

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UZAMSAL ÖZİLİŞKİ KATSAYILARININ TERS ÇÖZÜMÜ
İLE S-DALGASI HIZ PROFİLLERİNİN KESTİRİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Karolin FIRTANA**

Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2009

**UZAMSAL ÖZİLİŞKİ KATSAYILARININ TERS ÇÖZÜMÜ
İLE S-DALGASI HIZ PROFİLLERİNİN KESTİRİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Karolin FIRTANA

(505051404)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Aralık 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Ocak 2009

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Argun KOCAOĞLU (İ.T.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Haluk EYİDOĞAN (İ.T.Ü.)

Doç .Dr. Hayrullah KARABULUT (B.Ü.)

OCAK 2009

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. UZAMSAL ÖZİLİŞKİ YÖNTEMİ.....	5
2.1 Giriş	5
2.2 Uzamsal Özilişki Fonksiyonu ve Özilişki Katsayıları	6
2.3 Yapay Mikrotremor Verilerinin Üretilmesi	9
2.4 Özilişki Katsayılarının Hesaplanması	11
2.5 Katsayı Eğrilerine Etki Eden Parametreler	13
2.5.1 Alıcı sayısı	14
2.5.2 Dizilim yarıçapı	17
2.5.3 Sinyallerin azimutal dağılımı	18
2.5.4 Yakın kaynak etkisi	19
2.6 Alternatif Yöntemlerle Özilişki Katsayılarının Hesaplanması.....	21
2.7 Özet	22
3. ÖZİLİŞKİ KATSAYILARININ DOĞRUDAN TERS ÇÖZÜMÜ	25
3.1 Giriş	25
3.2 Kuramsal Özilişki Katsayılarının Hesaplanması (Düz Çözüm).....	26
3.3 Ters Çözüm	27
3.3.1 Sönümlü en küçük kareler çözümü	29
3.4 Özet	32
4. SENTETİK TESTLER İLE TERS ÇÖZÜM UYGULAMALARI	33
4.1 Giriş	33
4.2 İki Tabakalı Yer Modeli	33
4.3 Hızın Derinlikle Arttığı Yer Modeli.....	36
4.3.1 Gürültü analizleri	38
4.4 Düşük Hız Tabakası İçeren Yer Modeli.....	43
4.5 Özet	46
5. GERÇEK VERİ ANALİZİ	47
5.1 Giriş	47
5.2 Verilerin Toplanması.....	48
5.3 Verilerin Ön Değerlendirme Aşaması.....	48
5.4 Avcılar ve Çevresinin Jeolojisi	49
5.5 Avcılar Verilerinin Değerlendirilmesi.....	49

5.6 Çobançeşme Verisinin Değerlendirilmesi	55
5.7 Ters Çözüm Sonuçlarının Yorumlanması	58
5.8 Özet.....	61
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	63
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	71

KISALTMALAR

3C-MSPAC	: 3 Component Modified Spac
F-k	: Frekans- Dalgasayısı Yöntemi
MASW	: Multichannel Analsis of Surface Waves
MSPAC	: Modified Spac Method
Remi	: Refraction Microtremor
RMS	: Root Mean Square
SPAC	: Spatial Autocorrelation
SASW	: Spektral Analysis of Surface Waves
TUJJB	: Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : İki tabakalı yer modeli için model parametreleri.....	34
Çizelge 4.2 : Hızın derinlikle arttığı yer modeli için model parametreleri.....	37
Çizelge 4.3 : Düşük hız tabakası içeren yer modeli parametreleri.	44
Çizelge 5.1 : Ölçü noktalarındaki dizilim özellikleri.	47
Çizelge 5.2 : AVC-1 ölçü noktası için ters çözüm sonuçları.	51
Çizelge 5.3 : AVC-2 ölçü noktası için ters çözüm sonuçları.....	54
Çizelge 5.4 : ÇBM ölçü noktası için ters çözüm sonuçları.....	56

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Uzamsal özilişki yönteminin genel akış şeması.	6
Şekil 2.2	: Uzamsal özilişki yöntemi ölçüm düzeni.	7
Şekil 2.3	: (x_1, y_1) noktasındaki dispersif dalga alanı.	9
Şekil 2.4	: Yer tepki fonksiyonu ve yapay mikrotremor verisi.	11
Şekil 2.5	: Frekans ortamında kullanılan dar-band geçirimli filtre ($f_0=5$ Hz).	12
Şekil 2.6	: Özilişki katsayıları hesabında kullanılan ilişki uzaklıkları.	12
Şekil 2.7	: Dizilimde kullanılan alıcı sayısının katsayı eğrisinin şekline etkisi... 15	
Şekil 2.8	: 4 alıcılı bir dizilim için hata terimi ve hata terimini de içeren katsayı eğrisi.	16
Şekil 2.9	: Dizilimde kullanılan ilişki uzaklığının katsayı eğrilerinin şekline etkisi.	18
Şekil 2.10	: Dalga alanı sayısına bağlı olarak katsayı eğrilerinin şeklinin değişimi.	19
Şekil 2.11	: Yakın kaynak etkisi ile katsayı eğrisinin şeklinin değişimi.	20
Şekil 2.12	: MSPAC yöntemi ölçüm düzeni.	21
Şekil 3.1	: 1-B yatay tabakalı bir yer modeli için Rayleigh dalgası faz hızının bağlı olduğu parametreler.	26
Şekil 4.1	: İki tabakalı yer modeli için ters çözümle hesaplanan katsayı eğrileri.	35
Şekil 4.2	: İki tabakalı yer modeli için ters çözümle hesaplanan S-dalgası hızı profili ve dispersiyon eğrisi	36
Şekil 4.3	: Hızın derinlikle arttığı yer modeli için ters çözümle hesaplanan katsayı eğrileri	37
Şekil 4.4	: Hızın derinlikle arttığı yer modeli için ters çözümle hesaplanan S-dalgası hızı profili ve dispersiyon eğrisi.	38
Şekil 4.5	: % 5 gürültü içeren mikrotremor verisinin analizinden ters çözümle hesaplanan katsayı eğrileri	39
Şekil 4.6	: % 10 gürültü içeren mikrotremor verisinin analizinden ters çözümle hesaplanan katsayı eğrileri	39
Şekil 4.7	: % 20 gürültü içeren mikrotremor verisinin analizinden hesaplanan katsayı eğrileri	40
Şekil 4.8	: % 20 gürültü içeren mikrotremor verisinin analizinden ters çözümle hesaplanan katsayı eğrileri	41
Şekil 4.9	: Gürültü analizleri sonucunda elde edilen S-dalgası hız profilleri.	42
Şekil 4.10	: Gürültü analizleri sonucunda elde edilen dispersiyon eğrileri.	43
Şekil 4.11	: Düşük hız tabakası içeren yer modeli için ters çözümle hesaplanan katsayı eğrileri.	45

Şekil 4.12 :	Düşük hız tabakası içeren yer modeli için elde edilen S-dalgası hız profili ve dispersiyon eğrisi.	46
Şekil 5.1 :	Dizilim mikrotremor ölçülerinin alındığı noktalar.	48
Şekil 5.2 :	AVC-1 ölçü noktasında büyük dizilime ait gözlemsel katsayı eğrileri	50
Şekil 5.3 :	AVC-1 ölçü noktası için ters çözüm sonucunda elde edilen katsayı eğrileri.....	52
Şekil 5.4 :	AVC-1 ölçü noktası için S-dalgası hız profili ve dispersiyon eğrisi. ...	52
Şekil 5.5 :	AVC-2 ölçü noktasında 100 m’lik ilişki uzaklığı için gözlemsel katsayı eğrileri.	53
Şekil 5.6 :	AVC-2 ölçü noktası için ters çözüm sonucunda elde edilen katsayı eğrileri.....	54
Şekil 5.7 :	AVC-2 ölçü noktası için S-dalgası hız profili ve dispersiyon eğrisi. ...	55
Şekil 5.8 :	ÇBM ölçü noktası için 58 m’ lik dizilim yarıçapı için elde edilen katsayı eğrileri.	56
Şekil 5.9 :	ÇBM ölçü noktası için ters çözüm sonucunda elde edilen katsayı eğrileri.....	57
Şekil 5.10 :	ÇBM ölçü noktası için S-dalgası hız profili ve dispersiyon eğrisi.	57
Şekil 5.11 :	AVC-1 ve AVC-2 ölçü noktalarının stratigrafik kesit ile birlikte yorumlanması.	59
Şekil 5.12 :	ÇBM ölçü noktasının yalınlaştırılmış yer modeli.	60

SEMBOL LİSTESİ

$1-B$	: Bir boyutlu
$\mathbf{A}$	: Jacobian dizeyi
α	: P-dalgası hızı
β	: S-dalgası hızı
$c(\omega)$	: Faz hızı
d_1, d_2	: İlişki uzaklıkları
$E_M(rk)$	: Hata terimi
ε	: Fark vektörü
f_0	: Merkez frekansı
f	: Frekans
φ	: Dalga alanı geliş açısı
$g(f)$	: Gaussian fonksiyon
$g(\omega, r, \theta)$	: Kovaryans fonksiyonu
$h_0(\omega)$	: Spektral güç yoğunluğu
h	: Tabaka kalınlığı
J_0	: 0. dereceden 1. tip Bessel Fonksiyonu
J_1	: 1. dereceden Bessel fonksiyonu
$\mathbf{k}$	: Dalgasayısı vektörü
$\mathbf{\Lambda}$	: Özdeğerlerden oluşan diagonal dizey
λ	: Dalgaboyu
λ_i	: i. özdeğer

ω	: Açısal frekans
$n(t)$	: Rastgele gürültü
r	: Dizilim yarıçapı
ρ	: Tabaka yoğunluğu
$\rho(\omega, r)$	: Uzamsal özilişki katsayısı
rk_d	: Deviasiyon dalgasayısı
rk_N	: Nyquist dalgasayısı
$\mathbf{R}$	: Özilişki dizeyi
$S(r, \theta)$	: Uzamsal özilişki fonksiyonu
$\bar{S}(r)$	: Ortalama uzamsal özilişki fonksiyonu
$s(t)$	: Kaynak fonksiyonu
$\mathbf{v}$	: Özvektör
$\mathbf{V}$	: Sütunları özvektörlerden oluşan ortogonal dizey
ω	: Açısal frekans
$\mathbf{W}$	: Ağırlıklandırma dizeyi

UZAMSAL ÖZİLİŞKİ KATSAYILARININ TERS ÇÖZÜMÜ İLE S-DALGASI HIZ PROFİLLERİNİN KESTİRİMİ

ÖZET

Zeminlerin ve yapıların kuvvetli yer hareketleri sırasındaki davranış özelliklerinin belirlenmesinde S-dalgası hız bilgisi önemli bir parametredir. S-dalgası hızı kestiriminde yaygın olarak sismik yöntemler (kırılma, yansıma, kuyu içi yöntemler) kullanılmaktadır. Geleneksel sismik yöntemlerin yerleşimin yoğun olduğu bölgelerde uygulanması düşük sinyal/gürültü oranı nedeniyle zorluklar içerebilir. S-dalgası hız tayini için kuyu içi sismik yöntemlerin uygulanması ise yeterince ekonomik olmayabilir. Bahsedilen tüm bu zorluklar nedeniyle S-dalgası hız kestiriminde son yıllarda daha pratik ve düşük maliyetli yüzey dalgası yöntemleri kullanılmaktadır.

Mikrotremor verilerinin kullanıldığı pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemlerinden biri de uzamsal özilişki yöntemidir. Bu yöntemde genellikle veriler 4 alıcılı eşkenar üçgen dizilimler kullanılarak kaydedilir. Uzamsal özilişki yönteminde, özilişki katsayılarından elde edilen Rayleigh dalgası faz hızı dispersiyon eğrisinin ters çözümüyle S-dalgası hız bilgisi saptanır. Bu çalışmada, dispersiyon eğrileri yerine, daha pratik bir yaklaşım olan gözlemsel özilişki katsayılarının doğrudan ters çözümüyle S-dalgası hız yapısının kestirimi amaçlanmıştır.

Ters çözüm kodu Matlab ortamında sönümlü en küçük kareler çözümü kullanılarak yazılmıştır. Ters çözümde yer modelinin birçok ince tabakadan oluştuğu varsayılarak tabakalara ait S-dalgası hız değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca diferansiyel yuvarlatma yaklaşımı ile komşu tabakalara ait hız değerleri arasındaki fark minimize edilerek yer modelinin yumuşatılmış görüntüsü elde edilmiştir. Ters çözümde seçilen 3 referans yer modeli (iki tabakalı, dört tabakalı hızı derinlikle artan yer modeli ve düşük hız tabakası içeren yer modeli) için sentetik testler yapılmıştır. Ayrıca sentetik testler için gürültü analizleri de yapılmıştır. Yüzde 10' luk veya daha yüksek gürültü içeriği hesaplanan özilişki katsayıları eğrisinin özellikle düşük frekans aralığını (< 2 Hz) etkilemektedir. Gürültü oranının artmasıyla yarı-sonsuz tabakaya ait S-dalgası hız tayini güçleşir. Gerçek veri analizi için Avcılar ve Çobançeşme' de 4 alıcılı eşkenar üçgen dizilimler ile mikrotremor ağ ölçümleri alınmıştır. Avcılar bölgesi için elde edilen S-dalgası hız profilleri, çalışma alanında daha önce yapılmış çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlı olduğu saptanmıştır. Buna göre, Avcılar' daki iki ölçü noktasında düşük hızlı (< 750 m/s) sediman birim kalınlıkları 320 m ve 205 m olarak hesaplanmıştır. Çobançeşme' de ise temel kaya üzerinde kalınlığı en fazla 80 m olan düşük hızlı sediman birim saptanmıştır.

ESTIMATION OF S-WAVE VELOCITY PROFILES BY THE INVERSION OF SPATIAL AUTOCORRELATION COEFFICIENTS

SUMMARY

The S-wave velocity information is used to estimate the behaviour of soils and the site effects during strong ground motions. S-wave velocity is usually determined in field by using conventional seismic methods (reflection, refraction, borehole techniques). In densely populated urban areas, the use of conventional seismic methods is difficult due to high level of background seismic noise. Additionally, the implementation of borehole techniques can be costly for S-wave velocity estimations. To overcome the aforementioned difficulties, recently surface wave methods are being employed as a more practical low-cost alternative.

Spatial Autocorrelation method (SPAC), in which microtremors are measured, is applied as a passive surface wave technique. Generally, measurements are made using triangular shaped arrays of 4 sensors. In SPAC method, Rayleigh wave phase velocity dispersion data, obtained from autocorrelation coefficients, are inverted for the S-wave velocity structure. In this study, instead of inverting dispersion curves, a more practical approach is used; that is, observed SPAC coefficients are directly inverted for the S-wave velocities.

The inversion code is written in Matlab platform by using damped least squares solution. In the inversion the model is assumed to be formed by a stack of thin layers in which the S-wave velocities are unknown. Also differential smoothing approach is used to obtain smooth S-wave velocity models by minimizing the differences between velocities of adjacent layers. The inversion scheme is tested by using synthetic tests obtained for three reference models (a two layer and a four layer model with S-wave velocities increasing with depth and a model including a low velocity layer). Also the effect of noise is investigated for the synthetic cases. The noise content level of 10 percent or higher, especially affects the low frequency range (< 2 Hz) of the estimated autocorrelation coefficients. Increasing noise levels lead to models with unresolved half space velocities. For real data analysis, 4-station triangular arrays are deployed for microtremor array recordings in Avcılar and Çobançeşme observation sites. The interpreted shear wave velocity structure from the Avcılar experiment is in agreement with the results of previous studies. The results of this study show that, the thickness of the deep sedimentary layer with a low velocity (< 750 m/s) value vary between 320 m and 205 m at the Avcılar site. At the Çobançeşme observation site 70 m-thick-soft soils are overlying a rocky basement

1. GİRİŞ

Zeminlerde ve yapılarda kuvvetli yer hareketleri karşısında gözlenebilecek hasarın önceden kestirilebilmesi için S-dalgası hızı kullanılır. S-dalgası hız bilgisi ayrıca, zemin tepki analizlerinde, sismik risk haritalarının oluşturulmasında, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi, zemin ıslahı gibi jeoteknik problemlerin çözümünde, zemin dinamik parametrelerinin elde edilmesinde ve zemin sınıflamalarında kullanılmaktadır. S-dalgası hız kestirimi için kullanılan yöntemler arasında kuyu içi yöntemler, sondaj çalışmaları, sismik kırılma/yansıma çalışmaları ve aktif/pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri sayılabilir.

Çapraz, aşağı ve yukarı-kuyu teknikleri ve PS hız logu gibi kuyu içi yöntemlerle sınırlı bir alan için S-dalgası hızı saptanabilir. Ayrıca bu yöntemler mekanik sondaj gerektirdiğinden ekonomik değildir. Yerleşim alanları yakınında yapılan sismik kırılma ve yansıma çalışmalarında sinyal/gürültü oranı genellikle düşüktür. Bununla birlikte hedeflenen inceleme derinliğine ulaşmak için gerekli olan serim uzunluğunu arazi şartlarında elde etmek her zaman mümkün değildir. Bu nedenle, S-dalgası hız kestiriminde son yıllarda popülerliği giderek artan ve bu yöntemlere kıyasla daha ekonomik ve pratik olan aktif/pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri tercih edilmektedir.

Aktif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri, yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (multichannel analysis of surface waves, MASW) ve yüzey dalgalarının spektral analizidir (spectral analysis of surface waves, SASW). Aktif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri, kaynağın türüne bağlı olarak genellikle 50 m' lik sığ araştırma derinlikleri için kullanılır. Rayleigh dalgası yüksek mod tayininde aktif kaynaklı yöntemler pasif kaynaklı yöntemlere göre daha etkin olmaktadır.

Pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemlerinin başlıcaları uzamsal özilişki yöntemi (spatial autocorrelation, SPAC), frekans-dalgasayısı (F-k) yöntemi ve kırılma mikrotremor (refraction microtremor, REMI) yöntemidir. Uzamsal özilişki yöntemi

ve f-k yönteminde inceleme derinliği kullanılan dizilim boyutlarının 4-5 katı olabilir. Remi yönteminde ise yaklaşık 100 m' lik inceleme derinlikleri hedeflenir. F-k yönteminde yüksek modların saptanması kullanılan dizilimin boyutlarına bağlıdır. Uzamsal özilişki yönteminde ise yöntemin esasları gereği Rayleigh dalgalarının temel modu saptanabilmektedir.

Pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemlerinde sinyal olarak, sismik kırılma/yansıma çalışmalarında gürültü olarak nitelendirilen mikrotremorlar kullanılmaktadır. Periyodları 2 s' den daha kısa olan yer titreşimleri mikrotremor olarak adlandırılır. Periyodları 2 s' den uzun titreşimlere ise mikroseism denir. Genlikleri genellikle 0.1-1 mikron arasında değişen mikrotremorların kaynağı, başta trafik olmak üzere endüstriyel etkinliklerdir. Mikrotremorların içerikleri konusunda yapılan çalışmalarda enerjilerinin büyük bir kısmının 1-10 Hz frekans aralığında yüzey dalgaları ile taşındığı saptanmıştır (Kanai, 1961).

Mikrotremor çalışmaları, tek bir istasyonda 3 bileşen kayıtları ile veya ağ ölçüm yöntemlerinde düşey bileşen kayıtları ile yapılabilir. Mikrotremor çalışmaları içerisinde en yaygın olarak kullanılanı Nakamura yöntemidir. Nakamura yönteminin esası, mikrotremorların düşey bileşeninin zemin büyütmesinden etkilenmediği, buna karşın yatay bileşenlerin zemin tabakalarının özelliklerine bağlı olarak zemin büyütmesine maruz kalmasına dayanır. Zemin büyütmesi, bazı frekanslarda, yüzeye yakın tabakaların özelliklerine bağlı olarak, deprem dalgalarının genliğinde meydana gelen değişimdir. Spektral olarak yatay bileşen kayıtlarının düşey bileşen kayıtlarına oranlanması ile zemin büyütme etkisi saptanabilir (Konno ve diğ. 1998). Başlıca mikrotremor ağ ölçüm yöntemleri ise uzamsal özilişki yöntemi (Aki, 1957) ve f-k yöntemidir (Capon, 1969). Son yıllarda S-dalgası hız kestirimi için mikrotremor ağ ölçümleri ile elde edilen dispersiyon eğrileri ve mikrotremorların tek istasyon kayıtlarından elde edilen Yatay/Düşey spektumlarının ortak ters çözümü kullanılmaktadır (Arai, H., ve diğ., 2005, Garcia- Jerez, A., ve diğ., 2007). F-k yönteminde dalga alanı yayınının kaydedildiği alıcılar arasında kalan alanın hız yapısı ve dalga alanının geliş açısı saptanabilir. Klasik frekans ortamı ışın biçimlendirme yönteminde iki boyutlu Fourier dönüşümü ile zaman-uzay ortamındaki dalga alanı, frekans-dalgasayısı ortamına taşınır. Bu yöntemde amaç güç spektrumunun en büyük değeri aldığı frekans-dalgasayısı çiftini hesaplayabilmektir.

Böylece her bir frekansa karşılık gelen faz hızlarını elde etmek mümkündür (Tokeshi ve diğ., 2006).

Uzamsal özilişki yönteminin en yaygın uygulanış şekli, biri daire merkezinde diğerleri daire üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmiş 3 alıcıdan oluşan eşkenar üçgen dizilimidir (Kudo ve diğ., 2002, Asten , 2004, Apostolidis ve diğ.,2005). Roberts ve Asten (2005) ise sediman birim kalınlığını belirlemek amacıyla 7 alıcılı hegzagonal bir dizilim kullanmışlardır. Son yıllarda, farklı geometrik şekillere sahip veya belli bir geometriye uymayan dizilimlerle özilişki yöntemi uygulanmaktadır. Değiştirilmiş uzamsal özilişki (Modified Spatial Autocorrelation) yöntemi yerleşimin yoğun olduğu bölgelerde zaman zaman uygulama zorluğu yaşatan geleneksel dairesel dizilimin dezavantajını ortadan kaldıran bir yöntemdir (Betting ve diğ., 2001).

Uzamsal özilişki yönteminde alıcılarda kaydedilen sinyaller ilişkilendirilerek özilişki katsayıları hesaplanır. S-dalgası hız kestirimi için ilk adımda özilişki katsayılarından faz hızı dispersiyon eğrisi elde edilir. İkinci adımda ise dispersiyon eğrilerinin ters çözümü ile S-dalgası hız yapısı saptanır. Bu çalışmada dispersiyon verisinin ters çözümü yerine tek adımlı ve daha pratik bir yöntem olan özilişki katsayılarının doğrudan ters çözümü ile S-dalgası hız kestirimi hedeflenmiştir. Katsayı eğrilerinin doğrudan ters çözümü yaklaşımı kullanılarak yapılan çalışmalara örnek olarak Asten, M., W., ve diğ. (2004) ve Wathelet, M., ve diğ. (2005) yapmış oldukları çalışmalar gösterilebilir. Bu tez çalışmasının ters çözüm aşamasında sönümlü en küçük kareler çözümü ve diferansiyel yuvarlatma yaklaşımı ile S-dalgası hız profillerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bölüm 2’ de, uzamsal özilişki yönteminin kuramsal esasları, uzamsal özilişki fonksiyonu ve özilişki katsayıları hesabına değinilmiştir. Daha sonra özilişki katsayılarına etki eden parametreler yapay mikrotremor verileri üretilerek incelenmiştir. Bölüm 3’ te, kuramsal özilişki katsayılarının hesabı için düz çözüme değinildikten sonra Matlab ortamında yazılan ters çözüm kodunda kullanılan matematiksel bağıntılar ve ağırlıklandırma dizeyleri anlatılmıştır. Bölüm 4’ de kullanılan ters çözüm tekniği ele alınan 3 farklı yer modeli için sınanmıştır. Yapay testlerde, gürültü analizleri ile gürültü oranının değişiminin elde edilen sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Bölüm 5’ de, gerçek veri analizine yer verilmiştir. Gerçek verilerin analiziyle, Küçük Çekmece Gölü’ nün güneyindeki bölgede doğu-batı yönlü bir hat boyunca sediman birimin kalınlığının değişimi saptanmaya çalışılmıştır. Elde edilen ters çözüm sonuçları daha önce aynı bölgede

yapılmış çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 6' da ise tez çalışmasında elde edilen genel sonuçlar yer almaktadır.

