SİSMİK SAHA KARAKTERİZASYONLARINDA BİRLEŞTİRİLMİŞ YÜZEY DALGASI YÖNTEMLERİNİN KULLANILMASI

A.M. Eker[1], H. Akgün[1] ve M.K. Koçkar[2]

[1] Jeoteknoloji Birimi, Jeoloji Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06531, Ankara, Türkiye
[2] Deprem Müh. Uygulama ve Araştırma Merkezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye
Email: merteker@gmail.com

ÖZET:

Jeo-malzemelerin mukavemet parametrelerinin belirlenmesi ve sismik saha karakterizasyonlarının yapılması için zeminde kayma dalgası hızlarının kullanılması, yerel saha koşullarının tanımlanması için uygun bir yöntemdir. Bu nedenle, kayma dalgası hızı (V_s) litolojik birimleri çökelim ortamlarına ve yaşlarına göre niceliksel olarak ayırt etmek için önemli bir parametredir. Kayma dalgası hızı profilleri, sismik kodlar yardımıyla zemin hareketlerinin mekânsal dağılımını değerlendirmek için kullanabilecek olan sınıflandırma yöntemlerindeki ana parametrelerden biridir. Kayma dalgası hız profillerinin belirlenmesi için çeşitli sismik yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerin bir kısmı (Kuyu Aşağı, Kuyu Çaprazlama, PS Logu, vb.) güvenilir sonuçlar vermekle birlikte masraflı ve zaman alıcıdır. Diğer yöntemlerden sismik kırılma gibi yöntemler ise zemin profillerinin karaterize işlemini derinlikle doğrusal bir ilinti kurarak hesaba katar ve karmaşık jeolojiden dolayı doğru sonuçlar veremeyebilirler. Ancak, aktif ve pasif yüzey dalgası yöntemleri bu gibi zorlukları ortadan kaldırarak diğer sismik yöntemlerle yapılan karakterizasyon çalışmaları ile karşılaştırıldığında zaman, maliyet ve uygulama açısından daha avantajlıdır. Özellikle, Titreşimcik Dizi Yöntemindeki (MAM) Mekansal Oto Korelasyon (SPAC) dönüşümü kullanılarak yapılan pasif yüzey dalgası yönteminde, optimum veri alma parametreleri kullanıldığında kayma dalgası hız profilinin oluşturulması için tabakaların daha derin kısımlarında daha doğru bilgi eld e edilmesi sağlanırken, Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW) gibi bir aktif yüzey dalgası yöntemi de, yöntemin faz kaydırma dönüşümü analiziyle Rayleigh dalgasının doğasından dolayı kayma dalgası hız profilini sığ derinliklerde daha güvenilir şekilde çözümleme yetisine sahiptir. Aktif ve pasif yöntemlerin birlikte sentezlenerek kullanıldığı ve Birleştirilmiş Yüzey Dalgası Yöntemi (Combined Surface Wave Method) olarak da adlandırılan bir yöntem ile bu sismik derinlik profillerinin hazırlanması, inceleme alanının derinliğinin artırılarak hedef derinlik boyunca tahribatsız olarak yüksek çözünürlüklü ve sentezlenmiş güvenilir sonuçların elde edilmesine olanak sağlar. Bu sonuçlar zeminlerin sınıflandırılmasında, saha koşullarını yansıtan temsili bir kayma dalgası hızı profilinin oluşturulması için derinlik profillerinde, tabakaların sığ ve derin kısımlarının ortak karakterize edilmesi sebebiyle pek çok imkân sağlayabilir. Bu nedenle, bu yöntemin kullanımı ile hazırlanan yüzey dalgası profilleri; zemin çökellerine ait yer tepkilerinin başarılı bir şekilde tahminlerini veren sismik sediman özelliklerinin güvenilir bir şekilde belirlenmesi için yapılan saha karakterizasyonu çalışmalarında daha etkin şekilde kullanılabilir. Yapılan bu araştırma ile bahsedilen birleştirilmiş yüzey dalgası yönteminin uygulanması göz önünde bulundurularak yapılan sismik zemin karakterizasyonu çalışmaları, diğer sismik ve jeoteknik zemin karakterizasyonu çalışmaları ile yapılmış farklı örnek çalışmalarla da karşılaştırılarak gerçekleştirilmiş ve buna bağlı olarak gerekli öneriler sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Kayma dalgası hızı, MASW, MAM, birleştirilmiş yüzey dalgası yöntemi, sismik zemin karakterizasyonu.

