



Çok-kanallı yüzey dalgası analizi kullanılarak yüzeye-yakın yapıların araştırılması

Investigation of near-surface structures using multi-channel analysis of surface waves

Çağrı ÇAYLAK, Coşkun SARI

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü,
35160 Tınaztepe Yerleşkesi, Buca, İZMİR

Geliş (received) : 11 Nisan (April) 2008
Kabul (accepted) : 21 Temmuz (July) 2008

ÖZ

Bu çalışmada, sığ yeraltı yapılarının incelenmesinde Rayleigh tipi yüzey dalgalarının dispersif özelliğinden yararlanılmıştır. Yüzey dalgaları, diğer tüm sismik dalga türleri arasında en güçlü enerjiye ve en yüksek sinyal/gürültü oranına sahiptir. Çok-kanallı yüzey dalgası analizi sonuçlarının doğruluğu, veri eldesinde kullanılan sismik kaynak, yakın açılım, jeofon aralığı ve jeofon frekansı gibi parametrelere bağlıdır. Yüzey dalgası analizinin yapı ve ortam kesirimindeki başarısı ve uygun parametre seçimi Magnesia antik kentinde yapılan arazi çalışmasında gerçekleştirilen deneme ölçüleriyle irdelenmiştir. Bu çalışmada, 24 kanallı bir sismograf, 4.5 Hz ve 14 Hz olmak üzere iki farklı P jeofonu ve enerji kaynağı olarak da 8 kg'lık bir balyoz kullanılmıştır. Jeofon frekansının değişim etkisini test etmek amacıyla jeofon aralığı sabit tutularak ve farklı yakın açılım uzaklıklarıyla çok-kanallı veri kayıtları elde edilmiştir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde, bir boyutlu yüzey dalgası analizi ve doğrusal olmayan en küçük kareler algoritmasına dayanan ters-çözüm yöntemi kullanılmıştır. Deneme sonuçları; sığ yeraltı yapılarının araştırılmasında yakın açılım uzaklığının jeofon aralığının yaklaşık üç katı olmasının uygun olacağını ve farklı yakın açılım uzaklıkları için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında 14 Hz 'lük jeofon kullanımının sismik kaynak ve jeofon aralığı dikkate alındığında 4.5 Hz 'e göre daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok-kanallı sismik, sığ sismik, yüzey dalgaları.

ABSTRACT

In this study, dispersive characteristics of Rayleigh type surface waves were utilized for the investigation of shallow subsurface structures. The surface waves have the strongest energy among all other types of seismic waves ensuring the highest signal-to-noise ratios. Reliabilities of the results of the multi-channel analysis of surface waves (MASW) depend on seismic source, offsets, and geophone's frequency and intervals during the data acquisition. The success of the structure and medium prediction of the surface wave analysis as well as selection of the appropriate parameters were documented in the field studies at the antique city of Magnesia. In this study, a 24-channel seismograph, two types of vertical component P geophones with frequencies of 4.5 Hz and 14 Hz, and 8-kg sledgehammer as energy source were used. In order to test the effect of the variations of geophone frequencies, multi-channel data records were acquired with different offsets keeping the geophone intervals fixed. One-dimensional (1D) surface wave analysis and the inversion depending on non-linear least-square algorithm were used to evaluate the data. The test results indicate that the offset distance of shallow subsurface structures should be approximately three-times of geophone intervals and 14-Hz geophone is more successful than that of 4.5 Hz considering seismic source and geophone interval for different offset distances.

Keywords: Multi-channel seismic, shallow seismic, surface waves.

GİRİŞ

Yüzeeye yakın malzemelerin elastik özellikleri ve bu özelliklerin sismik dalga hızlarının yayılmasına etkileri; yeraltısuyu araştırmaları ile mühendislik ve çevre uygulamalarında ilgilenilen temel konulardandır. Geleneksel olarak, sıg yeraltı tabakalarının görüntülenmesi için tasarlanan çok-kanallı sismik cisim (V_p ve V_s) dalgalarının incelenmesinde yüzey dalgaları gürültü olarak hesaba katılmaktadır (Steeple ve Miller, 1990). Buna karşın, yüzey dalgaları frekans bağımlı özellikleri nedeniyle yüzeeye yakın malzemelerin elastik özelliklerini belirlemek için kullanılabilir (Park vd., 1998; Xia vd., 2000). Yüzey dalgalarının dispersif özelliklerinden, yaygın olarak, düzlem dalga analizinde S makaslama dalgası hızı profillerinin elde edilmesinde yararlanır.

Sismik dalgalar, yerkürenin yüzeyinde veya yakınında oluştuğu zaman, hem cisim dalgaları (P ve S), hem de yüzey dalgaları (Rayleigh, Love gibi) meydana gelir. Rayleigh dalgaları, P ve SV dalgalarının etkileşiminin bir sonucudur ve P-tipi dalga kaynağı kullanıldığında oluşan toplam sismik enerjinin üçte ikisinden daha fazlasına sahip olmaktadır (Heisey vd., 1982). Rayleigh dalgasının özel bir türü olan “ground roll” dalgası, göreceli olarak, düşük hız, düşük frekans ve yüksek genlikle nitelendirilir ve istenen yansıma sinyallerini maskeleyen eğilimindedir (Sheriff, 1991). Stokoe ve Nazarian (1983) ve Nazarian vd. (1983) yüzeeye yakın S-dalga hız profillerini oluşturmak için “ground roll” dalgalarının frekans bağımlı faz hızı (dispersiyon) eğrilerini analiz eden ve yüzey dalgalarının spektral analizi (SASW) adı verilen bir yüzey dalga yöntemini tanıtmışlardır. Frekans bağımlı faz hızı eğrileri, SASW yönteminde en küçük kareler tekniğini kullanılarak dönüşüme uğrattılır (Stokoe ve Nazarian, 1983; Nazarian vd., 1983). SASW yöntemi geniş çapta bir çok mühendislik projelerinde uygulanmıştır (Sanchez-Salineri vd., 1987; Sheu vd., 1988; Stokoe vd., 1989; Gucunski ve Woods, 1991; Stokoe vd., 1994). SASW 'a alternatif olarak geliştirilen ve bir defada birden fazla alıcı ile kayıt alma avantajını sağlayan yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi (MASW), yüzey dalgalarının spektral analizinde karşılaşılan sorunları gideren hızlı ve güvenilir bir yöntem olarak karşımıza çıkmıştır. Yüzey dalgalarının çok-kanallı analizinde, temel “mod” 'daki

Rayleigh dalgalarının cisim dalgalarından ve diğer “mod” 'daki yüzey dalgalarından ayrılmasını sağlayan çok-kanallı bir dizilim kullanılmaktadır (Park vd., 1999a).