2. UZAMSAL ÖZİLİŞKİ YÖNTEMİ

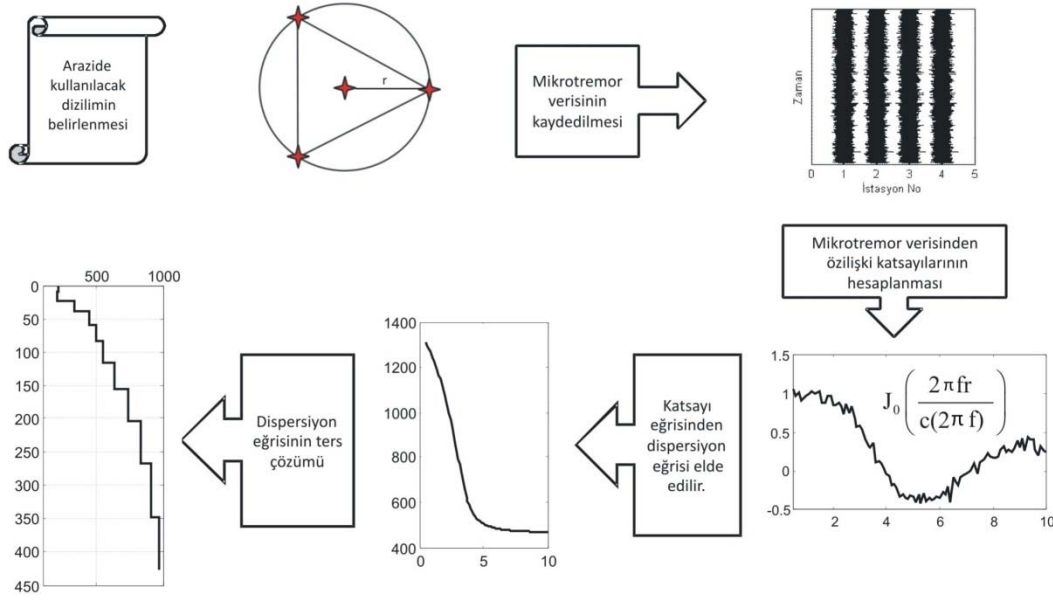
2.1 Giriş

Pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri sınıfında yer alan uzamsal özilişki yöntemi, mikrotremorların düşey bileşen kayıtlarının analizi ile Rayleigh dalgası dispersiyon eğrisinin elde edilmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Yöntemde seçilen dizilim yarıçapı değiştirilerek, istenilen dalgaboyu aralığı incelenebilir. Pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri kendi aralarında kıyaslandığında uzamsal özilişki yöntemi, frekans- dalgasayısı (f-k) yöntemine göre daha az alıcı ile daha geniş bir frekans aralığında Rayleigh dalgası dispersiyon eğrisinin elde edilmesini sağlar. Bu nedenle daha ekonomik, hızlı ve verimli çalışan bir yöntemdir (Estrella ve Gonzalez, 2003). Özilişki yönteminin günümüzde bir ve iki boyutlu dizilimlerle uygulanabilirliği, hatta belirli bir geometriye bağlı kalınmadan uygulanabilirlik esnekliği sayesinde S-dalgası hız yapısı tayininde sıkça kullanılmaktadır.

Uzamsal özilişki yönteminin genel akış şeması Şekil 2.1' de verilmektedir. Buna göre yöntem uygulanırken ilk olarak, hedeflenen araştırma derinliğine bağlı olarak dizilimin boyutları belirlenir. Bu yöntemde genellikle dairesel bir dizilim merkezinde ve daire üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmiş alıcılarda kaydedilen sinyaller kullanılarak uzamsal özilişki katsayıları hesaplanır. Özilişki katsayıları frekansın ve faz hızının fonksiyonu olduğundan dispersiyon eğrileri elde edilebilir. Dispersiyon eğrilerinin ters çözümüyle S-dalgası hız profilleri elde edilir. Bu çalışmada özilişki katsayılarının doğrudan ters çözümüyle S-dalgası hız profilleri elde edilmiştir.

Bu bölümde, ilk olarak uzamsal özilişki yönteminin kuramsal esasları verilmiştir. Daha sonra gözlemsel verilerden özilişki katsayılarının elde edilmesinde kullanılan yöntemlere değinilmiştir. Özilişki katsayılarına etki eden faktörler (Alt bölüm 2.5) yapay mikrotremor verileri üretilerek incelenmiştir.

Uzamsal Özilişki Yöntemi Genel Akış Şeması



Şekil 2.1 : Uzamsal özilişki yönteminin genel akış şeması.

2.2 Uzamsal Özilişki Fonksiyonu ve Özilişki Katsayıları

Kuramsal esasları ilk kez Aki (1957) tarafından verilen uzamsal özilişki (Spatial Autocorrelation Method, SPAC) yöntemi üç temel varsayıma dayanır: 1) Mikrotremorlar zaman- uzayda durağan bir rastgele süreçtir. 2) Mikrotremorlar farklı yönlerden gelen düzlem dalgaların toplamından oluşmuştur. 3) Mikrotremorlar içindeki en güçlü düzlem dalga, yüzey dalgalarından Rayleigh dalgasının temel modudur.

Bu yöntem mikrotremorların düşey bileşen kaydının analizine dayanır. Rayleigh dalgalarının dispersif özelliğinden faydalanılarak, dalga alanının kaydedildiği alıcı dizilimi (receiver array) arasındaki ortamın hız yapısı elde edilebilir. Aralarında r ilişki mesafesi bulunan ve farklı iki konuma yerleştirilmiş alıcılarda kaydedilen mikrotremor sinyallerinden uzamsal özilişki fonksiyonu elde edilebilir. Şekil 2.2' de φ geliş açısıyla yayınan dalga alanının merkez alıcıdaki kaydı $X(t,0,0)$, ve (r,θ) koordinatlarında bulunan alıcıdaki kaydı $X(t,r,\theta)$ olarak gösterilsin.

şeklinde ifade edilir. Bu fonksiyon dairesel dizilimin merkezinde yer alan alıcı ile merkez üzerinde (r, θ) koordinatlarında bulunan alıcı arasındaki özdeğişimin ölçüsüdür (Henstridge, 1979). Eşitlik (2.2)' den faydalanılarak merkezdeki $(0,0)$ özdeğişim fonksiyonu ω frekansı için

$$\begin{aligned}
g(\omega, 0, 0) &= \int_0^{2\pi} h(\omega, \varphi) d\varphi \\
&= h_0(\omega)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

şeklinde tanımlanır. Burada $h_0(\omega)$ spektral güç yoğunluğudur. Denklem (2.1), $r = 0$ ve $\theta = 0$ değerleri için tekrar düzenlenirse özilişki fonksiyonu

$$\begin{aligned}
S_0 &\cong S(0, 0) = E \left[|X(t, 0, 0)|^2 \right] \\
&= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_0^{2\pi} h(\omega, \varphi) d\varphi \right] d\omega \\
&= \int_{-\infty}^{+\infty} h_0(\omega) d\omega
\end{aligned} \tag{2.4}$$

olarak ifade edilebilir. İki alıcı arasındaki uzamsal özilişki fonksiyonundan faydalanılarak, ortalama uzamsal özilişki fonksiyonu

$$\begin{aligned}
\bar{S}(r) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} S(r, \theta) d\theta \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega, r, \theta) d\omega d\theta \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} \exp\{irk \cos(\theta - \varphi)\} h(\omega, \varphi) d\varphi d\omega d\theta \\
&= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} h(\omega, \varphi) d\omega d\varphi \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\{irk \cos(\theta - \varphi)\} d\theta \right] \\
&= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} h(\omega, \varphi) J_0(rk) d\omega d\varphi \\
&= J_0(rk) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} h(\omega, \varphi) d\varphi d\omega
\end{aligned} \tag{2.5}$$

şeklinde tanımlanır. Burada J_0 sıfırıncı dereceden birinci tip Bessel fonksiyonudur. Ortalama uzamsal özilişki fonksiyonu denklem (2.3) kullanılarak

$$\bar{S}(r) = J_0(rk) \int_{-\infty}^{+\infty} h_0(\omega) d\omega \quad (2.6)$$

eşitliği ile gösterilebilir. Bu eşitlik, denklem (2.4)' den faydalanılarak,

$$\bar{S}(r) = J_0(rk) S_0 \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilir. İki alıcı arasındaki ortalama uzamsal özilişki fonksiyonunun, merkezdeki özilişki fonksiyonuna oranı:

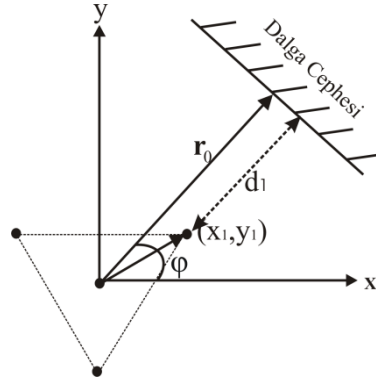
$$\frac{\bar{S}(r)}{S_0} = J_0(rk) = J_0\left(\frac{\omega}{c(\omega)} r\right) \quad (2.8)$$

ω frekansındaki özilişki katsayısına eşittir. (2.8) denklemi, uzamsal özilişki katsayılarının, dispersif yüzey dalgalarının faz hızlarının frekansla değişimine ve dizilim yarıçapına bağlı olarak, sıfırdan birinci tip Bessel fonksiyonu ile temsil edilebileceğini göstermektedir (Okada, 1997).

Özilişki katsayıları sanal ve gerçel bileşenden oluşur. Sanal bileşenin sıfırdan farklı değerleri kaydedilen sinyalin kalitesinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir. Daire üzerindeki alıcı sayısının çift seçilmesi durumunda, örneğin toplam 7 alıcılı dairesel bir dizilim için sanal bileşen, daima sıfıra eşit olacaktır. 4 alıcılı dizilimlerde ise mikrotremor sinyalinin tek bir yönden gelmesi durumunda katsayı eğrisinin sanal bileşeninin değeri her zaman sıfırdan farklı olacaktır (Asten, 2006).

2.3 Yapay Mikrotremor Verilerinin Üretilmesi

Uzamsal özilişki yönteminde katsayı eğrilerine etki eden parametrelerin analizi için öncelikle yapay mikrotremor verileri üretilmiştir. Şekil (2.3)' de (x_1, y_1) noktasındaki dispersif dalga alanı r_0 uzaklıktaki bir kaynaktan yayılan birim genlikli düzlem dalgaların lineer süperpozisyonu olarak tanımlanabilir. Dalga cephesinin (x, y) koordinat sisteminin merkezine olan uzaklığı r_0 , x-ekseni ile yapmış olduğu açı ise ϕ ile gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : (x_1, y_1) noktasındaki dispersif dalgı alanı.

(x_1, y_1) noktasındaki dispersif dalgı alanı:

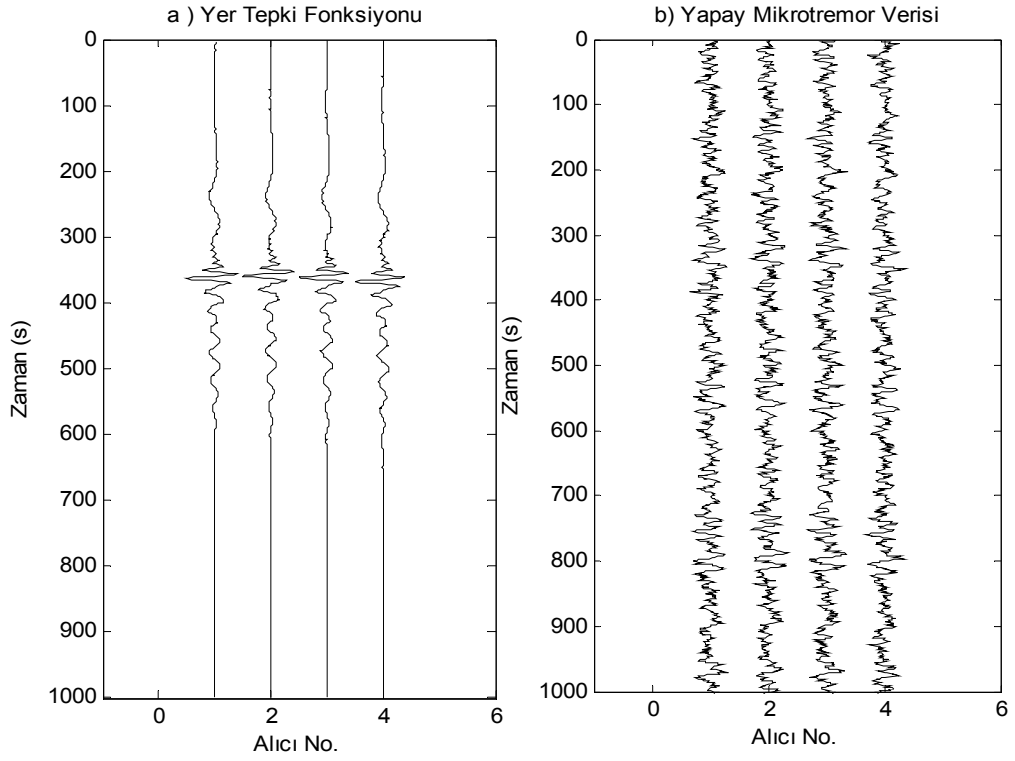
$$Z(x_1, y_1, t) = \frac{I}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[j\omega \left[\frac{(r_0 - x_1 \cos \varphi + y_1 \sin \varphi)}{c(\omega)} - t \right] \right] d\omega \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $(r_0 - x_1 \cos \varphi + y_1 \sin \varphi) = d_1$, (x_1, y_1) noktasının dalgı cephesine olan dik uzaklığıdır.

$Z(x_1, y_1, t)$ fonksiyonu birim genlikli düzlem dalgaların toplamından oluşmuştur ve yer tepki fonksiyonu olarak adlandırılır. Yapay mikrotremor verisi ise (2.9) eşitliği ile verilen yer tepki fonksiyonunun tekdüze dağılımlı rastgele bir süreç olarak tanımlanan bir kaynak fonksiyonu $(s(t))$ ile evrişimi olarak modellenenebilir. Ayrıca mikrotremor verileri gözlem noktasına bağılı olarak rastgele gürültüler $(n(t))$ de içerebilir. Bu durumda yapay mikrotremor verisi

$$Y(x_1, y_1, t) = Z(x_1, y_1, t) * s(t) + n(t) \quad (2.10)$$

eşitliği ile gösterilebilir. Şekil 2.4a' da 4 alıcıda kaydedilen yer tepki fonksiyonu Şekil 2.4b' de ise üretilen yapay mikrotremor verisi verilmiştir.



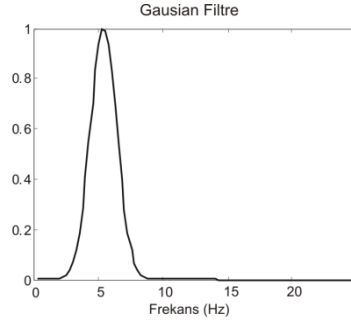
Şekil 2.4 : Yer tepki fonksiyonu (a) ve yapay mikrotremor verisi (b).

2.4 Özilişki Katsayılarının Hesaplanması

Uzamsal özilişki katsayılarını süzgeçleme yöntemi ile veya frekans ortamında hesaplanabilir. Katsayıların süzgeçleme yöntemi ile hesabında: 1) Sinyalin Fourier dönüşümü alınır. 2) Belirlenen f_0 merkez frekansında dar-band geçirimli bir süzgeç ile süzülür. 3) Sinyalin Ters- Fourier dönüşümü alınarak f_0 frekansı için süzölmüş veri elde edilir. Bu işlem incelenen frekans aralığı için tekrarlanır. Dar-band geçirimli süzgeç, Gaussian Fonksiyonu $g(f)$ ile tanımlanabilir

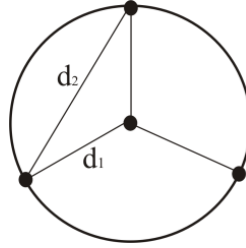
$$g(f) = \exp\left(-\frac{(f-f_0)^2}{2s^2}\right). \quad (2.11)$$

Burada, s değeri, dar-band geçirimli süzgecin genişliğini kontrol eder. Şekil 2.5' de örnek olarak, 5 Hz merkez frekansındaki dar-band geçirimli süzgeç verilmektedir.



Şekil 2.5 : Frekans ortamında kullanılan dar-band geçirimli Gaussian süzgeç ($f_0=5$ Hz için).

4 alıcılı dairesel bir dizilim için özilişki katsayıları 2 farklı uzaklık kullanılarak hesaplanabilir. Bu uzaklıklar, merkez alıcı ile daire üzerindeki alıcı arasındaki ilişki uzaklığı d_1 ve daire üzerindeki iki alıcı arasındaki ilişki uzaklığıdır (d_2).



Şekil 2.6 : 4 alıcılı dizilimlerde, özilişki katsayılarının hesaplanmasında kullanılabilecek iki ayrı ilişki uzaklığı (d_1 ve d_2).

d_1 yarıçaplı 4 alıcılı dairesel bir dizilimde kaydedilen sinyallerin f_0 merkez frekansında süzülmesiyle elde edilen süzölmüş sinyaller,

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1[n] \\ S_2[n] \\ S_3[n] \\ S_4[n] \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

şeklinde bir dizeyle verilebilir. Özilişki katsayılarını tanımlamak için aşağıda (2.13) denklemi ile verilen özilişki matrisi ($\mathbf{R}$) hesaplanır.

$$\mathbf{R} = \mathbf{S}\mathbf{S}^T \quad (2.13)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{11} & \mathbf{R}_{12} & \mathbf{R}_{13} & \mathbf{R}_{14} \\ \mathbf{R}_{21} & \mathbf{R}_{22} & \mathbf{R}_{23} & \mathbf{R}_{24} \\ \mathbf{R}_{31} & \mathbf{R}_{32} & \mathbf{R}_{33} & \mathbf{R}_{34} \\ \mathbf{R}_{41} & \mathbf{R}_{42} & \mathbf{R}_{43} & \mathbf{R}_{44} \end{bmatrix}$$

d_1 ilişki uzaklığı için öziliği katsayıları,

$$\rho(d_1, \omega_0) = \frac{(R_{12} + R_{13} + R_{14})/3}{R_{11}} \quad (2.14)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Frekans ortamında uzamsal öziliği katsayılarının hesaplanmasında süzme işlemi olmadığından dolayı, işlem daha hızlı gerçekleşir. Öziliği katsayıları frekans ortamında hesaplanırken

$$\rho(r, \omega_0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\int_{\omega_0-\Delta\omega}^{\omega_0+\Delta\omega} \text{Re} [U(x,y,\omega) U^*(x+r\cos\varphi, y+r\sin\varphi, \omega) d\omega]}{\sqrt{\int_{\omega_0-\Delta\omega}^{\omega_0+\Delta\omega} U^2(x,y,\omega) d\omega} \int_{\omega_0-\Delta\omega}^{\omega_0+\Delta\omega} U^2(x+r\cos\varphi, y+r\sin\varphi, \omega) d\omega} d\varphi \quad (2.15)$$

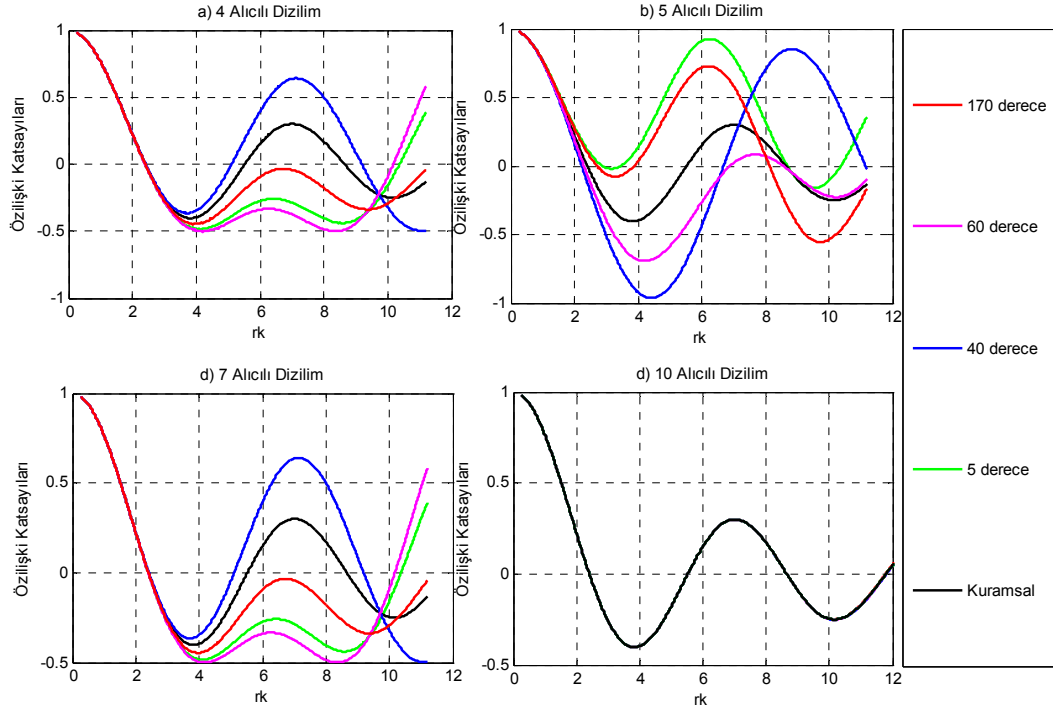
eşitliği kullanılır (Malagnini ve diğ., 1993). Bu eşitlikte, $U(x,y,\omega)$, (x,y) koordinatlı merkez istasyonunda kaydedilen sinyalin Fourier dönüşümüdür. $U^*(x+r\cos\varphi, y+r\sin\varphi, \omega)$, φ azimutunda, merkezden r uzaklıkta bulunan istasyonda kaydedilen sinyalin Fourier dönüşümünün kompleks eşleniğidir.

2.5 Katsayı Eğrilerine Etki Eden Parametreler

Uzamsal öziliği yönteminde, öziliği katsayıları eğrisi kuramsal olarak sıfırıncı dereceden birinci tip Bessel Fonksiyonu ile tanımlanır. Ancak, arazide toplanan mikrotremor sinyalleri ile yapılan analizlerde, elde edilen katsayı eğrilerinin şekli rastgele ve sistematik hatalar nedeniyle sıfırıncı dereceden birinci tip Bessel fonksiyonundan farklı olabilir. Rastgele hataların başlıca nedeni mikrotremor verilerinin içerdiği ilişkisiz (uncorrelated) gürültülerdir. Gürültü etkisi ile ilgili analizler Bölüm 4' de ele alınacaktır. Bu bölümde, dizilimde kullanılan alıcı sayısına, dizilim yarıçapı ve mikrotremor kaynağının alıcılara olan uzaklığına bağlı olarak oluşabilecek sistematik hatalar incelenmiştir.

2.5.1 Alıcı sayısı

Dizilimde kullanılan alıcı sayısının katsayı eğrisine etkisini araştırmak amacı ile tek bir yönden gelen yapay mikrotremor sinyali üretilmiştir. Uzamsal özilişki yönteminde genellikle iki boyutlu dairesel dizilimler kullanılmaktadır. Bu nedenle, yarıçapı 50 m olan dairesel bir dizilim üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmiş 4, 5, 7 ve 10 alıcılı dizilimler ele alınmıştır. Analiz için 10 dk uzunluğunda, örnekleme aralığı 0.01 s olan ve rastgele gürültü içermeyen yapay mikrotremor sinyali üretilmiştir. Bu analiz sırasında, dalga alanının geliş açısının da katsayı eğrilerine etkisini araştırabilmek için dalga alanının 4 farklı doğrultudan gelmesi durumu ele alınmıştır. İlk olarak seçilen bir yer modeli için frekansın fonksiyonu olarak faz hızı hesaplanmıştır. Bu işlem için, SURF96 (Herrmann ve Ammon , 2002) programının düz çözüme ilişkin FORTRAN alt programları MATLAB ortamına yeniden uyarlanmıştır. Faz hızı-frekans (dispersiyon) ilişkisinden her frekans için kuramsal özilişki katsayıları hesaplanmıştır. Şekil 2.7' de siyah eğri, kuramsal katsayı eğrisidir. Yatay eksen, Bessel fonksiyonunun değişkenleri olan dizilim yarıçapı ve dalgasayısının çarpımını, dikey eksen ise özilişki katsayılarını göstermektedir. Dizilimde kullanılan alıcı sayısına bağlı olarak elde edilen katsayı eğrileri, dalga alanı geliş yönü ne olursa olsun genellikle ilk minimum noktalarının civarında kuramsal eğriden sapmaya başlar. 5 alıcılı dizilimlerde ise bu sapma, ilk minimum değerinden çok daha önce başlamaktadır. Şekil 2.7d' de görüldüğü üzere 10 alıcılı dizilimler kullanıldığında katsayı eğrileri kuramsal eğri ile tam çakışmaktadır. Bu durumda incelenen (rk) aralığındaki (0-12) özilişki katsayılarının tamamı kullanılarak faz hızı hesaplanabilir. Ancak 4, 5 ve 7 alıcılı dizilimlerde, gözlemsel eğrilerin kullanılabilecek kısımları eğrilerin, kuramsal eğriden ayrılmaya başladığı (rk) değeri ile sınırlıdır.



Şekil 2.7 : Alıcı sayısının sırasıyla 4, 5, 7 ve 10 olması durumunda farklı yönlerden gelen dalga alanlarının katsayı eğrilerine etkisi. Siyah eğri kuramsal katsayı eğrisidir.

