

Yansıma ve Yüzey Dalgaları Metotları ile İnsan Yapımı Tünel Yerinin Bulunması, SDÜ Kampüs Örneği-Isparta

Mehmet Zakir KANBUR*, Ali SİLAHTAR, Can ÖZSOY

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü/ ISPARTA
Alınış Tarihi:06.05.2011, Kabul Tarihi:23.08.2011

Özet: Yer altında konumu bilinen bir tünel yapısının yerini belirlemek için sismik tekniklerle bir test çalışması yapılmıştır. Eni ve yüksekliği yaklaşık 1.9x2.0 m boyutlarında olan tünel Süleyman Demirel Üniversitesinin kampüs alanı içerisinde, kalorifer, doğalgaz boruları ve elektrik kablolarının muhafazası için yer altında inşa edilmiş ve yaklaşık 1.7 m derinlikte alüvyon altında bulunan bir yapıdır. Tünelin lokasyon tespiti için yansıma, MASW ve ReMi gibi sığ sismik teknikler uygulanmıştır. Yüzey dalgası yöntemleri olan MASW ve ReMi' den elde edilen S dalgası hız kesitleri ile sığ sismik yansıma kesiti karşılaştırılarak tünelin bilinen konumu belirlenmiştir. Hız değişimine karşı duyarlı olan MASW ve ReMi tekniklerine ait kesitlerin yorumu, alanda başka bozucu yapıların varlığı durumunda, güçleşmektedir. Bununla birlikte, yansıma kesiti ile birlikte değerlendirildiğinde bu güçlük ortadan kalkmakta ve lokasyon tespiti kolaylaşmaktadır. Sonuç olarak bu çalışmayla sığ sismik yansıma, MASW ve ReMi yöntemlerinin bir arada kullanılması durumunda yer altı boşluklarının konumlarının güvenilir bir şekilde belirlenebileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sığ sismik yansıma, Yüzey dalgaları, MASW, ReMi, Dispersiyon.

Determination of Shallow Manmade Tunnels by Reflection and Surface Wave Methods, an Example of SDU Campus, Isparta

Abstract: To determine the known location of a human made tunnel, a shallow seismic survey was performed. The tunnel, about 1.9x2.0 m in dimension, is a structure that was built for covering the electric cables, gas and central heating pipes, and located underground about 1.7 m in Suleyman Demirel University campus. To determine the location of the tunnel, the seismic techniques, shallow reflection, MASW, and ReMi was performed. The known location was determined by comparison the shallow seismic reflection section and the S-wave velocity sections obtained by surface wave techniques, The interpretation of the sections obtained from MASW and ReMi that are sensitive to velocity variations became difficult when there are other corruptive objects at surroundings. However, the location may be determined easily if reflection section obtained is considered. As a result, it was demonstrated that the known location of a covered tunnel can be determined in case the jointly use of shallow seismic reflection and the surface wave techniques.

Keywords: Shallow seismic reflection, MASW, Surface wave, ReMi, Dispersion.

Giriş

Üst yapı çalışmalarının güvenilir planlanması ve yürütülmesi, yer altı yapısının mühendislik özelliklerinin detaylı bir şekilde ortaya çıkarılmasıyla mümkündür. Eğer çalışma alanı kentsel alanda ise mühendislik yapıları üzerindeki istenmeyen deformasyonlardan kaçınmak için bu planlamaların yapılması yaşamsal önem taşıyabilir. Örneğin yeraltında bulunan doğal ya da yapay boşluklar, üzerlerine inşa edilecek yapılar için çok önemli statik problemlere yol açabilirler ve bir deprem esnasında bu yapının yıkımına neden olabilirler. Dolayısıyla yer altı yapısının her yönüyle ortaya konması özellikle kentsel alanlarda mühendislik çalışmaları için gereklidir. Yerin sığ yapısının mühendislik özelliklerinin ortaya çıkarılması için çeşitli sismik yöntemler geliştirilmektedir. Sismik yansıma kırılma teknikleri yanı sıra yüzey dalgaları analizine dayanan Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (Multichannel Analysis of Surface Waves-MASW) ve Sismik Kırılma-Titreşimcik (Refraction-Microtremor-ReMi) gibi teknikler son zamanlarda öne çıkmaktadır. Sismik yansıma tekniği, yer içinin görüntülenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Teknik son yıllarda yüksek çözünürlük sağlayacak şekilde sığ derinliklerin

görüntülenmesi için de kullanılmaktadır (Yılmaz, 1988; Steeples ve Miller, 1990; Sheriff ve Geldart, 1995). Bu tekniğin temeli, ara yüzeyler arasındaki akustik empedans farklılığından kaynaklanan dalga yansımalarına dayanır. Bu yansımalar bazende düzensiz yüzeylerden kaynaklanan saçılmalar şeklinde olmaktadır. Yansıyan ya da saçılan dalgaların pozisyonlanması ile yer içerisi görüntülenebilmektedir. Sığ yansıma tekniği yorumlamada derine nazaran daha problematiktir ve özellikle kentsel alanlarda gürültünün etkisi oldukça sınırlayıcıdır. Bununla birlikte yer altı bozucu kütlelerinin ortaya çıkarılmasında oldukça etkilidir.

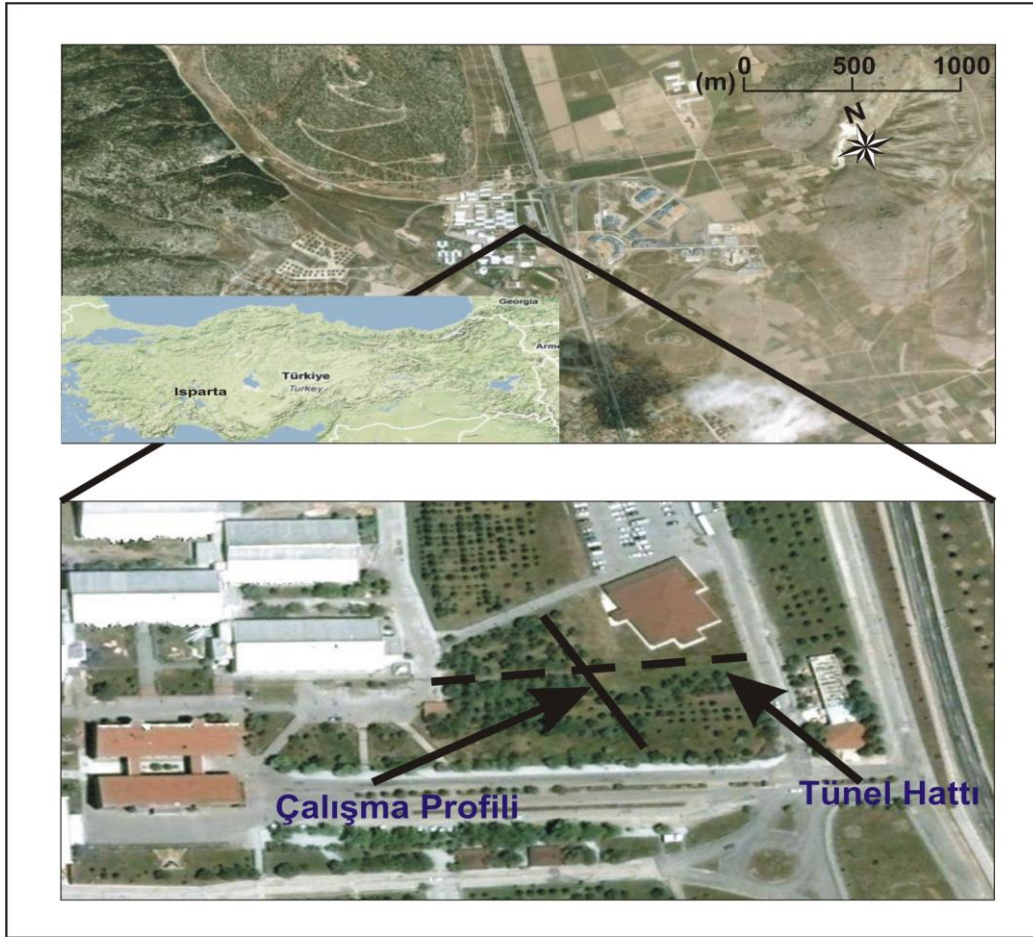
Sığ derinliklerin yapısal özelliklerinin ortaya konmasında geliştirilen yeni tekniklerden biri de yüzey dalgalarının kullanımınıdır. Sığ yer altı tabakalarının görüntülenmesi için üretilen cisim dalgalarının incelenmesinde yüzey dalgaları gürültü olarak değerlendirilmesine karşın, frekans bağımlı (dispersif) özellikleri nedeniyle yüzeye yakın malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılabilir (Nazarian vd.,1983; Stokoe vd.,1994; Park vd.,1998). Bunlardan ReMi (Louie, 2001) ve MASW

(Park vd., 1999) teknikleri son yıllarda geliştirilen tekniklerdir. Bu teknikler esasen yüzey dalgaları dispersiyon özelliğinden yararlanarak yerin sığ kısmına ait (30 m derinlik) ortalama S-dalgası (V_{30}) hız yapısını elde etmek için geliştirilmiş tekniklerdir. Gerek ReMi (Louie, 2001; Kanbur vd., 2008) ve gerekse MASW (Park vd., 1999) bu amaç doğrultusunda oldukça yaygın kullanılan tekniklerdendir. Literatürde, son yıllarda bu tekniklerle yüzeye yakın tünellerin ortaya çıkarılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır (Gucunski vd., 1996; Luke, 1999; Avar ve Luke, 1999; Leparoux vd., 2000; Cardarelli vd., 2002; Guconski ve Shokouhi, 2004; Miller vd., 2006; Putnam vd., 2006).

