kaynağın etkili olduğu P ve S dalga alanlarının kesitlerdeki görünümüne göre belirlenmiştir. Sonuçta etkili olarak yatay kuvvetler neticesinde S dalgalarının, düşey kuvvetler neticesinde ise P dalgalarının daha belirgin olarak kaydedildiği görülmüştür. Hesaplanan DSP sismogramlarının verdiği sonuçlar kaynak kuvveti doğrultusunun etkilerinin modellenmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Buna göre istenen amaca göre kaynak kuvveti seçiminin mümkün olacağı sonucu ortaya çıkmıştır.

Çalışmada Yapay DSP kesitleri bir frekans-dalgasayısı-derinlik ortamı çözümü olan ayrık dalgasayısı çözüm yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Çözümün doğru sonuçlar verdiği yapay DSP kesitlerinin gerçek arazi DSP kesitlerine uygunluğu ve teorik olarak bilinen nedensellik şartlarını sağlamasıyla belirlenmiştir. Orjinal olarak Aki ve Richards [42] tarafından geliştirilen ayrık dalgasayısı çözüm tekniğinin, Thomson-Haskell [26, 27] propagatör matrislerini kullanarak kolayca tabakalı ortamlarda kullanılabileceği görülmüştür. Kesitlerde elastik dalga alanlarının (P-SV) ve Rayleigh yüzey dalgalarının görülmesi kullanılan algoritmanın kolayca uygulanabilirliğini göstermiştir. Özellikle soğurucu tabakalanmış ortamların ve kaynak kuvvetlerinin modellenmesiyle çalışmanın faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.



6. ÖNERİLER

Yapay DSP modellemesi çalışmasında görüldü ki; soğurma etkileri hesaba katıldığında sismogramlardaki genlikler önemli derecede sönümlenmiştir (Bu sönümlenme sadece homojen olarak hesaba katıldı). Kurulan modeller düzenli yatay tabakalardan oluştuğu için değişim düşey yönde olmuştur. Gerçekte yeraltı yapılarının çok daha karmaşık ve değişken olduğu düşünülürse ileri bir çalışma için inhomojen (homojen olmayan) soğurma hesaba katılarak modelleme yapılabilir. Bunun için tabakaların kendi içindeki yanal olarak değişimlerini en iyi şekilde tanımlayabilen bir algoritma oluşturulmalıdır. Bu algoritma kaynak alıcı geometrisi ve arayüzeyleri (tabaka ve diğer süreksizlik sınırları) tanımlayan ve çözüme adapte edilecek bir algoritma olmalıdır. Böylelikle fay, dayk ve yanal değişimler gibi yapılar kolaylıkla modellenabilir.

Modeller düzenli arayüzeylerden oluşmuş tabakalardan kurularak modellenmiştir. Ancak arayüzeyler senklinal, antiklinal veya ondüleli yüzeyler şeklinde modellenabilir. Bunun için ileri bir çalışma yapılabilir. Çünkü algoritmanın mantığı buna elverişlidir. Fakat bu tür bir çalışma uzun zaman gerektirebilir.

Soğurmanın yukarı giden dalga alanları üzerine daha çok etkili olmasından dolayı bu dalga alanlarının genliklerinin açık bir şekilde görülmesi için Q-dekonvolüsyon yöntemi ile genlik kurtarımı yapılabilir. Buna bağlı olarak çok ince tabakaların etkilerinin daha duyarlı olarak modellenmesi için jeofonların adeti artırılabilir ve sıklaştırılabilir. Ayrıca merkez frekansı yüksek kaynak dalgacıkları ile kuvvetli kaynak kuvvetleri kullanılarak modelleme yapılması daha iyi olur.

Bundan sonra yapılacak bir çalışmada yukarıda bahsedilen eksikliklerin giderilerek algoritmanın geliştirilmesi ve gerçek bir arazi verisinin modellenmesi düşünülmektedir. Dolayısıyla arama ve rezervuar belirleme çalışmalarına daha çok faydalı olunabilir.

