

**Sismik Tehlikenin Yüksek Olduğu Kentsel Alanlarda
Mikrotremor ve Gelişmiş Çoklu-Mod Uzaysal Özilişki
(MMSPAC) Yöntemi ile Zeminlerin Özelliklerinin
Belirlenmesi**

Proje No: 109M390

Sonuç Raporu

Y.Doç.Dr. Ayşegül Askan Gündoğan
Doç.Dr. Selma Kadioğlu
Fatma Nurten Şişman
Esra Ezgi Ekincioğlu

ARALIK 2010
ANKARA

Önsöz

Bu rapor, Tübitak tarafından 15.10.2009-15.10.2010 tarihleri arasında desteklenmiş olan 109M390 no'lu ve "Sismik Tehlikenin Yüksek Olduğu Kentsel Alanlarda Mikrotremor ve Gelişmiş Çoklu-Mod Uzaysal Özilişki (MMSPAC) Yöntemi ile Zeminlerin Özelliklerinin Belirlenmesi" başlıklı Tübitak 1002 Hızlı Destek Projesinin sonuç raporudur.

Bu projede, jeofizik ve inşaat mühendislerinden oluşan proje ekibi tarafından Türkiye'nin sismik açıdan aktif bölgelerinden seçilen belirli sahalarda (Bolu ve Düzce illerinde) mikrotremor ölçümleri gerçekleştirilmiş; bu mikrotremor kayıtlarından MMSPAC yöntemiyle S-dalga hızının derinliğe göre değişimi elde edilmiştir. Proje kapsamında MMSPAC yöntemi ile mikrotremor uygulaması ayrıntılı olarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar, literatürdeki diğer yöntemlerle ve daha önceki çalışmalarda elde edilmiş olan bulgularla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucu belirlenmiş olan zemin bilgilerine ait çıktılar, ileride öncelikli olarak yerel zemin koşullarını dikkate alan deprem tehlike haritalarının geliştirilmesinde; zemin koşullarından ötürü oluşabilecek yapı hasar dağılımlarını belirlemede; mikrobölgelendirme çalışmalarında; tek boyutlu S-dalga hızı bilgilerinden çıkarılabilecek olan iki ve üç boyutlu zemin modellemelerinde; azalım ilişkilerinde ve yer hareketi modellerinde kullanılabilecektir.

İçindekiler

1. Giriş	1
2. Genel Bilgiler	3
2.1 Literatür Özeti	3
2.2 Bolu ve Düzce İllerinde S-dalga Hızları Belirlemeye Yönelik Önceki Çalışmaların Derlenmesi	5
3. Gereç ve Yöntem	11
3.1 Bolu ve Düzce İllerinde Mikrotremor Ölçümlerinin Yapılması	11
3.2 MMSPAC Yöntemi ile Veri Değerlendirilmesi	16
3.3 Frekans- Dalga Sayısı (f-k) Yöntemi ile Veri Analizi	20
3.4 HVSR (Horizontal to Vertical Spectrum Ratio- Yatay/Düşey Spektrum Oranları) Yöntemi ile Veri Analizi	21
4. Bulgular	22
4.1 Proje Kapsamında Elde Edilen Sonuçlar	22
4.2 Bu Proje Kapsamında Elde Edilen Sonuçların Önceki Çalışmalar ile Karşılaştırılması	34
5. Sonuç ve Öneriler	36
5.1 Sonuçlar	36
5.2 Öneriler ve Gelecek Çalışma Planları	37
5.3 Proje Kapsamında Yapılan Yayınlar	39
Kaynaklar	40

Tablo Listeleri

Tablo 1. Bolu ve Düzce İl Merkezlerinde Gerçekleştirilmiş Önceki Çalışmalar

Şekil Listeleri

- Şekil 1.** Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasında (a) Bolu ve (b) Düzce illerinin konumu
- Şekil 2.** Tokgöz (2002)'nin Bolu ilinde yaptığı Sismik Kırılma çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili
- Şekil 3.** Başokur (2005)'in Bolu ilinde yaptığı ReMi çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profile
- Şekil 4.** Rosenblad vd.(2006)'nin Bolu ilinde yaptığı SASW çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili
- Şekil 5.** Ansal vd. (2007)'nin Bolu ilinde yaptığı SPT çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profile
- Şekil 6.** Ulaş ve Kılıç (2008)'in Bolu ilinde yaptığı Sismik Kırılma çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili
- Şekil 7.** Kudo vd.(2002)'nin Düzce ilinde yaptığı SPAC çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili
- Şekil 8.** Yamanaka (2002)'nin Düzce ilinde yaptığı SPAC çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profilleri
- Şekil 9.** Rosenblad vd.(2006)'nin Düzce ilinde yaptığı SASW çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili
- Şekil 10.** Alexoudi (2008)'in Düzce ilinde yaptığı SPAC çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili
- Şekil 11.** Yılmaz vd. (2008a)'nin Düzce ilinde yaptığı Sismik Kırılma çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili
- Şekil 12.** Yılmaz vd. (2008b)'nin Düzce ilinde yaptığı Kuyu çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili
- Şekil 13.** Yılmaz vd. (2008b)'nin Düzce ilinde yaptığı SASW çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili
- Şekil 14.** Yılmaz vd. (2008b)'nin Düzce ilinde yaptığı MASW çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili
- Şekil 15.** Bolu ve Düzce sahalarında kurulu olan ivmeölçerler: BOL (üst sıra) ve DZC (alt sıra) kuvvetli yer hareketi istasyonları
- Şekil 16.** Güralp marka CMG-6TD sismometre
- Şekil 17.** Dört sismometre ile MMSPAC Yöntemi için arazi düzeneği
- Şekil 18.** Düzce sahasında kullanılan dizilim krokisi

Şekil 19. Bolu sahasında kullanılan dizilim krokisi

Şekil 20. Bolu ve Düzce saha çalışmaları sırasında merkez istasyonda veri toplama ve senkronizasyon çalışmaları

Şekil 21. SPAC Yöntemi ile Mikrotremor Veri Analizi Şeması

Şekil 22. DZC istasyonunda r1 ve r2 uzaklıkları için uyumluluk eğrileri

Şekil 23. En küçük hata değerini veren uyumluluk eğrisini oluşturan model

Şekil 24. En küçük hata değerini veren hız modeline ait dispersiyon eğrisinin gözlemsel dispersiyon verisi ile karşılaştırılması