Yüzey dalgası yöntemleri doğal yapıların jeoteknik özelliklerinin belirlenmesinin yanında şehirleşmeyle birlikte oluşan mühendislik yapılarının da özelliklerini belirlemede geliştirilmiş ve ciddi başarılar göstermiştir. Özellikle tünel gibi yeraltında bulunan boşluklu yapıların tespitinde karşılaşılan zorluklar göze alındığında bu konunun önemi açıkça ortaya çıkmaktadır. Tünellerin

ortaya çıkarılması için yapılacak işlemlerdeki başarı bilinen tünel lokasyonları, çeşitli jeolojik sınıflar ve farklı tünel geometrilerinin karakteristiklerinin incelenmesiyle sağlanmıştır (Miller vd., 2006). Sanz vd. (2007)'de yapılan çalışmada İspanya'daki metro hattının dış cephesinin sağlamlaştırma işlemi için gerekli mühendislik tasarımı yüzey dalgaları analiz yöntemlerinden sadece ReMi tekniğini kullanarak tespit etmişlerdir. Önceki çalışmalara detaylı bakıldığında sismik yansıma, ReMi ve MASW yöntemlerinin bir arada korele edildiği çalışmalara rastlanmamaktadır.

Bu çalışma ile sismik yansıma, ReMi ve MASW yöntemleri bir arada kullanılarak yeraltındaki boşluklu yapıların ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tekniklerin terminolojisine uygun olarak Süleyman Demirel Üniversitesi Kampüsü içerisinde (Şekil 1) bulunan kalorifer, doğalgaz boruları ve elektrik kablolarının bulunduğu tünel için arazi dizaynı yapılmış, duvarları betondan yapılmış tünelin ortaya çıkarılmasına çalışılmıştır.

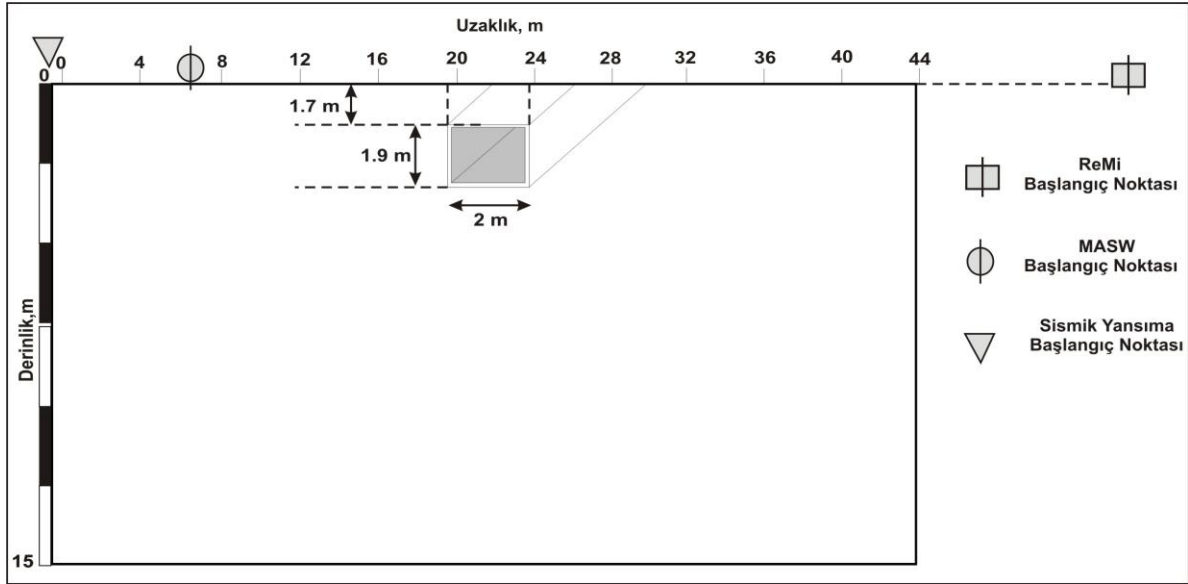


Şekil 1. Çalışma alanı ve çevresinin basitleştirilmiş gösterimi

Materyal ve Metot

Çalışma alanındaki tünelin yer tespiti, sığ sismik yansıma, MASW, ReMi teknikleri kullanılarak incelenmiştir.

Çalışma alanında 1,7 m derinlikte tünel olup, boyutları yaklaşık 1.9x2.0 metredir. Tünelin boyutları ve konumu şematik olarak Şekil 2'de gösterilmiştir. Kullanılan tekniklerin başlangıç noktaları şekil üzerinde belirtilmiştir



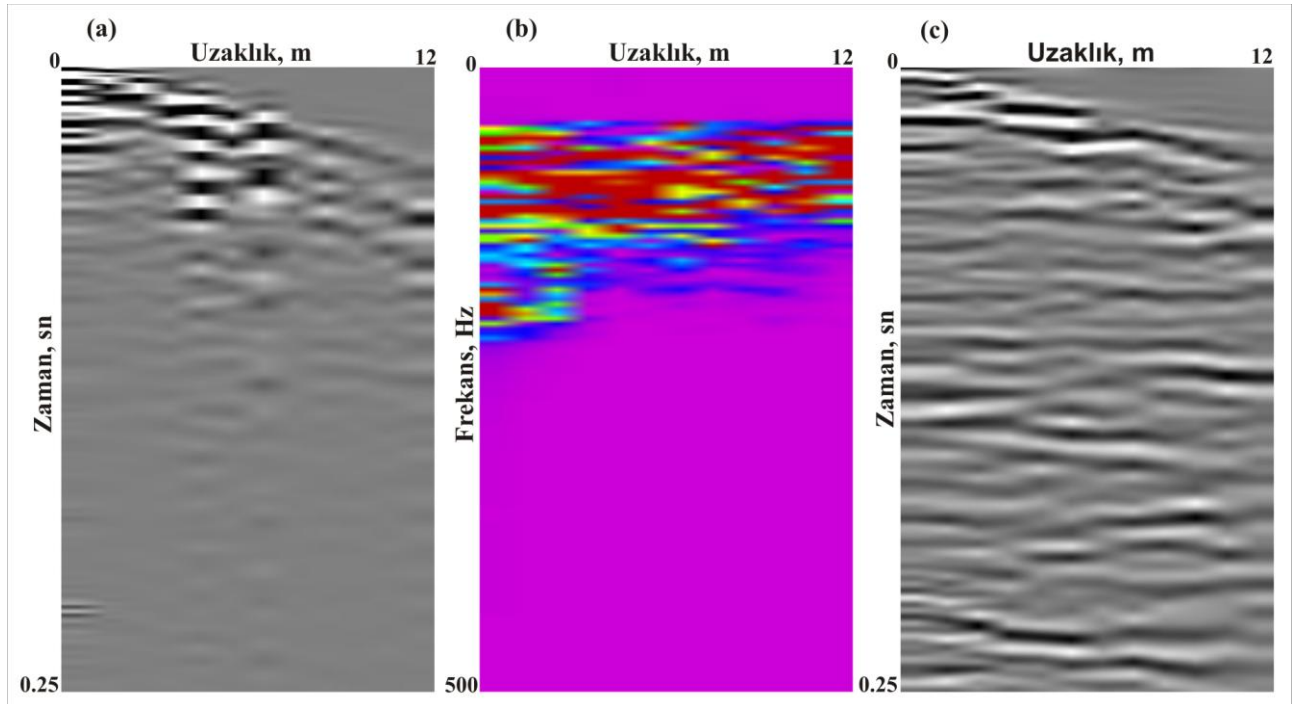
Şekil 2. Çalışma alanı içerisinde profillerin başlangıç noktalarını ve tünel yapısının geometrisinin şematik gösterimi

olup bu bilgi jeofizik tekniklerden elde edilen sonuçların yorumlamasında ve karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Sismik Yansımaya

Sismik yansımaya tekniği özellikle petrol ve gaz aramalarında yer içerisinde görüntülenmesinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tekniğin sığ derinlikler için (<100m) kullanılmasına yüksek çözünürlüklü sismik yansımaya tekniği ismi verilmiştir (Yılmaz 1988; Steeples ve Miller 1990; Sheriff ve Geldart 1995). Bu çalışmada yansımaya tekniği tünel yerinin tespitinde yüzey dalgalarından elde edilen sonuçların korelasyonu için kullanılmıştır.