1. GİRİŞ

Yüzey dalgası yöntemi tahribatsız uygulanması ve veri alımı ile işlemesindeki yüksek verimliliğinden dolayı zeminin kayma dalgası hızının (V_S) yapısını kestirmek için yakın zamanda en sık kullanılan sismik teknik olmuştur (Miller ve diğ., 1999; Stokoe ve diğ., 1994). Yüzey dalgası yöntemleri yeraltı kesme dalgası hızı profillerini elde etmek için, Rayleigh dalgalarının tabakalı bir ortamdaki dağılgan doğasına (dispersive nature) dayanmaktadır. Yüzey dalgası tiplerinden birisi olan Rayleigh dalgası toprak-hava veya toprak-su ara yüzeyi gibi serbest yüzeyler boyunca ilerler. Nispeten düşük hızlı, düşük frekanslı ve yüksek genlikli olması Rayleigh dalgalarının karakteristiklerindendir. Rayleigh dalgaları yüzey dalgalarının düşey bileşeni olan P ve radyal bileşeni olan SV dalgasının karışmasının bir sonucudur. Temel mod Rayleigh dalgalarının soldan sağa hareket eden homojen bir ortamdaki parçacık hareketi serbest yüzey boyunca saat yönünün tersine olacak şekilde eliptik bir şekildedir. Bu dalga hareketinin genliği, derinlikle orantılı olarak üssel olarak azalır. Başka bir değişle, derinlik dalga boyunun bir fonksiyonudur (Park ve diğ., 1999).Yüzey dalgaları yeterli derinliğe ulaştığında düzlemsel olur. Hareket dalga yayılımı ile tutarlı olarak düşey bir düzlemde kısıtlanmıştır (Telford, ve diğ., 1976 ve Xia, ve diğ., 2004).

Yüzey dalgaları, aktif ve pasif kaynaklar olmak üzere iki şekilde üretilir. Aktif kaynak, sismik enerjinin jeofon serimine göre belirli bir konumda üretildiği ve kaynak enerji yere uygulandığında kaydın başladığı anlamına gelmektedir. Yüzey Dalgasının Çok-kanallı Analizi (MASW) (Park, 1999) ve Yüzey Dalgasının Spektral Analizi (SASW) (Nazarian, 1984; Stokoe ve diğ., 1994) yöntemleri, aktif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri olarak sınıflandırılır. Bu durum, Titreşimcik Dizi Yöntemi (MAM) (Okada, 2003; Hayashi, 2008) veya Kırılma Titreşimcik (ReMi; Louie, 2001) yöntemleri olarak da bilinen pasif yüzey dalgası teknikerinde farklıdır. Bu pasif yöntemlerde herhangi bir zaman kırılması mevcut değildir ve jeofon serimine göre çeşitli ve genellikle konumları bilinmeyen doğal olaylarla (rüzgar, dalga hareketi) ve/veya yapay kaynaklarla (toplumsal gürültü, yani trafik, makina ve benzeri) üretilen ortam enerjisinin hareketi kaydedilir (SeisImager/SW™ Kullanım Kılavuzu 2.2, 2006).

Bu yöntemlerin hepsi farklı ölçeklerde olmasına karşın aynı prensiplere dayanmaktadır. Hepsinin temeli; Rayleigh dalgası hızının yayılımını, düşey heterojen ortamda frekansa bağımlı kılan geometrik dağılıma dayanmaktadır. Uzun dalga boyu (düşük frekans) Rayleigh dalgaları daha derin tabakalara nüfuz eder ve hızları yüksek derinliklerde malzeme özelliklerinden etkilenmekte ve bu tabakalar hakkında bilgi sağlamaktadır. Ancak kısa dalga boyu (yüksek frekans) Rayleigh dalgaları yüzeye yakın sığ tabakalarda yayılım gösterirler ve sığ tabakaların mekanik özelliklerine dair bilgi içerirler. Yüzey dalgası yöntemlerinin bu özelliği malzemeleri çok geniş bir ölçek aralığında karakterize etmek için kullanır (Foti, 2005).

Yüzey dalgalarının yayılım hızı (faz hızı) frekansın (veya dalgaboyunun) fonksiyonudur. Bu karakteristik her yayılan frekans için farklı bir dalga boyunun olması sonucunu doğurur. Bu özelliğe dağılım denir (Park, ve diğ., 1999). Yeraltı tabakalarının kesme dalgası hızları (V_S), oluşturulan dağılım eğrisi kullanılarak geri hesaplama işlemi ile elde edilebilir. Geleneksel yöntemlerin aksine yüzey dalgaları yöntemleri bu özellikten dolayı elastik dalga denklemine dayanır ve bu analizler tamamen frekans alanında gerçekleştirilir (Hayashi, 2008).

Bu çalışmada, Ankara'nın farklı bölgelerinde sismik saha karakterizasyon çalışmalarının bir parçası olarak kullanılan aktif kaynaklı Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi yöntemi (Multi spectral Analysis of Surface Waves, MASW) ve pasif kaynaklı MAM (Microtremor Array Method) yöntemlerinin farklı arazi kurulum ve veri alım parametreleriyle elde edilen bileşik dispersiyon eğrileri, daha yüksek çözünürlüklü ve daha güvenilir 1B V_S profilleri oluşturulması amacıyla derlenerek yorumlanmıştır. Her bir çalışmanın amacı diğerinden farklı olduğundan, bütün ölçümlerin arazi geometrisi doğrusal olmasına karşın jeofon aralıkları ve yakın ofset miktarı birbirinden farklı olarak uygulanmıştır.

Çalışmaların amacı doğrultusunda, her iki yöntemde optimum veri alma parametreleri kullanılarak saha çalışmalarında her noktaya uygulanmıştır. Pasif yüzey dalgası yöntemi (MAM) 1 B kesme dahası hız profilini oluşturmak için olan derin tabakaların bilgilerinin doğru olarak almak için, diğer yandan, yüzey dalgalarının doğası ve jeofon aralığına yakınlıkları yüzünden aktif yüzey dalgası yöntemi (MASW) daha sığ tabakaları çözme konusundaki yüksek kapasitesini kullanmak için uygulanmıştır. Bu şekilde, aktif yöntem ile birlikte pasif yüzey dalgası yönteminden elde edilen dağılım eğrileri birleştirilerek inceleme derinliğini maksimuma ulaştırmasını ve her derinlikte (bu çalışmalarda 30 m ve olabildiğince daha derin) yüzeyden tahribatsız olarak bileşik yüksek çözünürlüklü sonuç elde edilmesi sağlanmıştır.