Şekil 25. MMSPAC yöntemine ait akış diyagramı

Şekil 26.a BOL istasyonunda 1. kullanıcı MMSPAC sonucu

Şekil 26.b BOL istasyonunda 1. kullanıcı HVSR sonucu

Şekil 27.a BOL istasyonunda 2. kullanıcı MMSPAC sonucu

Şekil 27.b BOL istasyonunda 2. kullanıcı HVSR sonucu

Şekil 28.a BOL istasyonunda 3. kullanıcı MMSPAC sonucu

Şekil 28.b BOL istasyonunda 3. kullanıcı HVSR sonucu

Şekil 29.a BOL istasyonunda 4. kullanıcı MMSPAC sonucu

Şekil 29.b BOL istasyonunda 4. kullanıcı HVSR sonucu

Şekil 30.a DZC istasyonunda 1. kullanıcı MMSPAC sonucu

Şekil 30.b DZC istasyonunda 1. kullanıcı HVSR sonucu

Şekil 31.a DZC istasyonunda 2. kullanıcı MMSPAC sonucu

Şekil 31.b DZC istasyonunda 2. kullanıcı HVSR sonucu

Şekil 32.a DZC istasyonunda 3. kullanıcı MMSPAC sonucu

Şekil 32.b DZC istasyonunda 3. kullanıcı HVSR sonucu

Şekil 33.a DZC istasyonunda 4. kullanıcı MMSPAC sonucu

Şekil 33.b DZC istasyonunda 4. kullanıcı HVSR sonucu

Şekil 34. BOL istasyonunda MMSPAC ve f-k yöntemlerinin karşılaştırılması

Şekil 35. DZC istasyonunda MMSPAC ve f-k yöntemlerinin karşılaştırılması

Şekil 36. BOL istasyonunda tüm kullanıcılar tarafından elde edilen hız profillerinin karşılaştırılması

Şekil 37. DZC istasyonunda tüm kullanıcılar tarafından elde edilen hız profillerinin karşılaştırılması

Şekil 38. BOL istasyonunda bu proje sonuçlarının önceki çalışmalarla karşılaştırılması

Şekil 39. DZC istasyonunda bu proje sonuçlarının önceki çalışmalarla karşılaştırılması

Özet

Depremler yeryüzünde kentsel alanları etkilemekte olan en tahrip edici doğal felaketlerdendir. Depremlerin oluşturduğu yapı hasarları, depremin yalnızca odak ve yayılım özelliklerine değil, zemin özelliklerine bağlı olarak da büyük farklılıklar göstermektedir. Sert anakayanın üzerinde yer alan yumuşak zeminler, yer hareketini büyüterek ağır yapı hasarlarına neden olabilirler. Yapı ve zemin hasarları açısından son derece önemli olan zemin hakim periyotları, büyütme faktörleri ve zemin sınıflarının belirlenmesi, yapı hasarlarının, can ve mal kayıplarının azaltılması açısından kritik bir husustur.

Günümüzde zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda, S-dalga hızlarını elde etmek için sismik kırılma, yansıma ve sondaj gibi geleneksel yöntemler kullanılmaktadır. Ancak maliyeti yüksek ve şehirleşmiş bölgelerde uygulaması zor olan bu yöntemlerle derinlerdeki tabakaların S-dalga hızlarının elde edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle “pasif kaynaklı” alternatif sismik yöntemler geliştirilmiştir. Pasif kaynaklı yöntemlerle, yerin küçük-genlikli doğal titreşim kayıtları (mikrotremorler) kullanılarak zeminlerin dinamik özellikleri araştırılmaktadır. Literatürde mikrotremor verilerinin işlenmesi için geliştirilmiş en uygun yöntem çoklu-mod uzaysal özilişki (MMSPAC ya da multi-mode SPAC) yöntemidir. Bu yöntem, yalnızca hakim mod için değil daha yüksek modlarda S-dalgası hızlarını bulmak için de başarıyla uygulanmakta ve S-dalga hızları yünden bağımsız olarak elde edilmektedir. MMSPAC yöntemi az sayıda istasyon kullanılmasına da elverişli bir yöntemdir.

Bu çalışmada, jeofizik ve inşaat mühendislerinden oluşan proje ekibi tarafından Bolu ve Düzce illerinde seçilen sahalarda mikrotremor ölçümleri gerçekleştirilmiş; bu kayıtlardan elde edilen faz-hızı dispersiyon eğrilerinin ters çözümlerinden S-dalga hızının derinliğe göre değişimi elde edilmiştir. Sonuçlar diğer yöntemlerle ve bölgeye ait önceki verilerle karşılaştırılmış; yöntem ve bulgular sınanmıştır. Çalışmanın en önemli yaygın etkisi, alternatif bir yöntem sınanarak, Türkiye için dünyada sismik bölgelerde örnekleri bulunan bir Bölgesel Hız Modeli (Community Velocity Model) oluşturulması yönünde bir ilk adım atılmış olmasıdır.

Anahtar Kelimeler: Mikrotremor, zemin tabakaları, yüzey dalgaları, MMSPAC yöntemi, ters-çözüm, S-dalga hızı

Abstract

Earthquakes are among the most destructive natural disasters affecting urban populations. Structural damage caused by the earthquakes depends not only on the seismic source and propagation properties but also on the soil properties. Soft sediments on top of hard bedrock can greatly amplify the ground motion and cause severe structural damage. Estimation of the fundamental periods, amplification factors and types of soils is critical in terms of reduction of loss and casualties.

Nowadays, traditional methods like seismic refraction, reflection and drilling are used commonly in the estimation of dynamic properties of soils. However, with these difficult and costly methods, it is not possible to obtain the S-wave velocity of the deep soil layers. As an alternative to the existing methods in the literature for measuring S-wave velocities, surface wave techniques based on passive seismic sources are developed. In these alternative methods, microtremors are used to estimate dynamic soil properties. The most suitable method in the literature for the interpretation of microtremor data is the multi-mode spatial autocorrelation (MMSPAC) technique. This method works for the higher modes as well as the fundamental mode and estimates the S-wave velocities independent of the direction. In addition, this method works efficiently even with a small number of stations.

In this study, the project team consisting of geophysical and civil engineers collected and interpreted microtremor data at selected sites in Bolu and Düzce. The collected data are used to form phase-velocity dispersion curves and from the inverse solutions of these curves, the variation of S-wave velocities with respect to depth is obtained. The results are compared with the results of previous studies and the method is verified. The most significant deliverable of the proposed project is that it constitutes an important first step to form a Community Velocity Model similar to the existing ones throughout the world.