Yansımaya verisi Şekil 1’de gösterilen profil üzerinde alınmıştır. Toplam 43 atış kaydına ait veri kazanım parametreleri şu şekildedir. 12 adet 100Hz’lik P jeofonu 1 metre aralıklı, minimum ofset 0 ve maksimum ofset 13 m alınmıştır. Balyoz-çelik levha sismik kaynak olarak kullanılmış ve her ofset noktasında 15 vuruş ile 6 katlamalı veri elde edilerek sinyal/gürültü (S/G) oranının yükseltilmesi sağlanmıştır. Şekil 3’de 100 No’lu atış kaydı, güç spektrumu ve filtrelenmiş atış kaydı verilmiştir. Veri kazanımı esnasında yüzey dalgaları ve düşük frekanslı olayların etkilerini minimize etmek için düşük frekans analizi sonucu Şekil 3b’de gösterildiği gibi 15 Hz’den daha düşük frekanslar süzgeçlenmiştir. Profil boyunca toplam 43 adet verinin kayıt boyu 250 ms ve



Şekil 3. a) 100 No’lu sismik yansımaya atış kaydı, b) Atış kaydına ait güç spektrumu, c) Atış kaydının filtrelenmiş gösterimi

örnekleme aralığı 0.125 ms alınmıştır. Verinin amaca uygun yorumlanması için izleyen veri işlemlerin uygulanması yeterli olmuştur. Bu işlemler, genlik kazanımı, bant-geçişli filtre, mute işlemi, zaman kayması düzeltmesi (NMO), hız analizi ve CMP yığma işlemleridir. Kesite ilişkin derinlik ortalama hız göz önüne alınarak verilmiştir.

Yüzey Dalgaları Analizi

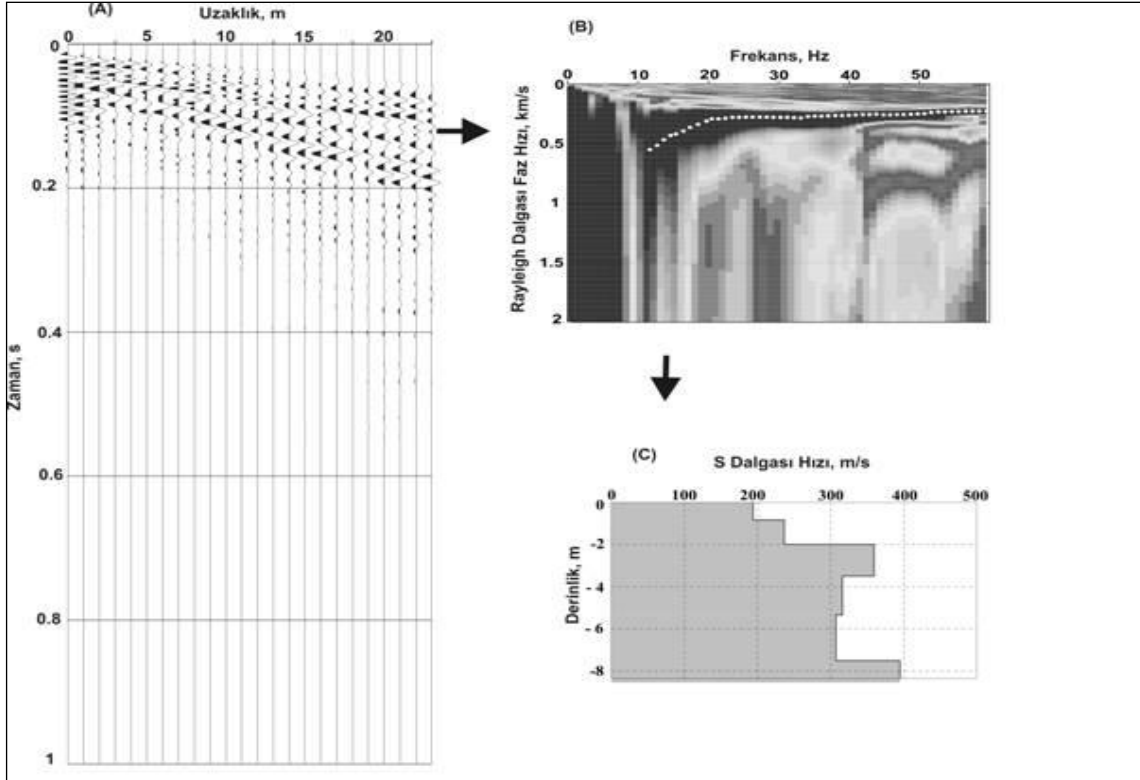
Yüzey dalgaları analizi temel olarak üç safhadan oluşur. Bunlar veri kazanımı dispersiyon analizi ve tabakalı yer modellemesi safhalarıdır. Yüzey dalgaları analizi yeni olmamakla birlikte, güncel olarak arazide veri kazanımı ve işlemlerinde önemli gelişmeler meydana gelmiştir. Konunun tarihi gelişimi geniş bir şekilde Park ve Ryden (2007)'de verilmiştir. Ayrıca Yüzey dalgaları analizine dayanan yer altına ait anomali saptama çalışmaları başarılı bir şekilde yapılmaktadır (Gucunski vd., 1996; Park vd., 1998b; Nasseri-Moghaddam, 2006). Yüzey dalgaları analizi öncelikle iki alıcıyla çalışan yüzey dalgalarının spektral analizi (Spektral Analysis of Surface Waves-SASW) tekniği ile başlamış ve daha da geliştirilerek 24 ve daha fazla jeofon kullanımı ile MASW ve ReMi gibi tekniklerine dönüşmüştür (Park vd., 1999; Louie, 2001). Her iki teknikte yerin jeoteknik özelliklerinin ortaya çıkarılmasında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Temelde benzerlik gösteren bu teknikler arasındaki en önemli fark yüzey dalgasını oluşturacak sismik kaynağın türüdür. MASW sığ derinlikler için aktif bir sismik kaynak gerektirirken ReMi için bu zorunlu değildir ve sismik kaynak olarak çevresel

gürültü kullanılmaktadır. Sadece gürültüyü kullanmak yerleşim merkezlerinde oldukça kullanışlı ve iyi bir alternatif oluşturmaktadır.

Veri kazanımını bilinen sismik kırılma ekipmanı kullanılarak düşey jeofonların doğrusal açılımı şeklinde yapılmaktadır. Hedef derinlik, açılım boyuna ve kullanılan jeofonun maksimum genlik (rezonans) frekansına bağlıdır. Jeofon ve sinyal kaynağı band genişliği ile ilgilidir ve kayıta kaynak sinyal tipini etkilerler. MASW temelde aktif kaynaklı bir tekniktir ve impuls sinyal gerektirir ki yüzey dalgası üretmek için balyoz, ağırlık düşürme, vibrosismik gibi sismik kaynaklar kullanılarak elde edilir. S-dalgası kaynaktan elde edilen Rayleigh dalga alanının temel modundan elde edilir. ReMi tekniği pasif kaynaklı bir tekniktir ve kaynağı çevresel gürültü ve mikro titreşimlerdir. Veri kaydı, bu titreşimciklerin standart sismik kırılma ekipmanı kullanılarak belli bir zaman süresince çizgisel olarak kaydedilmesi şeklindedir. Bu kayda yavaşlılık (hızın tersi)-frekans (p, f) dönüşümünün yapılarak Rayleigh dalgasının diğer dalgalardan ayrılması sağlanır. Her iki teknikte elde edilen Rayleigh dalgasının dispersiyonu, ters çözüm tekniği ile V_s hızlarına ve bu hızlara karşı gelen tabaka derinliklerine dönüştürülür.

MASW için Veri Toplama, İşleme ve Ters Çözüm

Yakın ve uzak ofset ve jeofon aralığı; hedef derinlik ve tabaka kalınlıklarına göre dizayn edilirler. Hedef derinliğin, maksimum dalga boyu kadar ve çözülmesi istenen minimum tabaka kalınlığının da minimum



Şekil 4. (a) 103 numaralı MASW atış kaydı. (b) Bu veriden elde edilen frekans-faz hızı (f, v) spektrumu ve seçilmiş pikler. (c) Dispersiyon eğrisinin belirli bir başlangıç modeli kullanılarak ters çözümü ile V_s hızları ve derinlik (v, z) bilgisi (V_s modellemesi 6 tabaka için yapılmıştır ve çakıştırma hatası tüm kayıtlar için ortalama %2.5 düzeyinde gerçekleşmiştir)