2. VERİ ALIMI VE ANALİZİ

Deneysel verinin edinilmesinde, ilgilenilen frekans aralığı ve mekânsal örnekleme farklılıkları yüzey dalgası ölçümlerine dayanan yöntemler arasındaki ana ayrılık olsa da bu yöntemlerde elde edilen verinin analiz prosedürünün tamamı, Rayleigh dalgalarının tabakalı ortamdaki dağılım doğasına dayandığı için aynı ana üç adıma dayanmaktadır (Foti, 2005). Bu adımlar: 1) Deneysel verinin alınması, yani sismik dalgaların mekanik sensörlerle saptanması ve kaydedilmesi, 2) Deneysel dağılım eğrisini oluşturmak için sinyal işlemesi, ve 3) 1-B kesme dalgası hız profilinin elde edilmesi için hesaplanmış olan dağılım eğrisinin ters çevrimi (inversion) (Foti, 2005, Jin ve diğ., 2006). Bu adımlardan, dağılım ilişkisinin kurulması doğru kesme dalgası hızı profilini hesaplamak için çok kritik bir adımdır. Dağılım ilişkisinin saflığı, spesifikliği ve doğruluğu ters çevrilmiş kesme dalgası hızı profilinin doğruluğunu etkileyen önemli özelliklerdir (Jin, ve diğ., 2006).

İnceleme alanında, arazinin uygunluğuna bağlı olarak iki farklı alanda toplam 130 adet sismik (aynı noktalarda 65 adet MAM ve 65 adet MASW) serim yapılarak yüzey dalgası ölçümlerinin alınması sağlanmıştır. Ölçümler, "GEODE" ve "Seistronix" marka "RAS-24" model sinyal biriktirmeli sismograflar ile 12 adet doğal frekansı 4.5 Hz olan jeofonlar yardımı ile alınmıştır. MAM yönteminde; hedef derinlik olan 30 m ve daha da derin zemin profillerinin elde edilmesini sağlamak için 5 m ve 10 m'lik jeofon aralıklarıyla 55 ve 110 m'lik profil boyunca kayıtlar alınmıştır. MASW yönteminde ise jeofon aralığı 1.5 m ve 5 m olarak belirlenmiş olup, ölçümler 16.5 ve 55 m uzunluğundaki profil boyunca alınmıştır. Bu şekilde, daha sığ tabakaların hızları hakkında yüksek çözünürlüklü ve daha hassas kayıtlar alınmıştır. Ölçümler 5, 10 ve 15 metre olmak 3 farklı vuruş uzaklığına göre biriktirmeli alınmıştır. Biriktirme sayısı ortam gürültüsüne bağlı olarak 3 ile 5 arasında seçilmiştir. Üç farklı vuruş uzaklığına ek olarak hem veri işleme de kullanılmak üzere, hem de MASW yönteminin ana varsayımlarından biri olan yanal homojenliği test etmek için 5 metre mesafeden ters atış ölçümleri de alınmış ve veri işlemlerine dahil edilmiştir. Uygulanan tekniklere göre değişen serim geometrisi özellikleri ve veri alımı parametreleri ile ilgili gerekli bilgiler Tablo 1'de özetlenmiştir. Tablodaki parantez içerisindeki veriler bir sahadan alınan veri seti ile ilgili parametreleri, parantez dışındaki değerler ise diğer sahadaki veri parametrelerini göstermektedir. Anlaşılacağı üzere, sahalarda birbirlerine göre kısa MAM ve uzun MASW (parantez içi değerler) ölçümleriyle tam tersi olarak uzun MAM ve kısa MASW ölçümleri (parantez dışı değerler) uygulanmıştır.

Tablo 1. Uygulanan serim geometrisi özellikleri ve veri alımı parametreleri ile ilgili özet bilgiler

Yöntem	**MASW**	**MAM**
Kaynak	6 kg ağırlındaki balyoz	Gürültü
Sismograf	GEODE, (RAS-24)	GEODE, (RAS-24)
Jeofon	4.5 Hz	4.5 Hz
Alıcı Dizilimi	12 kanallı doğrusal	12 kanallı doğrusal
Dizi Uzunluğu	16.5 m, (55 m)	110 m, (55 m)
Alıcı aralığı	1.5 m, (5 m)	10 m, (5 m)
Kaynak uzaklığı	Düz: 5 m, 10 m, 15 m ters: 5 m	-
Örnekleme frekansı	1 ms	2 ms
Kayı uzunluğu	2 s	32 s
Kayıt Saysı	Biriktirmeli: çevresel gürültüye bağlı olarak 3 ya da 5 adet	16 - 20 adet