Bu durumda katsayı eğrilerinin ilk minimumları civarındaki bir (rk) değerine kadar olan kısımları kullanılarak faz hızı hesaplanmalıdır. İlk minimumları civarında gözlemsel eğriler kuramsal eğriden saptığı için eğrinin ilk minimumlarından sonraki kısımlarının kullanılmasıyla hesaplanacak faz hızları hatalı olacaktır. Alıcı sayısına bağlı olarak, katsayı eğrilerinin kullanılacak kısımlarının üst sınırı, matematiksel olarak Nyquist dalgasayısı ile belirlenebilir. Nyquist dalgasayısını (rk_N), dairesel dizilimin çevresine yerleştirilen alıcı sayısına (M) bağlı olarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir (Henstridge, 1979).

$$rk_N = \begin{cases} \pi & M \leq 6 \\ \pi/2 \sin(\pi/M) & M > 6 \end{cases} \quad (2.16)$$

Bu eşitliğe göre, 4 alıcılı dizilimlerden elde edilen katsayı eğrileri, (rk)'nın π 'ye eşit olduğu değere kadar kullanılabilir. (rk)'nın π 'den büyük değerleri için gözlemsel eğri kuramsal eğriden ayrılmaya başlar. Okada (2006), sonlu sayıda alıcı kullanılarak pratikte elde edilecek özilişki katsayılarını analitik olarak,

$$\hat{\rho}_M(\omega, r) = J_0(rk) + 2 \sum_{l=1}^{\infty} (-1)^{vlM} J_{2vlM}(rk) \quad (2.17)$$

eşitliği ile tanımlamıştır. Burada eşitliğin sağ tarafındaki ifade gözlemsel eğrilerin

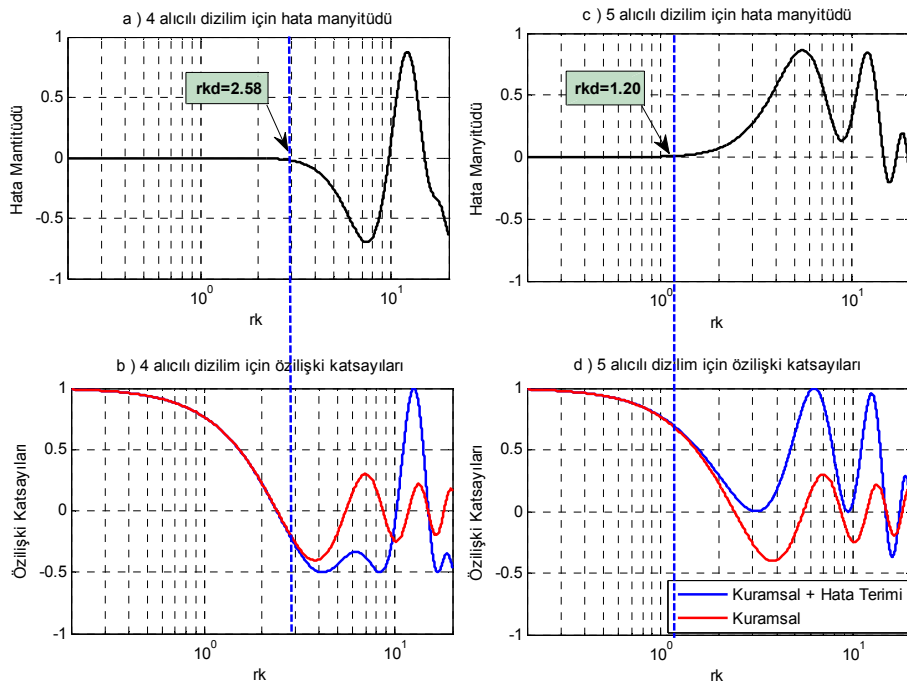
kuramsal eğriden sapmaya başladığı (rk) değerinden itibaren, içerdikleri hata miktarını $E_M(rk)$ tanımlamaktadır.

$$E_M(rk) = 2 \sum_{l=1}^{\infty} (-1)^{v_{lM}} J_{2v_{lM}}(rk) \quad (2.18)$$

Burada dizilim üzerindeki alıcı sayısının (M) tek sayı seçilmesi durumunda v değeri 1, M' nin çift sayı olması durumunda ise v değeri 1/2 olarak alınır. Daire üzerine yerleştirilmiş 3 alıcıdan oluşan eşkenar üçgen için denklem (2.18) ile verilen serinin ilk üç terimi alınırsa hata terimi,

$$E_3(rk) = 2[-J_6(rk) + J_{12}(rk) - J_{18}(rk) + \dots] \quad (2.19)$$

şeklinde yazılır. Şekil 2.8a ve Şekil 2.8c' de 4 ve 5 alıcılı dizilimler hata terimi çizdirilmiştir. Okada (2006), alıcı sayısına bağlı olarak deviasiyon dalgasayısını (rk_d), hata manyitüdünün değerinin 0.01' den büyük olmaya başladığı değer olarak tanımlamıştır. Buna göre 4 alıcılı dizilimlerde hata manyitüdünün, deviasyon dalgasayısının 2.58' e eşit olduğu noktadan itibaren, 5 alıcılı dizilimlerde ise hata manyitüdünün, deviasyon dalgasayısının 1.20' ye eşit olduğu değerden sonra arttığı görülmektedir. Şekil 2.8b ve Şekil 2.8d' de (2.17) eşitliği kullanılarak 4 ve 5 alıcılı dizilimler için hata terimini de içeren katsayı eğrileri (mavi) hesaplanmıştır. Kuramsal eğrilerden sapma, mavi kesikli çizgilerle gösterilmektedir.



Şekil 2.8 : 4 alıcılı dairesel bir dizilim için hata terimi (a) ve (b)' de hata terimini de içeren katsayı eğrisi (mavi).

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda (2.17) denklemindeki analitik ifade kullanılarak hesaplanan özilişki katsayıları ve Şekil 2.7’ de yapay mikrotremor sinyali üretilerek yapılan analiz sonucunda elde edilen katsayı eğrilerinin birbiriyle tutarlı olduğu söylenebilir. Şekil 2.7’ deki kuramsal ve gözlemsel eğrilerdeki sapma matematiksel olarak Şekil 2.8’ de elde edilen sonuçlar ile açıklanabilir.

4 alıcılı dizilimler için Nyquist dalgasayısı, deviasyon dalgasayısından daha büyük bir değere sahiptir. Bu nedenle 4 alıcılı dizilimlerde katsayı eğrisinin kullanılabilir kısmı Nyquist dalgasayısı ile sınırlandırılmıştır. Alıcı sayısı arttırıldığında deviasyon dalgasayısının daha büyük değerlere kayması beklenir, bu durum 5 alıcılı dizilimler için bir istisnadır. 5 alıcılı dizilimlerde alıcı sayısı artmasına rağmen deviasyon dalgasayısı, 4 alıcılı dizilime göre daha küçük bir değere sahiptir.

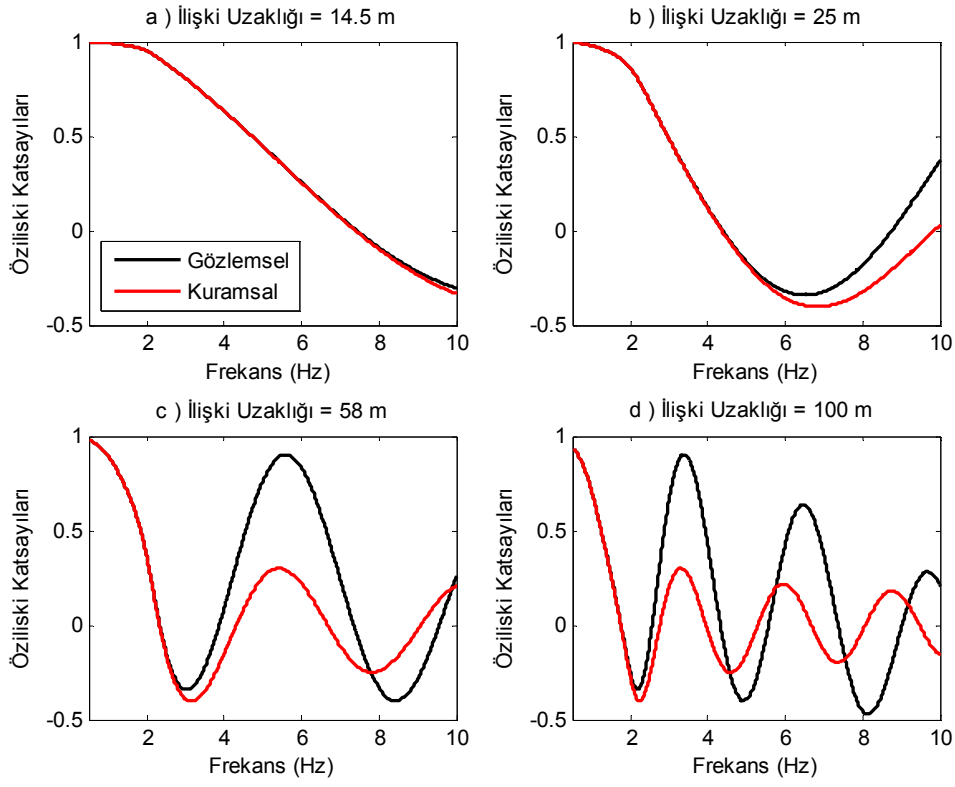
Dalga alanının geliş yönünden bağımsız olarak, (rk) ’nın sabit bir değere sahip olması, pratikte incelediğimiz frekans aralığını da sınırlandırır. Bu durumda daha geniş frekans aralıklarında özilişki katsayılarını hesaplayabilmek için, arazide kullanılan dizilim yarıçapının değiştirilmesi gerekir.

2.5.2 Dizilim yarıçapı

Pratikte incelenmek istenen frekans aralığının genişliği seçilen ilişki uzaklıklarına bağlı olarak belirlenebilir. Bu durumda dizilimlerde kullanılan yarıçap değiştirilerek daha geniş bir frekans aralığı için katsayı eğrileri elde edilebilir. Bu durumu daha iyi açıklayabilmek için yarıçapları 14.5 ve 58 m olan iki adet 4 alıcılı ve ortak merkezli dairesel dizilim oluşturulmuştur. Şekil 2.9’ da gösterildiği gibi 4 farklı ilişki uzaklığı kullanılarak katsayı eğrileri hesaplanabilir. Kullanılan ilişki uzaklığı küçüldükçe katsayı eğrilerinin ilk minimum değerleri civarında gözlenen deviasyon dalgasayısının değeri daha yüksek frekanslara kayacaktır. Böylece küçük ilişki uzaklıkları kullanılarak daha yüksek frekanslarda özilişki katsayıları hesaplanabilecektir. Büyük ilişki uzaklıklarının kullanıldığı durumlarda ise elde edilecek katsayı eğrilerinde deviasyon dalgasayısı daha küçük frekanslarda yer alacaktır. Şekil 2.9’ da gözlendiği gibi, kullanılan ilişki uzaklığı büyüdükçe, katsayı eğrilerinin ilk minimum noktalarına kadar olan frekans bandı daralmaktadır.

Sığ tabakaların S-dalgası hız kestirimi için küçük yarıçaplı dizilimler tercih edilir. Büyük yarıçaplı dizilimlerde en büyük ilişki uzaklığı ise ulaşabileceğimiz maksimum

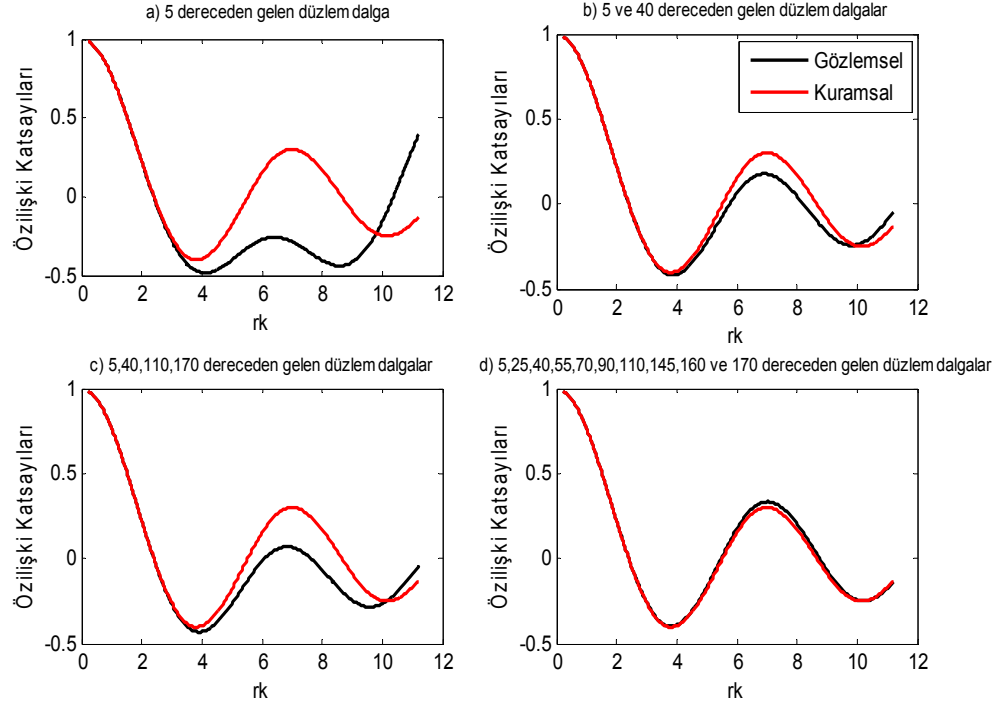
inceleme derinliğini sınırlandırır. Maksimum inceleme derinliği kullanılan en büyük ilişki uzaklığının 5 katı alınabilir (Henstridge,1979).



Şekil 2.9 : Sırasıyla 14.5, 25, 58 ve 100 metrelik ilişki uzaklıkları için gözlemsel katsayı eğrileri (siyah) ve kuramsal katsayı eğrisi (kırmızı).

2.5.3 Sinyallerin azimutal dağılımı

Bölüm 2.5.1’ de gösterildiği gibi tek bir yönden gelen dalga alanı varlığında, 4 alıcılı dizilimlerle katsayı eğrileri, ilk minimumlarına yakın bir noktaya kadar kullanılabilmektedir. 4 alıcılı dizilimlerle tek bir yönden gelen mikrotremor sinyali yerine açsal olarak dağılım gösteren birden çok mikrotremor sinyalinin kaydedilmesi durumunda katsayı eğrilerinin şeklinde gözlenen değişim Şekil 2.10’ da verilmektedir. Kaydedilen mikrotremor sinyallerinin sayısı arttığında kuramsal ve gözlemsel eğrilerin daha büyük (rk) değerlerine kadar uyumlu gittiği gözlenmektedir (Şekil 2.10d).



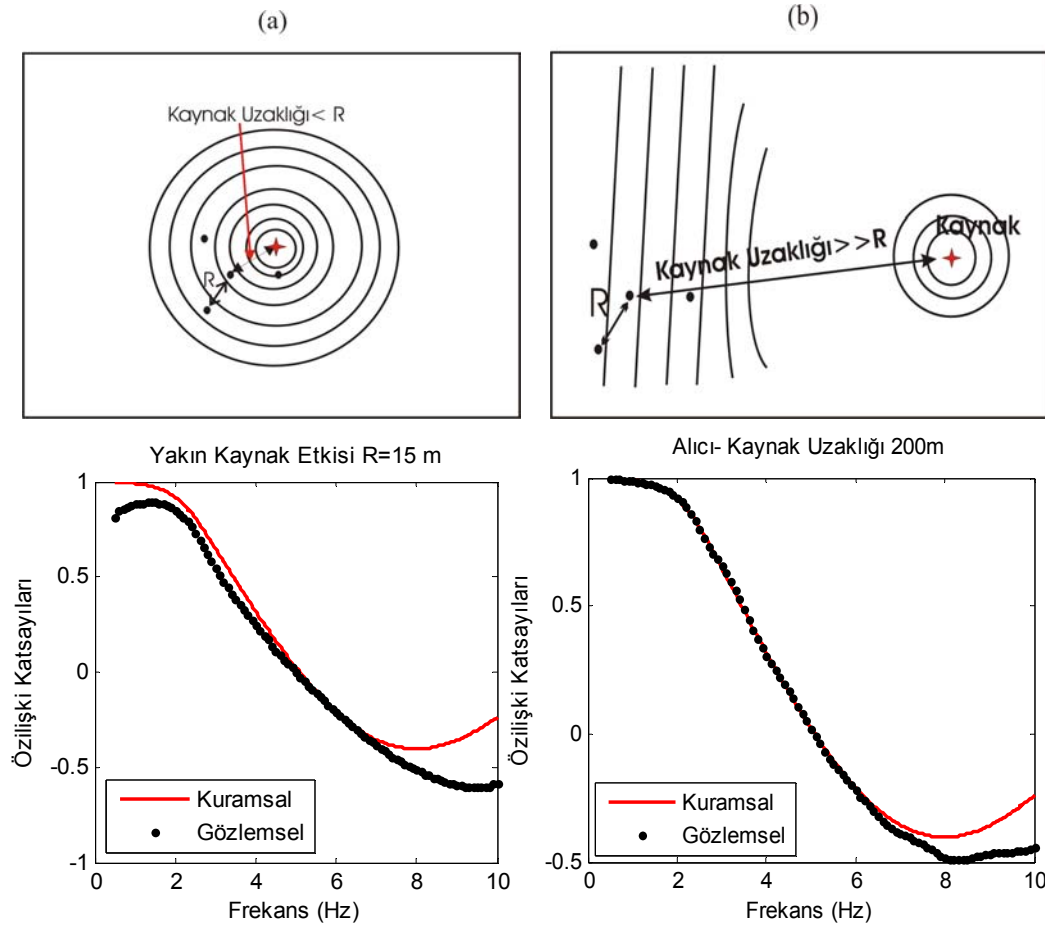
Şekil 2.10 : 4 alıcılı dizilimlerde kaydedilen dalga alanı sayısına bağlı olarak gözlemsel katsayı eğrilerinin şeklinin değişimi (siyah eğri) ve kuramsal özilişki katsayı eğrisi (kırmızı eğri).

2.5.4 Yakın kaynak etkisi

Mikrotremor kaynağının, dizilimdeki alıcılara olan uzaklığı, 3 farklı nedenle katsayı eğrilerini etkileyebilir. Mikrotremor kaynakları alıcılara yeteri kadar uzak değil ise, mikrotremor enerjisinin büyük bir kısmı yüzey dalgalarından çok cisim dalgaları ile taşınacaktır. Bunun dışında yüzey dalgalarının yüksek harmonikleri, kaynağın yakınlığı nedeniyle kayıtlarda daha hakim olacaktır. Yakın kaynağın bir diğer olumsuz etkisi alıcılarda kaydedilen dalga alanının düzlem dalga yerine küresel dalga cepheleri şeklinde yayınıyor olmasıdır (Roberts, Asten, 2008). Bu durumda uzamsal özilişki yönteminin uygulanmasında öngörülen temel esaslar sağlanamamış olur. Şekil 2.11’ de yakın kaynak etkisinin özilişki katsayıları eğrilerine olan etkisini incelemek için iki farklı durum özetlenmiştir. Şekil 2.11a’ da alıcı ve kaynak uzaklığı çok yakın, b’ de ise alıcı ile mikrotremor kaynağı arasında yeteri kadar mesafe bulunmaktadır. İlk durumda şekilde de görüldüğü gibi alıcılarda kaydedilen sinyal küresel dalga cepheleri şeklinde yayınmakta, ikinci durumda ise dalga alanı düzlem dalga cepheleri şeklinde yayınmaktadır. Roberts ve Asten (2008) yapmış oldukları çalışmada, mikrotremor ölçümlerinde yakın kaynak etkisinden etkilenmemek için

kaynak ile alıcı arasındaki mesafenin, dizilim yarıçapının en az 1.25 katı olması gerektiğini saptamışlardır.

Yakın kaynak etkisini incelemek için dizilim yarıçapı 25 m olan 4 alıcılı dairesel bir dizilim ele alınmıştır. Genliği 1 olan ve 5 derecelik geliş açısına sahip bir dalganın, ilk durumda (Şekil 2.11a) 15 m uzaklıktan ve ikinci durumda (Şekil 2.11b) 200 m uzaklıktan alıcılara ulaşması durumunda hesaplanan katsayı eğrileri Şekil 2.11’ de gösterilmektedir. Yakın kaynak etkisi nedeniyle gözlemsel katsayı eğrisini, ilk minimum değerine yakın bir noktaya kadar değerlendirmek de mümkün olmamaktadır. Ayrıca yakın kaynak etkisiyle katsayı eğrisinin özellikle düşük frekanslarında düşüş gözlenmektedir. Kaynak-alıcı mesafesinin yeterli derecede uzak tutulması durumunda ise katsayı eğrileri Nyquist dalgasayılara kadar kullanılabilir.

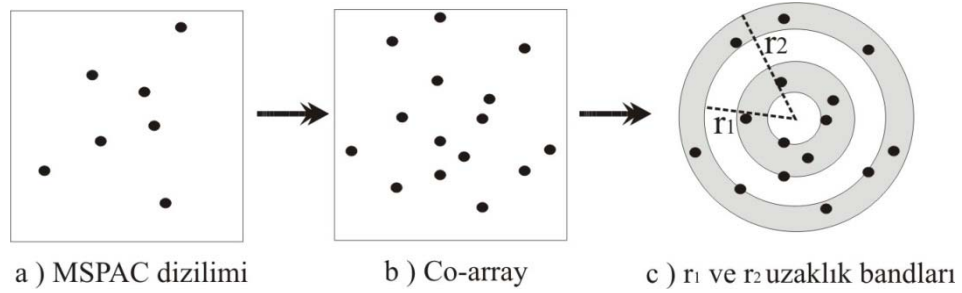


Şekil 2.11 : Kaynak-alıcı uzaklığının dizilim yarıçapından küçük seçilmesi durumu (a) ve kaynak-alıcı uzaklığının dizilim yarıçapının 1.25 katı veya daha büyük seçilmesi durumu (b).

2.6 Alternatif Yöntemlerle Özilişki Katsayılarının Hesaplanması

Uzamsal özilişki yöntemini, alıcılar arasındaki mesafelerin keyfi seçildiği düzensiz şekilli dizilimler kullanarak da uygulamak mümkündür. Değiştirilmiş Uzamsal Özilişki Yöntemi (Modified Spatial Autocorrelation Method) yerleşimin yoğun olduğu bölgelerde, dairesel veya yarı-dairesel dizilimlerin kullanılmasının mümkün olmadığı ya da zor olduğu alanlarda uygulanabilir bir yöntemdir. MSPAC yöntemi için Şekil 2.12a' daki gibi düzensiz yerleştirilmiş alıcılardan oluşan bir dizilim kullanılabilir. Alıcılar arasındaki farklı ilişki uzaklıkları kullanılarak oluşturulan alıcı çiftlerinde yeni dizilimler (co-array) (Şekil 2.12b) tanımlanır. Daha sonra r_1 ve r_2 uzaklıkları ile tanımlanan uzaklık bandı içindeki alıcı çiftlerinden faydalanılarak (2.20) eşitliği ile özilişki katsayıları hesaplanabilir.

$$\bar{\rho}(r_1, r_2, \omega) = \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} r J_0 \left(\frac{\omega r}{c(\omega)} \right) dr = \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{c(\omega)}{\omega r} \left[r J_1 \left(\frac{\omega r}{c(\omega)} \right) \right]_{r_1}^{r_2} \quad (2.20)$$



Şekil 2.12 : MSPAC yöntemi ölçüm düzeni

Bu yöntemde, uzaklık bandı genişliği ve bu bant içindeki alıcı sayısı elde edilecek sonuçları etkiler. Uzaklık bandı içindeki alıcı sayısının 3' den fazla, uzaklık bandının da mümkün olduğunca dar tutulması hedeflenir (Betting ve diğ., 2001).

Uzamsal özilişki yönteminde özilişki katsayıları hesaplanırken dizilim üzerindeki alıcıları azimutal ortalaması alınır. Chavez-Garcia ve diğ. (2006) uzamsal özilişki yöntemini sadece iki alıcı kullanarak doğrusal bir dizilim için uygulamışlardır. Mikrotremor verilerinin alıcılarla çok uzun bir süre için kaydedilmesi durumunda, sinyalin birçok yönden gelen dalga alanlarının toplamından oluştuğu ve böylece özilişki fonksiyonun azimutal ortalaması yerine zamansal ortalamanın kullanılabileceğini savunmuşlardır.

Uzamsal özilişki yönteminde mikrotremorların düşey bileşen analizi yapılmaktadır. 3C-MSPAC (3 Component Modified Spac) yönteminde mikrotremor verilerinin 3 bileşen kayıtları analiz edilmektedir. 3 bileşenli kayıtlardan hem Love dalgası temel harmoniğine ait dispersiyon eğrisi elde edilebilir hem de mikrotremorların yatay bileşenlerinin analizi ile özilişki fonksiyonun hesaplanması mümkündür (Köhler ve diğ. 2006).

2.7 Özet

Uzamsal özilişki yönteminde alıcılar arasındaki ilişki uzaklıkları kullanılarak özilişki katsayıları hesaplanır. Özilişki katsayılarının doğrudan ters çözümüne veya katsayı eğrilerinden hesaplanan dispersiyon eğrilerinin ters çözümüyle de S-dalgası hız kestirimi mümkündür. Uzamsal özilişki yönteminin en genel ölçüm düzeni biri merkezde diğerleri daire üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmiş 4 alıcılı eşkenar üçgen dizilimidir. Eşkenar üçgen dizilimlerde iki farklı ilişki uzaklığı kullanılarak katsayı eğrileri elde edilebilir.