Keywords: Microtremor, soil layers, surface waves, MMSPAC method, inverse problem, S-wave velocity

1. Giriş

Sert ana kaya üzerinde yer alan yumuşak zemin tabakaları, yer hareketlerini büyütme etkisine sahip olduklarından, zemin koşulları deprem hasarlarını doğrudan etkilemektedir. Tarih boyunca yerleşim merkezleri çoğunlukla sedimanter tabakaların üzerine kuruldukları için, sismik bölgelerde zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi, sismik tehlikenin ve yapı hasargörebilirliğinin tespiti açısından son derece önemli bir problemdir. 1999 Marmara depremlerinde yerel zemin koşullarının önemi ve ağır yapı hasarı oluşturma potansiyeli bir kez daha görülmüştür (Örn: Özel ve Sasatani, 2004; Bakır vd., 2005; Bol vd., 2007). Son yıllarda birçok yer hareketi modelleme çalışmasında yerel zemin etkileri üzerinde durulmuş (Örn: Olsen vd., 2000; Kudo vd., 2002; Komatitsch vd., 2004) ve şehirlerin üzerine kurulduğu zeminlerin dinamik özelliklerinin ayrıntılı olarak belirlenmesi, jeoloji, inşaat ve jeofizik mühendisliği gibi birçok bilim dalında öncelikli araştırma konularından birisi haline gelmiştir.

Zemin sınıflarının ve zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar, temelde S-dalga hızlarının elde edilmesine dayanmaktadır. Literatürdeki bir çok çalışmada belirtildiği gibi, günümüzde zeminlerin S-dalga hızlarının belirlenmesinde sismik kırılma, yansıma ve sondaj gibi geleneksel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak çoğunlukla maliyeti yüksek ve şehirleşmiş bölgelerde uygulaması zor olan bu yöntemlerle derinlerdeki yüksek hızlı tabakaların S-dalga hızlarının elde edilmesi mümkün değildir. Literatürde varolan S-dalga hızı belirleme yöntemlerine alternatif olarak, aktif ve pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde temel olarak yüzey dalgalarından elde edilen faz-hızı dispersiyon eğrileri kullanılarak tabaka kalınlıkları ve S-dalga hızlarının belirlenmesi hedeflenmektedir. Aktif kaynaklı yöntemler güçlü bir kaynağa ihtiyaç duyduklarından ve derinlerde çok iyi sonuç vermediklerinden, alternatif olarak kırılma-mikrotremor (ReMi) ya da frekans-dalga sayısı (f-k) gibi pasif kaynaklı yöntemler geliştirilmiştir. Yeryüzü depremler haricinde de sürekli salınım halindedir; bu küçük genlikli salınımlara mikrotremor (titreşim) adı verilmiştir. Pasif kaynaklı yöntemler çoğunlukla titreşim analizine dayanmaktadır. "Pasif kaynaklı sismik yöntem" olarak da bilinen mikrotremor ölçümleri son yıllarda tüm dünyada yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Pasif kaynaklı sismik yöntemlerde, yerin doğal titreşim kayıtları (mikrotremörler) kullanılarak zeminlerin dinamik özellikleri araştırılmaktadır.

Mikrotremor oluşumuna neden olan mikrosismik enerjinin kaynağı ve yayılım modları üzerinde yaklaşık bir yüzyıldan beri çalışılmaktadır. Mikrosismik enerjinin çoğunluğu dispersif özellikler taşıyan yüzey dalgaları olarak yayılır. Temel (hakim) modda ya da yüksek modlarda yayılabilen yüzey dalgaları her bir modda farklı bir faz-hızı dispersiyon özelliği gösterir. Faz-hızı dispersiyon yönteminin temeli faz-hızlarındaki frekansa bağlı değişimin ölçülmesidir: yüksek frekanslı yüzey dalgaları daha sığ tabakalarda etkiliyken, düşük frekanslı dalgalar daha derinlere yayılırlar ve dolayısıyla daha hızlıdırlar. Hızın frekansa göre en fazla değiştiği noktalar ise belirlenmesi hedeflenen tabaka arayüzleridir. Literatürde mikrotremor verilerinin işlenmesi için geliştirilmiş en uygun yöntem çoklu-mod uzaysal özilişki (MMSPAC ya da multi-mode SPAC) yöntemidir. Bu yöntem, diğer yöntemlerden farklı olarak yalnızca hakim mod için değil daha yüksek modlarda S-dalgası hızı bulmak için de başarıyla uygulanmakta ve S-dalga hızları yönden bağımsız olarak elde edilmektedir. Bunlara ek olarak MMSPAC yöntemi az sayıda istasyon kullanılmasına elverişli bir yöntemdir.

Bu çalışmada, Bolu ve Düzce illerinde seçilen sahalarda mikrotremor veri toplama ve işleme konularında dünyanın önde gelen yer bilimcilerinden Prof. Dr. Michael Asten önderliğinde, mikrotremor ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu kayıtlardan MMSPAC yöntemiyle faz-hızı dispersiyon eğrileri oluşturulmuştur. Dispersiyon eğrilerinin ters çözümlerinden S-dalga hızının derinliğe göre değişimi elde edilmiştir.

Bu hızlı destek projesinde MMSPAC yöntemi ile mikrotremor uygulaması ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Seçilmiş sahalardaki yumuşak zemin koşullarında sınınmış olan bu yöntem, ileride Türkiye'nin herhangi bir bölgesinde zemin tabakalarının dinamik özelliklerinin elde edilmesinde uygulanabilecektir. Uzun vadede bu ve benzeri çalışmalar sonucu belirlenmiş olan zemin bilgilerine ait çıktılar, öncelikli olarak yerel zemin koşullarına bağlı olarak deprem tehlike haritalarının geliştirilmesinde; zemin koşullarından ötürü oluşabilecek yapı hasar dağılımlarını belirlemekte; mikrobölgelendirme çalışmalarında; tek boyutlu S-dalga hızı bilgilerinden çıkarılabilecek olan iki ve üç boyutlu zemin modellemelerinde; azalım ilişkilerinde ve yer hareketi modellerinde kullanılabilir. Bu nedenlerle bu çalışmanın, literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaya yönelik bir adım olduğu düşünülmektedir.