Yeraltında bulunan jeolojik yapıları belirlemede birçok jeofizik yöntem kullanılmaktadır. Bunlar arasında yaygın olarak kullanılan sismik yöntemler, farklı özelliklere sahip tabakalı ortamların kalınlıkları, hızları ve yoğunluklarının hesabından, olası yeraltı jeolojik yapıları saptayabilir. Sismik yöntemler daha çok yatay veya yataya yakın katmanlarda başarılı sonuçlar vermekle birlikte; petrol aramaları, yerkabuğunun derin kısımlarının modellenmesi ve mühendislik jeofiziği uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yüzeeye-yakın yapıların zemin özelliklerinin araştırılmasında kullanılan geleneksel sismik kırılma yönteminin karşılaştığı hız terslenmesi olarak tanımlanan yüksek hızlı bir katmanın altında düşük hızlı katmanın bulunması, hedeflenen nüfuz derinliğine ulaşamaması gibi sorunlardan dolayı yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi (MASW) yöntemi tercih edilmiştir. Yüzey dalgası kaynaklı analiz yöntemleri yeraltındaki jeolojik yapılara ait farklı parametreleri oldukça etkin şekilde belirlemek için günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, aktif çok-kanallı yüzey dalga analizinin çok-sıg derinliklerdeki yapılara uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır. Yöntemin, günümüze değin bu derece çok-sıg derinliklere uygulanmamış olması, uygulanabilirliği açısından eksiklik olarak nitelendirilebilir. Yüzey dalgası analiz yönteminin uygulanabilirliği ve sonucunun doğruluğu, sismik kaynak, yakın açılım, jeofon aralığı ve jeofon frekansı gibi parametrelere bağımlıdır. Bu doğrultuda, ilk olarak uygun parametre seçimi için deneme ölçülerinin yapılması öngörülmüştür. Arazi test çalışmaları, Aydın ili Germencik ilçesine bağlı Menderes Magnesia antik kentinde gerçekleştirilmiştir. Yüzeeye-yakın farklı fiziksel özelliklere sahip yeraltı yapılarının varlığından dolayı Magnesia antik kentinin test ölçüleri için uygun olabileceği düşünülmüştür. Ölçüler, farklı yakın açılım, jeofon aralığı ve jeofon frekansı gibi farklı parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve en uygun sinyal/gürültü oranına sahip veri toplama parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen

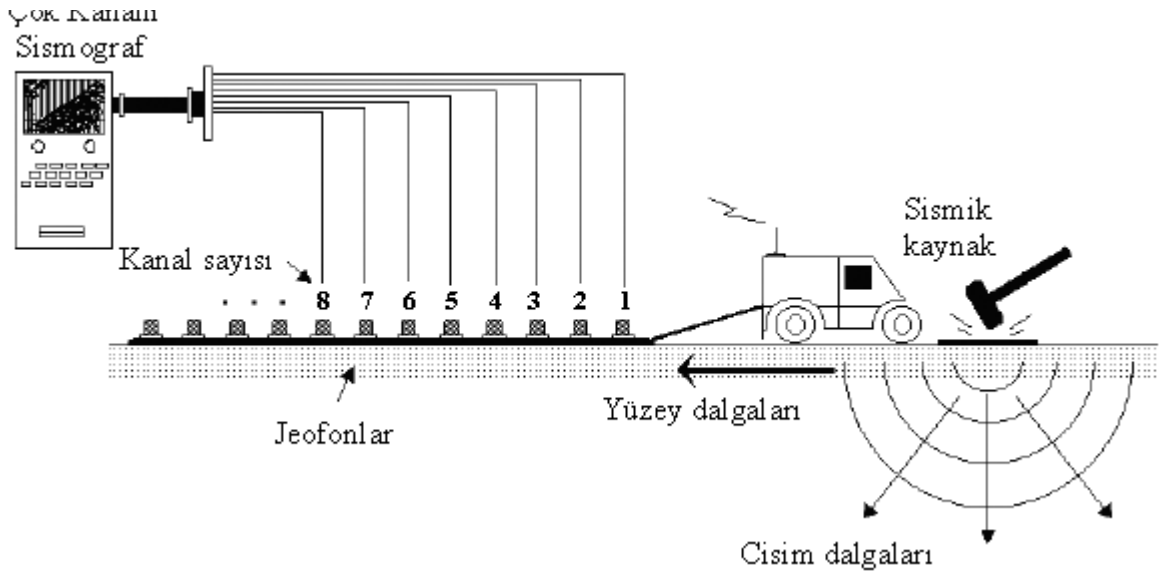
çok-kanallı atış toplulukları, bir boyutlu analiz programı yardımıyla değerlendirilmiştir.

YÜZEY DALGALARININ ANALİZ YÖNTEMLERİ

SASW yönteminin uygulamasında yayılan yüzey dalgalarını kaydetmek için sadece bir alıcı çifti kullanılır (Dobrin ve Savit, 1988). Sismik dalga enerjisi, genellikle, balyoz gibi darbeli bir kaynak tarafından üretilir. Bu nedenle, farklı araştırma derinliklerini kat etmek için denemenin birçok farklı alan düzenekleri (farklı kaynak ve alıcı aralığı) ile tekrarlanması gerekir. Sonuç olarak yöntem, fazla zaman alır ve yoğun işlemler gerektirir. Ayrıca, cisim dalgalarının (doğrudan gelen kırılan ve yansıyan P-dalgaları) ve yüzey dalgalarının yüksek “mod” ’larının varlığından dolayı, kaydedilen verinin olası kirlenmesi fark edilemez ve uygun şekilde kullanılamaz (Bath, 1973). Yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi (MASW) tekniği ise, var olan gürültü de SASW yönteminin eksiklerini gidermek amacıyla geliştirilmiştir (Park vd., 1999a) (Şekil 1). Çok sayıda kaynak kullanılması ve yığma yapılması durumunda esas Rayleigh dalga “modu” baskın olarak elde edilir. Makaslama hızının iki-boyutlu yatay belirtilerini elde etmek için profiller boyunca birçok kayıt alınarak ters-çözümü yapılır.