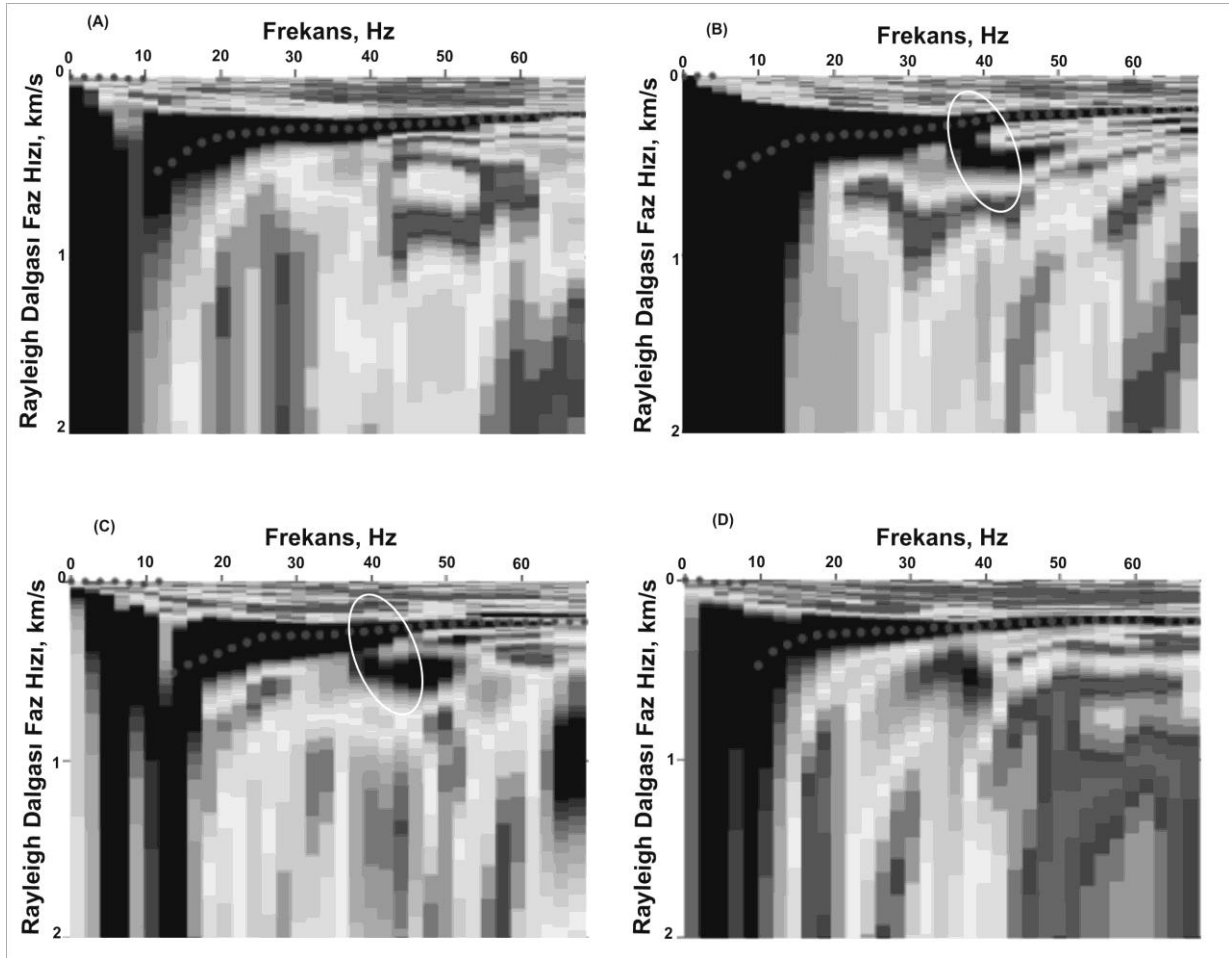
dalga boyu kadar alınması tavsiye edilmiştir (Park vd., 1999). Veri kazanımında, kaynaktan ilk jeofon arasındaki uzaklığı net bir kural olmasa da kayıt içerisinde yakın ofset kirliliğine meydan vermemek için genel olarak maksimum derinliğin %20'si kadar alınması yeterli olacaktır (Park vd., 1999). Arazi düzeneklerinde, jeofon aralığı (Δx), profil boyunca çözünürlükle ilişkilendirilir. Daha yüksek çözünürlük, daha küçük Δx gerektirir. Jeofon aralığının en büyük araştırma derinliğinin (Z_{\max}) onda birinden daha küçük olması önerilir (Stokoe vd., 1994). Alıcıların birincisi ve sonuncusu jeofon arasındaki uzaklık olarak verilen toplam yayılım uzunluğu (X), $X \geq Z_{\max}$ koşuluna dayanılarak hesaplanır (Nazarian vd., 1983).

Bu çalışmada MASW verisi 4.5 Hz'lik düşey bileşenli jeofon kullanılarak 24 kanallı sismografla alınmıştır. 4.5 Hz'lik jeofonlar bir çok araştırmacı tarafından Rayleigh dalgası temel mod dispersiyonunu yüksek kalitede elde etmeye imkan sağlamasından ötürü sıkça kullanılmıştır (Park vd., 1999; 2002; Xia vd., 1999; Stephenson vd., 2005; Tallavo vd., 2008). Jeofon aralığı 1 m, minimum ofset 2 m olarak alınmıştır. Balyoz-çelik levha sismik kaynak olarak kullanılmış ve her ofset noktasında 5 vuruş yapılarak veri toplanmıştır. Veri kazanımı esnasında herhangi bir süzgeç uygulanmamıştır. Hat boyunca (Şekil

2) toplam 24 adet verinin kayıt boyu 1 s ve örnekleme aralığı 0.5 ms alınmıştır.

Şekil 4a'da görülen sismik kayıt yukarıda belirtilen sismik veri kazanım parametrelerine göre elde edilmiştir. Bu veri Şekil 4b'de görüldüğü gibi faz hızı ve frekans ortamına dönüştürülmüştür. Faz ve frekans ortamına dönüştürülen kayıtların dispersiyon eğrilerinin işaretlenmesi S-dalgası hız yapısının doğru ve güvenilir bir şekilde ortaya çıkarılması açısından son derece önemlidir (Şekil 5) Dispersiyon eğrisi faz hızına karşılık frekans değişimi ile gösterilir. Şekil 5a bozucu etkinin çok fazla görülmediği dispersiyon eğrisine örnektir. Bu dispersiyon eğrisi işaretlenirken Rayleigh dalgasının esas modu dikkate alındığında ortaya çıkacak derinliğe bağlı S-dalgası hız yapısı Şekil 4c de görüldüğü gibi elde edilir. Şekil 5b, 5c bozucu etkinin yoğun bir şekilde hissedildiği kayıtların dispersiyon eğrilerindeki işaretlemelere örnek olarak gösterilmiştir.

Ortaya çıkan Rayleigh dalgası dispersiyonunu her bir frekansa karşılık faz hızı şeklinde elde edilir ve ters çözüm tekniği işlemine tabi tutulur. V_s ve tabaka kalınlığı hesaplaması dispersiyon eğrisinin, poisson oranı ve yoğunluğun tahmin edilmesiyle yinelemeli (iteratif) ters çözüm (inversiyon) ile hesaplanır. Ters çözüm işlemleri



Şekil 5. Değişik MASW kayıtlarına ait dispersiyon eğrileri için belirlenmiş dispersiyon eğrileri (a) 103, (b) 108, (c) 112 ve (d), 123 No'lu kayıtlar. c ve d'de elipse işaret edildiği gibi tünele yaklaşıldığında 40 Hz civarlarında hızın arttığı kayıtlardan görülmektedir

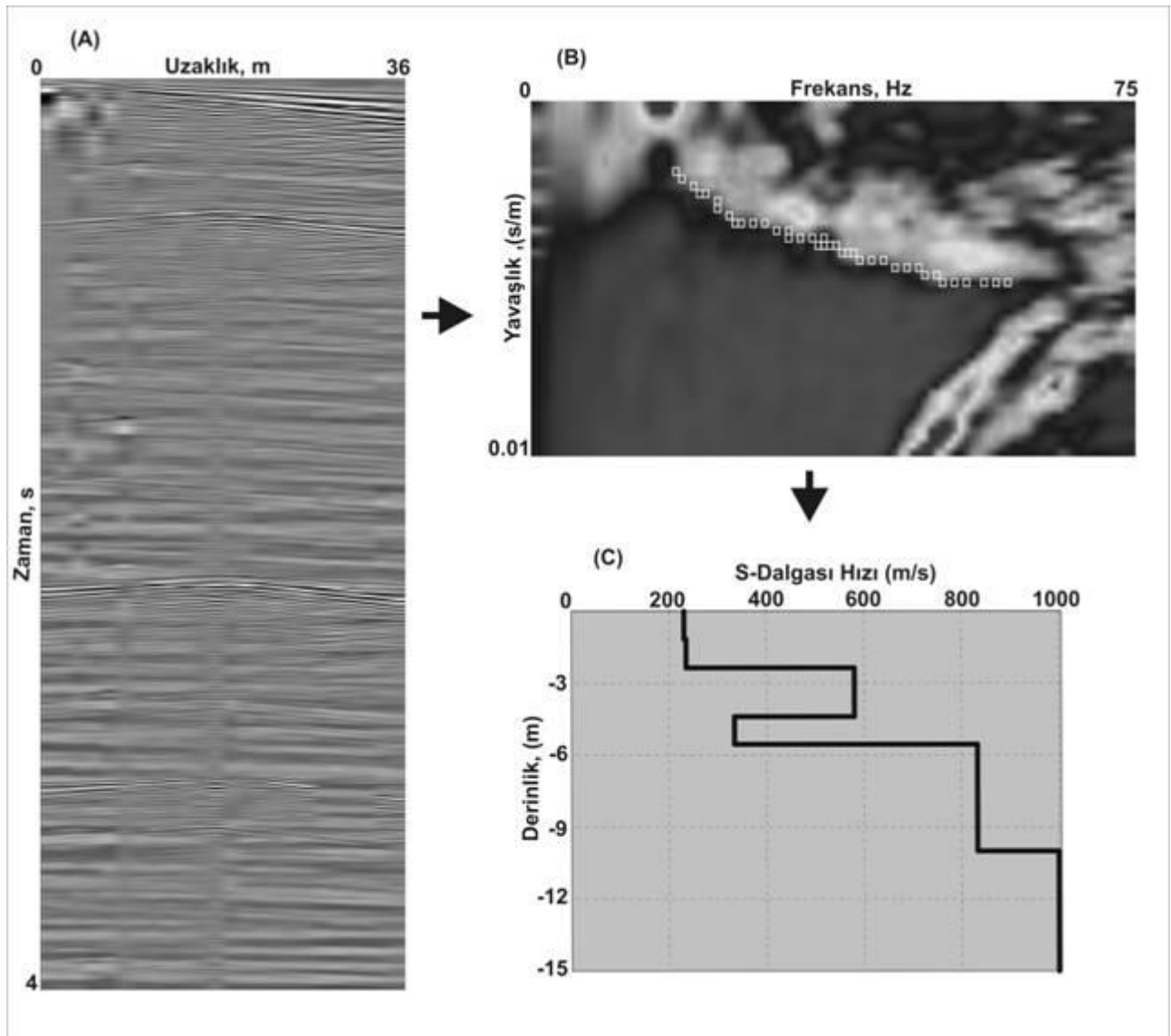
için en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Ters-çözüm işlemi, derinlik profiline eş bir S-dalga hızının oluşturulması için her bir frekans bağımlı faz hızı eğrisine uygulanmalıdır (Xia vd., 1999). Yinelemeli ters çözüm işlemi belirli bir başlangıç modeliyle başlatılır. Yer modeli, hız, yoğunluk ve tabaka kalınlığı parametrelerinden oluşur. Bu çalışmada ölçülen ve hesaplanan faz hızı (frekans bağımlı) eğrilerine uygulanan ters-çözüm işlemi sonucunda %2-3 hata oranıyla iyi çakişmalar gerçekleştirilmiştir.