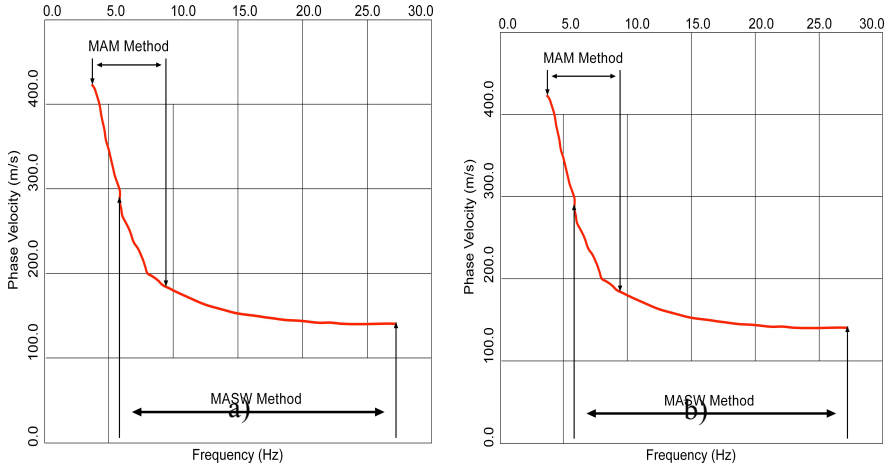
Aktif ve pasif yüzey dalgası ölçümlerinin analiz işleminde SeisImager/SW^{TM} V. 2.2 yazılımı kullanılarak, ölçülen yüzey dalgası kayıtları işlenmiş ve analiz edilmiştir. SeisImager/SW^{TM} kullanımı kolay olmasına karşın yüzey dalgası verisinin çok-kanallı aktif ve pasif kaynaklı analizinin yapılmasını sağlayan güçlü bir programdır. Dağılım eğrisinin bahsedilen program ile oluşturulmasından sonra, yine bu program yardım ile 1B profilin başlangıç modelini kurmak ve doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi ile ters çevrim işleminin uygulanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu adımda ilk olarak oluşturulan faz hızı - frekans grafikleri (dağılım eğrisi), veri noktalarının kalitesinin göreceli göstergesi olan sinyal-gürültü oranı (S/N) eğrileri baz alınarak kontrol edilmiştir. Düşük kalite verinin filtrelenmesi ve Rayleigh dalgasının yüksek modunun ayıklanmasıyla ilgili gerekli tüm düzenlemeler bu aşamada uygulanmıştır. Farklı sahaları kapsayan arazi çalışmaları sırasında genel olarak karot analizleri sırasında, yüzeyde (25 metreden sığ) alüvyon ve kil taşı ana jeolojik birimler olarak gözlemlense de, birimler içerisindeki depolanma çeşitliliği (örn: alüvyondaki çakıl, kum, kil ardalanması), dolgu malzemesinin bulunması, bazı ölçüm alanlarında ignimbrite ve tufa gibi volkanik kökenli katmanların gözlemlenmesi ve bazı noktalarda bu birimlerin kalınlıklarının kayda değer olması sebebiyle; analizlerin ilk aşamasındaki başlangıç model oluşumu sırasında verilen katman sayısı parametresi nihai sonuçları da olabildiğince az etkilemesini sağlamak ve profildeki her değişikliği saptayabilmek için 15 olarak seçilmiştir. Bu sayı yüzey dalgası yöntemlerinin kör şekilde (sondaj olmadan) uygulandığı zaman alınan katman sayısı ile aynıdır (Xia ve dig, 2002).

3. DAĞLIM EĞRİLERİNİN YORUMU

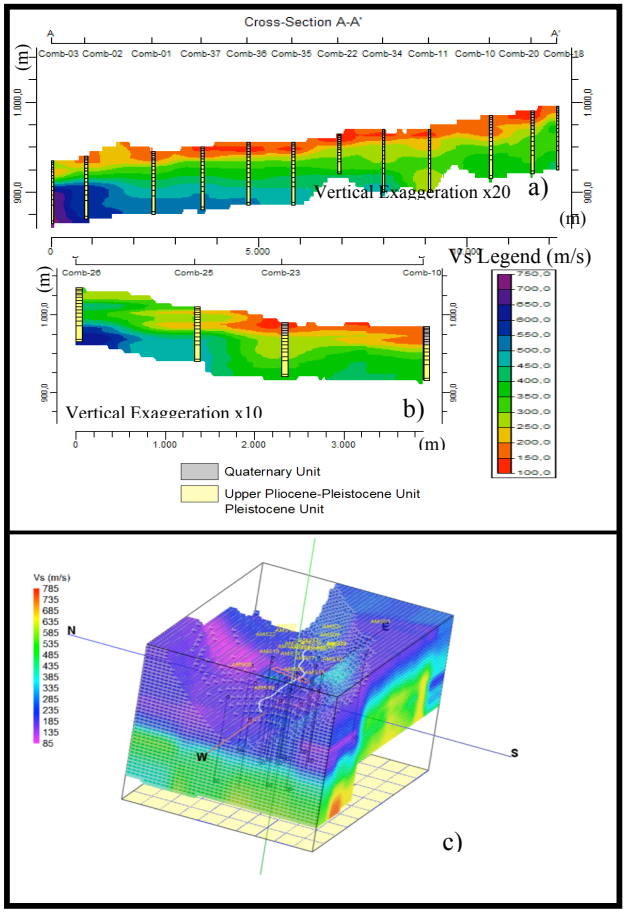
Literatürde, kayıt uzunluğu, örnekleme aralığı, kaynak ve jeofon tipi gibi kayıt parametrelerine dair genel bir mutabakat olmasına karşın, yakın ofset (kaynak ve ilk alıcı-jeofon arasındaki mesafe), jeofon açıklık mesafesi ve ofset mesafesi (ilk ve son jeofon arasındaki mesafe) gibi diğer optimum arazi konfigürasyonları hususunda tartışmalar mevcuttur. Bu parametreler, yakın ve uzak alan etkilerinden dolayı kayıtta veri kirlenmesini ve veri kaybını önlemek için doğru şekilde seçilmelidir (Stokoe et al., 1994; Park et al., 1999, 2001, 2002; Xia et al.,