MASW yöntemi, tabakalı yerküre modeli için Rayleigh dalgasında baskın bir etkisi olan S-dalga hızına dayanır. Dönüşmüş faz hızları ile derinliğe bağlı bir boyutlu S-dalga hızı fonksiyonunu tanımlayan S-dalga hızı profilleri elde edilir. MASW yönteminde, gürültüyü etkili bir şekilde kontrol etmek olasıdır. Bu nedenle, en yüksek sinyal/gürültü oranı sağlanır. Makaslama dalgası hız profiline tam bir veri işlem, yüzey dalgalarının kazancı, frekans bağımlı faz hızı eğrisinin yapılandırılması ve frekans bağımlı faz hızı eğrisinin ters-çözüm işleminden oluşur. Burada dikkat edilmesi gereken husus, makaslama dalgası hız derinlik profilini doğru saptayabilmek için geniş bantlı yüzey dalgalarının en az gürültüyle kaydedilmesidir. MASW yönteminde bant-genişliği, araştırmanın derinliği ve çözünürlüğü artırıldığı zaman yüksek sinyal/gürültü oranı hesaplanan frekans bağımlı faz hızı eğrisinde yüksek doğruluğa neden olur. Daha yüksek “modlu” veri, temel “modlu” veriden daha derin araştırma derinliğine sahiptir. Aynı zamanda, daha yüksek “modlu” veri frekansa ek olarak kaynak uzaklığına bağlı olan dönüşmüş S-dalga hızının çözünürlüğünü artırır.

İlk olarak, standart CDP formatında birkaç çok-kanallı kayıt toplanmalıdır. Yüzey dalga verilerinin elde edilmesi için yüzeyden etkiyen darbe



Şekil 1. Çok-kanallı (MASW) yüzey dalga veri toplama düzeni (Park vd., 1998).

Figure 1. Data collection configuration of multi-channel (MASW) surface waves (Park et al., 1998).

türü kaynaklar için normalde 4 – 5 Hz'den küçük alçak tepki frekanslı alıcılar seçilmelidir. Sismik kaynak, jeofon (alıcı), yakın açılım (ofset), alıcı aralığı gibi veri parametreleri, "Ground roll" dalga sinyallerini arttırmak için ayarlanmalıdır (Park vd., 1999a).

Veri toplanmasından sonra, her bir atış topluluğunun 'ground roll' dalgası faz hızları hesaplanır. 'Ground roll' dalgasının frekans ve faz hız dizileri başlangıç doğrusu boyunca verinin analiz edilerek hesaplanmasını gerektirir. Bu iki dizi, her bir atış topluluğundan frekans bağımlı faz hızı eğrilerini tam olarak çıkarmak için çok önemli bir sınırlamadır (Park vd., 1999a).

Ters-çözüm işlemi, derinlik profiline eş bir S-dalga hızının oluşturulması için her bir frekans bağımlı faz hızı eğrisine uygulanmalıdır (Xia vd., 1999). Dönüşen S-dalga hız profili, jeofon aralığının ortasına yerleştirilmelidir (Miller vd., 1999). Başlangıç modelleri, ters-çözüm işleminin yakınsamasında anahtar bir etkenidir. Regresyon analizi gibi iki boyutlu veri işlem teknikleri ise, bölgesel anomalileri arttırmak için S-dalga hızının düşey kesitine kolay bir şekilde uygulanabilir. 2-boyutlu S-dalgası hız haritasında çatlaklı bölgeler, boşluklar, örtülü dolgu alan sınırları ve benzeri alanlar, düşük hız bölgeleri S-dalga anomalileri ile gösterilirken, ana kaya yüzeyi, genellikle, yüksek S-dalga hız gradyanı ile ilişkilendirilir.

VERİ TOPLAMA PARAMETRELERİ

Bu yöntemde 'ground roll' dalgaları, genellikle, ya balyoz gibi darbe türü bir sismik kaynak ya da titreşim kaynağı kullanılarak oluşturulur. Oluşturulan dalgalar jeofonlar tarafından algılanır, sayısal olarak kaydedilir ve hemen sonra makaslama dalga hız profillerini oluşturmak için işlenir. Kaydedilen verinin işlenmesi, iki aşamadan oluşur. İlk aşamada, uygun çok-kanallı veri-işlem tekniği kullanılarak dispersiyon verisi elde edilir. İkinci aşamada ise ters-çözüm işlemine giriş olarak frekans bağımlı faz hızı eğrisi kullanılır ve S profili oluşturulur. Alan düzeneklerinde, jeofon aralığı (dx), S profilinde çözünürlükle ilişkilendirilir. Daha yüksek çözünürlük, daha küçük dx gerektirir. Jeofon aralığının en büyük araştırma derinliğinin (Zmax) onda bi-

rinden daha küçük olması önerilir (Stokoe vd., 1994).

$$dx \leq 0.1 * Z_{\max} \quad (1)$$

Kaynak ve birinci jeofon arasındaki ilk yakın açılım (dx1) ve birinci jeofon, yakın-alan etkilerinden kaçınmak için aşağıdaki koşulun sağlanması gerekir (Stokoe vd., 1994).

$$dx_1 = 0.5 * Z_{\max} \quad (2)$$

Alicıların birinci ve sonuncu jeofon arasındaki uzaklık olarak verilen toplam yayılım uzunluğu (X), aşağıdaki koşula dayanılarak hesaplanır (Nazarian vd., 1983).