2. Genel Bilgiler

Bu çalışmada ele alınan temel yöntem olan MMSPAC yöntemi ve uygulaması ayrıntılı olarak incelenmeden ve proje kapsamında elde edilen sonuçlar sunulmadan önce literatürde bulunan S-dalga hızları belirlemeye yönelik çalışmalar ile bu proje kapsamında seçilen sahalarda yapılmış önceki çalışmaların kısa bir özeti verilecektir.

2.1 Literatür Özeti

Günümüzde, yaygın olarak kullanılan sondaj, kırılma ve patlatma yöntemlerinin şehirleşmiş bölgelerdeki uygulama zorluğu ve yüksek maliyetleri nedeniyle zeminlerin özelliklerinin belirlenmesinde alternatif yöntemler arayışına gidilmiş ve yüzey dalgalarından birisi olan Rayleigh dalgası kullanarak yerin S dalga hız yapısını belirleyen yüzey dalgası yöntemleri geliştirilmiştir. Yüzey dalgası yöntemleri aktif ve pasif kaynaklı yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Tüm bu yöntemlerde temel amaç, incelenen alana ait dispersiyon eğrisinden yola çıkarak tek boyutlu S-dalgası hız profilleri elde etmektir. Aktif kaynaklı yöntemlerden ilki, Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi Yöntemi (SASW-Spectral Analysis of Surface Waves) (Nazarian ve Desai, 1993; Kramer, 1996; Zywicki, 1999), ikincisi ise Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi Yöntemi'dir (MASW-Multichannel Analysis of Surface Waves) (Park vd. 1999). Aktif kaynaklı yöntemler güçlü bir kaynağa ihtiyaç duyduklarından ve derinlerde çok iyi sonuç vermediklerinden kırılma-mikrotremor (ReMi) ya da frekans-dalga sayısı (f-k) gibi pasif kaynaklı yöntemler geliştirilmiştir (Ekincioğlu, 2007).

Pasif kaynaklı yöntemler, doğada bulunan mikrotremorlerden faydalanırlar. Mikrotremorler, yer yüzeyinde doğa olayları ya da insan aktiviteleri sonucu oluşan sürekli titreşimlerdir. İlk kez Aki (1957) mikrotremor ölçüm yöntemini literatüre tanıtmış ve titreşimleri kayıt ve analiz etmek suretiyle zemin tabakalarının hızlarına dair bilgi elde edileceğini göstermiştir (Claprod ve Asten, 2009). Toksöz ve Lacoss (1968) mikrotremorlerin temel olarak cisim ve yüzey dalgalarından oluştuğunu ve zaman ile uzayda değişken olmalarına rağmen tamamen rassal olmadıklarını belirtmiştir. Cisim dalgaları yüzey dalgalarından daha hızlı sönümlendikleri için, mikrotremor kayıtlarının çoğunlukla Rayleigh ve Love dalgalarından oluştuğu belirtilmiştir (Arai ve Tokimatsu, 2004). Pasif kaynaklı yöntemlerle yüzey dalgalarının analizleri temel olarak dispersiyon eğrisinin frekansa bağlı değişimine dayanır. Literatürde yaygın olarak kullanılan pasif kaynaklı yüzey dalgası analiz yöntemleri Kırılma – Mikrotremor (Refraction-Microtremor - ReMi) (Louie 2001) ve f-k (Frekans – Dalga Sayısı) (Toksöz, 1964; Capon,

1969; Capon, 1973; Schmidt, 1986) yöntemleridir (Ekincioğlu, 2007). Bu yöntemlere alternatif olarak, dairesel dizimli mikrotremor ölçümleri kullanılarak yapılan pasif kaynaklı Uzaysal Özilişki Yöntemi (SPAC) ile veri toplama ve veri işleme kuramları geliştirilmiştir (Aki, 1957; 1964; Toksöz, 1964; Okada, 2003; Tokimatsu, 1997; Asten vd., 2003). SPAC yöntemi dünyada çeşitli bölgelerde S-dalga hızı belirlemesi çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Okada, 2003; Stephenson vd. 2009). SPAC analizi mikrotremor dalga alanlarının uyumluluklarının bir dizi istasyonda hesabı ile yerin tek boyutlu S-dalga hızı profilini elde etmeye dayanır. Geleneksel olarak SPAC yönteminde dairesel dizimli alıcılarda düşey mikrotremor kayıt ve analizleri yapılmıştır. Yakın geçmişteki çalışmalarda ise SPAC yöntemi çoklu-modları ele almak için geliştirilmiş (MMSPAC); 3-eksenli ölçümler yapılmış ve dairesel olmayan dizimlerle çalışılmıştır (Asten ve Boore, 2005; Asten, 2006; Chavez-Garcia vd., 2006).

Ülkemizde de son yıllarda İstanbul, İzmir, Adapazarı ve Kocaeli gibi merkezlerde mikrotremor ölçümleri ile zemin sınıflandırması, zeminlerin dinamik özelliklerinin belirleme ve bölgesel sismik tehlikenin belirlenmesi çalışmaları gerçekleştirilmektedir (Örn: Ansal vd., 2001; Yılmaz vd., 2005; Siyahi ve Selçuk, 2005; Karabulut vd., 2006; Akgün ve Bekler, 2007; Ansal vd., 2007). Ancak bu çalışmaların büyük bir çoğunluğunda literatürde HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) adıyla bilinen (Yatay/ Düşey Spektral Oran) yöntemi (Nakamura, 1989) ile zeminlerin yalnızca hakim titreşim periyotları ve yüzeye yakın tabakaların yer hareketini büyütme etkileri hesaplanmış, ya da 30m derinlikte S-dalgası hız ölçümü yapılmış, bunlara dayanarak zemin sınıfı belirleme ve mikrobölgelendirme yapılmıştır. Yakın zamanda Zor vd. (2007) Tübitak MAM ve Kocaeli Büyükşehir Belediyesi işbirliği ile Kocaeli ilinde 160m derinliğe kadar SPAC yöntemi ile S-dalgası bilgilerine ulaşmış ve bunları kullanarak zemin sınıflarını belirlemiştir. Bulunan sonuçlar bölgesel sismik tehlike hesaplarında kullanılmıştır.