7. KAYNAKLAR

1. Peterson, R. A., Fillippone, W.R. ve Cooker, F. B., The Synthesis of Seismograms From Well Log Data, Geophysics, 20, (1955) 516-538.
2. Baranov, V. ve Kunetz, G., Film Synthe'que Avec Re'flexions Multiples, The'orie et Calcul Pratique, Geophysical Prospecting, 8, (1960) 315-325.
3. Wuenschel, P. C., Seismograms Synthesis Including Multiples and Transmission Coefficients, Geophysics, 25, (1960) 106-129.
4. Ganley, D.C., A Method for Calculating Synthetic Seismograms Which Include the Effects of Absorption and Dispersion, Geophysics, 46, (1981) 1100-1107.
5. Temme, P. ve Müller, G., Nümerical Simulation of Vertical Seismic Profiling, J. Geophysics Res., 50, (1982) 177-188.
6. Silva, W., Body Waves in Layered Anelastic Solid, Bull. Seism. Soc. Am., 66, (1976) 1539-1554.
7. Fuchs, K. ve Müller, G., Computation of Synthetic Seismograms with the Reflectivity method and comparison with observations, J. Geophysics Res., 23, (1971) 417-433.
8. Trorey, A.W., Theoretical Seismograms with Frequency and Depth Dependent Absorption, Geophysics, 17, (1962) 766-785.
9. Nielsen, P. H., Calculation of Synthetic Reflection Seismograms in the Frequency domain, Geophysical Prospecting, 26, (1978) 399-406.
10. Kennet, B. L. N., Theoretical Reflection Seismograms for Elastic Media, Geophysical Prospecting, 27, (1979) 301-321.
11. Berzen, I. S., Calculations of Theoretical Seismograms with Provision for Absorption in Heterogeneous Media, Geofiz. Sb. Akad. Navk. Ukr. SSR., 44, (1971) 36-47.
12. Bouchon, M. ve Aki, K., Discrete Wave Number Representation of Seismic Source Wave Fields, Bull. Seism. Soc. Am., 67, (1977) 259-277.
13. Prange, M. D., Vertical Seismic Profilling, A Numerically Stable Method for Computing High Frequency Sub-Surface Seismograms in Layered Media Using Discrete Wavenumber Method, Consortium Annual Report, E. R. L., M. I. T., Cambridge, M.A., 1985.
14. Fesseden, R. A., Method and Apparatus for Locating Ore Bodies, U. S. Patent No 1, (1917), 240-328.

15. Mc Collum, B. ve Larue, W. W., Utilization of Existing Wells in Seismograph work, Early Geophysical Paper, 1, (1931) 119-127.
16. Gal' perin, E.I., Vertical Seismic Profiling, 12th. Edition, Society of Explorations Geophysics, Tulsa, 1974.
17. Wyatt, K. D., Synthetic Vertical Seismic Profiles, Geophysics, 46, (1981) 880-891.
18. Kennet, P., Ireson, R. L. ve Conn, P. J., Vertical Seismic Profiles and Their Applications in Exploration Geophysics, Geophysics Prospecting, 28, (1980) 676-679.
19. McDonal, F. J., Angona, F. A., Mills, R. L., Sengbush, R.L., Van Nostrant, R. G. ve White, J. E., Attenuation of Shear and Compressional Waves in Pierre Shale. Geophysics, 23, (1958) 421-439.
20. Tullos, F. N. ve Reid, A. C., Seismic Attenuation of Gulf Coast Sediments, Geophysics, 34, (1969) 516-528.
21. Gaiser, J. E., Disiena, J. P. ve Fix, J.E., Vertical Seismic Profiles: Fundamentals of Downgoing Wave Field and Applications that Improve CDP Data Interpretation, ARCO Oil and Gas Company Exploration and Production Res. Lab., (1982) Dallas, U. S. A.
22. Spencer, T. W., Sonrad, J. R. ve Butler, T. M., Seismic Q-Stratigraphy or Dissipation, Geophysics, 47, (1982) 1808-1812.
23. Hauge, P. S., Measurements of Attenuation From VSP, Geophysics, 46, (1981) 1548-1558.
24. Hardage, B. A., Vertical Seismic Profiling, Geophysical Press Limited, London, 1983.
25. Kennet, B. L. N., The Effects of Attenuation on Seismograms, Bull. Seism. Soc. Am., 65, (1975) 1643-1651.
26. Thomson, W.T., Transmission of Elastic Waves Trough a Stratified Solid Medium, Journal Appl. Phys., 27, (1950) 89-93.
27. Haskell, N., The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, Bull. Seism. Soc. Am., 43, (1953) 17-34.
28. Martinez, R.D. ve McMechan, G. A., Analysis of Absobtion and Dispersion Effects in Synthetic τ -p Seismograms, Geophysics, 52, (1987) 1033-1047.