$$X \geq Z_{\max} \quad (3)$$

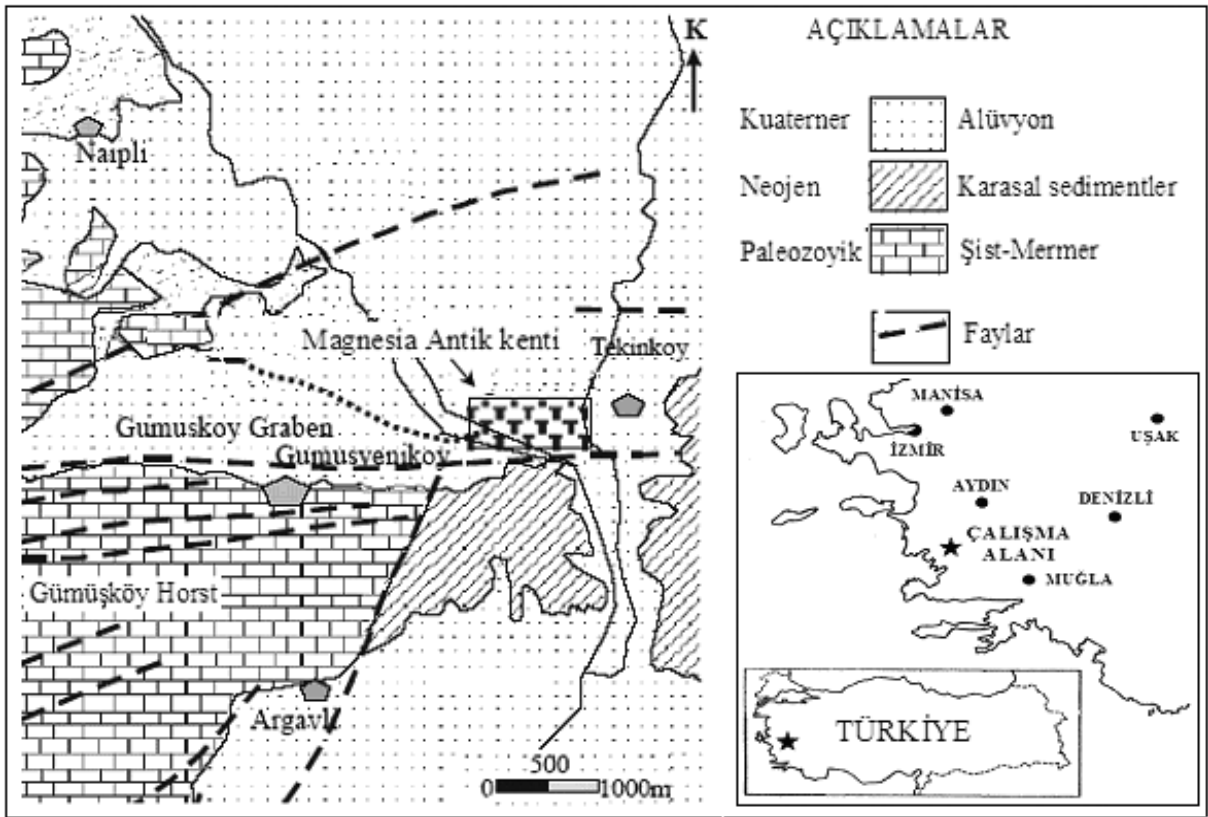
Öngörülen araştırma derinliği için, sismik kayıtçı kanallarının toplam sayısı N, en az X / dx kadar olmalıdır.

$$N \geq X / dx \quad (4)$$

Burada, N, X / dx 'den daha küçük olursa, Zmax'dan daha büyük olan alıcılarla kat edilen toplam yüzey uzaklığı için daha fazla alıcı konum değişimi gereklidir. Bu anlamda her zaman çok-kanallı bir sismik kayıtçı tercih edilmelidir. En yakın kaynak-jeofon ofset aralığı araştırma derinliğinin yarısı kadar seçilir (Park vd., 1999b).

İNCELEME ALANININ TANITIMI

Menderes Magnesiası; Aydın ili, Germencik ilçesi Ortaklar kasabasına bağlı Tekin Köy sınırları içinde, Ortaklar-Söke karayolunun üzerinde yer almaktadır (Şekil 2). Kent, anlatılan efsane ve antik kaynaklara göre, Thessalia'dan gelen ve Magnetler olarak adlandırılan bir kavim tarafından kurulmuştur. Kent; sur ile çevrili, yaklaşık 1.5 km çapında bir alanı kapsayan, izgara planlı cadde ve sokak sistemine sahiptir ve Priene, Ephesos ve Tralleis üçgeni arasında ticari ve stratejik açıdan önemli bir konuma sahiptir. Menderes'in sürekli yatak değiştirip taşması sonucu oluşan salgın hastalıklar ve Perslere karşı daha emin bir kent kurma zorunda kalmaları nedeniyle Magnetler, M.Ö. 400 yıllarında kenti



Şekil 2. Çalışma alanının jeolojik haritası (Erişen vd., 1996 'dan değiştirilerek alınmıştır).
Figure 2. Geological map of the study area (modified from Erişen et.al, 1996).

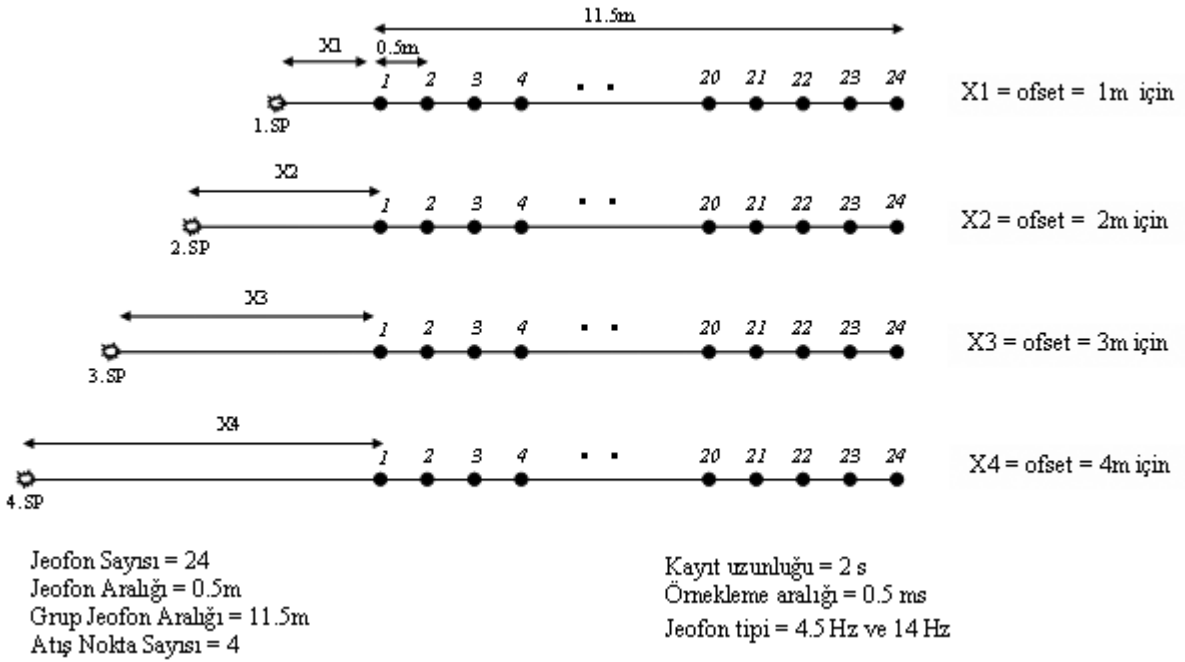
bugünkü yerinde, Gümüşçay'ın yanında yeniden kurmuşlardır. Magnesia antik kenti insan kaynaklı fazla yıkım ve tahribata uğramamıştır. Bunda akarsuların ve Gümüş Dağı'ndan inen yağmur sularının getirdiği milin kenti örtmesinin de payı yüksektir. Ancak, M.S. 17'de yıkıcı bir deprem geçirdiğinden önemli oranda zarar görmüştür (Bingöl, 2005).