ReMi için Veri Toplama, İşleme ve Ters Çözüm

ReMi verisi çalışma alanındaki en uzun profile sahip veridir. Amaç MASW 'den elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma yapmak ve göreceli olarak tünelin daha derinlerde (~30 m) ait etkilerini incelemek amaçlı

yapılmıştır. Çalışmada 24 adet 4.5Hz'lik jeofon 1.5 metre doğrusal olarak aralıklandırılmış ve böylece maksimum açılım 34.5 m'ye ulaşmıştır. Maksimum açılım kısa olduğu için 4 sn'lik gürültü kaydı 2ms örnekleme aralığı ile örneklenmiş ve her noktada 3 ayrı kayıt alınarak ReMi spektral oranının yükseltilmesi hedeflenmiştir.

Şekil 6a, elde edilen ReMi kayıtlarından birini göstermektedir. 18 adet gürültü kaydının her birine genlik kazanımı uygulanarak, uzaklık zaman ortamı hız-frekans ortamına dönüştürülerek hız spektrumları hesaplatılmıştır. Elde edilen spektrumlar birleştirilerek tek bir spektrum elde edilmiş ve bu çıktı üzerinde ortaya çıkan dispersiyon eğrisi dikkate alınarak frekansla değişen görünür hızlar elde edilmiştir. Şekil 6b elde edilen dispersiyon eğrisini hız yapısının doğru ve güvenilir bir şekilde ortaya çıkarılması MASW'de olduğu gibi bu yöntemde de önem

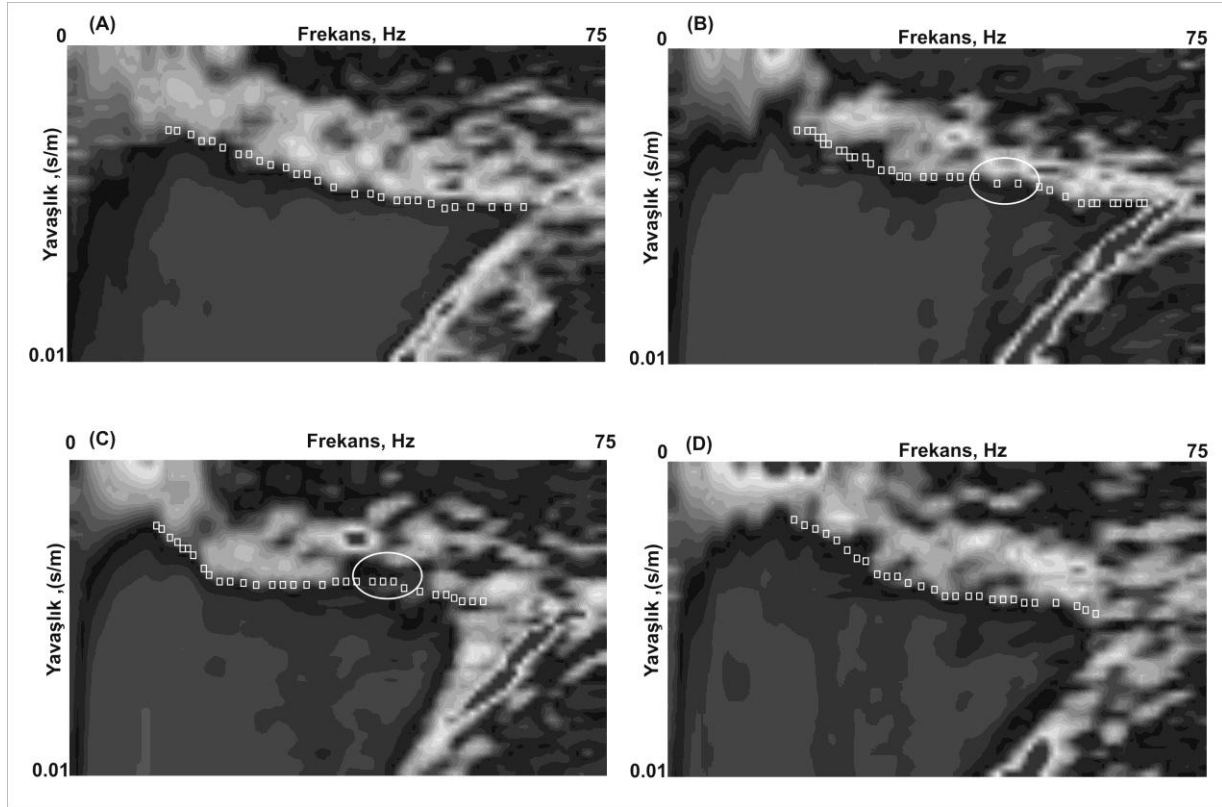


Şekil 6. (a) 146 no'lu ölçüm noktasında alınan tipik ReMi verisi. (b) (a)'da gösterilen gürültü kaydının kaydın yavaşlık-frekans dönüşümü. (c) (b)'de içi boş kutucuklarla gösterilen dispersiyon eğrisine karşı gelen kuramsal dispersiyon eğrisinden elde edilen V_s hızları ve derinlikleri (V_s modellemesi 6 tabaka için yapılmıştır)

teşkil etmektedir. Şekil 7’de gösterilen güç spektrumlarından (a)’da gösterilen eğri bozucu etkinin az olduğu veridir. Bu eğride uygun dispersiyon eğrisi işaretlenmesi yapılırken, en uygun yer açık gri ve koyu gri arasındadır. Bu noktada siyah bant ne kadar dar olursa belirsizlik o kadar az demektir. Sığ derinliklerde bu bant oldukça dar bir alanda ortaya çıkmaktadır.

Bununla birlikte, daha derinler için siyah bant spektrumun sonlarına doğru genişlemekte ve bu da belirsizliği artırmaktadır. Dolayısıyla özellikle daha derinler için

hesaplanacak hızlar ve derinliklerin doğruluğu bu alandan seçilecek piklerin daha az belirsiz alandan seçilmesine bağlıdır (Kanbur ve Kanbur, 2009). En uygun dispersiyon eğrisinin belirlenmesinden ardından ters çözüm hesaplaması ile S-dalgası hızları ve karşı gelen tabaka derinlikleri elde edilmiştir (Şekil 6c). Literatürde tekniğin detayları ve değişik uygulamaları geniş bir şekilde yer almaktadır (Louie, 2001; Scott vd., 2004; Thelen vd., 2005; Richwalski vd., 2007; Anderson vd., 2007; Chávez-García vd., 2007, Kanbur vd., 2008; Pancha, 2008; Kanbur ve Kanbur, 2009).



Şekil 7. Farklı Farklı ReMi kayıtlardan elde edilen dispersiyon eğrileri, a) 103, (b) 108, (c) 112 ve (d), 123. Tünel yaklaşıldığında 40 Hz civarlarında hızın arttığı kayıtlardan görülmektedir (Rayleigh dalgasına ilişkin 40 Hz’lik frekans, değişimin sığ kısımda olduğuna işaret etmektedir).