Katsayı eğrilerinin şekli, sistematik ve rastgele hatalar nedeniyle sıfıncı dereceden birinci tip Bessel fonksiyonundan farklı olabilmektedir. Rastgele hataların başlıca nedeni verinin içerdiği gürültü miktarı iken, sistematik hatalar kullanılan alıcı sayısına, dizilim yarıçapına, dalga alanın geliş yönü ve uzaklığına bağlı olarak oluşabilirler. Bu hatalar nedeniyle katsayı eğrilerinin tamamı kullanılamaz. Katsayı eğrilerinin kullanılabilir üst limiti deviasiyon veya Nyquist dalgasayıları ile belirlenebilir. Bu iki değer, 4 alıcılı dizilimlerde birbirine çok yakın olmakla birlikte Nyquist dalgasayısı deviasiyon dalgasayısından daha büyüktür. Bu nedenle 4 alıcılı dizilimlerde eğrilerin kullanılabilir üst limiti Nyquist dalgasayısı ile belirlenir. Nyquist dalgasayısı, katsayı eğrisinin ilk minimum noktasından önce yer alan ve ilk minimum noktasına çok yakın olan bir değerdir.

Uzamsal özilişki yönteminde kullanılan dizilim boyutları değiştirilerek geniş bir frekans aralığı için özilişki katsayılarını elde etmek mümkündür. Küçük ilişki uzaklıkları kullanılarak yüksek frekanslara kadar (8-10 Hz) özilişki katsayıları hesaplanabilir. Dizilimdeki en büyük ilişki uzaklığı kullanılarak düşük frekans aralığı için (0-2 Hz) özilişki katsayıları elde edilebilir. Katsayı eğrileri hesabında dikkat edilmesi gereken bir diğer konu kaynak ile alıcı arasındaki mesafedir. Kaynak-alıcı

mesafesinin dizilim yarıçapının 1.25 katından daha küçük olması durumunda katsayı eğrilerinden faz hızı hesaplanamaz.

Uzamsal özilişki yönteminde özilişki katsayılarının hesabında en çok tercih edilen yöntem 4 alıcılı eşkenar üçgen dizilimdir. Bu yöntemde, mikrotremor enerjisinin incelenen frekans aralığında var olması durumunda geniş bir frekans aralığı için (0.5-10 Hz) özilişki katsayıları elde edilebilir. Özilişki katsayıları klasik 4 alıcılı dairesel dizilimler dışında farklı ölçü teknikleri kullanılarak da hesaplanabilir fakat bu yöntemlerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

3. ÖZİLİŞKİ KATSAYILARININ DOĞRUDAN TERS ÇÖZÜMÜ

3.1 Giriş

Uzamsal özilişki yöntemi ile S-dalgası hız kestiriminde, ilk adımda özilişki katsayılarından faz hızı dispersiyon eğrisi elde edilir. İkinci adımda ise dispersiyon eğrilerinin ters çözümü ile S-dalgası hız yapısı saptanır (Xia, J., ve diğ. (1999), Kudo, K., ve diğ. (2002), Apostolidis, P., ve diğ. (2004) ve Cho., I., ve diğ. (2006)). Bu çalışmada dispersiyon verisinin ters çözümü yerine tek adımlı ve daha pratik bir yöntem olan özilişki katsayılarının doğrudan ters çözümü ile S-dalgası hız kestirimi hedeflenmiştir.

Katsayı eğrilerinin doğrudan ters çözümü yaklaşımı kullanılarak yapılan çalışmalara örnek olarak Asten, M., W., ve diğ. (2004) ve Wathelet, M., ve diğ. (2005) yapmış oldukları çalışmalar gösterilebilir. Asten ve diğ. (2004) S-dalgası hız kestirimi için doğrusallaştırılmış yinelemeli yöntemleri kullanmışlardır. Wathelet ve diğ. (2005) ise ters çözümde global optimizasyon yöntemlerinden Neighborhood algoritması ile S-dalgası hız profilleri elde etmişlerdir. Global optimizasyon yöntemlerinde, problemin global çözümünün bulunması olasılığı doğrusallaştırılmış yinelemeli yöntemlere göre daha fazladır. Bu yöntemler, verinin gürültü içeriğinden daha az etkilenir. Ancak ölçülen ve kuramsal veriler arasındaki kabul edilebilir bir çakışmanın sağlanması için oldukça fazla model denendiğinden uzun hesaplama zamanı gerekmektedir.

Bu çalışmada ters çözüm için doğrusallaştırılmış yinelemeli yöntemlerden sönümlü en küçük kareler çözümü ile S-dalgası hız kestirimi hedeflenmiştir. Doğrusallaştırılmış yinelemeli yöntemlerde model parametreleri iterasyon yapılarak elde edilir. Seçilen bir başlangıç modeli, yineleme ile iyileştirilerek problemin çözümü hesaplanabilir. Ters çözümde elde edilen sonuçların duraylılığını seçilen başlangıç modelinin parametre değerleri etkiler. Bu çalışmada ters çözüm işlemi boyunca, duraylılığı arttırmak için diferansiyel yuvarlatma yaklaşımı kullanılmıştır.

Bu bölümde, özilişki katsayılarının doğrudan ters çözümüne geçmeden önce, kuramsal özilişki katsayılarının hesaplandığı düz çözüme değinilmiştir. Daha sonra ters çözüm için MATLAB ortamında yazılan algoritmada kullanılan matematiksel bağıntılar ve veri- model ağırlıklandırma dizeyleri açıklanmıştır.

3.2 Kuramsal Özilişki Katsayılarının Hesaplanması (Düz Çözüm)

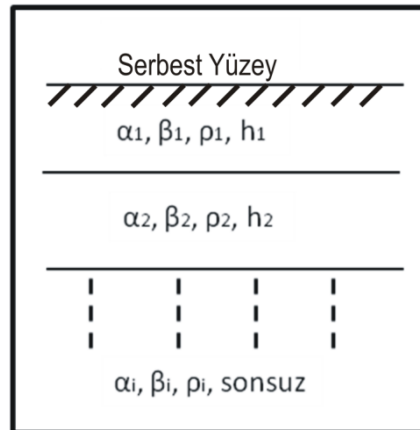
Bir-boyutlu (1B) yatay katmanlı bir yer modeli için kuramsal özilişki katsayıları

$$\rho(\omega, r) = J_0 \left(\frac{\omega}{c(\omega)} r \right) \quad (3.1)$$

denklemleri ile elde edilir. Burada r ilişki uzaklığını, ω açısal frekansı ve $c(\omega)$ ise modele ilişkin Rayleigh dalgası faz hızı dispersiyon eğrisidir. Yatay tabakalı yer modelleri için Rayleigh dalgası dispersiyon eğrilerinin hesabı için Thomson-Haskell (1953) yöntemi kullanılabilir. N katmanlı bir yer modeli için kuramsal Rayleigh dalgası faz hızları

$$F(\omega, c, \alpha_i, \beta_i, \rho_i, h_i) = 0 \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (3.2)$$

Kapalı ifadesi ile verilen karakteristik fonksiyonunun köklerinin bulunmasıyla hesaplanır. Burada açısal frekans ω serbest değişkendir. Rayleigh dalgası faz hızları değişimine etki eden parametreler Şekil 3.1’de de verildiği gibi, katmanların P-dalgası hızı (α_i), S-dalgası hızı (β_i), yoğunluk (ρ_i) ve kalınlık (h_i) değerleridir.



Şekil 3.1 : 1-B yatay tabakalı bir yer modeli için Rayleigh dalgası faz hızının bağlı olduğu parametreler.

Rayleigh dalgası faz hızlarının en duyarlı olduğu parametre S-dalgası hızıdır. Diğer model parametrelerinin faz hızına etkisi sırasıyla tabaka kalınlığı, yoğunluk ve P-dalgası hızıdır (Xia ve diğ. 1999).

Düz çözüm ile yer modeline ait kuramsal dispersiyon eğrilerinin hesabında, SURF96 (Herrmann ve Ammon, 2002) programının düz çözüme ilişkin FORTRAN alt programları MATLAB ortamına yeniden uyarlanmıştır. SURF96 programı, Russell (1985) tarafından yazılan SURF programı temel alınarak oluşturulmuş bir programdır. Programın düz çözüme ilişkin alt programları kullanılarak Rayleigh dalgasının temel harmoniğine ait faz hızları ve faz hızının model parametrelerine göre türevleri hesaplanabilir.

3.3 Ters Çözüm

Ters çözümde çoğul çözümlülük probleminden etkilenmemek için model parametrelerinin tamamının çözümü yerine Rayleigh dalgası faz hızını en çok etkileyen parametre olan S-dalgası hızının çözümü amaçlanmıştır.

Özilişki katsayılarından faydalanılarak tabakalara ait S-dalgası hızının hesaplanması doğrusal olmayan bir ters çözüm problemidir. Doğrusal olmayan problemde matematiksel model, belirlenen bir başlangıç değeri civarında, 1. dereceden Taylor serisine açılarak doğrusallaştırılabilir. Tanımlanan bu problemde gözlem sayısı parametre sayısından fazla olduğu için denklem sistemi aşırı tanımlıdır. Problemin, En Küçük Kareler çözümünde

$$|\mathbf{A}\Delta\mathbf{m} - \Delta\mathbf{d}| = \min. \quad (3.3)$$

olması amaçlanır. Burada $\Delta\mathbf{d} = \rho_{göz.} - \rho_{teo.}$ gözlemsel özilişki katsayıları ile kuramsal özilişki katsayıları arasındaki fark vektörü, $\Delta\mathbf{m} = \mathbf{m}_i - \mathbf{m}_{i-1}$ ($i = 1, \dots, N$) bir önceki iterasyondaki model parametresine uygulanacak olan düzeltme vektörü ve $\mathbf{A}$ düz çözümde kullanılan matematiksel bağıntının model parametrelerine göre kısmi türevlerini içeren Jacobian dizeyidir. Jacobian dizeyi

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho(\omega_1, r_j)}{\partial \beta_1} & \frac{\partial \rho(\omega_1, r_j)}{\partial \beta_2} & \frac{\partial \rho(\omega_1, r_j)}{\partial \beta_n} \\ \frac{\partial \rho(\omega_2, r_j)}{\partial \beta_1} & \frac{\partial \rho(\omega_2, r_j)}{\partial \beta_2} & \frac{\partial \rho(\omega_2, r_j)}{\partial \beta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho(\omega_n, r_j)}{\partial \beta_1} & \frac{\partial \rho(\omega_n, r_j)}{\partial \beta_2} & \frac{\partial \rho(\omega_n, r_j)}{\partial \beta_n} \end{bmatrix} \quad j = 1, \dots, 4 \quad (3.4)$$

özilişki katsayılarının S-dalgası hızına göre kısmi türevlerini içermektedir. Kısmi türevler,

$$\frac{\partial \rho(\omega_n, r_j)}{\partial \beta_n} = J_1 \left(\frac{\omega_n}{c(\omega_n)} r \right) \cdot \frac{\omega_n}{c(\omega_n)^2} r \frac{\partial c(\omega_n)}{\partial \beta_n} \quad (3.5)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. Burada J_1 birinci dereceden Bessel fonksiyonudur. Faz hızının S-dalgası hızına göre kısmi türevi, SURF96 programının düz çözüme ilişkin alt programları kullanılarak hesaplanmıştır.

Pratikte ortak merkezli iki eşkenar üçgen dizilim ile 4 farklı ilişki uzaklığı için özilişki katsayıları hesaplanır. İncelenen frekans aralığını geniş tutabilmek amacıyla 4 farklı ilişki uzaklığından hesaplanan özilişki katsayıları eğrileri birlikte analiz edilir. Bu durumda Jacobian dizeyi, 4 farklı ilişki uzaklığından elde edilen katsayı eğrilerinin S-dalgası hızına göre kısmi türevlerinden oluşacaktır. Benzer şekilde, gözlemsel özilişki katsayıları ve kuramsal katsayılar arasındaki fark vektörüne ve model parametrelerine ait düzeltme vektörüne 4 farklı ilişki uzaklığına ait değerler eklenebileceğinden denklem sisteminde her dizey, aynı oranda genişletilmiş olur. Örneğin, Jacobian dizeyine ait değerler (3.9) denklemi ile gösterilen 4 dizeyin ard arda eklenmesinden oluşacaktır.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 \\ \mathbf{A}_4 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.3.1 Sönümlü en küçük kareler çözümü

$(A^T A)$ 'nın tersinin alınabildiği durumlar için doğrusallaştırılmış problemlerin en küçük kareler çözümü

$$\Delta \mathbf{m} = (A^T A)^{-1} A^T \Delta \mathbf{d} \quad (3.7)$$

eşitliği ile verilebilir. Yineleme sırasında küçük özdeğerlerin neden olduğu salınımları sönümlemek için $(A^T A)$ dizeyinin köşegenlerine sönüm faktörü (μ) (Damping factor) eklenir. En küçük kareler çözümünde (3.3) eşitliği ile verilen ifadenin boyunun minimize edilmesi dışında çözüm vektörünün sönüm faktörü ile çarpımının mutlak değeri de minimize edilmeye çalışılır. Böylece denklem sistemi daha kararlı hale getirilir. Bu durumda,

$$|A\Delta \mathbf{m} - \Delta \mathbf{d}| + |\mu \Delta \mathbf{m}| = \min. \quad (3.8)$$

eşitliğini sağlayan değer, problemin en küçük kareler çözümünü verecektir. Bu ifade,

$$(A\Delta \mathbf{m} - \Delta \mathbf{d})^T (A\Delta \mathbf{m} - \Delta \mathbf{d}) + \mu \Delta \mathbf{m}^T \Delta \mathbf{m} = \min. \quad (3.9)$$

şeklinde de yazılabilir. (3.9) eşitliğini sağlayan çözüm için Jakobian dizeyi dekompoze edilerek 3 farklı dizey çarpımı şeklinde ifade edilebilir.

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T \quad (3.10)$$

Burada $\mathbf{U}$ ve $\mathbf{V}$, sütunları özvektörlerden oluşan ortogonal dizeyler, ve $\mathbf{\Lambda}$ özdeğerlerden (λ) oluşan diagonal bir dizeydir. $\mathbf{A}^T = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^T$ olduğundan denklem (3.7)' den faydalanılarak problemin sönümlü en küçük kareler çözümü

$$\Delta \mathbf{m} = \mathbf{V} (\mathbf{\Lambda}^2 + \mu^2 \mathbf{I}) \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^T \Delta \mathbf{d} \quad (3.11)$$

olarak verilebilir.

Ters çözümün duraylılığı çözüm vektörüne eklenecek ağırlıklandırma dizeyleri ile arttırmış olur. Ağırlıklandırma dizeyi $\mathbf{W}$ ile çözüm vektörünün $\Delta \mathbf{x}$ çarpımı $\Delta \mathbf{p}$ olarak atanırsa $\mathbf{W} \Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{p}$, bu durumda

$$|\sigma \mathbf{A} \mathbf{W}^{-1} \Delta \mathbf{p} - \sigma \Delta \mathbf{d}| + |\sigma \mathbf{W} \Delta \mathbf{p}| = \min. \quad (3.12)$$

ifadesinin değeri minimize edilmeye çalışılır. Burada, σ veri ağırlıklandırma dizeyinin diagonal değerlerini, W ise model ağırlıklandırma dizeylerini göstermektedir. Bu ifadede $A = \sigma A W^{-1} = U \lambda V^T$ şeklinde tanımlanırsa, problemin sönümlü en küçük kareler çözümü,

$$\Delta m = W^{-1} V (\lambda^2 + \mu^2 I)^{-1} \lambda U^T (\sigma * \Delta d) \quad (3.13)$$

denklemleri ile hesaplanır (Herrmann ve Ammon, 2002). Bu tez çalışmasında yapay modeller için yapılan çalışmada ve gerçek veri analizinde model parametresine ait çözüm vektörü için (3.13) eşitliği kullanılmıştır. Bu problemde model parametreleri diferansiyel yuvarlatma yaklaşımı ile satırları [1 -1] değer çiftlerinden oluşan diyagonal bir dizeyi ile çarpılarak ağırlıklandırılır. Ağırlıklandırma dizeyi,

$$W_1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

olarak tanımlanır. Bu dizeyi, model parametresinin derinliğe göre birinci türevinin değerini minimize ederek, ters çözümde komşu iki tabaka arasındaki hız değerlerinin farkının minimum olmasını sağlar. Böylece ters çözümle katmanlar arasındaki ani hız değişimleri engellenerek yer modelinin yumuşatılmış görüntüsü elde edilebilir.

Model parametresine eklenen ikinci ağırlıklandırma dizeyi (W_2), yarı-sonsuz tabakaya ait değeri dışındaki diğer diagonal değerleri 1'e eşit olan model ağırlıklandırma dizeyidir. Her tabakayı temsil eden model parametresine eşit güvenildiği için diagonal değerler 1 olarak atanmıştır. Yarı-sonsuz ortamı temsil eden model parametresinin ağırlık katsayısı daha küçük seçilerek ters çözüme etkisi azaltılmıştır.

$$W_2 = \begin{bmatrix} \tau_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_j \end{bmatrix} \quad j = 1, \dots, N \quad (3.15)$$

Bu durumda model parametrelerine ait ağırlıklandırma düzeyi ($\mathbf{W}$), $\mathbf{W}_1$ ve $\mathbf{W}_2$ düzeylerinin çarpımı ile gösterilebilir.

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_1 * \mathbf{W}_2 \quad (3.16)$$

Ters çözümde gözlemsel veriler içerdikleri gürültü miktarıya orantılı olarak belli bir hata içermektedirler. Gözlemsel verilerdeki hata oranları, denklem sistemine yansıtılır. Hata oranı yüksek olan gözlemsel verinin çözüme etkisini azaltmak için verilere standart sapmalarının (σ_N) tersi oranında ağırlıklandırma uygulanır. Gözlemsel verilerin ağırlıklandırma düzeyi,

$$\sigma = \text{diag}\left(\frac{1}{\sigma_N}\right) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_j} \end{bmatrix} \quad j = 1, \dots, N \quad (3.17)$$

şeklinde tanımlanır.

Bu çalışmada, Tekil Değer Ayrışımı Yöntemi sönüm faktörünün değerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Yöntem uygulanırken küçük özdeğerler atılmak yerine, küçük özdeğerlerin ters çözüme olumsuz etkisini engellemek için tersi alınacak dizeye sönüm faktörü (μ) eklenmiştir. Sönüm faktörü büyük özdeğerler üzerinde önemli bir değişime yol açmazken, küçük özdeğerler nedeni ile bölme işleminde karşılaşılabilecek sıkıntıları engeller. Böylece denklem sistemi daha kararlı hale getirilmiş olur. Sönüm faktörünün değeri belirlenirken özdeğerler hesaplanıp, en küçük özdeğerin %10' u oranında bir sönüm faktörü seçilmiştir. Sönüm faktörünün ters çözümdeki işlevi, her bir iterasyonda model parametrelerine ait çözüm vektörünün hata enerjisinin lokal minimuma yönelimini sağlamaktır böylece ters çözüm daha kararlı hale gelir.

Ölçülen ve kuramsal verilerin çakışmasının bir ölçütü olarak , gözlemsel ve kuramsal veriler arasındaki uyum derecesi

$$X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_{göz.} - \rho_{teo.})^2}{n}} \quad (3.18)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada n veri sayısını göstermektedir. Ters çözümde yineleme (3.18)' eşitliği ile verilen değerin 1' den küçük bir değeri için sonlandırılır.

3.4 Özet

Özilişki katsayılarının doğrudan ters çözümü ile S-dalgası hız profilleri elde edilebilir. Ters çözüm aşamasından önce, kuramsal özilişki katsayılarının hesaplanması gerekir. Özilişki katsayıları Rayleigh dalgası faz hızı ile ilişkilendirilebilir. Rayleigh dalgası faz hızlarının en duyarlı olduğu parametre S-dalgası hızıdır. Ters çözümde çoğul çözümlülük probleminden etkilenmemek için sadece tabakalara ait S-dalgası hızları hesaplanmaya çalışılmıştır. Problemin çözümü, sönümlü en küçük kareler çözümü ve diferansiyel yuvarlatma yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu bölümde ters çözümde MATLAB ortamında yazılan algoritmada kullanılan matematiksel bağıntılar, veri ve model ağırlıklandırma düzeyleri açıklanmıştır.

4. SENTETİK TESTLER İLE TERS ÇÖZÜM UYGULAMALARI

4.1 Giriş

Yapay testlerde, gözlemsel veri olarak yapay mikrotremor verileri kullanılmıştır. İlk olarak, gürültü içermeyen mikrotremor verilerinin analizi ile 2 tabakalı basit bir yer modeli için ters çözüm ile S-dalgası hız profili elde edilmiştir. Yapay testler için seçilen ikinci yer modeli, hızın derinlikle arttığı 4 tabakalı yer modelidir. Bu model için, %5-20 aralığında gürültü içeren mikrotremor verileri analiz edilerek gürültü oranının, hesaplanan S-dalgası hız modellerine etkisi araştırılmıştır. Son olarak daha kompleks bir yer modelini temsil eden düşük hız tabakalı bir yer modeli seçilmiştir. Yapay testlerde ters çözüm algoritmasının performansı, kuramsal eğrilerin, gözlemsel katsayı eğrileri ve dispersiyon eğrilerine yakınsama derecesi ile değerlendirilebilir. Bunun dışında ters çözümde çakışmanın bir ölçüsü olarak RMS değerler göz önünde tutulmuştur. İterasyon, RMS değerlerinin 1' den küçük bir değere eşit olması ile sonlandırılmıştır. Yapay verilerle yapılan bu çalışmalar, daha sonraki aşamada gerçek verilerle yapılan analizlerin doğruluğunun sınanmasında yardımcı olmuştur.

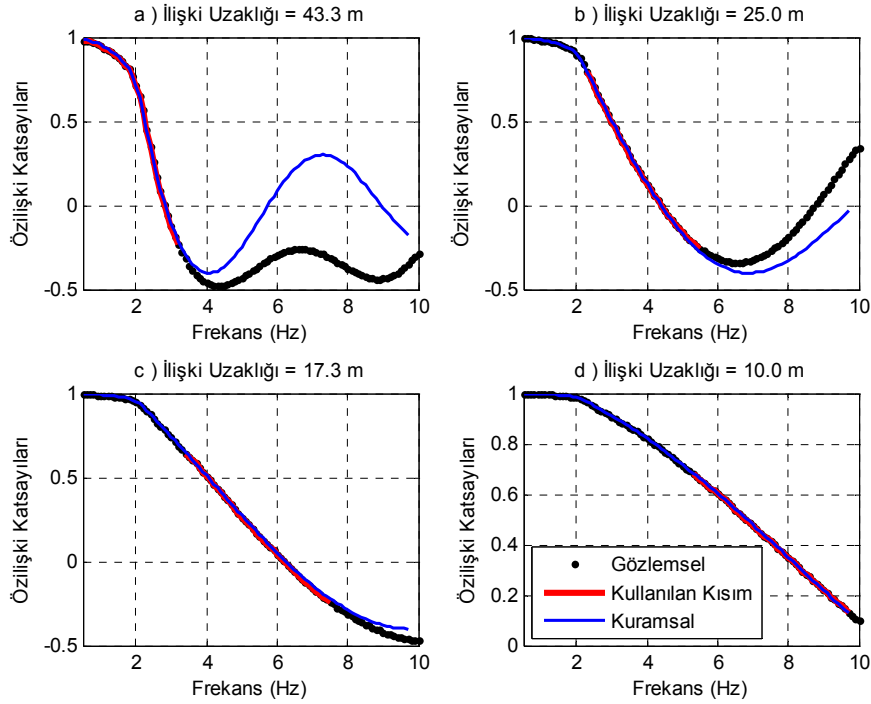
4.2 İki Tabakalı Yer Modeli

Yapay testlerde ilk aşamada iki tabakalı bir yer modeli ele alınmıştır. Analiz için gürültü içermeyen 25 derecelik geliş açısıyla 1 km uzaklıktan gelen yapay mikrotremor verisi üretilmiştir. Dizilim yarıçapları 10 ve 25 m olan ortak merkezli dört alıcılı dairesel bir dizilimde 4 farklı ilişki uzaklığı kullanılarak özilişki katsayıları eğrileri elde edilmiştir. Mikrotremor verileri 0.5-10 Hz frekans aralığında

incelenmiştir. Maksimum inceleme derinliği en büyük ilişki uzaklığının 5 katı kadar seçilebilir (Henstridge, 1979). Burada maksimum araştırma derinliği olarak en büyük ilişki uzaklığının 4 katı alınmıştır. Ters çözümde model parametreleri, tabakalara ait S-dalgası hızı, yoğunluk, tabaka kalınlığı ve Poisson oranıdır. Ters çözümde sadece tabakalara ait S-dalgası hızı çözülmeye çalışılmıştır. Bu nedenle tabaka kalınlıkları dışında Poisson oranları da sabit alınmıştır. Her bir iterasyonda hesaplanan yeni modelden P ve S dalgası hız bilgisine bağlı olarak ampirik bir formülle yoğunluk hesaplanmıştır. Başlangıç modelindeki tabaka sayısı, maksimum inceleme derinliği ile sınırlandırılmıştır. Tabakaların kalınlıklarının toplamı maksimum inceleme derinliğinden daha azdır. Buna göre başlangıç modeli kalınlıkları derinlikle artan birçok ince katmandan oluşmaktadır. Gerçek yer modeli parametreleri ve ters çözüm sonuçlarında hesaplanan değerler Çizelge 4.1’ de verilmektedir. Şekil 4.1’ de ise ters çözümle hesaplanan katsayı eğrileri (mavi) ve gözlemsel katsayı eğrileri (siyah) verilmiştir. Özilişki katsayıları analizlerinde katsayı eğrileri ilk minimum değerlerine çok yakın olan bir noktaya kadar kullanılabilir. Ters çözüm aşamasında da her bir ilişki uzaklığından elde edilen katsayı eğrilerinin ilk minimum değerlerine yakın bir noktaya kadar olan kısımları kullanılmıştır. Büyük ilişki uzaklıkları düşük frekanslara daha duyarlıdır, küçük ilişki uzaklıkları ise yüksek frekans aralığında daha iyi çözünürlük sağladığından, küçük ilişki uzaklıklarında yüksek frekanslı kısımlar kullanılmıştır. Ters çözümde gözlemsel katsayı eğrilerinin kullanılan kısımları kırmızı eğri ile gösterilmektedir.