Jeolojik açıdan, bölgede temeli Paleozoyik yaşlı Menderes Masifi'ne ait kayalar oluşturur. Bu kayalar gnays, şist, metakuarsit ve şistler içinde bulunan mermer mercleklerinden oluşur. Menderes Masifi'ne ait bu metamorfik temel kayaların üzerinde çakıltası, kumtaşı, çamurtaşı ve kiltası araldanmasından oluşan Tersiyer (Alt Pliyosen-Üst Pliyosen) yaşlı kırıntılı çökeller uyumsuzlukla yer alır. Kuaterner yaşlı alüvyon ve yamaç molozu birimleri yöredeki en genç oluşuklar olup, tüm birimleri uyumsuzlukla örteler (Filiz vd., 1999).

YÖNTEMİN UYGULANMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yüzey dalgalarının çok-kanallı analiz (MASW) yöntemi için yapılan bu arazi çalışmasında, kırılma yönteminde kullanılan standart kayıtçılar ve jeofonlar kullanılmıştır. Alıcı olarak; 24 adet 4.5 Hz ve 14 Hz'lük P (düşey-bileşenli) jeofonu, kaynak olarak 8 kg 'lık bir balyoz ve demir plakanın kullanıldığı bu çalışmada, her bir atış istasyonunda sinyal/gürültü oranını arttırmak için ardarda 5 vuruş gerçekleştirilmiştir.

Veri toplama alan geometrisi Şekil 3'de gösterilmiştir. Burada, jeofonlar (alıcılar), eşit aralıklarla bir platform şeklinde sabit olarak yerleştirilmiştir. Jeofon aralığı 0.5 m, jeofon yayılım uzunluğu (ilk jefondan son jefona uzaklık), 11.5 m'dir. Yakın açılım uzaklığı, 1, 2, 3 ve 4 m olarak değişim göstermekte olup, her iki farklı frekansa sahip (4.5 Hz ve 14 Hz) jeofonlar için dörder olmak üzere 8 noktada ölçü alınmıştır. Kayıtlarda, kayıt



Şekil 3. Veri toplama geometrisi.
 Figure 3. Data acquisition geometry.

uzunluğu 2 s, örnekleme aralığı 0.5 ms seçilmiştir. SEG2 formatında Geometrics Smartseis Sismografi kullanılarak kaydedilen sismik kesitlerin yorumlanmasında, ters-çözüm işlemine doğrusal olmayan en küçük kareler algoritmasına dayanan, bir boyutlu yüzey dalga çok-kanallı analiz yazılımı kullanılmıştır.

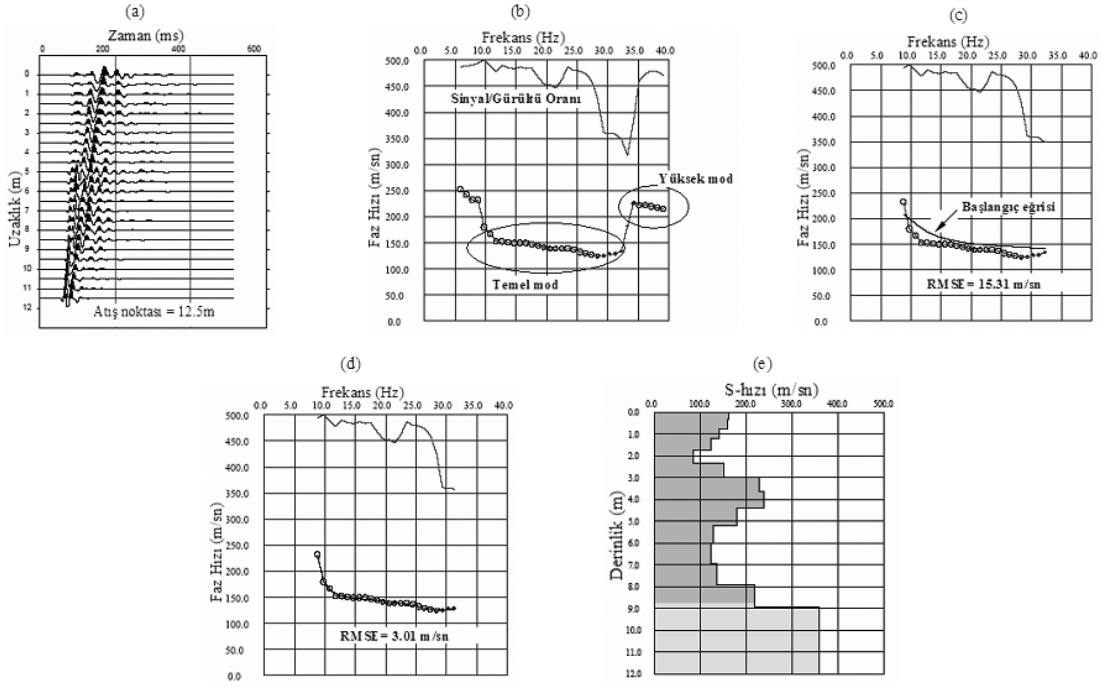
Arazi çalışmasında kullanılan kaynak, jeofon grup aralığı ve yakın açılım (ofset) uzaklığına bağlı etkin araştırma derinliği, en yüksek 10 m ile sınırlandırılmaktadır. Değerlendirmeler, araştırma derinliğinin jeofon grup aralığının yaklaşık yarısı kadar derine nüfuz edeceği düşünülerek irdelenmiş ve alan kayıtlarında herhangi bir süzgeçleme işlemi uygulanmamıştır. Şekil 4'de atış nokta yerleri ve atış grupları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Her bir ölçü noktası için elde edilen çok-kanallı alan atış kayıtları, normal bir veri işlem sürecinden geçirilmiştir. İlk olarak, atış kaydı (Şekil 5a) temel "mod" frekans bağımlı faz hızı eğrisini çıkarmak için frekans bağımlı faz hızı eğrisine (f-k dönüşümü) dönüştürülmüştür (Şekil 5b). Frekans bağımlı faz hızı eğrisinde daha yüksek "modlar" ve sinyal/gürültü oranına bakılarak saptanan düşük kaliteli veriler çıkartılarak ters-çözüm için temel "mod" frekans bağımlı faz hızı