2004). Örtüşme (aliasing) sorunları ortaya çıktığında, bir tek asıl (orijinal) sinyal örneklenmiş sinyalden eşsiz olarak oluşturulamaz. Bu durum, Yoon ve Rix (2005) tarafından belirtildiği üzere yakın alan etkisinden dolayı özellikle birleştirilmiş analizlerdeki ölçümlerde gözlemlenmez. Ancak bazı ölçüm noktalarında (örn. MASW-4, -5, -8 ve -9) MASW ölçümleri esnasında Rayleigh dalgasının temel modunun en yüksek frekans bileşeninin hızla sönümlenmesinden dolayı uzak alan etkileri ile ilişkili bazı zorluklar yaşanmıştır. Bu etki, ters atış ölçümleri ve MAM ölçümlerinin sonuçları ile karşılaştırarak istifleme prosedürü tarafından minimuma indirilmeye çalışılmıştır. Uzak alan etkilerinin gözlemlendiği ölçümler kesit analizleri esnasında göz önünde bulundurulmamaya çalışılmıştır. Özellikle 5 m jeofon açıklığıyla oluşturulan 55 m'lik doğrusal hat boyunca alınan MASW ölçümlerinde, uzak alan etkisinden kaynaklanan yüksek frekans verisine sahip bileşenlerin sönümlenerek bu verilerin kayıt edilememesi olarak karşılaşılmıştır. Jefon aralıkları daha az olarak (1.5 m) uygulanan doğrusal hatta ise aynı yöntemde 30 Hz'den daha yüksek frekanslara kadar ölçüm sorunsuz alınmıştır.

Birleştirme işleminde oluşturulan frekans aralığı, uygulanan uzun ve kısa serimlerden alınan veriler incelendiğinde aktif yüzey dalgası yöntemi üst sınırı, pasif yöntem ise alt sınırı belirlemektedir. Parametreler göreceli olarak uzun MAM ve kısa MASW çalışmasından elde edilen birleştirilmiş dağılım eğrisinde genellikle 2 Hz ile 50 Hz arasında değişmektedir. Diğer durumda ise frekans aralığı 2 Hz ile 30 Hz arasında değişim göstermiştir Ancak göreceli olarak kısa MAM ve uzun MASW ölçümlerinde elde edilen dağılım eğrisinde frekans üst sınırı daha çok 20 Hz ve altındaki değerler olarak incelenebilmiştir (Şekil 1). Kayma dalgası hızı sonuçlarındaki değişimler, çalışma alanındaki sismik sediman özelliklerinin değerlendirilebilmesi için 2B ve 3B modeller oluşturmak üzere sentezlenmiştir (Şekil 2). Bu modellerde literatür, arazi çalışması ve yüzey dalgası ölçümlerinden elde edilen Vs sonuçlarından edinilen bilgilerin yardımı ile yeraltı geometrisi kabaca oluşturulmuştur.



Şekil 1. Aktif ve pasif yüzey dalgası yöntemlerinden elde edilen birleştirilmiş örnek dağılım eğrileri. a) kısa MAM ve uzun MASW, b) uzun MAM ve kısa MASW ölçümlerinden elde edilen eğriler.