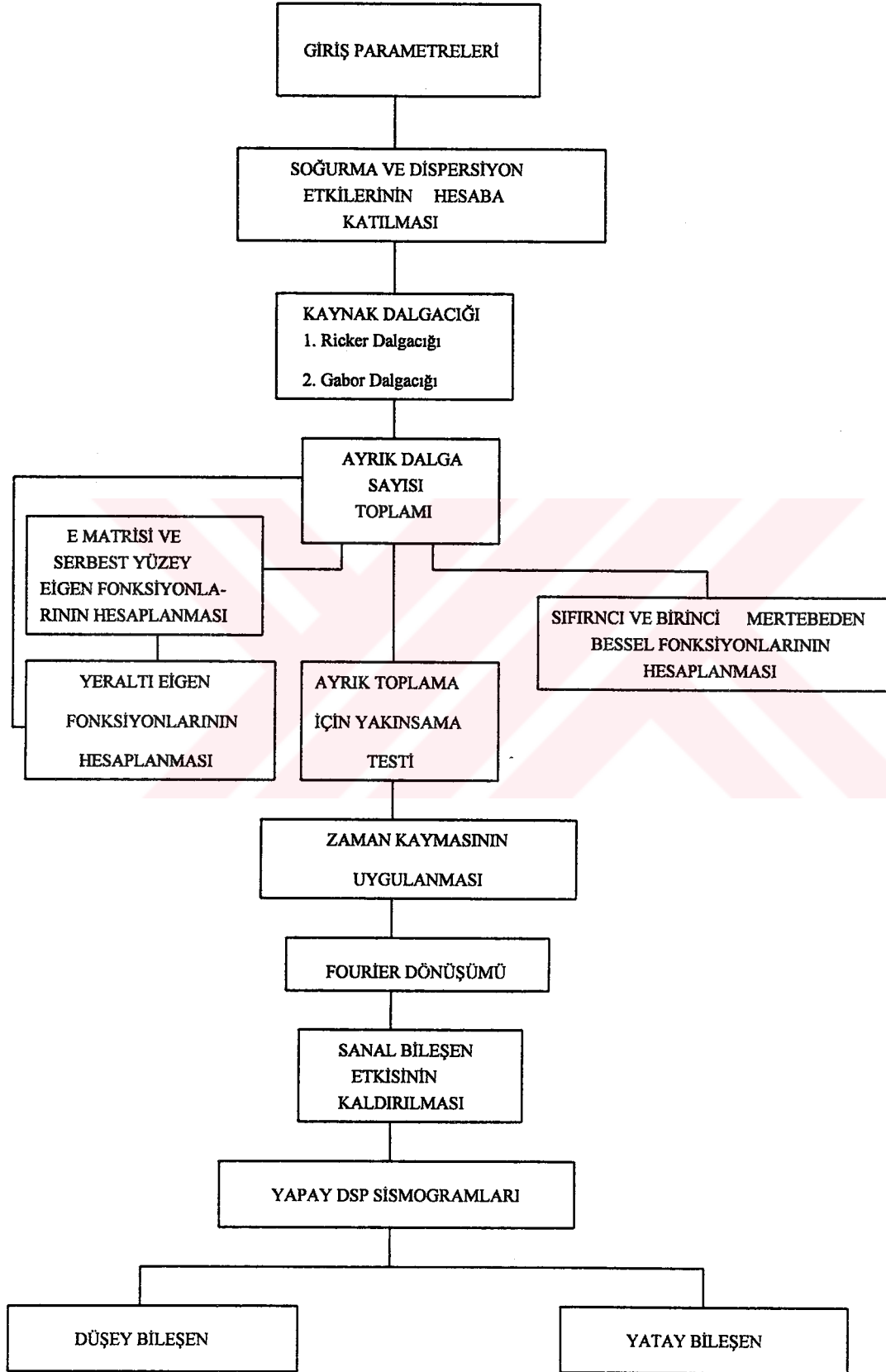
29. Stephen, R. A., Synthetic Vertical Seismic Profiling by the Method of the Finite Difference, Vertical Seismic Profiling, Part B: Advanced Concepts, Volume 14B, Geophysical Press, London, 1984.
30. Bouchon, M., Discrete Wavenumber Representation of Elastic Wave Fields in Three Space Dimensions, J. Geophysics Res., 84, (1979) 3609-3614.
31. Bouchon, M., A Simple Method to Calculate Green's Functions for Elastic Layered Media, Bull. Seism. Soc. Am., 71, (1981), 959-971.
32. Gelişli, K., Ayrık Dalgasayısı Yöntemiyle Tabakalı Ortamda Yüksek Frekanslı Düşey Sismik Profil Sismogramlarının Hesaplanması, Model ve Arazi Çalışmaları, Doktora Tezi, İ. Ü. F. B. E., İstanbul, 1992.
33. Meissner, R., Attenuation of Seismic Waves in Sediments, Proc. 11th. World Petroleum Congress, 1987, 363-379.
34. Jhonston, D. H. ve Toksöz, M. N., Seismic Wave Attenuation, Edited by Frankly, K.L., No. 2, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, 1981.
35. Ecevitoglu, B., Sismik Q Değeri ve Modellenmesi, Jeofizikte Modelleme Kollokyumu, Ocak 1992, İstanbul, Jeofizikte Modelleme Kollokyumu Ders Notları, 223-227.
36. Bourbie, T., The Effects of Attenuation on Reflections, Ph.D. Thesis, Stanford Univ., Stanford, 1982.
37. White, R. E., The Accuracy of Estimating Q From Seismic Data, Geophysics, 57, (1992) 1508-1511.
38. Borchardt, R. D., Inhomogenous Body and Surface Plane Waves in A Generalized Viscoelastic Half-Space, Ph.D. Thesis, California Univ., Berkeley, 1971.
39. Buchen, P. W., Plane Waves in Viscoelastic Medium, Geophysics J. Res. Astr. Soc., 23, (1971) 531-542.
40. Cooper, M. F. Jr., Reflection and Transmission of Oblique Plane Waves at A Plane Interface Between Viscoelastic, J. Acoust. Soc. of Am., 42, (1967) 1064-1069.
41. Lockett, C., Application of the Logarithmic Creep Law to Stress Wave Attenuation in the Solid Earth, J. Geophys. Res., 67, (1962) 365-368.
42. Aki, K. ve Richards, P. G., Quantative Seismology-Theory and Methods, First Edition, Freeman, W. H., and Company, Newyork, 1980.