eğrisi belirlenmiştir. Temel "mod" frekans bağımlı faz hızı eğrisi referans olarak alınmış ve bir başlangıç eğrisi (yapay model) oluşturulmuştur (Şekil 5c). Bu başlangıç ve ölçülen model eğriler, en küçük kareler algoritması ile yinelenmeli olarak en küçük hata içerisinde kesiştirilmiştir (Şekil 5d). Sonuçta, zeminin fiziksel özelliklerini temsil eden derinliğe bağlı bir boyutlu S hız profili ve derinlik parametreleri belirlenmiştir (Şekil 5e, 6 ve 7).

SONUÇLAR

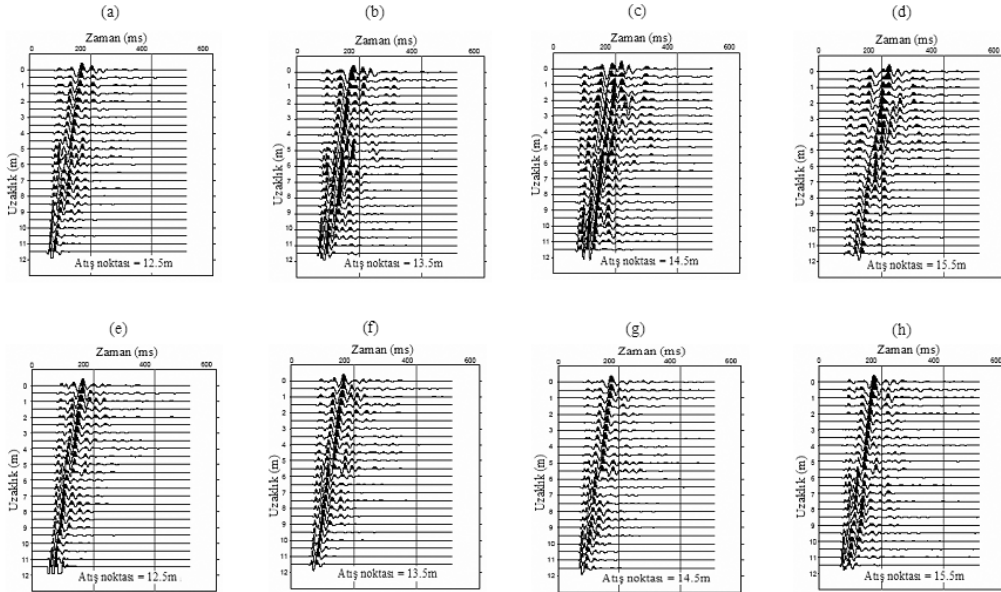
Çok-kanallı yüzey dalgası analizi yönteminin siğ yeraltı yapılarına uygulanabilirliği ve uygun parametre seçimi, Magnesia antik kentinde yapılan arazi çalışmasında deneme ölçüleriyle irdelenmiştir. Yöntemde, Rayleigh dalgasının frekans bağımlı faz hızı değişimi nedeniyle nüfuz derinliğinin dalga boyuna bağımlı olması ilkesinden ve veri-işlem aşamasında da Fourier dönüşümlerinden yararlanılmıştır.

Bu çalışmada, sabit jeofon aralığıyla farklı yakın açılımlar kullanılarak, her iki jeofon frekansı için ortamın S-dalgası hızı değişimleri saptanmıştır. Bir boyutlu makaslama hızı profilleri nü-



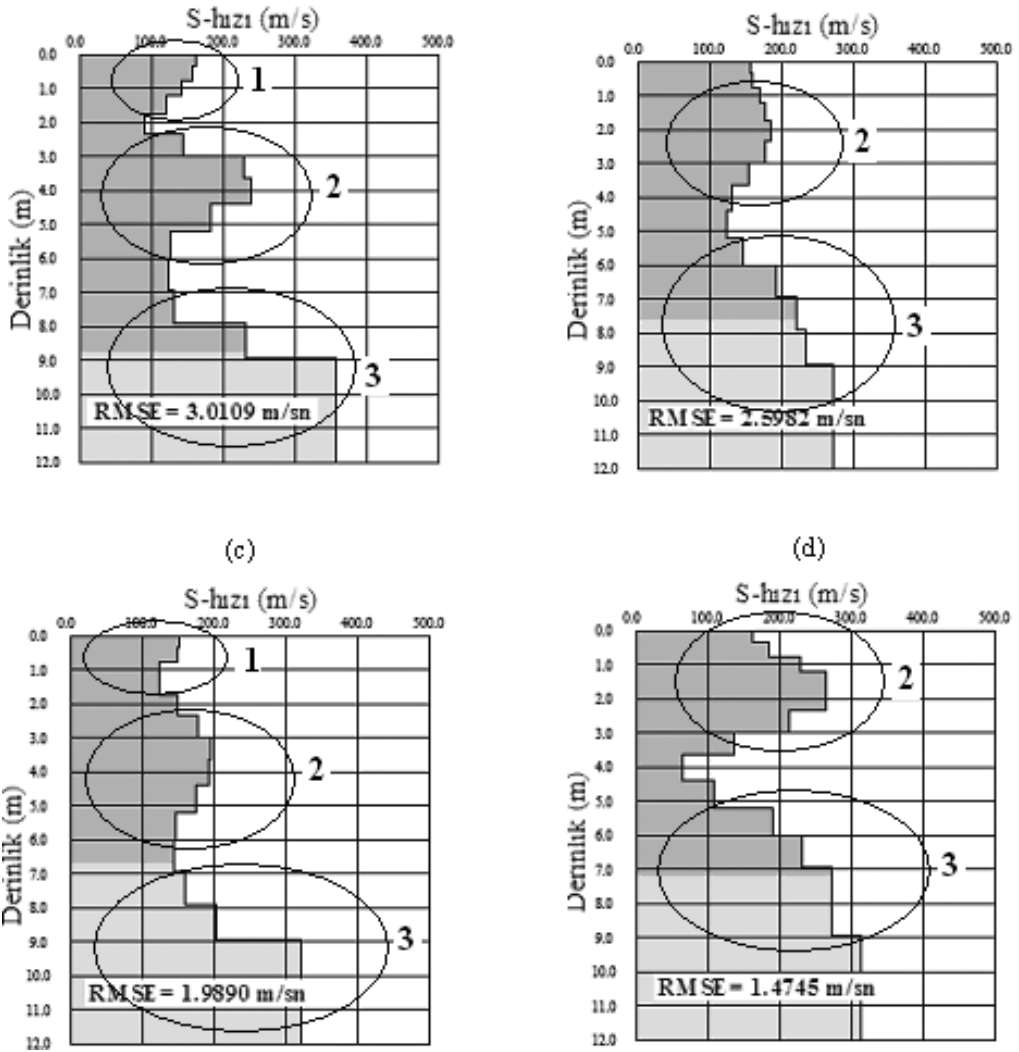
Şekil 4. Alan atış kayıtları: 4.5 Hz jeofon için (a) yakın açılım = 1 m, (b) 2 m, (c) 3 m, (d) 4 m; 14 Hz jeofon ile (e) ofset = 1 m, (f) 2 m, (g) 3 m, (h) 4 m.