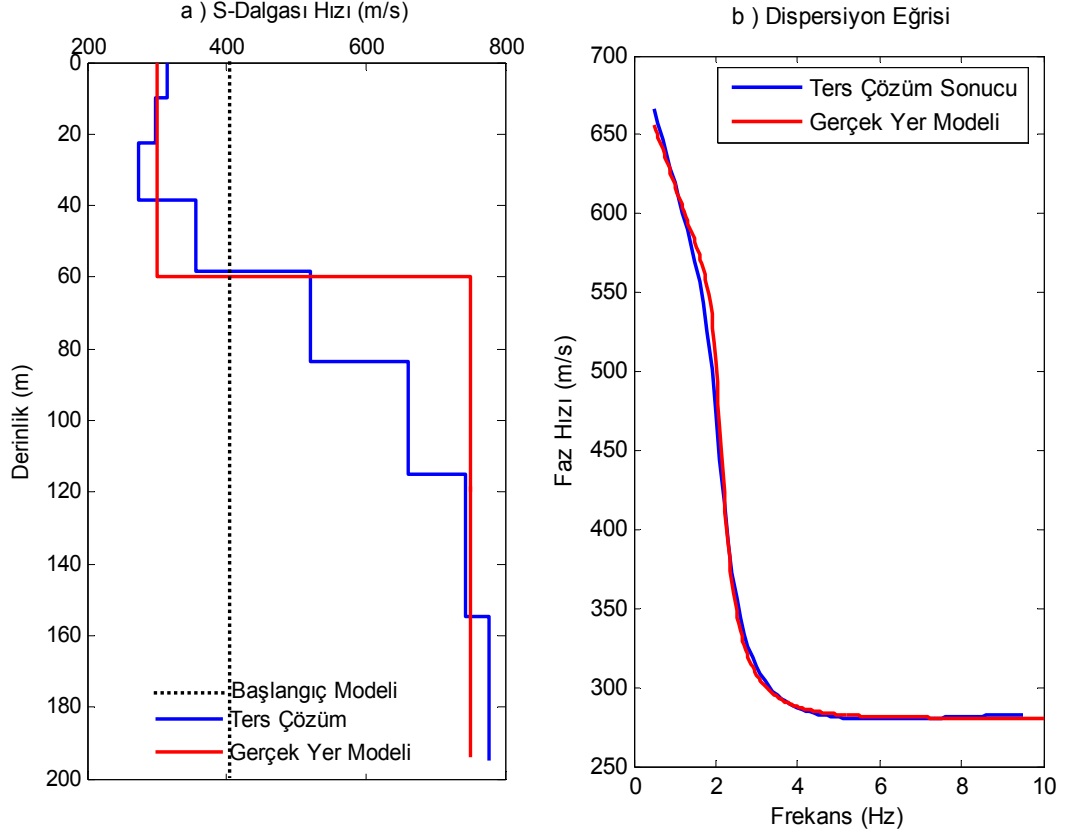
Çizelge 4.1 : İki tabakalı yer modeli için model parametreleri.

	Katman Sayısı	Katman Kalınlıkları (m)	Poisson Oranı	S-dalgası Hızı (m/sn)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Gerçek Yer Modeli	2	60	0.35	300	2.0
		sonsuz	0.25	750	2.2
Ters Çözüm Sonucu	8	10.0	0.3500	315.3	1.8990
		12.6	0.3357	298.3	1.8797
		15.8	0.3214	273.5	1.8495
		20.0	0.3071	356.2	1.9414
		25.1	0.2929	520.5	2.0731
		31.6	0.2786	660.7	2.1560
		39.8	0.2643	742.8	2.1967
		0	0.2500	778.0	2.2128



Şekil 4.1 : İki tabakalı yer modeli için ters çözümle hesaplanan kuramsal katsayı eğrileri (mavi) ve gözlemsel katsayı eğrileri (kırmızı).

Ters çözümle hedeflenen, her bir ilişki uzaklığı için seçilen kırmızı renkli kısımlarla en iyi çakışmayı sağlayan kuramsal eğriyi elde edebilmektir. 20 iterasyon ile hesaplanan RMS değeri 0.63 civarında bulunmuştur. Bu sonucu veren S-dalgası hız profili ve dispersiyon eğrisi Şekil 4.2’ de verilmektedir. Kesikli çizgi başlangıç modelini (Şekil 4.2a) temsil etmektedir. Başlangıç modelinde tabakalara ait S-dalgası 400 m/s alınmıştır. Poisson oranları 0.35- 0.25 aralığında atanmıştır. Başlangıç modeli parametrelerinin değişimi elde edilen sonuçları çok etkilememekle birlikte gerçek yer modeli ile uyumlu seçilen başlangıç hızları, daha az iterasyon ile daha küçük RMS değerleri verir. İki tabakalı bir yer modeli için ters çözüm sonucunda elde edilen yer modeli 8 tabakalıdır. Ters çözümden elde edilen hız modelinde, iki tabaka arasındaki ani hız geçişi yerine, tabakalara ait hızların derinlikle dereceli olarak arttırıldığı ve tabakalar arasındaki hız farklarının mümkün olduğunca küçük tutulduğu gözlenmiştir.



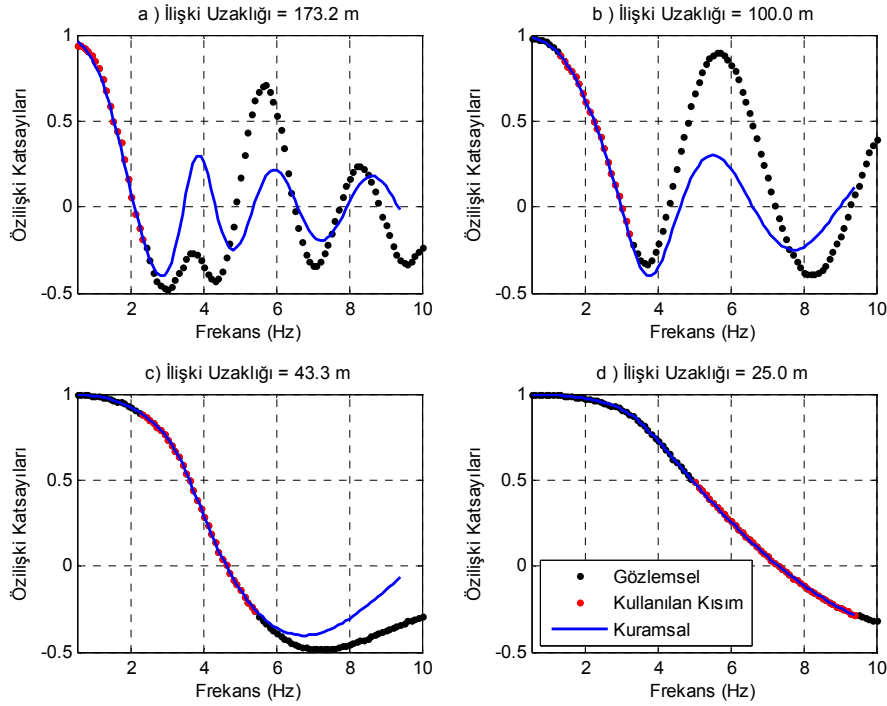
Şekil 4.2 : İki tabakalı yer modeli için ters çözümle hesaplanan yer modeli (a) ve dispersiyon eğrisi (b).

4.3 Hızın Derinlikle Arttığı Yer Modeli

Yapay testlerde ikinci ele alınan model, yarı-sonsuz tabaka üzerinde yer alan 3 tabakalı yer modelidir. Başlangıç modeli tabaka kalınlıklarının derinlikle üstel olarak arttırıldığı 13 ince katmandan oluşmaktadır. Çizelge 4.2’ de gerçek yer modeli parametre değerleri ve ters çözüm sonucunda elde edilen model parametreleri verilmektedir.

Yapay mikrotremor verilerinin yarıçapları 25 ve 100 m olan 4 alıcılı ortak merkezli iki dairesel dizilim ile kaydedildiği varsayılmıştır. Alıcılarda kaydedilen sinyaller arasındaki ilişkiden, özilişki katsayıları 25, 43.3, 100 ve 173.2 m’ lik ilişki uzaklıkları için hesaplanabilir. Ters çözümde katsayı eğrilerinin kullanılan kısımları

Şekil 4.3’ de gözlemsel katsayı eğrileri (siyah), gözlemsel katsayı eğrilerinin kullanılan kısımları (kırmızı) ve kuramsal katsayı eğrileri (mavi) verilmektedir.

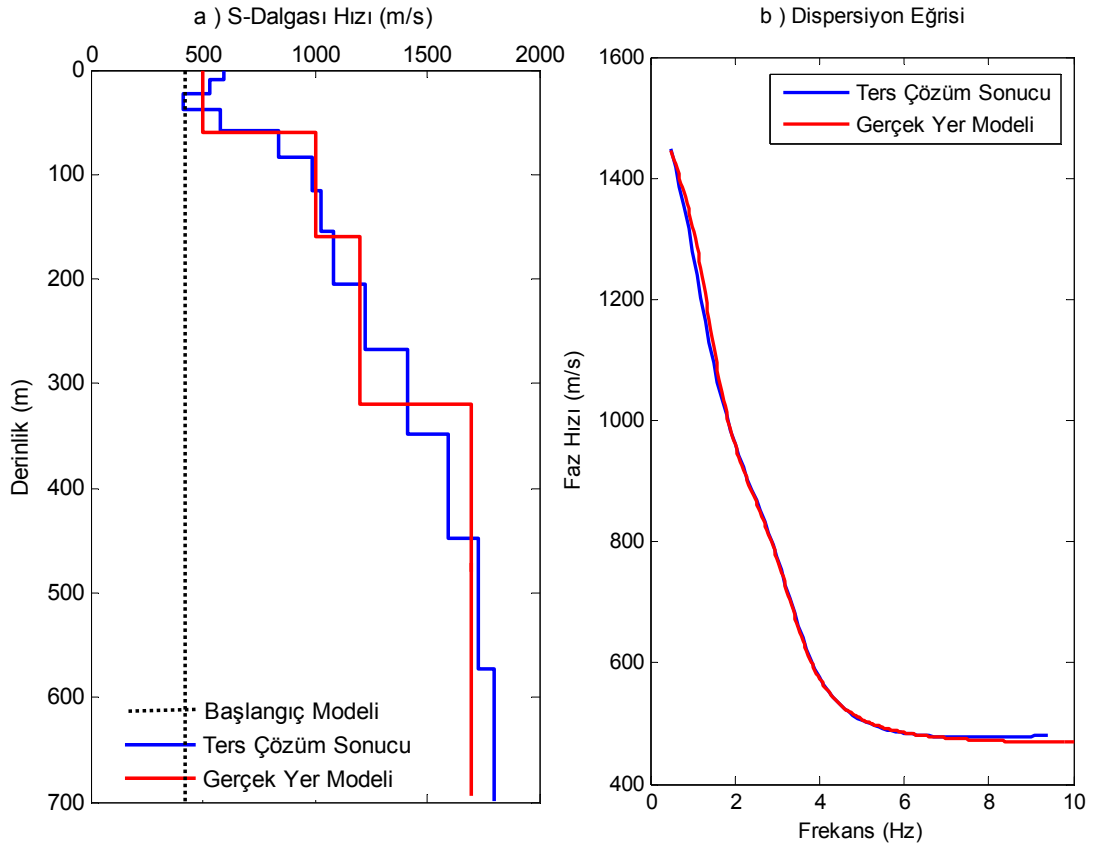


Şekil 4.3 : Hızın derinlikle arttığı yer modeli için ters çözümle hesaplanan kuramsal katsayı eğrileri (mavi) ve gözlemsel katsayı eğrileri (kırmızı).

Çizelge 4.2 : Hızın derinlikle arttığı yer modeli için model parametreleri.

	Katman Sayısı	Katman Kalınlıkları (m)	Poisson Oranı	S-dalgası Hızı (m/sn)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Gerçek Yer Modeli	4	60	0.35	500	1.9
		100	0.31	1000	2.0
		160	0.29	1200	2.1
		sonsuz	0.25	1700	2.2
Ters Çözüm Sonucu	13	10.0	0.3500	590.6	2.1170
		12.6	0.3417	531.4	2.0803
		15.8	0.3333	415.7	1.9950
		20.0	0.3250	581.7	2.1118
		25.1	0.3167	842.0	2.2402
		31.6	0.3083	986.3	2.2952
		39.8	0.3000	1030.4	2.3104
		50.1	0.2917	1085.4	2.3285
		63.1	0.2833	1221.0	2.3694
		79.4	0.2750	1411.2	2.4197
		100.0	0.2667	1593.0	2.1148
		125.9	0.2583	1724.7	2.1534
		0	0.2500	1796.1	2.1677

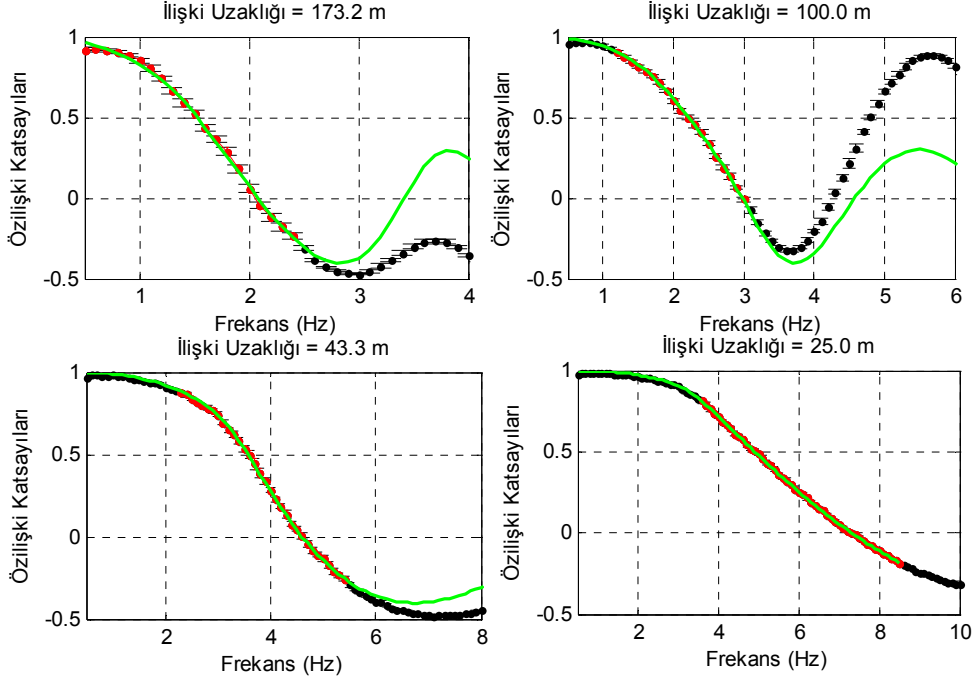
Ters çözüm sonucunda 17 yineleme ile elde edilen RMS değeri 0.83 civarındadır. Çizelge 4.2’ de görüldüğü üzere ters çözüm sonucunda hesaplanan S-dalgası hızları tabaka kalınlıkları göz önünde tutulduğunda gerçek yer modeli ile uyuşmaktadır. S-dalgası hız profili ve dispersiyon eğrileri Şekil 4.4’ de verilmektedir.



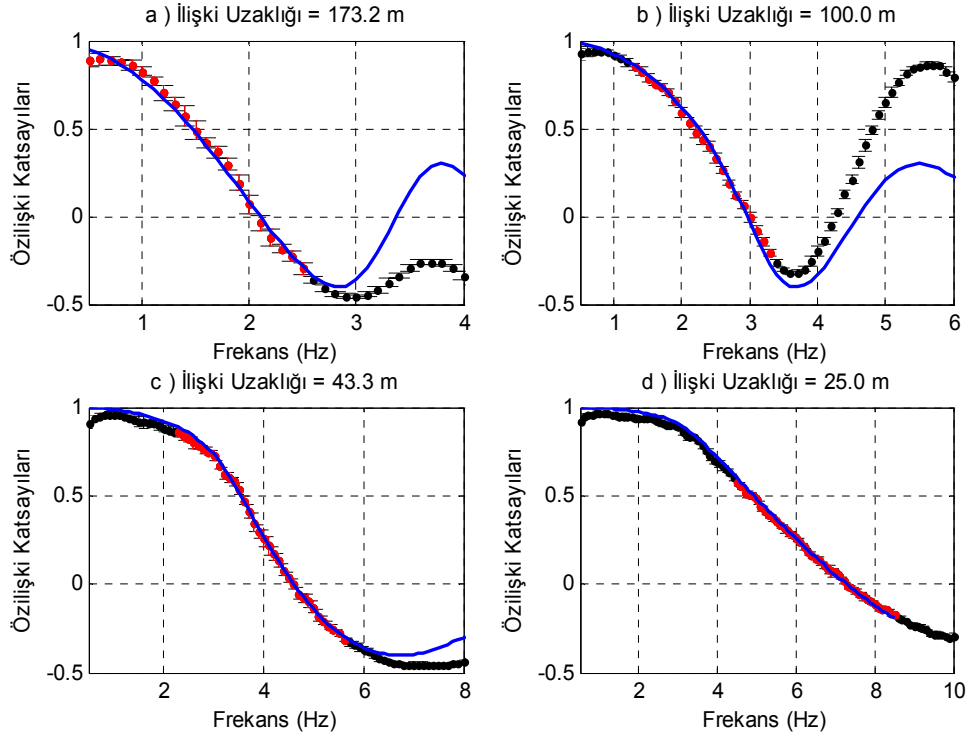
Şekil 4.4 : Hızın derinlikle arttığı yer modeli için ters çözümden elde edilen S-dalgası hız profili (a) ve dispersiyon eğrisi (b).

4.3.1 Gürültü Analizleri

Hızın derinlikle arttığı yer modeli için ikinci aşamada %5, %10 ve %20 oranlarında gürültü içeren mikrotremor verileri analiz edilmiştir. Çizelge 4.2’ de verilen model parametreleri kullanılarak ters çözüm ile S-dalgası hız profilleri elde edilmiştir. Daha önceki analizlerde olduğu gibi ortak merkezli 25 ve 100 m’ lik yarıçaplı 4 alıcılı dairesel dizilim kullanılmıştır. Şekil 4.5- 4.6’ da ters çözüm sonucunda elde edilen katsayı eğrileri verilmektedir.



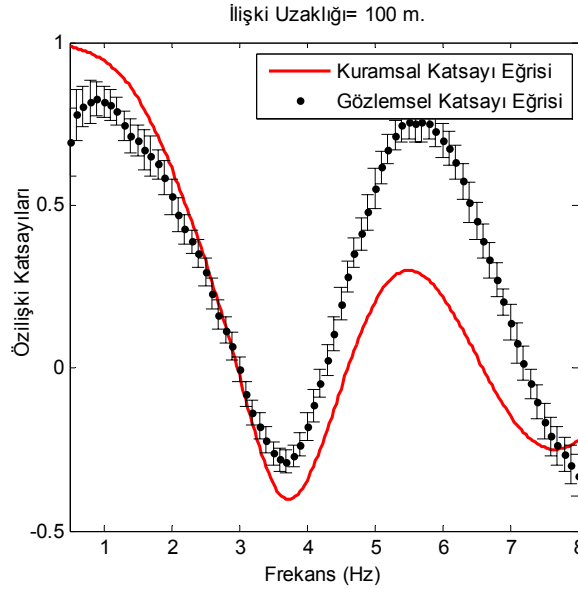
Şekil 4.5 : % 5 gürültü içeren mikrotremor verisinin analizinden ters çözümle hesaplanan kuramsal katsayı eğrileri (yeşil) ve gözlemsel eğri (siyah).



Şekil 4.6 : % 10 gürültü içeren mikrotremor verisinin analizinden ters çözümle hesaplanan katsayı eğrileri (mavi) ve gözlemsel eğri (siyah).

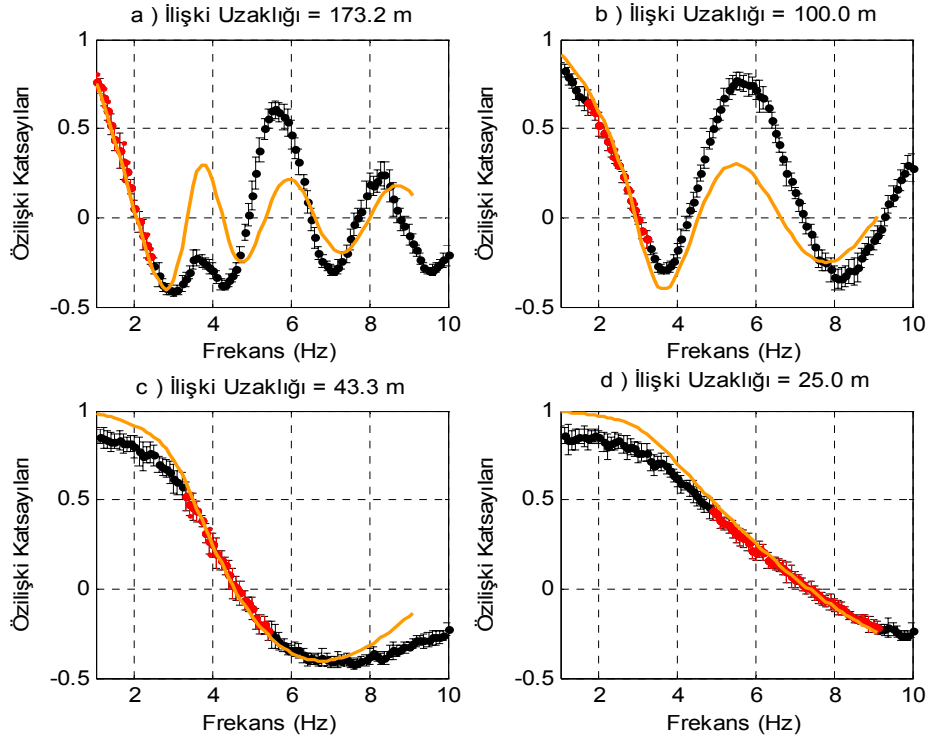
Ters çözüm aşamasında gözlemsel katsayı eğrilerinin sadece kırmızı ile gösterilen kısımları kullanılmıştır. Şekil 4.5-4.6' daki renkli eğriler, gözlemsel katsayı

eğrilerinin kırmızı ile seçilmiş kısımlarıyla en iyi çakışan kuramsal eğrilerdir. Mikrotremor verilerindeki gürültü oranının % 5 olması durumunda 17 iterasyonla RMS değeri 0.71 civarında hesaplanmıştır. % 10 gürültülü analizde ise 19 iterasyonla elde edilen RMS değeri 0.88 civarındadır. Mikrotremor verisindeki gürültü düzeyi arttıkça eğrilerin özellikle düşük frekanslarında (0-2 Hz) düşüşler gözlenir. Gürültü oranı % 20 olduğunda gözlemsel katsayı eğrisinin şekli daha da bozulmaktadır. Şekil 4.7’ de % 20 oranında gürültü içeren mikrotremor verisinin 100 m’ lik ilişki uzaklığı için hesaplanan özilişki katsayı eğrisi verilmektedir. 1 Hz’ den düşük frakanslarda gözlemsel katsayı eğrisinin şekli aşırı derecede bozulmaktadır. Bu durumda ters çözümde eğrinin bozulmaya başladığı düşük frekanslı kısım değerlendirilmemelidir.