43. Bouchon, M., Calculation of Complete Seismograms for an Explosive Source in Layered Medium, Geophysics, 45, (1980) 197-203.
44. Campillo, M. ve Bouchon, M., Synthetic SH Seismograms in a Laterally Varying by the Discrete Wavenumber Method, Geophysics J. R. Astr. Soc., 83, (1985) 307-317.
45. Campillo, M., Modeling of SH-Wave Propagation in a Irregularly Layered Medium-Application to Seismic Profiles Near a Dome, Geophysical Prospecting, 35, (1987) 236-249.
46. Bouchon, M., Campillo, M. ve Gaffet, S., A Boundary Integral Equation-Discrete Wavenumber Representation Method to Study Wave Propagation in Multilayered Media Having Irregular Interfaces, Geophysics, 54, (1989) 1134-1140.
47. Dietrich, M., ve Bouchon, M., Synthetic Vertical Seismic Profiles in Elastic Media, Geophysics, 50, (1985a) 224-234.
48. Dietrich, M. ve Bouchon, M., Measurements of Attenuation From Vertical Seismic Profiles by Iterative Modeling, Geophysics, 50, (1985b) 931-949.
49. Schmitt, D. P., Bouchon, M. ve Bonnett, G., Full Wave Synthetic Acoustic Logs in Saturated Porous Media, Submitted to Geophysics, 1987.
50. Schwarz, L., Theorie des Distributions, Hermann, Paris, 1966.
51. Lamb, H., On the Propagation of Tremors at the Surface of an Elastic Solid, Phil. Tran. Roy. Soc., 203, (1904) 1-42.
52. Sommerfeld, A., Über die Ausbreitung der Wellen in Derdrahtlosen Telegraphie, Ann. Phys., 28, (1909) 665-736.
53. Dietrich, M., Prange, M. ve Bouchon, M., Synthetic Vertical Seismic Profiles Using the Discrete Wavenumber Method, Vertical Seismic Profiling, Part B: Advanced Concepts, Volume 14B, Geophysical Press, London, 1984.
54. Schwab, F. ve Knopoff L., Fast Surface Wave and Free Mode Computations, Methods in Computations, Methods Physics, 12, (1972) 87-180.
55. Anstey, N. A., Seismic Interpretation, The Physical Aspects, Boston, 1977.
56. Angleri, G. P. ve Loinger, E., Phase Distortion due to Absorption in Seismograms and VSP, Geophysical Prospecting, 32, (1984) 406-424.