Figure 4. Field shot records: (a) offset=1 m, (b) 2 m, (c) 3 m, (d) 4 m obtained from 4.5 Hz geophones; (e) offset = 1 m, (f) 2 m, (g) 3 m, (h) 4 m obtained from 14 Hz geophones.



Şekil 5. (a) Yakın açılım = 1 m (1. profil) için 24 kanallı 4.5 Hz jeofon kullanılarak elde edilen atış kaydı, (b) ölçülen verinin dispersiyon eğrisi, (c) yapay başlangıç ve ölçülen dispersiyon eğrileri, (d) final dispersiyon eğrisi ve (e) S-dalgı hız profilinin derinlikle değişimi.

Figure 5. (a) offset = 1 m (1st profile), shot record obtained from 24 channel 4.5 Hz geophones, (b) dispersion curve of measured data, (c) synthetic initial and measured dispersion curves, (d) final dispersion curve, and (e) S-wave velocity profile variation with depth.

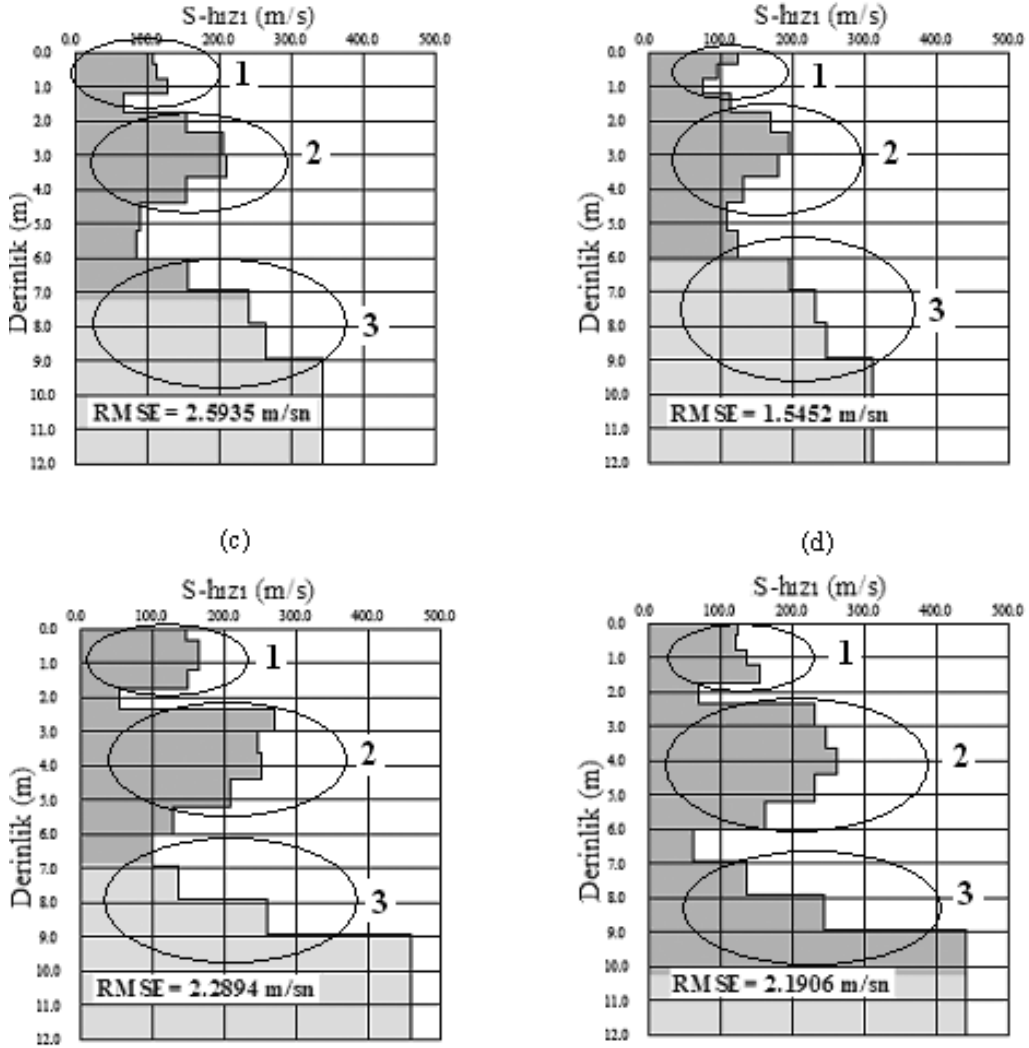


Şekil 6. 4.5 Hz jeofon kullanılarak elde edilen VS'nin derinlikle değişimi: (a) yakın açılım =1m, (b) 2m, (c) 3m, (d) 4m (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).