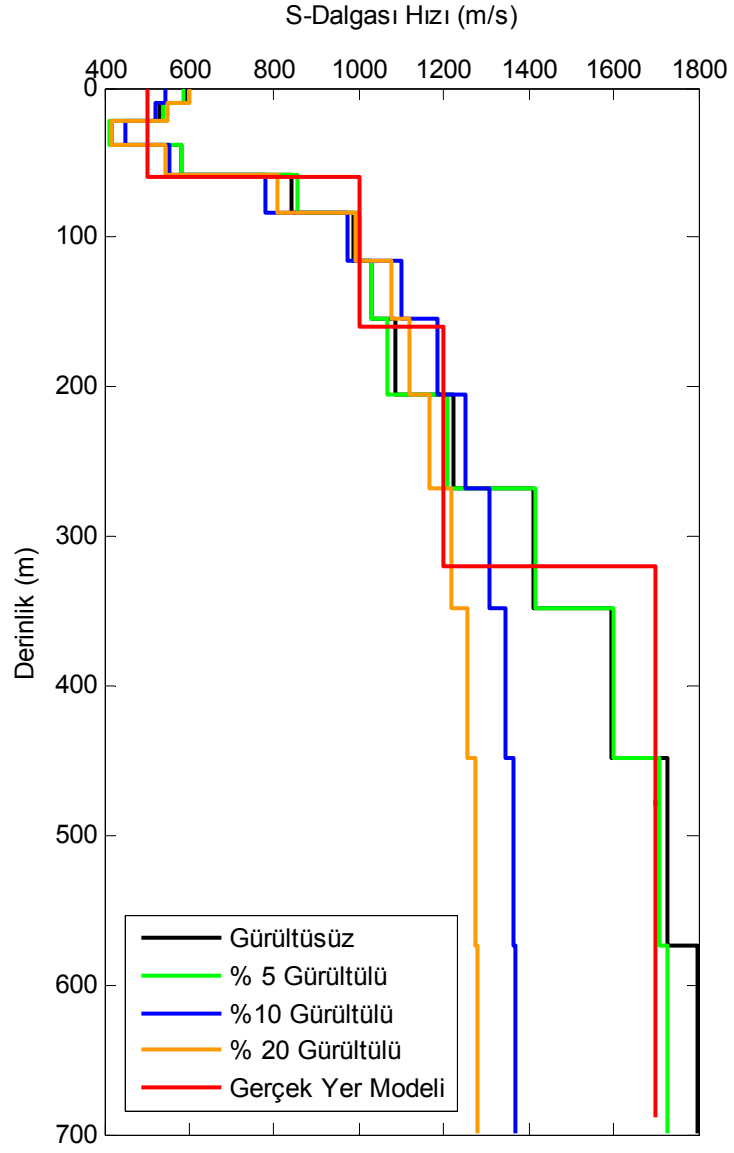
Şekil 4.7 : % 20 gürültü içeren mikrotremor verisinden hesaplanan kuramsal (kırmızı) ve gözlemsel katsayı eğrileri (siyah).

% 20 oranında gürültü içeren mikrotremor verisinin analizi için ters çözümde 1-10 Hz frekans aralığı değerlendirilmiştir. Şekil 4.8’ de ters çözümle hesaplanan kuramsal katsayı eğrileri (turuncu) verilmektedir.

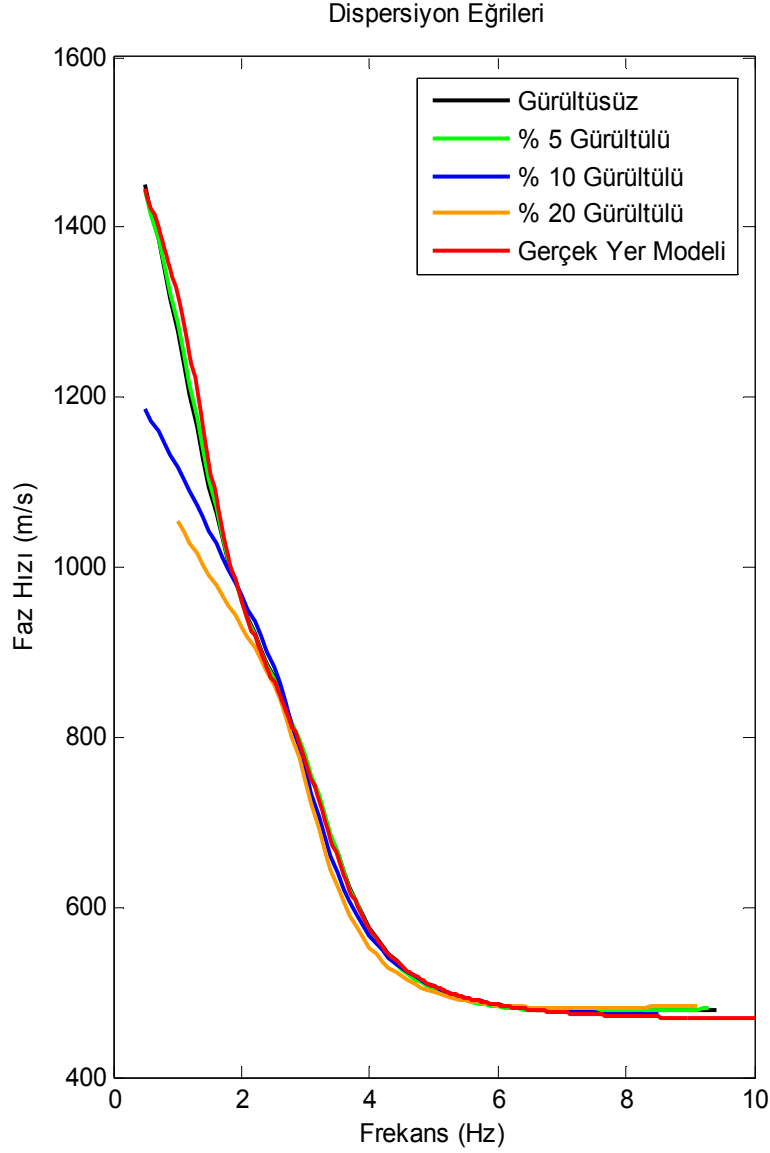


Şekil 4.8 : % 20 gürültü içeren mikrotremor verisinin analizinden ters çözümle hesaplanan katsayı eğrileri (turuncu) ve gözlemsel eğri (siyah).

Mikrotremor verilerinin % 20 gürültü içermesi durumunda en iyi RMS değeri 19 iterasyonla 0.79 civarında bulunmuştur. Şekil 4.9’ da % 5, % 10 ve % 20 oranlarında gürültü içeren mikrotremor verilerinin analizinden elde edilen S-dalgası hız profilleri ve Şekil 4.10’ da dispersiyon eğrileri verilmektedir. Sinyaldeki gürültü oranının % 5 olması, gürültüsüz analize yakın sonuçlar verir. % 10 gürültülü analiz sonucunda ise özellikle düşük frekans aralığında (0-2 Hz) dispersiyon eğrisinde gözlenen düşüş hız profilinde (mavi) yarı-sonsuz tabakanın hızının olduğundan daha düşük saptanmasına sebep olur. % 20’ lik gürültü oranında 4 tabakalı yer modelinde tabakalar ayırt edilememekte ve saptanan yer modeli daha çok 2 tabakalı yer modelini andırmaktadır. Elde edilen sonuçlardan, mikrotremor verilerinin içerdiği gürültü oranının %10’ u aşması durumunda hesaplanan yer modellerinin yanıltıcı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.9 : Gürültü analizleri sonucunda elde edilen S-dalgası hız profilleri.



Şekil 4.10 : Gürültü analizleri sonucunda elde edilen dispersiyon eğrileri.

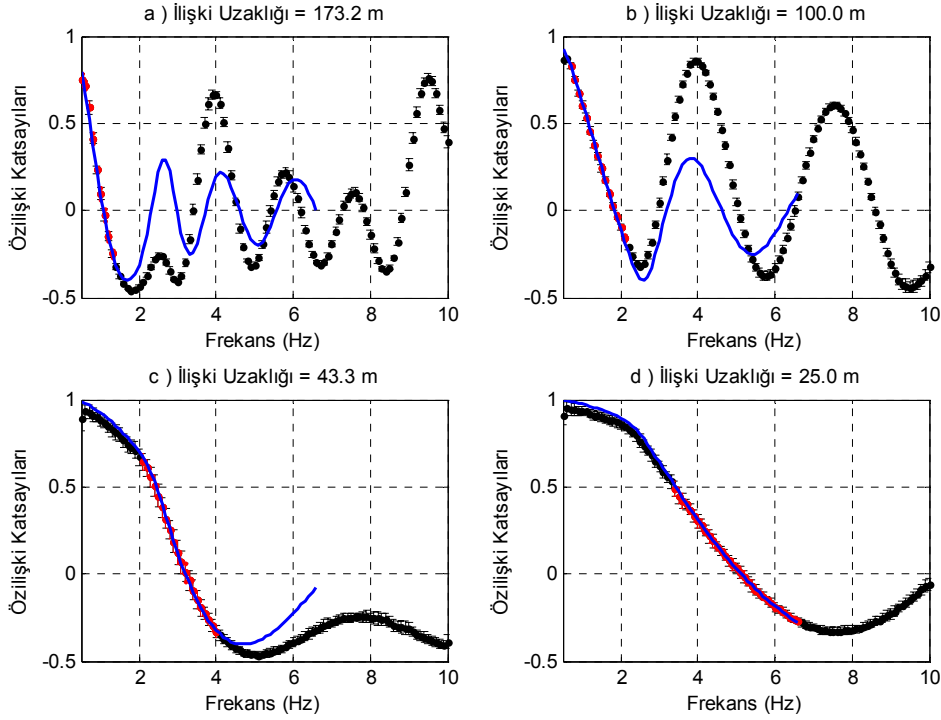
4.4 Düşük Hız Tabakası İçeren Yer Modeli

Ele alınan üçüncü model, düşük hız tabakası içeren bir yer modelidir. Burada amaç, daha karmaşık bir yer modeli için elde edilecek S-dalgası hız profilini analiz etmektir. Bölüm 4.3.1’ deki gürültü analizlerinden mikrotremor verilerinin içerdiği gürültü oranının % 10’ dan fazla olması durumunda saptanan yer modelinin hatalı olabileceği açıklanmıştır. Bu nedenle bu analiz için % 10 oranında gürültü içeren mikrotremor verileri kullanılmıştır. Analiz için dizilim yarıçapları 25 ve 100 m olarak seçilmiştir. Başlangıç modeli kalınlıkları derinlikle artan 13 ince katmandan oluşmaktadır.

Çizelge 4.3’ te gerçek yer modeli ve ters çözüm sonucunda hesaplanan model parametrelerinin değerleri verilmektedir. Şekil 4.11’ de ise 4 farklı ilişki uzaklığı için hesaplanan katsayı eğrileri verilmektedir. Gözlemsel veriler siyah, kuramsal eğri ise mavi renkle temsil edilmektedir. Daha önceki analizlerde olduğu gibi her bir ilişki uzaklığı için sadece eğrilerin seçilen kırmızı kısımların çakışma kriterini sağlaması amaçlanmıştır.

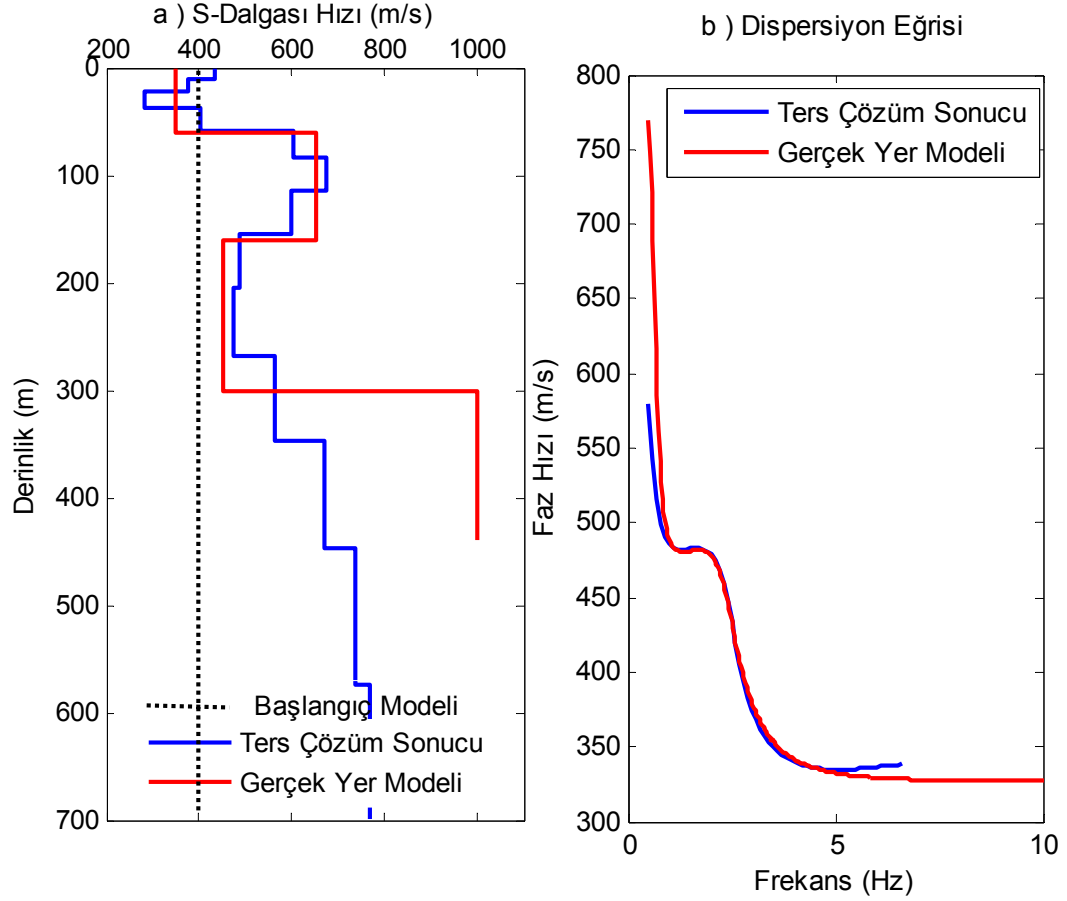
Çizelge 4.3 : Düşük hız tabakası içeren yer modeli parametreleri.

	Katman Sayısı	Katman Kalınlıkları (m)	Poisson Oranı	S-dalgası Hızı (m/sn)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Gerçek Yer Modeli	4	60	0.35	350	1.7
		100	0.30	650	1.9
		140	0.30	450	1.8
		sonsuz	0.25	1000	2.2
Ters Çözüm Sonucu	12	10.0	0.3500	433.4	2.0095
		12.6	0.3417	377.0	1.9611
		15.8	0.3333	281.1	1.8591
		20.0	0.3250	404.7	1.9857
		25.1	0.3167	601.5	2.1234
		31.6	0.3083	675.1	2.1635
		39.8	0.3000	597.2	2.1209
		50.1	0.2917	486.2	2.0495
		63.1	0.2833	475.7	2.0419
		79.4	0.2750	564.6	2.1014
		100.0	0.2667	669.1	2.1604
		125.9	0.2583	737.7	2.1943
		0	0.2500	767.1	2.2079



Şekil 4.11 : Düşük hız tabakası içeren yer modeli için gözlemsel katsayı eğrileri (siyah) ve kuramsal eğri (mavi).

Model daha kompleks olduğundan ters çözümde çakışmazlık ölçütünü sağlayabilmek için daha fazla yineleme yapmak gerekmiştir. Yineleme sayısının artmasında sebep olan bir başka nokta mikrotremor verilerinin içerdiği gürültü miktarıdır. Bu unsur kendini özellikle dispersiyon eğrilerinde göstermektedir. Şekil 4.12’ de ters çözüm sonucunda elde edilen S-dalgası hız profili ve dispersiyon eğrileri verilmiştir. 29 yineleme sonucunda elde edilen RMS değeri 0.57 civarındadır. S-dalgası hız profili incelendiğinde ters çözüm algoritmasının düşük hız tabakalı modellerinin çözümüne duyarlı olduğu ve yaklaşık olarak düşük hız tabakasının kalınlığının ve S-dalgası hız değerini saptayabildiği gözlenmiştir.



Şekil 4.12 : Düşük hız tabakası içeren yer modeli için elde edilen S-dalgası hız profili (a) ve dispersiyon eğrisi (b).

4.5 Özet

Yapay testlerde üç farklı yer modeli için, yazılan ters çözüm algoritması ile S-dalgası hız profilleri elde edilmiştir. Hız profilleri ince katmanlardan oluşan ve katman kalınlıklarının derinlikle arttığı hız gradyanlı yer modellerini temsil etmektedir. Diferansiyel yuvarlatma yaklaşımı, hızın derinlikle arttığı yer modelleri için daha iyi sonuçlar verirken düşük hız tabakası içeren yer modelinde iterasyon sayısı artırılarak çakışmazlık kriteri ($RMS < 1$) sağlanabilir. Mikrotremor verilerinin içerdiği gürültü seviyesi her iki yer modelinden elde edilen ters çözüm sonuçlarının özellikle düşük frekans aralığını (0-2 Hz) etkilemektedir.

5. GERÇEK VERİ ANALİZİ

5.1 Giriş

Bu bölümde, Mayıs 2008’ de tamamlanan “İstanbul, Avcılar bölgesinde derin S-dalgası hız yapısının araştırılarak deprem yer tepkisinin belirlenmesi” adlı TUJJB-UDP04-03 no.’ lu projesi kapsamında toplanan arazi verilerinden seçilen üç nokta için, özilişki katsayılarının doğrudan ters çözümü ile S-dalgası hız profillerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Seçilen ölçü noktaları İstanbul, Küçük Çekmece Gölü’ nün doğusunda yer almaktadır. Gerçek veri analiziyle, Küçük Çekmece Gölü’ nün doğusundaki derin çökel birim kalınlığının yaklaşık 10 km’ lik bir hat boyunca değişiminin saptanması amaçlanmıştır. Çizelge 5.1’ de ölçü noktalarında kullanılan dizilim özellikleri yer almaktadır. Şekil 5.1’ de ise ölçü alanının lokasyonu gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 : Ölçü noktalarındaki dizilim özellikleri.

Dizilim Kodu	Lokasyon	Dizilim Sayısı ve Türü	Dizilim Yarıçapı (m)	Maks. İnceleme Derinliği (m)
AVC-1	Avcılar Merkez	2 adet eşkenar üçgen dizilim	14.5 ve 58	400
AVC-2	İ.Ü Kampüs	2 adet eşkenar üçgen dizilim	14.5 ve 58	400
ÇBM	Çobançeşme	2 adet eşkenar üçgen dizilim	14.5 ve 58	400



  ekil 5.1 : Dizilim mikrotremor     lerinin alındığı noktalar (Google Earth).

5.2 Verilerin Toplanması

Mikrotremor a      mleri için dairesel bir dizilimin merkezinde ve     bir eşkenar    enin k   lerinde olacak şekilde yerleştirilmiş alıcılarda Mark Products-L4 tip 1 Hz' lik sismometreler kurularak mikrotremor sinyalleri kaydedilmiştir. Kayıtçı olarak Reftek Texan kayıtçıları kullanılmıştır. Kayıtların  rnekleme aralığı 0.01 sn' dir. Toplam kayıt uzunluğu, b   k yarıçaplı dizilimler için (58 m) en az 40 dk, küçük yarıçaplı dizilimler için (14.5 m) en az 20 dk' dır. Verilerin genlik spektrumlarından enerji yoğunluğu dikkate alınarak, 0.5 ile 10 Hz frekans aralığı incelenmiştir.

5.3 Verilerin   n Değerlendirme Aşaması

Verilerin değerlendirilmesi aşamasından   nce   n veri işlem aşamasında sırasıyla, toplanan verilerin bilgisayar ortamına aktarılması, format d  n    m  , analiz için kullanılacak veri penceresinin belirlenmesi ve verilerin kesilmesi, sismometre tepki fonksiyonlarının giderilmesi ve 10 Hz' lik kesme frekansında alçak geçişli s  zge leme adımları yer almaktadır. Veri pencere uzunlukları b   k yarıçaplı dizilim için 40 s ve küçük yarıçaplı dizilim için 20 s olarak seçilmiştir. B   k

dizilimden ve küçük dizilimden elde edilen toplam 4 ilişki uzaklığı kullanılarak uzamsal özilişki katsayıları hesaplanmıştır. Yapay verilerin değerlendirilmesi aşamasında olduğu gibi katsayı eğrilerinin ilk minimum değerleri civarına kadar olan kısımları kullanılmıştır.

Ters çözümde elde edilen sonuçları desteklemek ve yer modeli hakkında doğru saptamalar yapabilmek için yorumlama aşamasında bölgede daha önce yapılmış diğer jeofizik çalışmalar ve bölge jeolojisi de gözönünde tutulmalıdır.

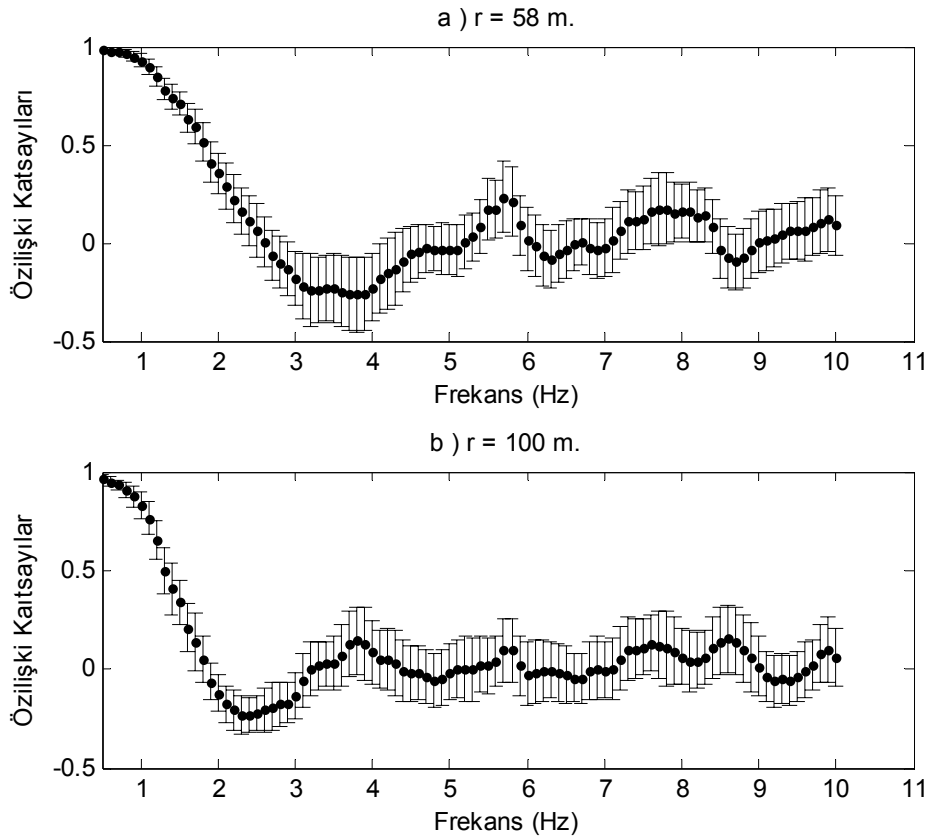
5.4 Avcılar ve Çevresinin Jeolojisi

Çalışma alanına ait jeolojik istifin en alt kısmında Oligosen yaşlı Gürpınar Formasyonu ve bu birimin üzerinde sırasıyla Çukurçeşme, Güngören ve Bakırköy Formasyonları yer almaktadır. Gürpınar Formasyonunun en alt kısmında çakıllı seviyeler, çakıllı seviyelerin üzerinde marn, kil ve şeylden oluşmuş ara seviyeler görülmektedir. Bölgede Gürpınar Formasyonunun kalınlığı yaklaşık olarak 200 m' dir. Gürpınar Formasyonunun üzerinde kalınlığı 15-40 m arasında değişen Çukurçeşme Formasyonu yer alır. Bu birim, siltli ince kum ve çakıltaşlarından oluşmuştur. Çukurçeşme Formasyonunun üzerinde geçiş formasyonu olarak Güngören Formasyonu gözlenmektedir. Bu birimin kalınlığı ise yaklaşık 10 m' dir ve yeşil renkli kireçtaşlarından ve mavimsi yeşil plastik kil birimlerinden oluşur. Bu formasyonun üzerinde, orta-kalın tabakalı ve yer yer erime boşluğu içeren açık renkli kireçtaşlarından oluşan Bakırköy Formasyonu yer almaktadır. Bu birimin kalınlığı yaklaşık 20 m' dir. Stratigrafik kesitin en üstünde ise Kuvaterner yaşlı kalınlığı yaklaşık 20 m olan alüvyon tabakası ve en üst kısımda güncel dolgu ve bitkisel toprak yer almaktadır. Avcılar ve çevresinin stratigrafik kesiti Şekil 5.11' de gösterilmektedir.

5.5 Avcılar Verilerinin Değerlendirilmesi

Avcılar' da değerlendirilen ilk ölçü noktasında (AVC-1) dizilim yarıçapları 14.5 m ve 58 m olan ortak merkezli iki eşkenar üçgen dizilimle mikrotremor verisi toplanmıştır. AVC-1 ölçü noktasının ana mikrotremor kaynağı 200 m doğusunda yer alan karayoludur.

Şekil 5.2’ de 58 m yarıçaplı dizilimle, iki ayrı ilişki uzaklığı kullanılarak hesaplanan gözlemsel katsayı eğrileri ve standart sapmaları verilmiştir. Katsayı eğrilerinin şekli mikrotremor sinyallerinin azimutal dağılımının yetersiz oluşuna ve kaydedilen sinyalin gürültü içeriğine bağlı olarak yüksek frekanslarda bozulmaya başlar. Eğrideki saçılmalar eğrilerin ilk minimum noktalarından sonra artmaya başlar. Bu nedenle gerçek veri analizinde de katsayı eğrilerinin ilk minimum noktalarından hemen önceki kısımları değerlendirilmiştir.