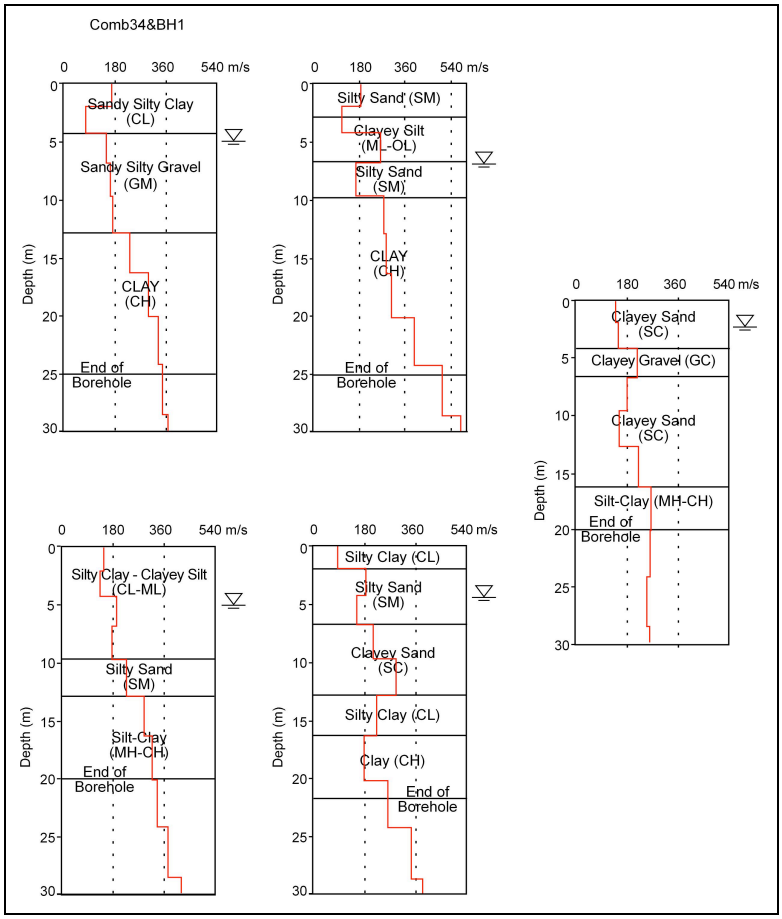


Şekil 2. Saharlda alınan yüzey dalgası ölçümlerinin birleştirilmesiyle elde edilen 1B kayma dalgası hızı profillerinden elde edilen 2B ve 3B modeller. a) kısa MAM ve uzun MASW, b) uzun MAM ve kısa MASW ölçümlerinden elde edilen eğriler.

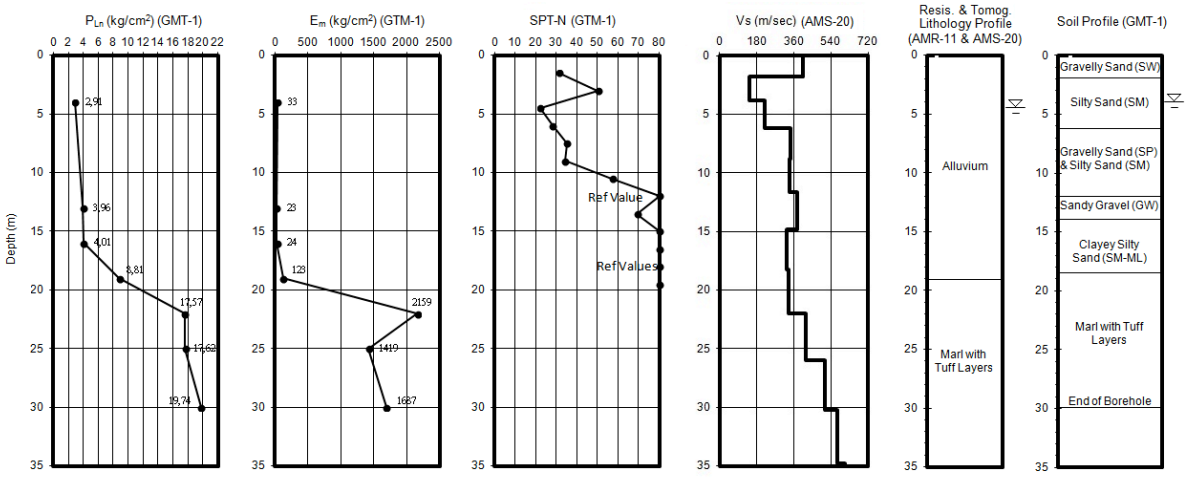
4. TARTIŞMALAR VE SONUÇLAR

Alan genelinde kör yön (blind way) tekniği kullanılmıştır. Bunun ana amacı incelenen alanın ortalama kesme dalgası hızı (V_{s30}) haritasının çıkarılmasıdır. Bu nedenle, en az 30m derinliğe kadar tabakaları karakterize etmek için uygun jeofon tipi, jeofon mesafesi ve ofset uzunluğu belirlenmiştir. Böylelikle farklı kaynaklara sahip iki yüzey dalgası ölçüm yönteminin sonuçları karşılaştırılabilmiştir. Bazı MASW ölçümleri uzak alan etkisinden etkilenmiş olsa da, sonuçlar çalışma esnasında gerçekleştirilen çabanın çok tatmin edici sonuçlar verdiğini kanıtlamıştır. Nihai modeller yüzey dalgası analizleri esnasında Rayleigh dalgasının temel modunun kaydedilmesi varsayımı üzerine oluşturulmuştur. Aktif ve pasif yüzey dalgası ölçümlerinin işlenmiş kayıtlarından örnekler Şekil 1'de verilmiştir ve bu şekilde dağılım (dispersion) eğrileri arasındaki uyum açıkça görülebilir.