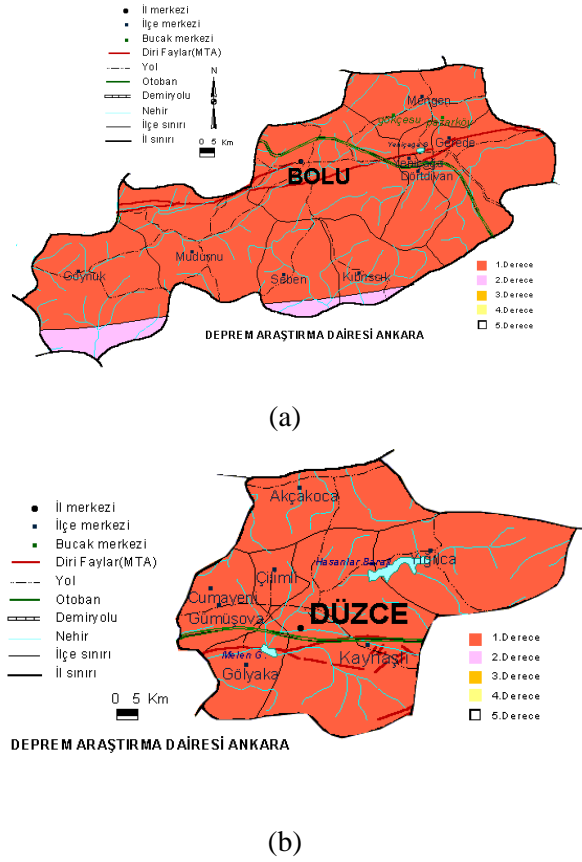
Bu çalışmada ise Bolu ve Düzce'de yaklaşık 1000 metre derinliklere dek S-dalgası hız profilleri için MMSPAC yöntemiyle dispersiyon eğrilerinden ters çözümler yapılmış; bulunan sonuçlar HVSR ve Frekans-Dalga Sayısı yöntemleriyle ve eldeki sondaj verileriyle karşılaştırılarak, yöntemin ve elde edilen hız profillerinin doğruluğu sınanmıştır.

Bunlara ek olarak, literatüre baktığımızda Türkiye'deki sismik riski yüksek bölgeler için geliştirilmiş bir bölgesel hız modeli olmadığı görülmektedir. Dünyada örnekleri bulunan bölgesel hız modelleri (Örn: Magistrale vd., 2000; Brocher, 2006), jeoloji, jeofizik ve inşaat mühendisliği gibi birçok alandan araştırmacılar tarafından hazırlanan ve yine bu alanlardaki çalışmalarda (sismik tehlike, sismik tomografi, zemin mekaniği, yer hareketi modellemeleri

gibi) doğrudan kullanıma açık ve son derece büyük bir yaygın etkiye sahip iki ya da üç boyutlu yeraltı hız modelleridir. Bu hızlı destek projesinde sınanmış olan yöntem, literatürdeki diğer yöntemlerle birlikte ileride benzeri hız modellerinin Türkiye'deki sismik bölgeler için oluşturulması yönünde kullanılabilir.

2.2 Bolu ve Düzce İllerinde S-dalga Hızları Belirlemeye Yönelik Önceki Çalışmaların Derlenmesi

Bu projenin temel amacı, Bolu ve Düzce illerinde seçilen pilot sahalarda MMSPAC yöntemiyle ana kaya derinliklerine dek S-dalgası bilgileri elde etmektir. Literatürde Bolu ve Düzce illerine ait tek boyutlu S-dalga hız yapısının elde edilmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Önceki çalışmalardan elde edilmiş zemin etüdüleri bulunan bu il merkezleri, bu proje sonunda elde edilmiş olan sonuçları karşılaştırabilmek ve yöntem ile veriyi sınamak için özellikle seçilmiştir. Şekil 1.a ve 1.b Bolu ve Düzce illerini ve bu illerdeki deprem tehlikesi dağılımını göstermektedir.



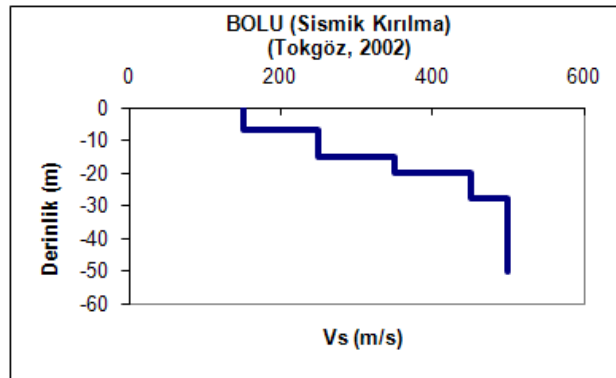
Şekil 1. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasında (a) Bolu ve (b) Düzce illerinin konumu (<http://www.deprem.gov.tr/Sarbis/Shared/DepremHaritalari.aspx> adresinden alınarak düzenlenmiştir)

Literatürden derlenen çalışmalar arasında, Bolu ve Düzce illerinde seçilen sahalarda yakınlarında gerçekleştirilmiş sondaj, sismik kırılma, Nakamura (H/V) Yöntemi, Kırılma-Mikrotremor (Re-Mi), Uzaysal Özilişki (SPAC), Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi (SASW) ve Standard Penetrasyon Testi (SPT) gibi jeofizik ve geoteknik yöntemler bulunmaktadır. İncelenen bölgeye ait ulusal ve uluslararası çalışmaların kısa bir özeti Tablo 1’de verilmiştir.

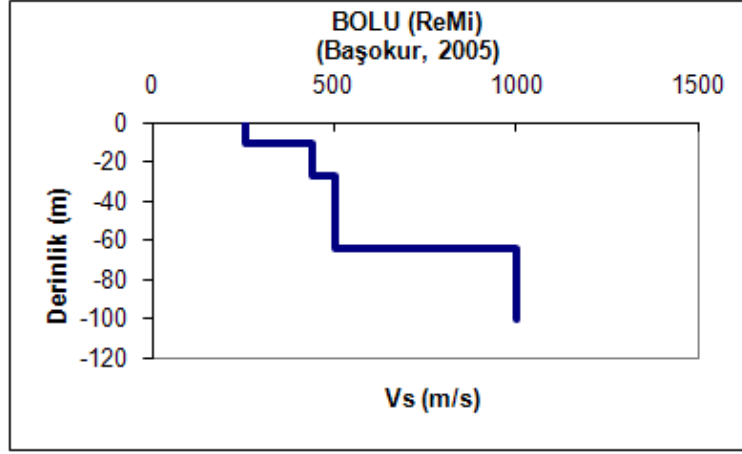
Tablo 1. Bolu ve Düzce İl Merkezlerinde Gerçekleştirilmiş Önceki Çalışmalar