Şekil 5.2 : AVC-1 ölçü noktasında büyük dizilime ait gözlemsel özilişki katsayıları eğrileri ve verilerin standart sapmaları.

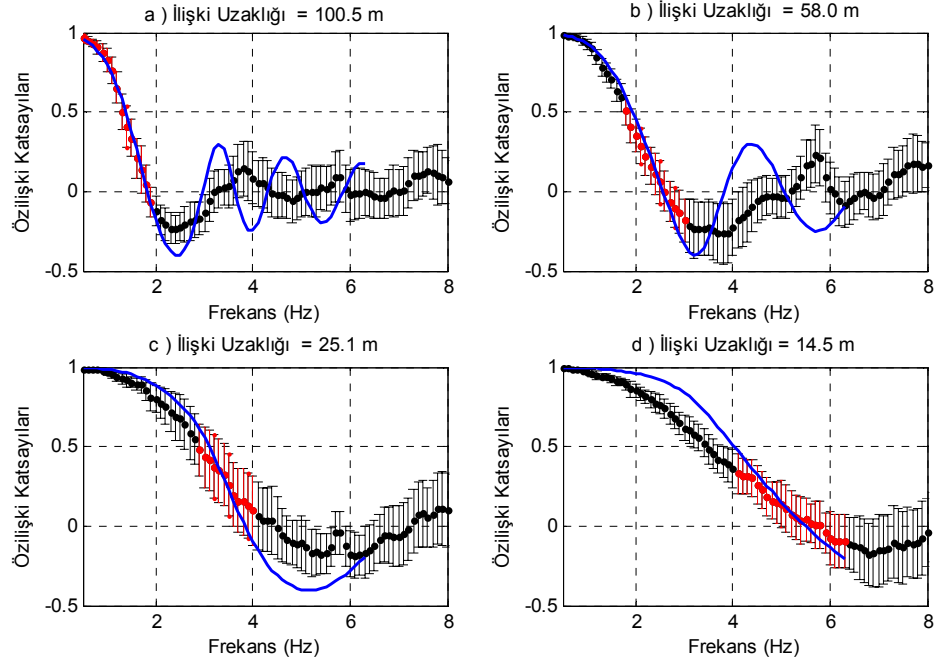
Ters çözüm sonucunda elde edilen model parametrelerinin değerleri Çizelge 5.2’ de verilmektedir. Yapay veri analizinde olduğu gibi başlangıç modeli kalınlıkları derinlikle logaritmik olarak artan 10 katmandan oluşmaktadır. Başlangıç modelinde her bir tabaka için S-dalgası hızı 400 m/s olarak alınmıştır. Poisson oranları 0.35-0.25 aralığına değişmektedir. Yoğunluk ise P-dalgası hızı ile ilişkili olup ampirik bir bağıntı ile her bir katman için hesaplatılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en üst

katmanın hızı 215 m/s civarında bulunmuştur. Yarı sonsuz ortamda S-dalgası hızı 970 m/s' ye ulaşmaktadır. 14 yineleme ile elde edilen RMS değeri 0.53 civarındadır.

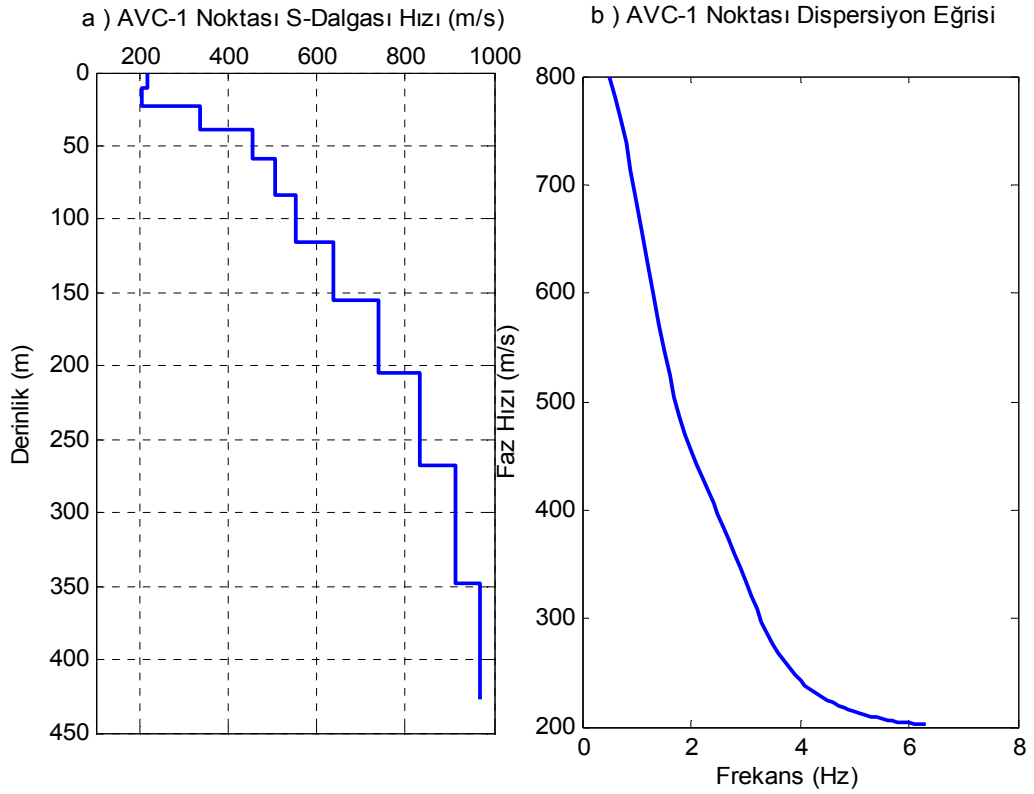
Çizelge 5.2 : AVC-1 ölçü noktası için ters çözüm sonuçları.

	Katman Sayısı	Katman Kalınlıkları (m)	Poisson Oranı	S-Dalgası Hızı (m/sn)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Ters Çözüm Sonuçları	11	10.0	0.3500	215.3	1.7665
		12.6	0.3400	203.2	1.7464
		15.8	0.3300	337.1	1.9222
		20.0	0.3200	454.4	2.0260
		25.1	0.3100	503.4	2.0616
		31.6	0.3000	554.2	2.0949
		39.8	0.2900	636.9	2.1433
		50.1	0.2800	737.2	2.1941
		63.1	0.2700	834.2	2.2370
		79.4	0.2600	913.6	2.2686
		0	0.2500	968.5	2.2889

Ters çözüm sonucunda elde edilen katsayı eğrileri Şekil 5.3' de verilmektedir. Ters çözüm aşamasında herbir ilişki uzaklığı için hesaplanan katsayı eğrilerinin kullanılan kısımları kırmızı renkle gösterilmektedir. Gözlemsel verilerin hata sınırları içinde, ters çözüm sonucunda en iyi çakışmayı veren katsayı eğrileri mavi renk ile gösterilmektedir. AVC-1 ölçü noktası için elde edilen S-dalgası hız profili ve dispersiyon eğrisi şekil 5.4' de verilmektedir.

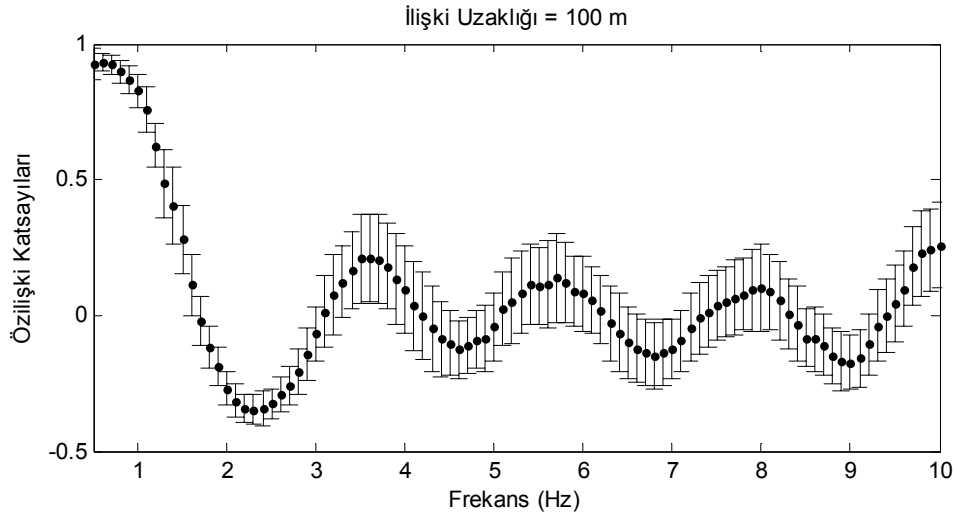


Şekil 5.3 : AVC-1 ölçü noktası için ters çözüm sonucunda elde edilen katsayı eğrileri (mavi) ve gözlemsel katsayı eğrileri (siyah).



Şekil 5.4 : AVC-1 ölçü noktası için S-dalgası hız profili (a) ve dispersiyon eğrisi (b).

İkinci ölçü noktası AVC-1 noktasının yaklaşık 2 km doğusunda, İstanbul Üniversitesi Kampüsü' nde yer almaktadır. AVC-2 noktasının ana mikrotremor kaynağı dizilimin yaklaşık 250 m güneyinden geçen E-5 karayoludur. Dizilimde, minimum sayıda alıcı kullanılmasına rağmen alıcılara ulaşan sinyallerin açısal dağılımının çok yönlü olması nedeniyle katsayı eğrilerinin şekli sıfıncı dereceden birinci tip Bessel Fonksiyonu görünümündedir. Şekil 5.5' de AVC-2 ölçü noktasında 100 m' lik ilişki uzaklığı kullanılarak elde edilen gözlemsel özilişki katsayı eğrisi verilmektedir.

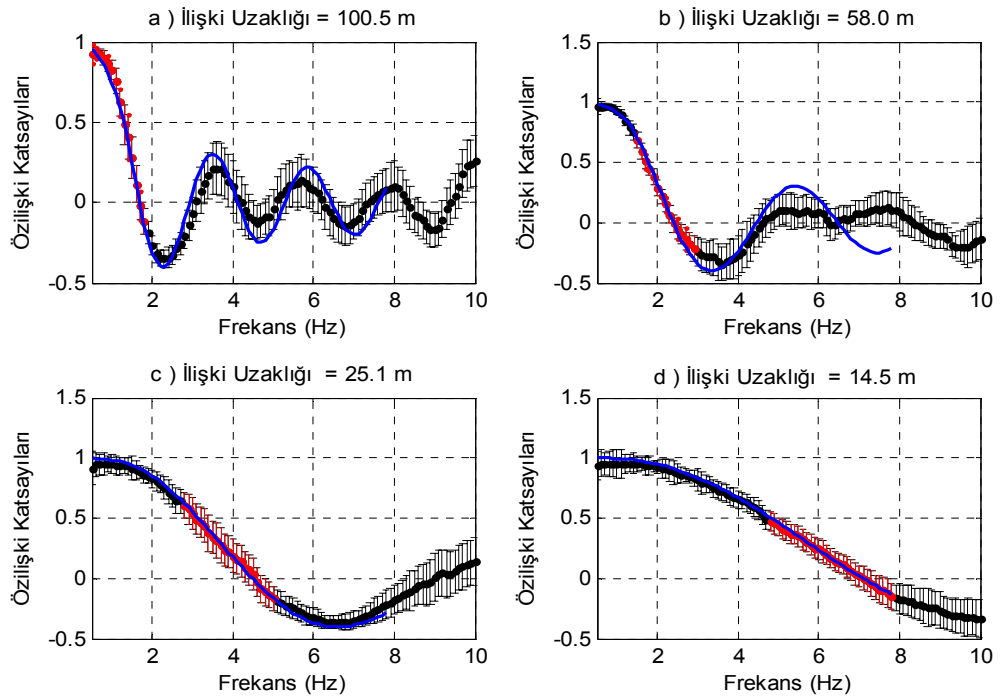


Şekil 5.5 : AVC-2 ölçü noktasında 100 m' lik ilişki uzaklığı için gözlemsel özilişki katsayıları eğrisi.

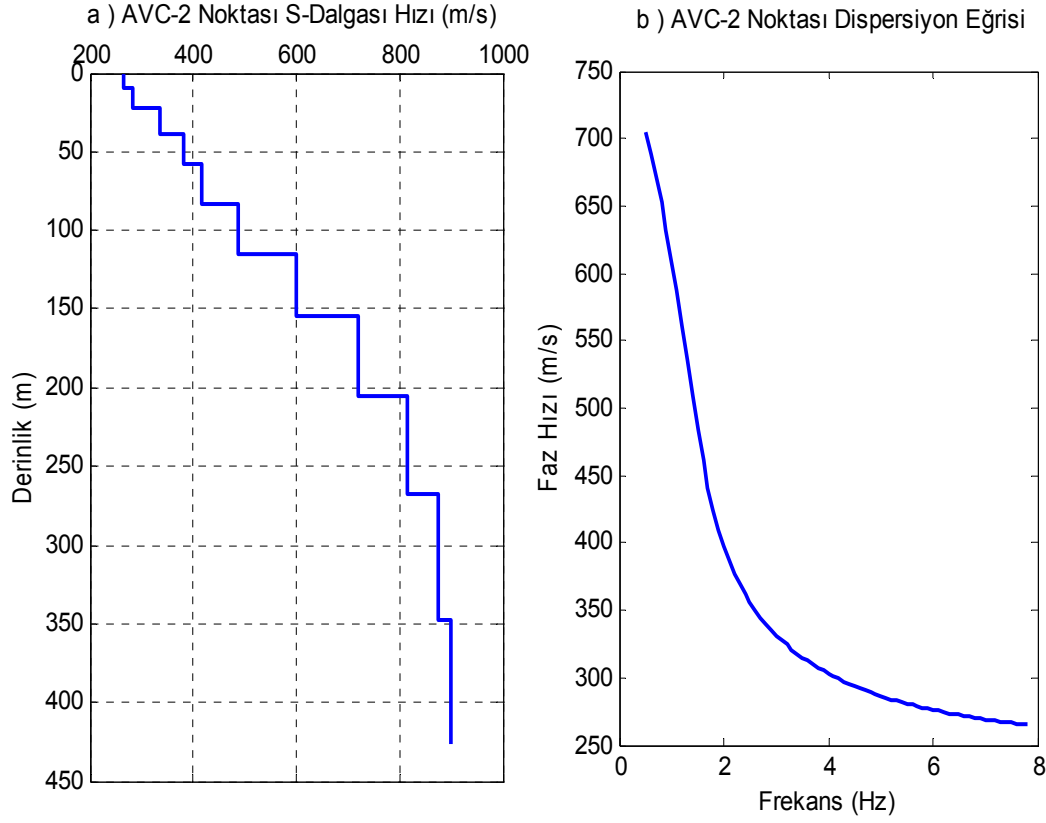
AVC-2 noktasında maksimum inceleme derinliği 400 m' dir. Başlangıç modeli 11 ince tabakadan oluşmaktadır ve her bir tabakaya ait S-dalgası hızı 400 m/s alınmıştır. AVC-2 ölçü noktasına ait ters çözüm sonuçları Çizelge 5.3' de verilmektedir. 12 iterasyon sonucunda elde edilen yer modelinin RMS değeri 0.33 civarındadır. Şekil 5.6' da 4 farklı ilişki uzaklığı için elde edilen gözlemsel katsayı eğrileri (siyah) ve ters çözümde elde edilen katsayı eğrileri (mavi) verilmektedir. Eğrilerin ilk minimum noktalarından sonraki kısımlarında da çakışma sağlanmış olsa da ters çözümde sadece kırmızı ile gösterilen eğriye ait özilişki katsayıları kullanılmıştır. AVC-2 ölçü noktası için elde edilen S-dalgası hız profili ve dispersiyon eğrisi şekil 5.7' de verildiği gibidir.

Çizelge 5.3 : AVC-2 ölçü noktası için ters çözüm sonuçları.

	Katman Sayısı	Katman Kalınlıkları (m)	Poisson Oranı	S-Dalgası Hızı (m/sn)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Ters Çözüm Sonuçları	11	10.0	0.3500	267	1.8412
		12.6	0.3400	283.7	1.8623
		15.8	0.3300	341.4	1.9267
		20.0	0.3200	384.9	1.9682
		25.1	0.3100	415.8	1.9951
		31.6	0.3000	483.7	2.0476
		39.8	0.2900	596.4	2.1204
		50.1	0.2800	717.2	2.1845
		63.1	0.2700	812.8	2.2280
		79.4	0.2600	871.7	2.2523
		0	0.2500	899.4	2.2632



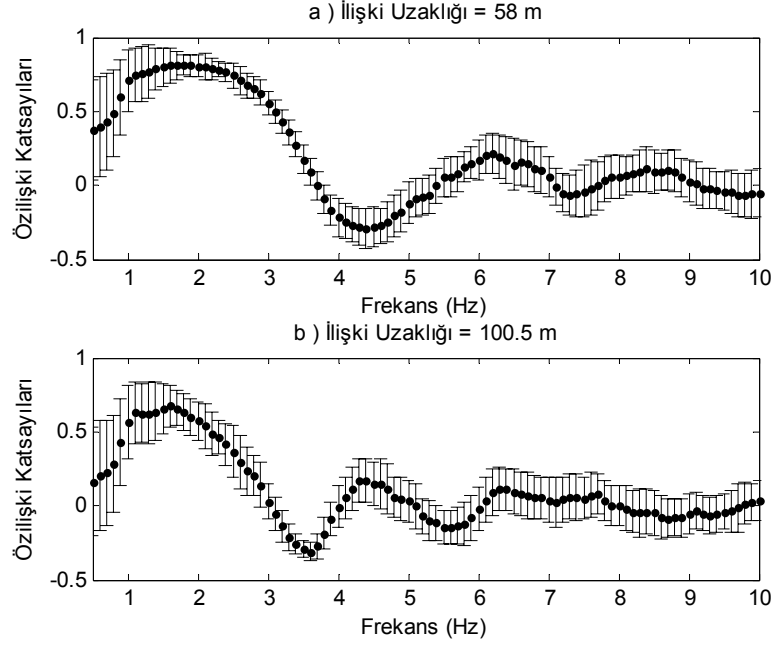
Şekil 5.6 : AVC-2 ölçü noktası için ters çözüm sonucunda elde edilen katsayı eğrileri (mavi) ve gözlemsel katsayı eğrileri (siyah).



Şekil 5.7 : AVC-2 ölçü noktası için S-dalgası hız profili (a) ve dispersiyon eğrisi (b).

5.6 Çobançeşme Verisinin Değerlendirilmesi

Yenibosna- Çobançeşme ölçü noktası D-100 karayolunun 600 m kuzeyinde, AVC-2 ölçü noktasının yaklaşık 8 km doğusunda yer almaktadır. 14.5 ve 58 m' lik yarıçaplar kullanılarak kaydedilen mikrotremor verilerinden hesaplanan özilişki katsayıları eğrisi incelendiğinde 1.5 Hz' den düşük frekanslarda mikrotremor enerjisinin yetersiz oluşundan dolayı katsayı eğrilerinde düşüş gözlenmiştir. Şekil 5.8' de 58 m' lik dizilim yarıçapı için hesaplanan özilişki katsayıları eğrileri ve verilerin standart sapmaları verilmektedir. Düşük frekanslarda rastlanan bu düşüş küçük ilişki uzaklıkları kullanılarak hesaplanan katsayı eğrilerinde de gözlenmektedir. Bu nedenle ÇBM ölçü noktasında kaydedilen mikrotremor sinyali 1.5-10 Hz frekans aralığı için analiz edilmiştir. Çizelge 5.4' de ÇBM ölçü noktasına ait ters çözüm sonuçları verilmektedir.

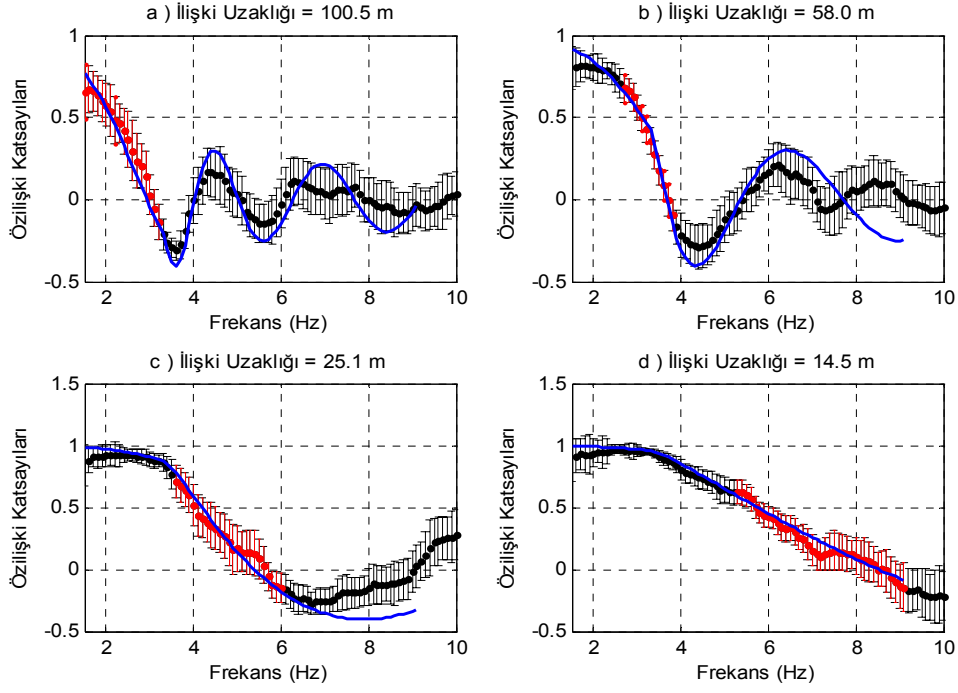


Şekil 5.8 : ÇBM ölçü noktasında 58 m' lik dizilim yarıçapı için elde edilen katsayı eğrileri.

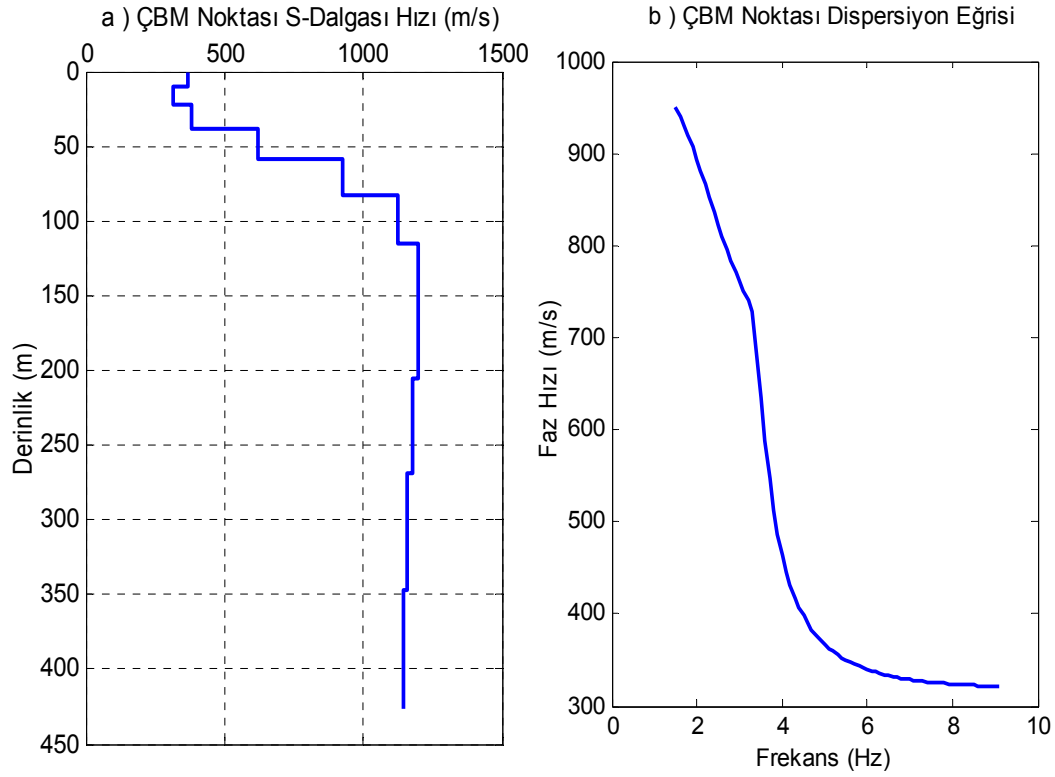
Çizelge 5.4 : ÇBM ölçü noktası için ters çözüm sonuçları.

	Katman Sayısı	Katman Kalınlıkları (m)	Poisson Oranı	S-Dalgası Hızı (m/sn)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Ters Çözüm Sonuçları	11	0.0100	0.3500	365.8	1.9506
		0.0126	0.3400	313.0	1.8964
		0.0158	0.3300	380.3	1.9641
		0.0200	0.3200	623.4	2.1358
		0.0251	0.3100	925.9	2.2733
		0.0316	0.3000	1127.5	2.3417
		0.0398	0.2900	1201.1	2.3637
		0.0501	0.2800	1199.4	2.3632
		0.0631	0.2700	1177.3	2.3567
		0.0794	0.2600	1158.9	2.3512
		0	0.2500	1147.0	2.3476

ÇBM ölçü noktası için 11 tabakalı başlangıç modelinde tabakalara ait hızlar 400 m/s atanmıştır. Maksimum inceleme derinliği en büyük ilişki uzaklığının 4 katı alınmıştır. Ters çözüm sonucunda 12 yinleme ile RMS değeri yaklaşık 0.4 bulunmuştur. Bu çakışma kriterini sağlayan kuramsal katsayı eğrileri Şekil 5.9' da mavi renkli eğrilerle gösterilmektedir. Elde edilen S-dalgası hız profili ve dispersion eğrisi ise Şekil 5.10' da verilmektedir.