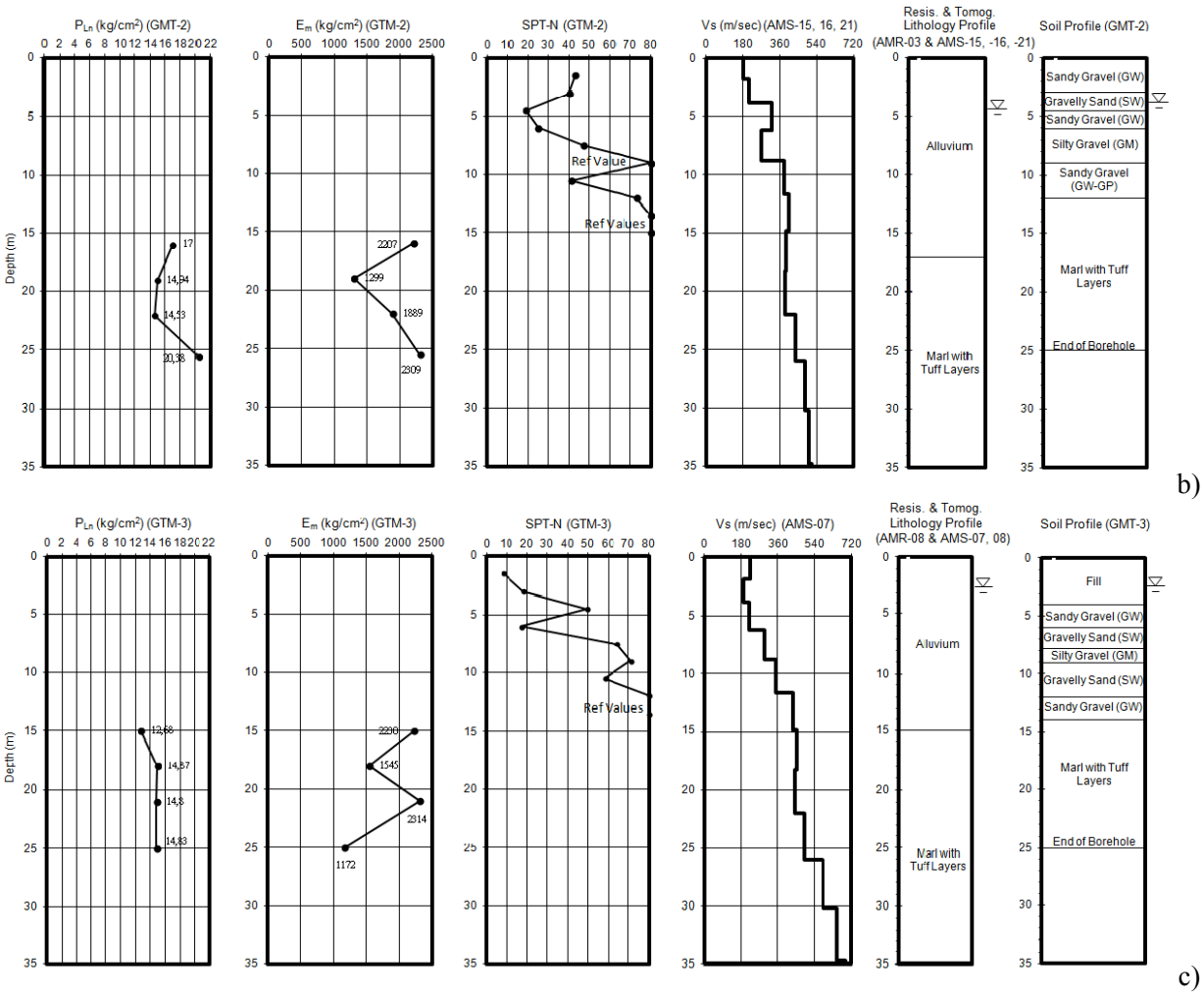
Deneysel sismik sonuçların doğruluğunu ve geçerliliğini kontrol etmek ve böylelikle de zemin profili için daha güvenilir bilgiler elde etmek için bu ölçümlerin, incelenen alanda mevcut jeoteknik sondaj çalışmalarının logları ile de tamamlanmış ve karşılaştırılmış olduğuna da dikkat edilmelidir (Şekil 3 ve 4). Bu şekilde yüzey dalgası ölçümlerinden elde edilen bilgilerin kalitesi değerlendirilmiş ve teyit edilmiştir.



Şekil 3. Sondaj verileri ile yakınında alınan yüzey dalgası ölçümlerinin birleştirilmesiyle kör yön elde edilen 1B kayma dalgası zemin profillerinin göreceli olarak kısa MAM ve uzun MASW çalışması için karşılaştırılması.



a)



Şekil 4. Kuyu içi sondaj testleri ve diğer jeofizik verileriyle yüzey dalgası ölçümlerinin birleştirilmesiyle kör yön elde edilen 1B kayma dalgası zemin profillerinin göreceli olarak Uzun MAM ve kısa MASW çalışması için 3 farklı noktada karşılaştırılması.

Çalışmalar dahilinde incelenen iki sahada, nehrin ana yatağından uzaklaşıldığında, ince taneli malzeme çökeliminden dolayı kesme dalgası hızı değerleri düşme eğilimdedir. Çalışmalar mında elde edilen sismik veriler ile birlikte tamamlayıcı çalışmaların da yardımıyla alüvyon çökel kalınlığı belirlenebilir (Eker, 2009 ve Eker vd., 2012). Temsili kayma dalgası hızı profilleri ve jeoteknik sondajlardan elde edilen kuyu logları Şekil 3 ve 4'te karşılaştırılmış ve denetleştirilmiştir. Şekillerde de görüleceği üzere, çökelim sistemleri arasındaki eşik değer sınırı ile birlikte farklı zemin tipleri kayma dalgası hızı ile tanımlanabilmektedir. Gerçekleştirilen sondaj çalışmalarından elde edilen kuyu logu ve standart penetrasyon testi (SPT) verilerine istinaden, genel olarak 2 sahada da farklı derinliklerde bulunan çakıl lensleri veya tabakaları olmasından ve bu birimin altında kil çökellerinin yer almasından dolayı çalışma alanında güvenilir N_{SPT} sonuçlarının elde edilmesinin zor olduğu gözlenebilmektedir (Şekil 4a, 4b ve 4c). Bu tabakalarda refü (refuse) sonuçları alındığından standart penetrasyon testi bu tip birimleri karakterize etmek için uygun olmayan bir yöntem olarak söylenebilir.