Figure 6. Variations of VS with depth obtained from 4.5 Hz geophones: (a) offset = 1m, (b) 2m, (c) 3m, (d) 4m (1: Soil cover, 2: Archeological material, 3: Basement rock).

fuz etki derinliği dikkate alınarak incelendiğinde, ilk 8 m'lik derinlikte Vs 100 ile 350 m/s arasında değişmektedir. 4.5 Hz jeofon kullanılarak toplanan veri kayıtları işlendiğinde, farklı yakın açılım değerleri için elde edilen S-dalgası hızının derinlikle değişimi birbirleriyle uyuşmamıştır. Farklı yakın açılım değerleri için, 14 Hz jeofon kullanılarak elde edilen S-dalgası hızının derinlikle değişim sonuçları ise 4.5 Hz'e göre birbirleriyle daha uyumludur. Örneğin, tüm yakın açılımlarda, 3 m derinlikte yaklaşık 250 m/s, 6 m için 150 m/s S-dalgası hız değeri saptanmıştır. Bu değişimler, farklı birimlerin arasın-

daki geçişler olarak nitelendirilebilir. Bunun yanı sıra, Vs'nin derinlikle değişim değerleri, 14 Hz jeofon kullanımının 4.5 Hz'e göre birim geçişlerinin ortaya çıkarılmasında daha başarılıdır. 14 Hz jeofon frekansı ile bu derinlikler için daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir ve bu sonuçlara bakılarak yorum yapılması daha uygun olacaktır. S-dalgası hızlarının derinlikle değişim sonuçları incelendiğinde, yüzeyden 2 m'lik derinliğe kadar toprak örtüsü, 2 ile 6 m arası arkeolojik malzeme ve 6 m'den sonra daha sıkı ve sert malzemeden oluşan ana kaya olarak adlandırılacak üç farklı birim



Şekil 7. 14 Hz jeofon kullanılarak elde edilen VS hızının derinlikle değişimi: (a) yakın açılım =1m, (b) 2m, (c) 3m, (d) 4m (1: Toprak örtüsü, 2: Arkeolojik malzeme, 3: Anakaya).

Figure 7. Variations of VS with depth obtained from 14 Hz geophones: (a) offset =1m, (b) 2m, (c) 3m, (d) 4m (1: Soil cover, 2: Archeological material, 3: Basement rock).

ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, yakın açılımın jeofon aralığının yaklaşık üç katı olduğu durumda, verilerde sinyal/gürültü oranı daha yüksektir ve S-dalgası hızı daha belirgin bir değişim göstermektedir. Ölçülen ve hesaplanan frekans bağımlı faz hızı eğrilerine uygulanan ters-çözüm işlemi sonucunda bunlar arasında iyi bir çakışma sağlanmış olup, karekök (rms) hata 1.47 ile 3 m/s arasında değişmektedir.

MASW yöntemi; sismik kırılma, yansıma, kuyu içi, kuyuda yapılan ölçümler, tomografi ve sondaj çalışmalarına göre çok daha hızlı ve etkin

bir şekilde kullanılabilir. Yöntem, günümüzde pek çok zemin (jeoteknik, mikro bölgelendirme, mühendislik jeofiziği amaçlı) yapısının ve kayma dalga hızının (V_s) saptanmasında etkili bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Buna göre; ölçüm alma, alınan ölçümlerin sonuçlarının kolay ve kısa zamanda değerlendirildiği çok-kanallı yüzey dalga analizi yöntemi, arkeolojik alanlar da dahil olmak üzere, kentsel alanlarda sığ yeraltı yapılarının araştırılmasında yaygın olarak kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, Ö. Arda İşçi ve H.Aslıhan Çelik (Dokuz Eylül Üniversitesi)'e arazi çalışmalarındaki yardımlarından dolayı ve ayrıca yayının son şekline gelmesinde önemli katkılarından dolayı Mahmut G. Drahor ve Gökhan Göktürkler (Dokuz Eylül Üniversitesi)'e teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Bath, M., 1973. Introduction to the Theory of Seismology. A Halsted Press Book, Birkhauser Verlag, Basel.
- Bingöl, O., 2005. Menderes Magensiası/Magnesia on the Meander: Theatron. Homer Yayınları, İstanbul.
- Dobrin, M.B., and Savit, C.H., 1988. Introduction to Geophysical Prospecting. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Erişen, B., Akkuş, İ., Uygur, N., and Koçak, A., 1996. Turkish Geothermal Inventory. MTA General Directory, Ankara.
- Filiz, Ş., Tarcan, G. ve Gemici, Ü., 1999. Germencik (Aydın) jeotermal alanlarının hidrojeo- kimyasal açıdan incelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 1 (1), 41-64.
- Gucunski, N., and Wood, R.D., 1991. Instrumentation for SASW testing, Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics, S. K. Bhatia and G. W. Blaney (eds.), American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication. No. 29, pp. 1-16.
- Heisey, J.S., Stokoe II, K. H., and Meyer, A. H., 1982. Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves. Transportation Research Research Record No. 852, 22-31.
- Miller, R.D., Xia, J., and Park, C.B., 1999. Using MASW to map bedrock in Olathe, Kansas. Open-file Report-Kansas Survey 99-9.
- Nazarian, S., Stokoe, K.H., and Hudson, W.R., 1983. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. Transportation Research Record, 930, 38-45.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1998. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. The Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts , pp. 1377-1380.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1999a. Multi-channel analysis of surface waves (MASW). Geophysics, 64, 800-808.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., Hunter, J.A., and Harris, J.B., 1999b. Higher mode observation by the MASW method. The Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, pp. 524-527.
- Sanchez-Salintero, I., Roesset, J.M., Shao, K.Y., Stokoe II, K.H., and Rix, G. J., 1987. Analytical evaluation of variables affecting surface wave testing of pavements. Transportation Research, 1136, 86-95.
- Sheriff, R.E., 1991. Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. Third edition, Society of Exploration Geophysicists.
- Sheu, J.C., Stokoe II, K.H., and Roesset, J.M., 1988. Effect of reflected waves in SASW testing of pavements: Transportation Research, 1196, 51-61.
- Steeple, D.W., and Miller, R.D., 1990. Seismic-reflection methods applied to engineering, environmental, and groundwater problems. The Society of Exploration Geophysicists. Investigations in Geophysics, 5, S.H. Ward (ed.), 1: Review and Tutorial, 1-30.
- Stokoe II, K.H., and Nazarian, S., 1983. Effectiveness of ground improvement from spectral analysis of surface waves. Proceeding of the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Finland.
- Stokoe II, K.H., Rix, G.J., and Nazarian, S., 1989. In-situ seismic testing with surface wave. Proceedings of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, pp. 331-334.

- Stokoe, K.H., II, Wright, G.W., James, A.B., and Jose, M.R., 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. In: Geophysical Characterization of Sites, R.D. Woods, (ed.), Oxford Publishers, New Delhi.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A., and Harris, J. B., 1999. Evaluation of the MASW technique in unconsolidated sediments. Proceedings of the 69th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, pp. 437–440.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 2000. Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes. The Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, pp. 1295–1298.