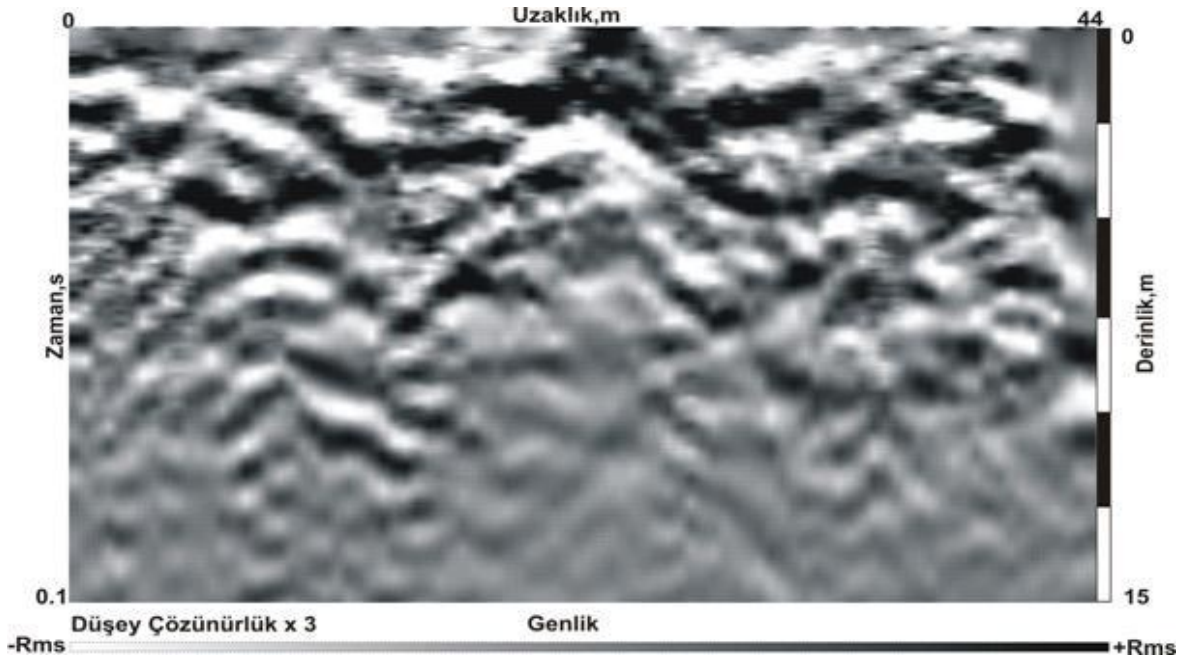
Bulgular

Yer içerisinde sismik dalğanın hızının derinlikle arttığı temel bir varsayımdır. Bu varsayım genel olmakla birlikte, bazen bu çalışmada da görüldüğü gibi tüneli oluşturan beton malzeme altındaki birimlere göre daha yüksek sismik hıza sahiptir. Bu durum sismik kırılma tekniğinde ciddi bir problemdir ve tekniğin yanlış sonuç vermesine neden olur. Ancak sismik yansıma, ReMi ve MASW teknikleri farklı dalga varışlarını kullandıkları için bu durum problem oluşturmayacaktır.

Şekil 8. sismik ölçü alanında elde edilmiş verilere ait sığ sismik yansıma kesitini göstermektedir. Ortalama hız göz önüne alındığında yaklaşık 15m derinlik içerisindeki yapılar görüntülenmiştir. Duvarları 25 cm kalınlığında yapılmış tünel daha önce çevre düzenlemesi yapılmış bir ortamda bulunmaktadır. Dolayısıyla ortamda düzgün bir tabakalaşma mevcut değildir. Şekil 8’de verilen sismik

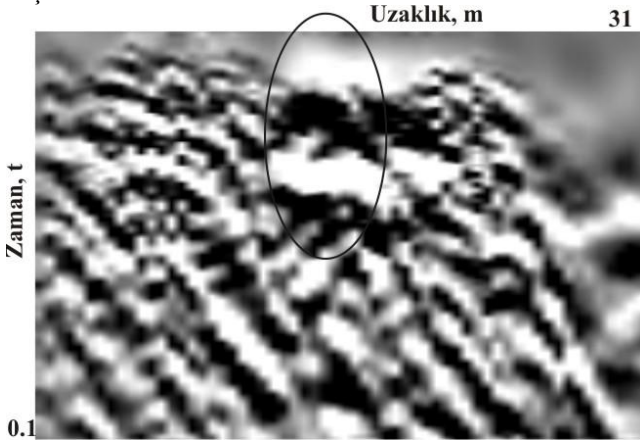
kesitte bu durum açıkça görülmektedir. Bununla birlikte tünelin bulunduğu noktada sismik dalgalar difraksiyona uğradığı için aşağıya doğru uzanan bir antiklinal yapı ortaya çıkmıştır. Bu yapının oluşumundaki en büyük etken tünelin yanall yönde kuvvetli bir sismik empedans oluşturmasıdır.

Aynı işlemler MASW tekniği için elde edilmiş veri setine de uygulanmıştır. Şekil 9. MASW verisinin sismik yansıma kesitini göstermektedir. Şekilde tünelin yeri elipsle gösterilmiştir. Burada Şekil 8’de görülen başarılı sonuç elde edilememiştir. Bunun temel sebebi, her iki veri setinde de farklı veri kazanım parametrelerinin kullanılmasıdır. MASW tekniğine uygun veri kazanım parametreleri sismik yansıma için yeterli olmamıştır. Burada yerin çok sığ bir kısmının görüntülenmesi söz konusu olduğu için kullanılan alıcı tipleri ve veri kazanım parametreleri yansıma tekniği için yüksek frekanslara uygun seçilmiştir. Bununla birlikte daha derin çalışmalar



Şekil 8. Çalışma alanına ait sığ sismik yansıma kesiti. Tünel yapısından dolayı ortaya çıkan difraksiyon ve genliklerde zayıflama

için alınacak tek bir veri setinin yeterli olabileceği düşünülmektedir.



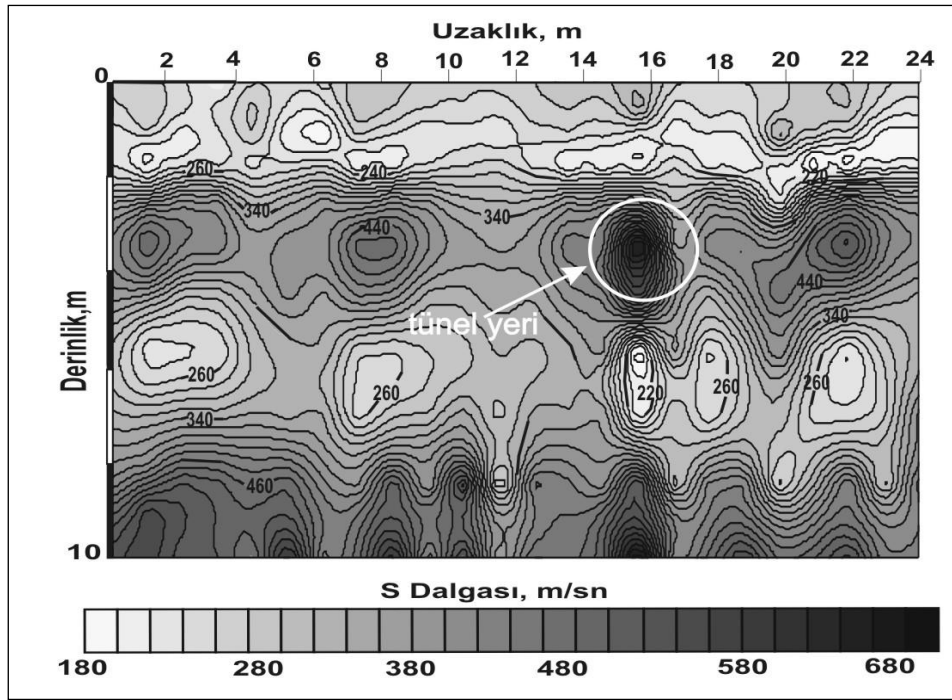
Şekil 9. MASW verisi kullanılarak elde edilmiş sismik yansıma kesiti

Çalışma alanında MASW verilerinden elde edilmiş sismik S-dalgası hız kesiti Şekil 10'daki gibidir. Kesit yansıma kesitiyle benzerlik göstermektedir. Kesitte sismik S-dalgası hızı 180-700 arasında değişmektedir. Xu ve Butt (2006)'nın yaptıkları çalışmada doğal bir boşluğu ortaya çıkarmışlar ve boşluğun olduğu bölgede S-dalgası hızlarını diğer ara yüzeylerden daha düşük bulmuşlardır. Bu çalışmada ise şekilde görüldüğü üzere tünelin bulunduğu yerde S-dalgası hızı yükselmiştir. Sığ sismik yansıma kesitinde de görüldüğü gibi burada beton iskeletin varlığından kaynaklanan sismik hızlarda bir yükselme mevcuttur. Çalışma amacına uygun olarak elde edilen kesitte tünelin bulunduğu bölgedeki eğrilerde hızların yükselmesine bağlı olarak sıklaşma görülmektedir. Bu da tünelin yerini belirgin bir şekilde ortaya koymaktadır.