57. Kolksky, H., Stress Waves in Solids, London Oxford University Press, Newyork, 1963.
58. Kolksky, H., The Propagation of Stress Pulses in Viscoelastic Solid, Phyl. Mag., 1, (1956) 693-710.
59. Ricker, N. H., The Form and Laws of Propagation of Seismic Wavelets, Geopysics, 18, (1953) 10-40.
60. Ricker, N. H., Transient Waves in Viscoelastic Media, Elsevier, Newyork, 1977.
61. Futterman, W. I., Dispersive Body Waves, J. Gephysics Res., 67, (1967) 5297-5291.
62. Kjartanson, E., Constant-Q Wave Propagation and Attenuation, J. Geophysics Res., 84, (1979) 4737-4748.
63. Carpenter, E. W., Absorption of Elastic Waves-An Operator for a Constant-Q Mechanism, UK. Atom. Energy. Auth., Awre. Rep., 66, (1979) 1-43.
64. Turgut, A., ve Yamamoto, T., Synthetic Seismograms for Marine Sediments and Determination of Porosity and Permeability, Geophysics, 53, (1988) 1056-1067.
65. Keho, T. H., Toksöz, M. N., Cheng, C. H. ve Turpening, R. M., Wave Dynamics in a Gulf Coast VSP, Vertical Seismic Profiling, Part B: Advanced Concepts, Volume 14B, Geophysical Press, London, 1984.



8. E K L E R



Şekil EK 1. Yapay DSP sismogramlarının hesaplanmasında kullanılan programın akış diyagramı.

9. ÖZGEÇMİŞ

Hakan KARSLI, 1971 yılında Trabzon' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon' un Yomra ilçesinde tamamladı. 1988-89 eğitim-öğretim yılında K.T.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü' ne girdi. Haziran-1992 yılında Jeofizik Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 1992 yılında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı' nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 1993 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü kadrosuna araştırma görevlisi olarak atandı. Halen bu görevini sürdürmektedir.