Şekil 5.9 : ÇBM ölçü noktası için ters çözüm sonucunda elde edilen katsayı eğrileri (mavi) ve gözlemsel katsayı eğrileri (siyah).



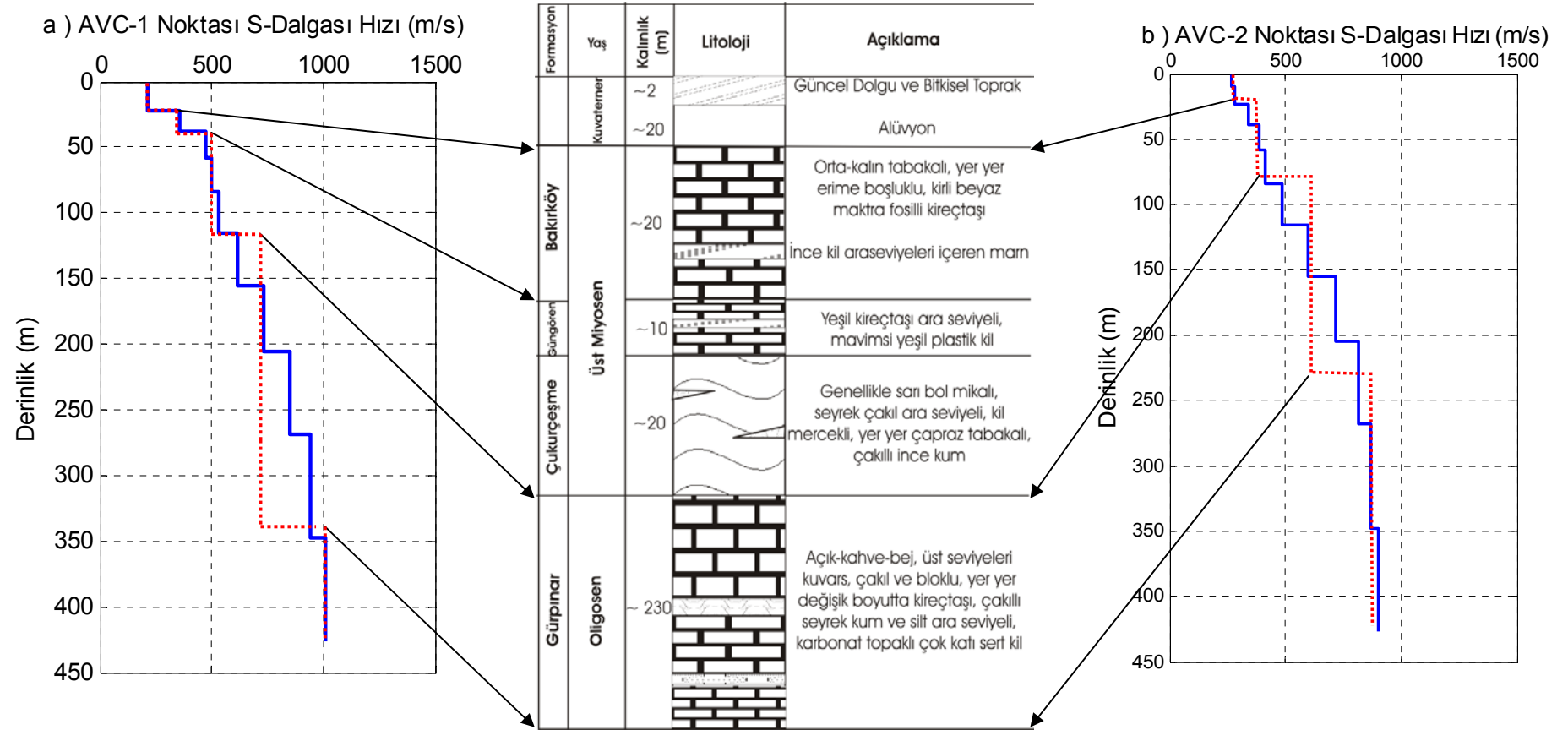
Şekil 5.10 : ÇBM ölçü noktası için S-dalgası hız profili (a) ve dispersiyon eğrisi (b).

5.7 Ters Çözüm Sonuçlarının Yorumlanması

Elde edilen S-dalgası hız profilleri incelendiğinde, ölçü noktalarındaki hız yapılarının hız gradyanlı yer modelleri ile temsil edildiği görülmektedir. Gerçek yer modelinde tabaka sınırlarındaki hız geçişleri, ters çözümde yumuşatılmış, dereceli olarak arttırılmış hız geçişleri şeklinde gösterilmektedir. Avcılar bölgesi için hesaplanan S-dalgası hız profillerinde, derin çökel birim kalınlığının değişimini daha iyi saptayabilmek için Şekil 5.11' deki Avcılar ve çevresine ait genelleştirilmiş stratigrafik kesitten faydalanılmıştır (Yüzer ve Eyüboğlu, 1988). Stratigrafik kesit yardımıyla derin çökel birimlerin kalınlığı saptanırken ölçü noktalarına ait yalınlaştırılmış yer modelleri de yorumlanabilir.

Şekil 5.11' de mavi çizgiler AVC-1 ve AVC-2 ölçü noktaları için ters çözümle elde edilen hız profillerini, kırmızı kesikli çizgiler ise jeolojik formasyonlarla ilişkilendirilmiş ve yalınlaştırılmış yer modellerini temsil etmektedir. AVC-1 ölçü noktası için yalınlaştırılmış yer modeli yarı sonsuz ortam üzerinde yer alan 4 tabaka ile temsil edilebilir. AVC-1 noktası için alüvyon birim kalınlığı yaklaşık 25 m' dir. Alüvyon birimin hemen altında 20 m kalınlığında gözlenen Bakırköy Formasyonu yer almaktadır. Bu tabakanın altında hızı yaklaşık 550 m/s olan 75 m kalınlığında bir birim yer almaktadır. Son olarak yarı-sonsuz ortam üzerinde ise kalınlığı yaklaşık 225 m olan 750 m/s' lik hıza sahip çökel tabaka saptanmıştır. Hız değeri yaklaşık 350 metrede 1000 m/s' ye ulaşmaktadır. AVC-1 ölçü noktasında düşük hıza sahip (< 750 m/s) birimlerin toplam kalınlığı 330 m civarındadır.

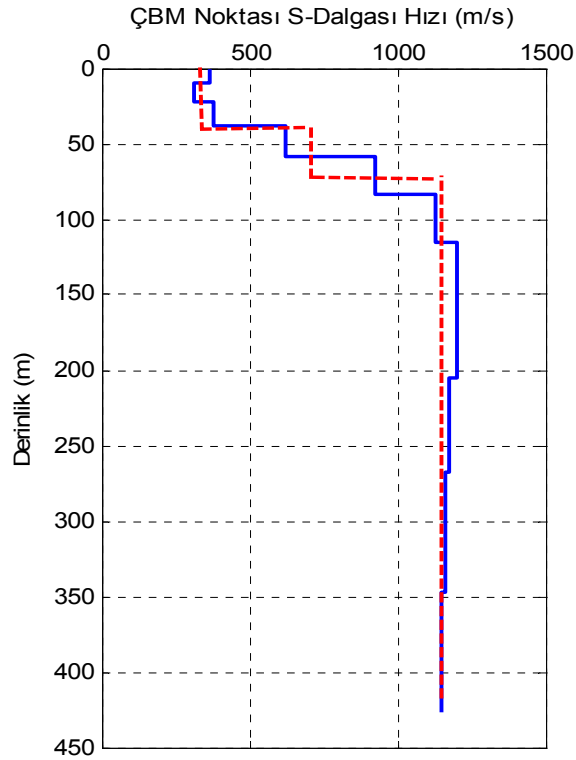
AVC-2 ölçü noktasında ait yalınlaştırılmış yer modeli ise yarı-sonsuz ortam üzerinde yer alan 3 tabaka ile temsil edilebilir. AVC-2 noktasında elde edilen S-dalgası hız profili Kudo ve diğ.' nin (2000) aynı noktada elde ettikleri sonuçlarla kıyaslandığında sonuçların genellikle tutarlı olduğu saptanmıştır. Kudo ve diğ. yapmış olduğu çalışmada temel kaya derinliğini 280 m saptamışlardır. Bu çalışmada ise temel kaya derinliği 230 m olarak hesaplanmıştır. AVC-2 ölçü noktası civarında yapılan bir diğer çalışma Bozdağ' ın (2002) F-k yöntemini kullanarak elde ettiği hız profilidir. Alüvyon tabaka kalınlığı Bozdağ' ın yapmış olduğu çalışmada 70 m olarak saptamıştır. Bu çalışmada ise bu birim yaklaşık 25 m hesaplanmıştır. Bu birimin hemen altında hızı yaklaşık 400 m/s olan orta-kalın tabakalı, yer yer erime boşluklu kireçtaşları yer almaktadır. Yarı-sonsuz ortamın hemen üstünde ise hızı 620



Şekil 5.11 : AVC-1 (a) ve AVC-2 (b) ölçü noktalarının S- dalgası hız profillerinin Avclar ve çevresine ait stratigrafik kesit ile değerlendirilmesi (Yüzer ve Eyüboğlu, 1988). Mavi çizgi ters çözüm sonucunda elde edilen hız profillerini, kırmızı kesikli çizgi stratigrafik kesit göz önünde tutularak elde edilen yalınlaştırılmış hız profilini göstermektedir.

m/s' ye ulaşan çok katı sert-kil ardalannasından oluşan 150 m kalınlığında çökel tabaka yer almaktadır. Bu tabakanın hızı Bozdağ' ın yapmış olduğu çalışmada 500 m/s olarak bulunmuştur. Bozdağ, AVC-2 noktası için için kalınlığı en az 200 m olan çökel birim saptamıştır. Bu çalışmada düşük hızlı (< 750 m/s) çökel birimin toplam kalınlığı 205 m olarak hesaplamıştır.

AVC-1 ölçü noktasının yaklaşık 10 km doğusunda yer alan ÇBM noktasına ait hız profili daha yalın bir yer modeli ile temsil edilebilir. Yalınlaştırılmış yer modeli Şekil 5.12' de verilmektedir. Buna göre, hızı 1200 m/sn' ye ye ulaşan temel kaya üzerinde yaklaşık 80 m kalınlığında düşük hızlı çökel birim yer almaktadır. Avcılar' daki ölçü noktaları ile kıyaslandığında Küçükçekmece Gölü' nün doğu kısmında yer alan ÇBM noktasında mühendislik temel kayası (> 750 m/s) yüzeye daha yakındır. Gölün güneyinde seçilen ve 3 noktadan oluşturulan D-B doğrultulu bu hat üzerinde, topoğrafyanın değişimi K-G yönlü değişimine göre oldukça azdır ve seçilen ölçü noktalarının topoğrafik yükselteleri birbirlerine yakın olduğundan yorumlara topoğrafyanın etkisi eklenmemiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda inceleme bölgesinde yaklaşık 10 km' lik bir hat boyunca çökel birim kalınlığı Batıdan Doğuya doğru giderek azalmaktadır.



5.12 : ÇBM ölçü noktasının yalınlaştırılmış yer modeli (kırkızı).

5.8 Özet

Avcılar ve Çobançeşme ölçü noktalarındaki mikrotremor ağ ölçümlerinin uzamsal özilişki yöntemi ile analizi sonucunda ters çözümle 1-B yumuşak geçişli hız modelleri elde edilmiştir. Avcılar ve çevresine ait stratigrafik kesitten faydalanılarak sadeleştirilmiş yer modelleri yorumlanmaya çalışılmıştır. Buna göre Avcılar' ın batısındaki AVC-1 noktasında yaklaşık 330 m kalınlığında düşük hızlı (< 750 m/s) çökel birim, doğudaki AVC-2 noktasında ise yaklaşık 205 m kalınlığında çökel tabakası saptanmıştır. Çobançeşme ölçü noktasında ise çökel birimin kalınlığı en fazla 80 metredir. Elde edilen S-dalgası hız profillerinden Avcılar' da derin çökel kalınlığının Çobançeşme'deki ölçü noktasına göre daha fazla olduğu saptanmıştır.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemlerinden uzamsal özilişki yöntemi ile mikrotremor verileri analiz edilerek ters çözümle S-dalgası hız kestirimi amaçlanmıştır.

Mikrotremorlar gibi durağan rastgele süreçlerde, alıcılarda kaydedilen sinyaller arasındaki ilişki, uzamsal özilişki fonksiyonu ile tanımlanabilir. Uzamsal özilişki yönteminde genellikle 4 alıcı ile oluşturulan dairesel bir dizilim kullanılır. Alıcılardan biri, dairesel dizilimin merkezine, diğerleri ise eşit aralıklarla daire üzerinde bir eşkenar üçgen oluşturacak şekilde yerleştirilir. Alıcılar arasındaki ilişki uzaklıkları kullanılarak özilişki katsayıları eğrileri elde edilebilir. Özilişki katsayıları, sıfırıncı dereceden birinci tip Bessel Fonksiyonu ile tanımlanır. Katsayılar, ilişki uzaklığının, dalga frekansın ve faz hızının fonksiyonudur.

Gözlemsel katsayı eğrilerinin, içerdikleri sistematik ve rastgele hatalar nedeniyle tamamını kullanmak mümkün değildir. Eğrilerinin değerlendirilebilecek kısmının üst sınırını Nyquist dalgasayısı veya deviasiyon dalgasayısı belirler. $(rk)'$ nın π' ye eşit olduğu değer Nyquist dalgasayısını tanımlar ve bu değer 4 alıcılı dizilimlerde eğrilerin ilk minimumları civarındadır. Deviasyon dalgasayısı ise gözlemsel eğrilerin kuramsal eğriden ayrılmaya başladığı noktadaki dalgasayısını olarak tanımlanır. 4 alıcılı dizilimlerde Nyquist dalgasayısı deviasiyon dalgasayısından büyüktür. Bu nedenle 4 alıcılı dizilimlerde katsayı eğrileri, ilk minimum değerlerine çok yakın bir noktaya kadar değerlendirilmelidir.

Özilişki katsayıları frekans ve faz hızının fonksiyonu olduğundan, katsayı eğrilerinden her frekansa karşılık gelen faz hızları hesaplanabilir. Yüzey dalgası yöntemlerinde S-dalgası hız kestirimi için en çok tercih edilen yöntem, dispersiyon eğrilerinin ters çözümüdür. Bu tez çalışmasında, tek adımlı ve daha pratik bir yöntem olan gözlemsel katsayı eğrilerinin doğrudan ters çözümü ile S-dalgası hız profilleri elde edilmiştir. Ters çözüm algoritmasında sönümlü en küçük kareler çözümü ve

diferansiyel yuvarlatma yaklaşımı kullanılmıştır. Rayleigh dalgası faz hızı değişimini en çok etkileyen parametre S-dalgası hızıdır. Bu nedenle çoğul çözümlülük probleminden etkilenmemek için sadece tabakalara ait S-dalgası hızları saptanmıştır. Ters çözümde elde edilen sonuçların duraylılığı kullanılan model ve veri ağırlıklandırma dizeyleri ile artırılmıştır. Diferansiyel yuvarlatma yaklaşımı ile komşu tabakalara ait hız değerlerinin birbirine yakın olması sağlanarak ani hız değişimlerinin gözlenmediği, hız gradyanlı yer modelleri elde edilmiştir. Ölçülen ve kuramsal verilerin çakışmasının bir ölçütü olarak RMS değerleri hesaplatılmıştır.

Ters çözüm algoritması öncelikle yapay modellerle sınanmıştır. Ele alınan yer modelleri 2 tabakalı yer modeli, hızın derinlikle arttığı ve düşük hız tabakası içeren yer modelleridir. Ters çözüm sonucunda elde edilen hız modelleri çok ince tabakalar ile temsil edilmektedir. Hızın derinlikle arttığı yer modeli için yaklaşık 10 iterasyon ile sonuç elde edilebilir. Düşük hız tabakası içeren daha kompleks bir yer modelinde ise iterasyon sayısının daha fazla tutulması gerekmektedir. Elde edilen hız profillerini etkileyen bir diğer etken, mikrotremor verilerinin içerdiği gürültü oranıdır. Gürültü düzeyinin ters çözüme etkisini araştırmak için % 5, 10 ve 20 oranlarında rastgele gürültüler içeren mikrotremor verileri üretilip aynı yer modelleri için değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde mikrotremor verilerindeki gürültü oranının katsayı ve dispersiyon eğrilerinin özellikle düşük frekans aralığını (0-2 Hz) etkilediği saptanmıştır. Gürültü oranının %10' dan fazla olması durumunda elde edilen ters çözüm sonuçların hata oranının oldukça arttığı gözlenmiştir. Ters çözüm algoritması ile gerçek arazi verileri de değerlendirilmiştir. Gerçek veri analiziyle amaçlanan, Küçük Çekmece Gölü' ün güneyindeki kesimde derin çökel birimlerin kalınlığının değişimini saptamaktır. Avcılar' ın doğu ve batısında seçilen iki ölçü noktasında ve Çobançeşme' de tek bir noktada, ortak merkezli 14.5 ve 58 m yarıçaplı eşkenar üçgen dizilim ile mikrotremor ağ ölçümleri alınmıştır. Her bir ölçü noktası için 11-12 katmanlı yer modelleri elde edilmiştir. Avcılar bölgesi için elde edilen sonuçlardan jeolojik formasyon sınırları ile uyumlu yalınlaştırılmış yer modelleri elde edilmiştir. Hesaplanan S-dalgası hız profilleri daha önce aynı bölgede yapılmış olan çalışmalarla (Kudo ve diğ., 2002, Bozdağ, 2002) karşılaştırılmıştır. Avcılar' ın doğusundaki AVC-2 ölçü noktasında derin çökel birim kalınlığı 205 m olarak bulunmuştur. Aynı noktada Bozdağ (2002) çökel birim kalınlığını en az 200 m olarak tespit etmiştir. Kudo ve diğ. (2002) yapmış oldukları çalışma sonucunda bölgedeki

derin çökel birim kalınlığını 280 m olarak hesaplamışlardır. AVC-1 noktası için düşük hızlı (< 750 m/sn) ökel birim yaklaşık 330 m kalınlığındadır. Çalışma alanının en doğusunda yer alan BM ölçü noktasında ise kalınlığı en fazla 80 m olan düşük hıza sahip tabaka saptanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Küçük ekmece Gölü' nün güney kesiminde, batıdan doğruya doğru çökel birim kalınlığı giderek azalmaktadır.

KAYNAKLAR

Aki, K., 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthquake Research Institute Tokyo Univ.*, **35**, 415-455.

Apostolidis, P., Raptakis, Dimitrios, Roumelioti, Z., Pitilakis K., 2004. Determination of S- wave velocity structure using microtremors and spac method applied in Thessaloniki (Greece), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, 49-67.

Arai, H., Tokimatsu, K., 2005. S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical (H/V) spectrum, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 1766-1778.

Asten, M., W., 2004. Passive seismic methods using the microtremor wave field for engineering and earthquake site zonation, *SEG 74th Annual Meeting Denver*.

Asten M., W., Dhu, T., Lam, N., 2004. Optimised array design for microtremor array studies applied to site classification; Comparison of results with scpt logs, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No: 2903.

Asten, M., W., 2006. On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods, *Geophysics*, **71**, 6, 153-162.

Asten, M., W., 2003. Lessons from alternative array design used for high-frequency microtremor array studies, in "Earthquake Risk Mitigation", (Eds) *Proceedings of the Australian Earthquake Engineering Soc. Melbourne*, Paper No:14.

Betting, B., Bard, P., Y., Scherbaum, F., Riepl, J., Cotton, F., Cornou, C., Hatzfeld, D., 2001. Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC), *Bollettino di geofisica Teorica ed applicata*, **42**, 3-4, 281-304.

Bozdağ, E., 2002. Yeşilyurt ve Avcılar'da Deprem Yer Tepkisinin Çok Kanallı Mikrotremor Kayıtlarının Analizi ile Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Chavez- Garcia, F., J., Rodriguez M., Stephenson, W., R., 2006. Subsoil structure using SPAC measurements along a line, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 2, 729-736.

Chavez- Garcia, F., J., Rodriguez M., 2007. The correlation of microtremors: empirical limits and relations between results in frequency and time domains, *Geophysical J. Int.*, **171**, 2, 657-664.

Cho, I., Tada, T., Shinozaki, Y., 2008, Assessing the applicability of the spatial autocorrelation method: A theoretical approach, *Journal of Geophysical Research*, **113**, doi:10.1029/2007JB005245.

Estrella, H., F., Gonzalez, J., A., 2003. SPAC: An alternative method to estimate earthquake site effects in Mexico City, *Geofísica Internacional*, **42**, 2, 227-236.

Garcia- Jerez, A., Navarro, M., Alcalá, F., J., Luzon, F., Perez- Ruiz, J., A., Enomoto, T., Vidal, F., Ocana, E., 2007. Shallow velocity structure using joint inversion of array and h/v spectral ratio of ambient noise: The case of Mula town (SE of Spain), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**, 907-919.

Haskell, N., A., 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 17-34.

Henstridge, J., D., 1979. A signal processing method for circular arrays, *Geophysics*, **44**, 179-184.

Hermann, R., B., Ammon C., J., 2004. *Computer Programs in Seismology, Surface Waves, Receiver Functions, and Crustal Structure, Version 3.30.*

Konno, K., Ohmachi, T., 1998. Ground- motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 228-241.

Köhler, A., Ohrnberger M., Scherbaum F., Wathelet M., Cornou C., 2007. Assessing the reliability of the modified three-component spatial autocorrelation technique, *Geophysical J. Int.*, **168**, 779-796.

Kudo, K., Kano, T., Hiroshi, O., Özel, O., Erdik M., Sasatoni, T., Higashi, S., Takahashi, M., Yoshida, K., 2002. Site- specific issues for strong ground motions during the Kocaeli, Turkey, earthquake of 17 August 1999, as inferred from array observations of microtremors and aftershocks *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 1, 448-465.

Malagnini, B., L., Rovellii, A., Hough, S., E., Seeber, L., 1993. Site amplification estimates in the Garigliano Valley, Central Italy, based on dense array measurements of ambient noise, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 6, 1744-1755.

Okada, H., 1997. *A new method of underground structure estimation using microtremors, Division of earth and planetary sciences, Hokkaido University, Sapporo, Japan.*

Okada, H., 2004. *The Microtremor Survey Method, Society of Exploration Geophysicists, Geophysical Monograph Series.*

Okada, H., 2006. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method, *Exploration Geophysics*, **37**, 73-85.

Roberts, J., Asten, M., 2005. Estimating the shear velocity profile of Quaternary silts using microtremor array (SPAC) measurements, *Exploration Geophysics*, **36**, 34-40.

Roberts, J., Asten, M., 2008. A study of near source effects in array-based (SPAC) microtremor surveys, *Geophys. J. Int.*, **174**, 1, 159-177.

Saenger, E., H., Torres, A., Rnetsch, S., Lambert, M., Schmalholz, M., S, 2007. A hydrocarbon microtremor survey over a gas field: Identification of seismic attributes, *SEG/San Antonio Annual Meeting.*

Sorensen, C., Asten M., 2007. Microtremor methods applied to groundwater studies, *Exploration Geophysics*, **38**, 125-131.

Tokeshi, J., C., Karkee, M., B., Sugimura, Y., 2006. Reability of rayleigh wave dispersion curve obtained from f-k spectral analysis of microtremor array measurement, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**,163-174.

Udwadia, F., E., Trifunac, M. D., 1973. Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **63**, 1227-1253.

Wathelet, M., Jongmans, D., Ohrnberger, M., 2005. Direct inversion of spatial autocorrelation curves with Neighborhood Algorithm, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 1787-1800.

Xia, J., Miller, R., D., Park, C., B., 1999. Estimation of near- surface shear wave velocity by inversion of Rayleigh Waves, *Geophysics*, **64**, 691-700.

Yaramancı, U., 1984. *Jeofizik'te Stokastik Modelleme, İTÜ Maden Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, Yayın No:10.*

Yüzer, E. ve Eyüboğlu, R., 1998. Kentsel yerleşim planlamasında genelleştirilmiş bir mühendislik jeolojisi yaklaşımı (Avcılar-İstanbul), Kentleşme ve Jeoloji Sempozyumu, Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Avcılar Belediye Başkanlığı, İstanbul, 233-248.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İstanbul’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini tamamladıktan sonra 2000 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü’nde lisans ve 2002 yılında aynı fakültenin Maden Mühendisliği Bölümünde yandal eğitime başladı. Aynı yıl, Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi İşletme Bölümü lisans programında okumaya başladı. 2005 yılında Jeofizik Mühendisliği Diploması ve Maden Mühendisliği Yandal Programı Sertifikasını kazanarak İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitime başladı. 2006 yılından bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Halen İşletme Bölümü son sınıf öğrencisidir.