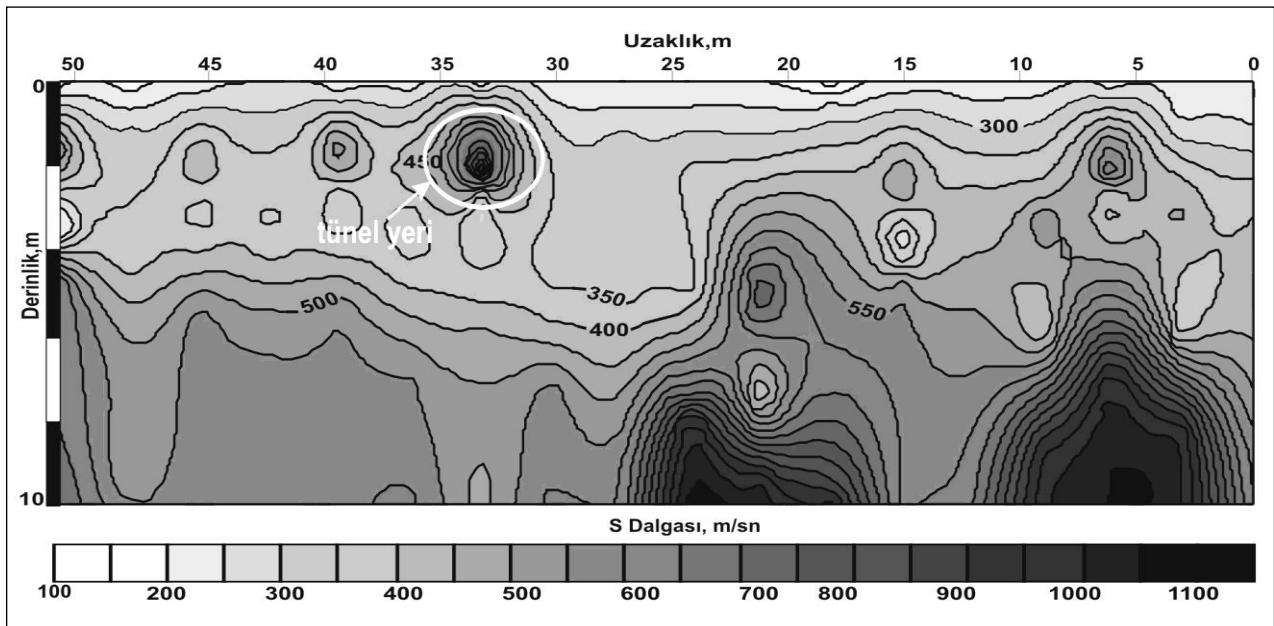
ReMi'den elde edilen S-dalgası hızları MASW sonuçları ile ilk bakışta uyum içerisinde görülmektedir. MASW ve ReMi kesitlerinde görüleceği üzere x doğrultusundaki açılımları birbirlerinden farklıdır. MASW'den elde edilen kesit (Şekil 10) 24m uzunluğundayken, ReMi'den elde edilen kesit (Şekil 11) 52m'dir. Bu bilgiler doğrultusunda kesitlere bakıldığında MASW ve ReMi sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu ve tünelin olduğu bölgede MASW kesitinde olduğu gibi hızlarda artma ve eğrilerde sıklaşma görülmektedir. Bununla birlikte ReMi hızlarının MASW hızlarına göre biraz yüksek olduğu gözlenmektedir.

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada zeminin yaklaşık 1.7 m altında bulunan insan yapımı tünelin yerini tespit etmek için Sismik yansıma, MASW ve ReMi teknikleri kullanılmıştır. Bunun için yerin yaklaşık 15 m derinliğine kadar sismik S-dalgası hız değişimleri ve tabakalaşma durumu araştırılmıştır. Çalışmada sığ yansıma kesiti ile tünel yapısına ilişkin anomali elde edilmeye çalışılmıştır. MASW ve ReMi sonuçları sismik S-dalgası hızı değişiminin bağlı olarak ortaya çıkan anomaliler karşılaştırılmıştır. Şekil 8'de gösterilen sığ sismik yansıma kesiti ile tünelin yaklaşık 2 m derinlikte olduğu açıkça görülmektedir. Tünel, yığma kesitinde aşağı doğru uzanan difraksiyonlarla temsil edilmektedir. Diğer taraftan tünel ile ilişkin bu varlıkların altında genlikler yan kısımlara göre oldukça zayıflamaktadır. Bu durum tünel içerisinde yansıma varlıklarının yayılamamasından kaynaklanmaktadır. Tünelin içerisinde bulunduğu zemin önceki inşaat artıkları ve sonrasındaki çevre düzenlemelerinden dolayı örselendiğinden çalışma alanında düzensizlikler yüksek seviyede olup kesitte bu durum izlenebilmektedir.



Şekil 10. Ölçü alanında elde edilen toplam 24 adet MASW verisinin tek tek ters-çözüm işlemi yapıldıktan sonra 2 boyutlu şekilde yan yana birleştirilmesi ile elde edilmiş MASW kesiti



Şekil 11. Ölçü alanında elde edilen toplam 18 adet ReMi verisinin tek tek ters-çözüm işlemi yapıldıktan sonra 2 boyutlu şekilde yan yana birleştirilmesi ile elde edilmiş ReMi kesiti

Aynı profil üzerinde elde edilen MASW ve ReMi kesitlerinde de tünel yapısına ait anomaliler elde edilmiştir (Şekil 10,11). Bununla birlikte her iki kesitte de benzer başka anomalilerin de varlığı gözükmemektedir. Bu anomaliler tünele ilişkin anomaliden daha zayıf gözükmemektedir. Bu durum, her iki kesitin de yorumunu biraz zorlaştırırken, yığma kesiti ile korelasyon bu durumu kolaylaştırmaktadır.

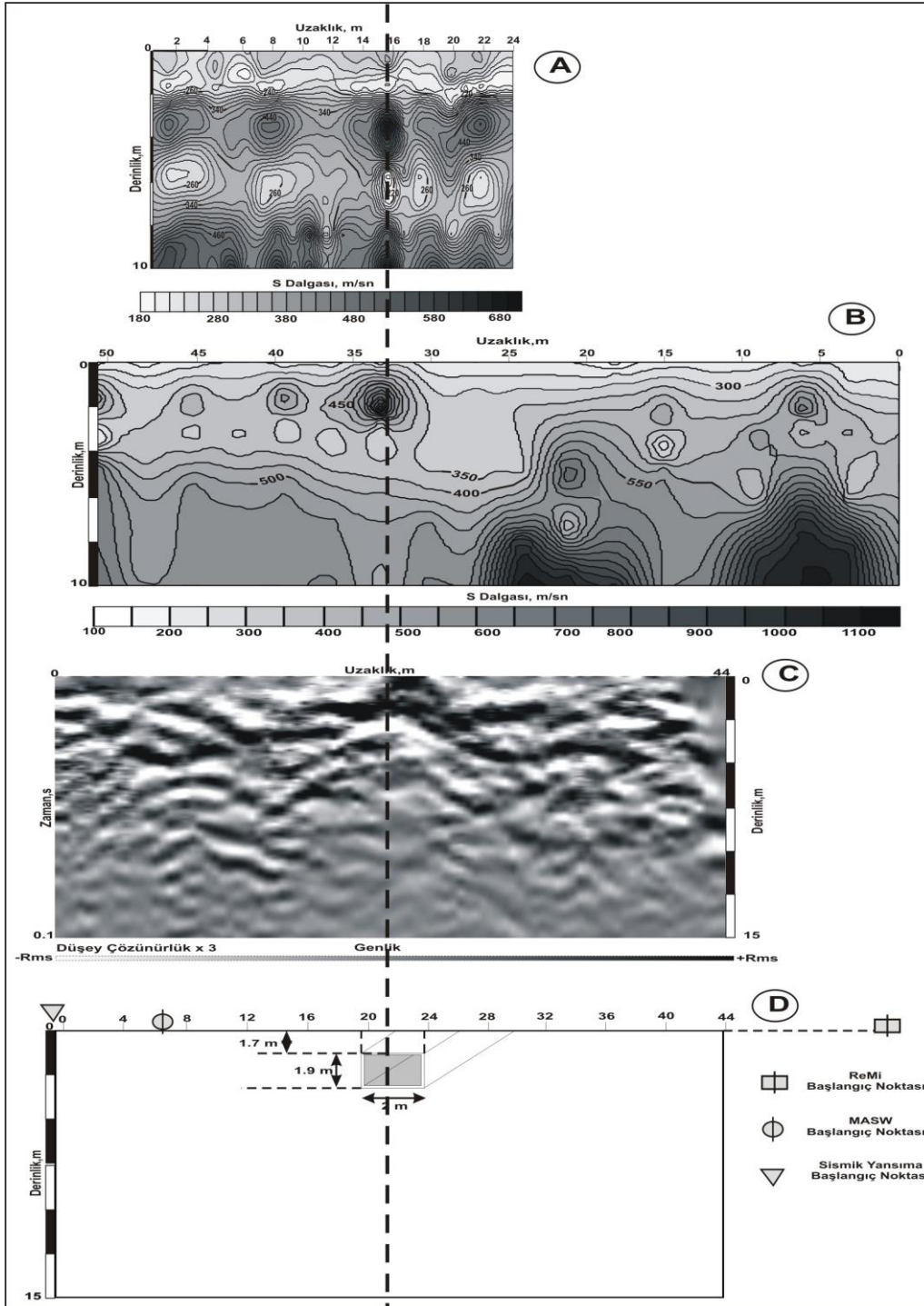
Stephenson vd. (2005)'te MASW ve ReMi yöntemlerinin birlikte kullanılmasının sonuçların güvenilirliğini