Şekil 4'te verilen bulgular göz önünde bulundurulduğunda, yüzey dalgası, sismik tomografi ve özdirenç ölçümleri jeoteknik sondajlar (GMT-1, -2 ve -3) ile ilişkilendirilerek seçilmiş ve litolojik ve Vs logları hazırlanmıştır. Jeoteknik deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, sedimanter tabakaların (yeni inşaat dolgu malzemesi, alüvyon ve diğer litolojik sınırlar) litolojik sınırlarının ve ayrıca yeraltı suyu seviyelerinin

genel yöneliminin 2-B özdirenç ve sismik tomografi jeofizik deney sonuçları ile nispeten tutarlı olduğu ve özelikle AMR11-AMS20 ile GMT-1, AMR3, AMS15-16-21 ile GMT-2 ve AMR8, AMS7 ile GMT-3 çiftlerinde nispeten tutarlı olduğu görülmektedir (ŞEKİL 4a, 4b ve 4c). Kesme dalgası hızı sonuçları ayrıca jeoteknik sondaj sonuçları ve özellikle de GMT-1 ile AMS20, GMT-2 ile AMS15-16-21 ve GMT-3 ile AMS7 çiftlerinde tutarlıdır [yüksek su tablalı yumuşak derin alüvyon tabakalar (Vs < 200 m/s); orta sıkılıkta kum ve çakış (200 < Vs < 400 m/s) ve tüff ve aglomera gibi yumuşak volkanik kayaçlar, süreksizlik düzlemli aşınmış çimentolanmış sedimanter kayaçlar (400 < Vs < 700 m/s) Türk Sismik Kodu Zemin Grupları (Türkiye Cumhuriyeti Bayındırlık ve İskân Bakanlığı. 1998)]. Tabakalar ve atanan kesme dalgası hızı sonuçları arasındaki litolojik birimlerin yanal değişiminden kaynaklanan küçük farklılıklar dışında, deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda üç alanda da başarılı korelâsyonlar yapıldığı sonucuna varılabilir.

KAYNAKLAR

Foti, S. (2005). Surface wave testing for geotechnical characterization, surface waves in geomechanics—direct and inverse modeling for soil and rocks. In: Lai, Wilmanski (Eds.), CISM Lecture Notes. Springer-Verlag, Wien-Newyork, pp. 47–71.

Hayashi, K. (2008). Development of surface-wave methods and its application to site investigations, PhD Thesis, Kyoto University, 278 pp.

Jin, X., Luke, B. ve Louie, J. (2006). Comparison of Rayleigh wave dispersion relations from three surface wave measurements in a complex-layered system. Proc., ASCE Geocongress (Atlanta). ASCE Press, New York.

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.

Miller, R.D., Xia, J., Park, C.B. ve Ivanov, J.M. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock, Kansas Geological Survey. The Leading Edge 1392–1396 (December).Nazarian, S., 1984. In situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by spectral-analysis-of-surface-waves method. Ph.D. Dissertation, Univ. of Texas, Austin.

Türkiye Cumhuriyeti Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (1998). Afet Bölgelerinde İnşa Edilecek Yapılar için Türk Deprem Yönetmeliği, Özellikler. Ankara, Türkiye.

Okada, H. (2003). The microtremor survey method, Geophysical Monograph Series no. 12. Published by Society of Exploration Geophysicists (SEG), Tulsa.

Park, C.B., Miller, R.D. ve Xia, J. (1999). Multi-channel analysis of surface waves. Geophysics 64 (3), 800–808.

Park, C.B., Miller, R.D. ve Xia, J. (2001). Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MASW). Proceedings of the SAGEEP 2001, Denver, Colorado, SSM-4.

Park, C.B., Miller, R.D. ve Miura, H. (2002). Optimum field parameters of a MASW survey [Exp. Abs.]. SEG-J, Tokyo (May 22–23).

SeisImager/SW^{TM} Manual (2006). OYO Coppeation, Geometrics, Inc.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A. (1976). Applied Geophysics, 1st Edition, Cambridge University Press, New York, 860p.

Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A., Harris, J.B. ve Ivanov, J. (2002). Comparing shearwave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22 (3), 181–190.

Xia, J.,Miller, R.D., Park, C.B., Ivanov, J., Tian, G. ve Chen, C. (2004). Utilization of high frequency Rayleigh waves in near surface geophysics. The Leading Edge 23 (8), 753–759

Stokoe II, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A. ve Roesset, J.M. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method, in geophysical characterization of sites. In: Woods, R.D. (Ed.), ISSMFE Technical Committee #10. Oxford Publishers, New Delhi.

Yoon, S. ve Rix, G.J. (2005). Active and passive surface wave measurements at the William Street Park Site, using F-K methods, in blind comparisons of shear-wave velocities at closely-spaced sites in San Jose, California. In: Asten, M.W., Boore, D.M. (Eds.), U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 2005–1169, part 2 (15 pp.).