artıracağı ve dolayısıyla bu tekniklerin birlikte kullanılmasının yararına işaret etmektedirler. Bu çalışmanın sonuçları bu araştırmacıların önerilerini desteklemektedir. Sonuçlar MASW yönteminin ayrımlılığının daha yüksek fakat ReMi yönteminin de daha derinlerden bilgi elde etmek için hızlı, kolay ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla daha derinlerden bilgi alınması gerektiği durumlarda ReMi tekniği tamamlayıcı yöntem olarak da kullanılabilir. Bu çalışma üç yöntemin uygulanmasının göreceli olarak çok zaman almadığını göstermiştir. Eğer sismik S-dalgası hız

yapısına ilaveten yer altı süreksizliklerinin ve yapısal durumunun araştırılması isteniyorsa bu üç yöntemin birlikte kullanılması sonuçların daha güvenilir olmasına katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak bu çalışmada insan yapımı bir tünelin tespiti için sismik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda Sismik yansıma, MASW ve ReMi teknikleri kullanılmış ve yerin yaklaşık 15m derinliğine kadar sismik S-dalgası hız değişimleri ve tabakalaşma durumu ortaya konmuştur. Sonuçlar tek tek değerlendirildiğinde sığ sismik yansıma sonuçlarının tünel yapısını belirgin bir şekilde ortaya çıkardığı; bununla birlikte MASW ve ReMi sonuçlarında

başka bir bilgi olmadığı takdirde ölçüm alanında anomali verebilecek yapıların olması durumunda, hatalı yorumlama yapılabileceği görülmüştür. MASW için atış kayıtlarının güç spektrumlarının incelenmesi ile boşlukla ilgili bilgi bu belirsizliği ortadan kaldırmaktadır. Diğer taraftan başka bilgiye ihtiyaç duyulsa da ReMi tekniği sismik kaynağa ihtiyaç duyulmaması ve kolay uygulanabilirliği ve çabuk sonuç alınması bakımından bu gibi problemlerin çözümünde kullanmaya değer gözükmektedir. Bu çalışmada tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, sonuçların birbirlerini desteklediği görülmüştür (Şekil 12).



Şekil 12. Çalışma alanından elde edilen sismik kesitlerin tünel geometrisi üzerinde gösterimi (A: MASW derinlik-hız kesiti, B: ReMi Derinlik-hız kesiti, C: Sığ sismik yansıma kesiti, D: Tünelin şematik görünümü)

Kaynaklar

- Anderson, N., Thitimakorn, T., Ismail, A., Hoffman, D., 2007. A comparison of four geophysical methods for determining the shear wave velocity of soils. *Environmental and Engineering Geoscience*, 13 (1), 11-23.
- Avar, B.B., Luke, B.A. 1999. Roadside application of seismic surface waves over abandoned mines. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems-SAGEEP 1999* Oakland, California, March 14-18, 31-40 pp.
- Chávez-García, F. J., Domínguez, T., Rodríguez, M., Pérez, F. 2007. Site effects in a volcanic environment: A comparison between HVSR and array techniques at Colima, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(2), 591-604.
- E. Cardarelli., C. Marrone., L. Orlando. 2003 Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods, *Journal of Applied Geophysics* 52, 93-102 pp.
- Gucunski, N., Ganji, V., Maher, M. 1996. Effect of Soil Nonhomogeneity on SASW Testing, *Proceed. Uncertainty in Geologic Environment from Theory to Practice*.
- Gucunski, N., Shokouhi, P. 2004. Detection and characterization of cavities under the airfield pavements by wavelet analysis of surface waves. Presented for the 2004 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, USA.
- Kanbur, Z., Görmüş, M., Kanbur, S. 2008. Isparta yerleşim alanı kuzey kesiminin sığ S-Dalgası kesitini çıkarılmasında Kıvrım-Mikrotitreşim Tekniğinin (ReMi) kullanılması. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri dergisi*, 29(2). 76-86.
- Kanbur, Z., Kanbur, S. 2009. Isparta Şehir Merkezi Kuzeyinin Sismik Kırılma-Mikrotitreşim (ReMi) Tekniği ile S-Dalgası Hız Dağılımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(2), 156-172.
- Leparoux, D., Bitri, A., Grandjean, G., 2000. Underground cavities detection: a new method based on seismic Rayleigh Waves. *EJEEG* 5, 33-53.
- Louie, J.N., 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347-364.
- Luke, B., 1999. Spectral-analysis of subsurface-waves method. *IEEE Journal*, 38- 85 (February-March).
- Miller, R., Park C., Xia, J., Ivanov, J., Steeples, D., 2006. Tunnel Detection Using Seismic Methods: 2006 Joint Assembly of the American Geophysical Union Baltimore: NS21A-07.
- Nasseri-Moghaddam, A. 2006. Study of the Effect of Lateral Inhomogeneities on the Propagation of Rayleigh Waves in an Elastic Medium, Canada, University of Waterloo: Ph.D. Thesis.
- Nazarian, S., Stokoe, K. H., II, Hudson, W. R. 1983. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems: *Transport. Res. Record*, 930, 38-45.
- Park, C. B., Xia, J., and Miller, R. D. 1998. Ground roll as a tool to image nearsurface anomaly: 68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 874-877.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J. 1999. Multi-channel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- Park, C.B., Miller, R.D., Miura, H. 2002. Optimum field parameters of an MASW survey [Exp. Abs.]: SEG-J, Tokyo, May 22-23, 2002.
- Park, C.B., and Ryden, N. 2007. Historical overview of the surface wave method, *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2007)*, Denver, CO, April 1-5, pp 897-909.
- Pancha, A., Anderson, J. G., Louie, J.N., and Pullammanappallil, S. 2008. Measurement of shallow shear wave velocities at a rock site using the ReMi technique: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 522-535.
- Putnam, N. H., Rogers J. D., and Anderson N. L., 2006. Applications of Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) for Detection of Tunnels, Pennsylvania: 2006 Philadelphia Annual Meeting of the Geological Society of America, 218-8 pp.
- Richwalski, S. W., Picazzo, M., Parolai, M., Milkereit, C., Baliva, F., Albarello, D., Roy-Chowdhury, K., Zschau, H., J. 2007. Rayleigh wave dispersion curves from seismological and engineering-geotechnical methods: a comparison at the Bornheim test site (Germany). *Journal of Yansımaya ve Yüzey Dalgaları Metotları ile İnsan Yapımı Tünel Yerinin Bulunması*
- Sanz, A.G., Contreras, A.M., Álvarez, M.H., Mazo, C.O., Rubio, F.D. 2007. Experiences with the Application of the Passive Seismic Method to survey the Route of several Lines of the 2003-2007 Madrid Metro

Extension Plan, XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid.

- Scott, J. B., Clark, M., Rennie, T., Pancha, A., Park, H. and Louie, J. N. 2004. A shallow shear-wave velocity transect across the Reno, Nevada area basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 2222-2228.
- Sheriff, R. E., Geldart, L.P. 1995. *Exploration Seismology*, second edition, Cambridge University Press 592 pp.
- Steeple, D.W., and Miller, R.D. 1990. Seismic reflection methods applied to engineering, environmental and groundwater problems, in Ward, S., Ed., *Geotechnical and Environmental Geophysics, Volume I: Review and Tutorial*. Soc. Expl. Geophys.1-30.
- Stephenson, W.J. Louie, J.N. Pullammanappallil, S. Williams, R.A. Odum, J.K. 2005. Blind shear-wave velocity comparison of ReMi and MASW results with boreholes to 200 m in Santa Clara Valley: implications for earthquake ground motion assessment. *Bull Seism Soc Am*. 95, 2506–2516.
- Stokoe, K. H., II, Wright, G. W., James, A. B., and Jose, M. R. 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Woods, R. D., Ed., *Geophysical characterization of sites*: Oxford Publ.
- Tallavo, F., Cascante, G., and Pandey, M. 2008. Experimental and numerical analysis of MASW tests for detection of buried timber trestles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 29(1): 91-102.
- Thelen, W.A., Clark, M., Lopez, C. T., Loughner, C., Park, H., Scott, J.B., Smith, S. B., Greschke, B. and Louie, J. N. 2005. A transect of 200 shallow shear velocity profiles across the Los Angeles Basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 1055-1067.
- Thorson, J.R. and Claerbout, J.F. 1985. Velocity-Stack and Slant-Stack Stochastic Inversion. *Geophysics*, 50, 2727-2741.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave. *Geophysics*, 64(3), 691-700.
- Xu, C. Q. and Butt, S. D., 2006. Evaluation of MASW techniques to image steeply dipping cavities in laterally inhomogeneous terrain. *Journal of Applied Geophysics* 59, 106-116.
- Yilmaz, O. 1988. *Seismic data processing*, Society of Exploration. *Geophysicist* 526 pp.