Kaynak	Yöntem	Çalışma Sahası	İnilen Maksimum Derinlik (m)
Tokgöz (2002)	Kırılma	Bolu	50
Başokur (2005)	Re-Mi	Bolu	100
Rosenblad vd. (2006)	SASW	Bolu	50
Ansal vd. (2007)	SPT	Bolu	Değişken ~100
Ulaş ve Kılıç (2008)	Kırılma	Bolu	50
Kudo vd. (2002)	SPAC	Düzce	~500
Yamanaka (2002)	SPAC	Düzce	~1000 (Bu çalışmada 5 ayrı istasyon kullanılmıştır)
Rosenblad vd. (2006)	SASW	Düzce	50
Alexoudi (2008)	SPAC	Düzce	~300
Yılmaz vd. (2008a, 2008b)	Kırılma, SASW, MASW, Kuyu	Düzce	~50

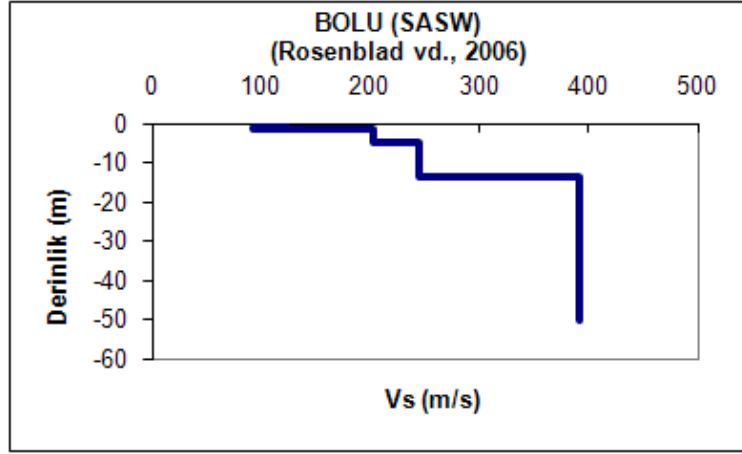
Tablo 1’de belirtilen çalışmalara ait S-dalga hız profilleri ve ilgili açıklamaları Şekil 2-14’te sunulmuştur. Proje raporunun sonuç bölümünde, bu çalışmada elde edilen bulgular, önceki çalışmalara ait bu sonuçlar ile karşılaştırılacaktır.



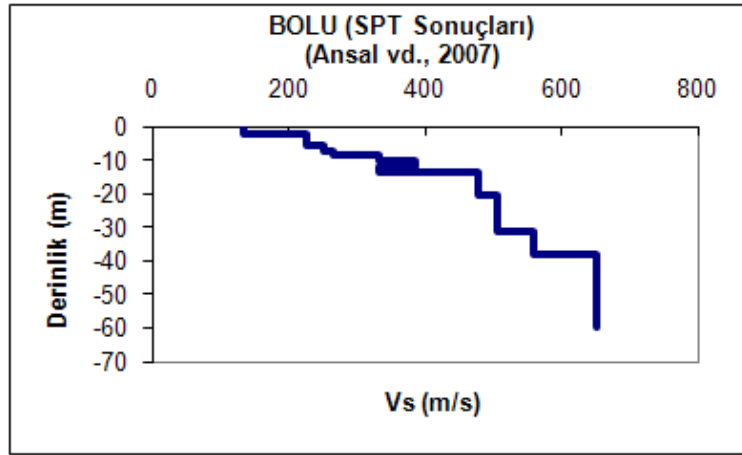
Şekil 2. Tokgöz (2002)'nin Bolu ilinde yaptığı Sismik Kırılma çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili



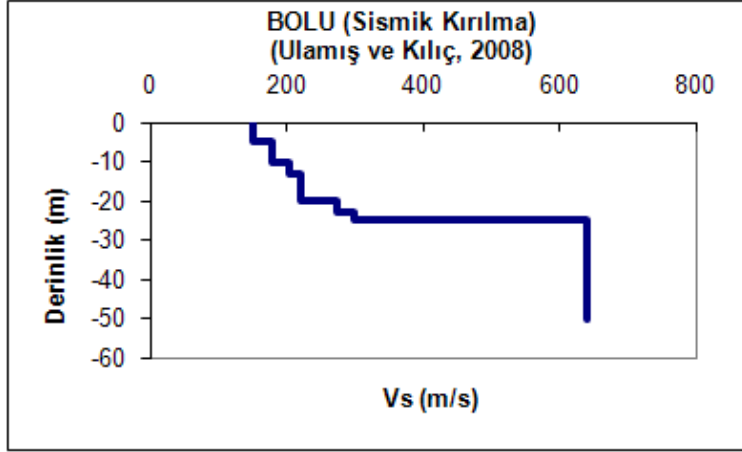
Şekil 3. Başokur (2005)'in Bolu ilinde yaptığı ReMi çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili



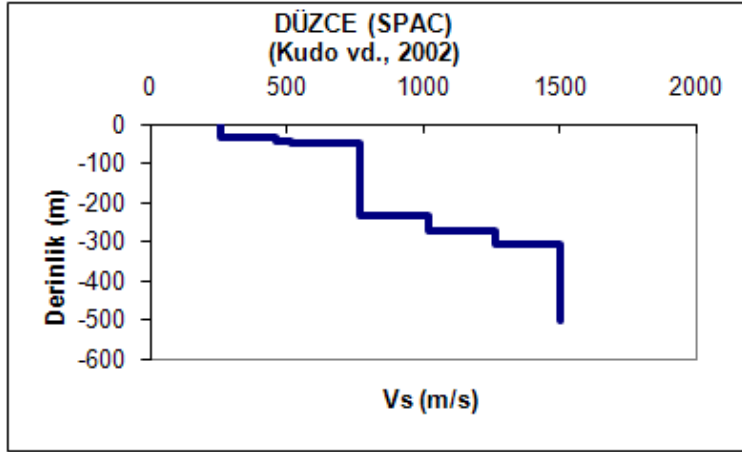
Şekil 4. Rosenblad vd.(2006)'nın Bolu ilinde yaptığı SASW çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili



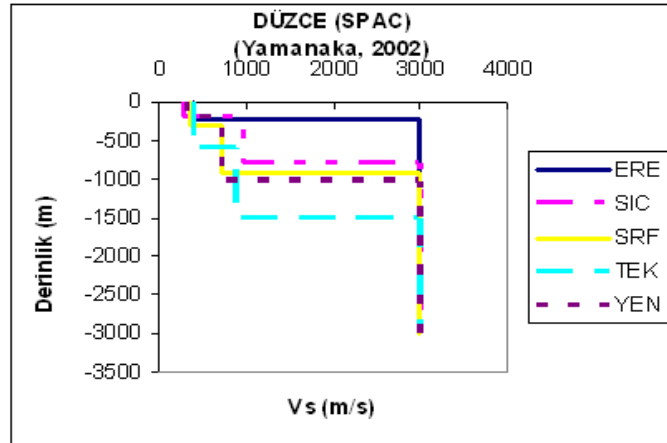
Şekil 5. Ansal vd. (2007)'nin Bolu ilinde yaptığı SPT çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili



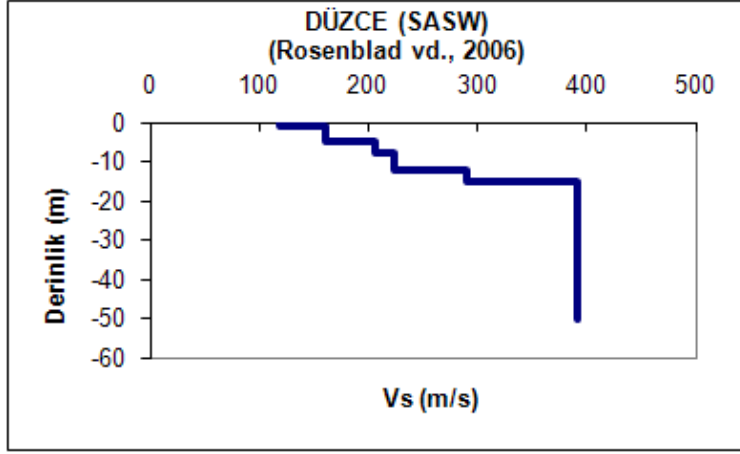
Şekil 6. Ulaşmış ve Kılıç (2008)'in Bolu ilinde yaptığı Sismik Kırılma çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili



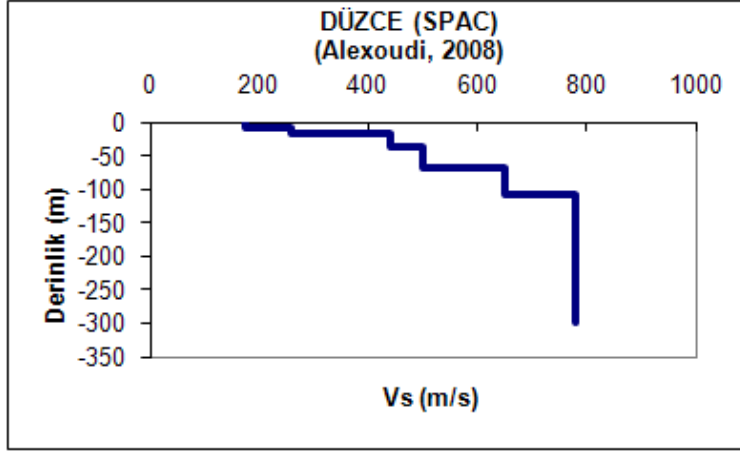
Şekil 7. Kudo vd.(2002)'nin Düzce ilinde yaptığı SPAC çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili



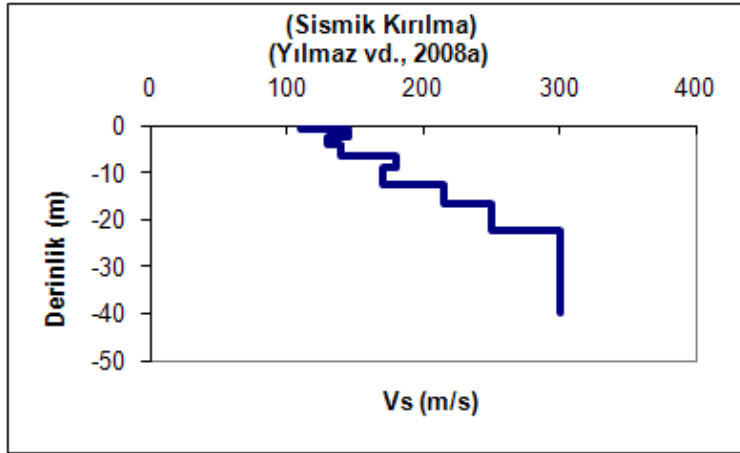
Şekil 8. Yamanaka (2002)'nin Düzce ilinde yaptığı SPAC çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profilleri



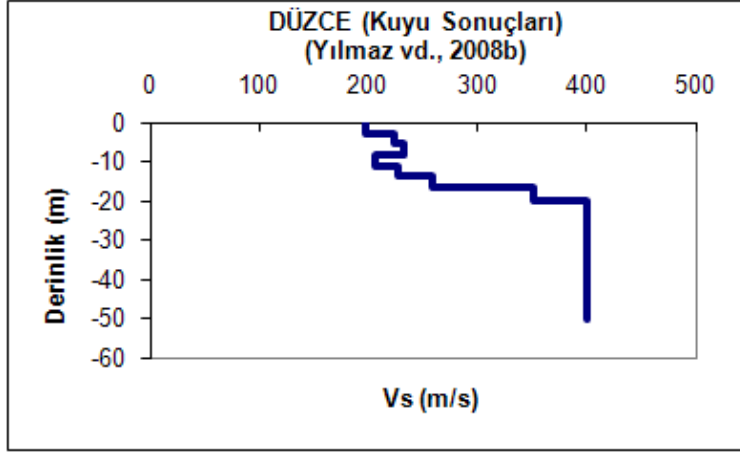
Şekil 9. Rosenblad vd.(2006)'nın Düzce ilinde yaptığı SASW çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili



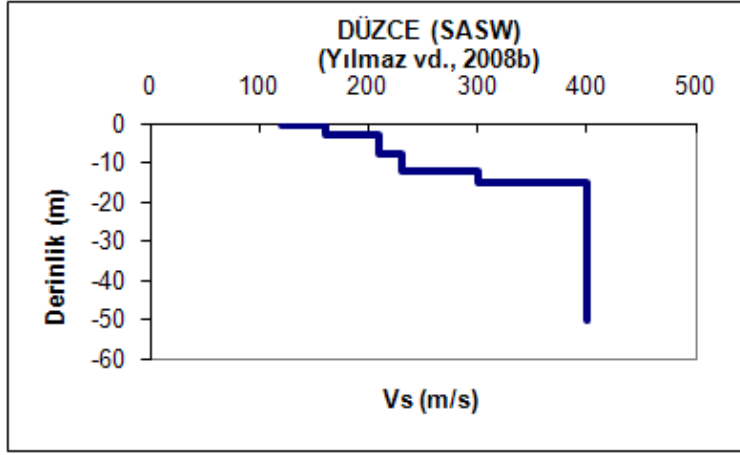
Şekil 10. Alexoudi (2008)'in Düzce ilinde yaptığı SPAC çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili



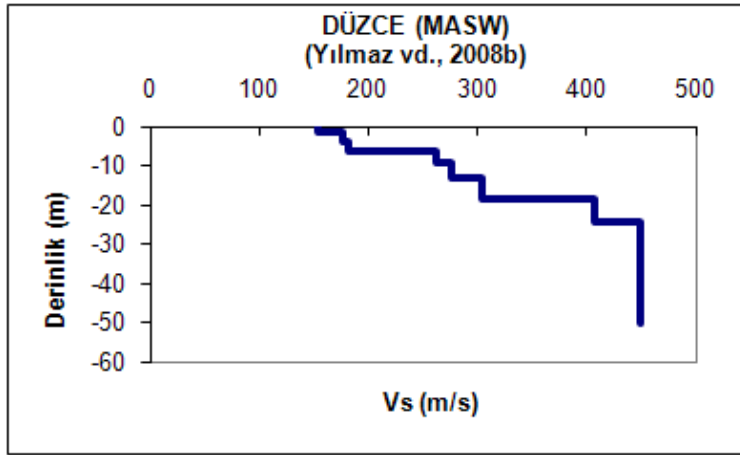
Şekil 11. Yılmaz vd. (2008a)'nın Düzce ilinde yaptığı Sismik Kırılma çalışması sonucu elde edilen S-dalga hız profili



Şekil 12. Yılmaz vd. (2008b)'nin Düzce ilinde yaptığı Kuyu çalışması sonucu elde edilen S- dalga hız profili



Şekil 13. Yılmaz vd. (2008b)'nin Düzce ilinde yaptığı SASW çalışması sonucu elde edilen S- dalga hız profili



Şekil 14. Yılmaz vd. (2008b)'nin Düzce ilinde yaptığı MASW çalışması sonucu elde edilen S- dalga hız profili

3. Gereç ve Yöntem

Bu çalışmanın temel amacı, deprem tehlikesi yüksek olan bölgelerde zeminlerin dinamik özelliklerini pratik ve gerçekçi olarak elde etmek için bir yöntem geliştirmektir. Bu amaçla, Kuzeybatı Anadolu'da seçilen sahalarda 11 Eylül-24 Eylül 2009 tarihleri arasında Avustralya Monash University'den Prof. Dr. Michael Asten'ın önderliğinde bir saha alıştırması yürütülmüş, devamında MMSPAC jeofizik yöntemiyle incelenen sahalardaki zemin özellikleri araştırılmış ve bulunan sonuçlar literatürdeki diğer yöntemlerle (HVSR ve Frekans-Dalga Sayısı, f-k) doğrulanmıştır. Bu çalışmada S-dalga hız profili ve zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek için pilot bölgeler olarak Bolu ve Düzce seçilmiştir.

Belirtilen temel amaçlar ve elde edilmesi planlanmış olan çıktılar doğrultusunda, bu çalışma kapsamında yürütülmüş üç temel aşama vardır:

- Bolu ve Düzce merkezlerinde seçilen sahalarda en uygun sismometre dizilim tasarımı ile mikrotremor ölçümleri alınması;
- Veri değerlendirme yöntemleri ve yazılımlar konusunda proje ekibi ve Prof. Dr. Michael Asten arasında bilgi ve teknoloji transferi;
- MMSPAC yöntemiyle veri değerlendirmesi ve elde edilen sonuçların HVSR ve f-k yöntemleriyle doğrulanması.

Bu aşamalarda kullanılmış olan ölçüm ve değerlendirme yöntemleri aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

3.1 Bolu ve Düzce İllerinde Mikrotremor Ölçümlerinin Yapılması

Projenin bu aşamasında, proje ekibince çalışılacak yöntem ile ilgili gerekli teorik çalışmalar ve hazırlıklar yapılmış, daha sonra saha çalışmalarına geçilmiştir. İki ilde de seçilen sahalarda Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Ağı istasyonları (BOL ve DZC) yakınındadır. Bolu ilinde Bolu Bayındırlık ve İskan İl Müdürlüğü ve Düzce ilinde ise Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü bahçesinde veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 15'te gösterildiği gibi her iki çalışma sahası içerisinde sürekli olarak kuvvetli yer hareketi kayıtları alan ivmeölçerler (BOL ve DZC istasyonları) bulunmaktadır.



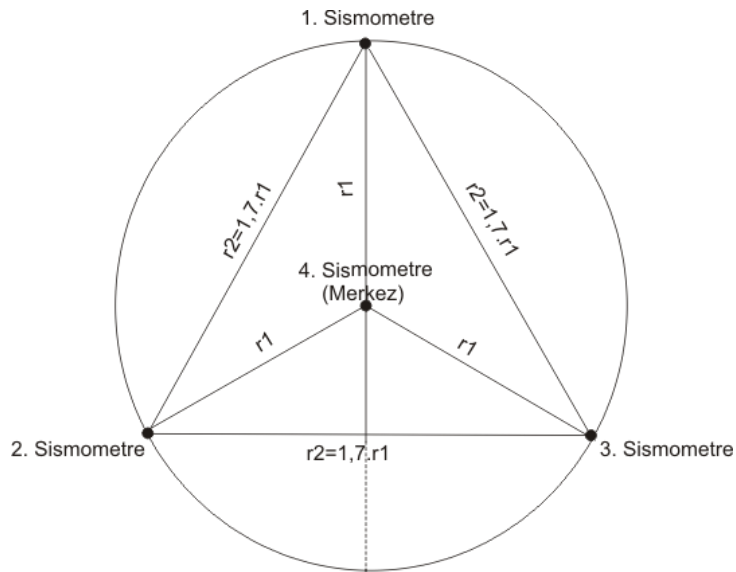
Şekil 15. Bolu ve Düzce sahalarında kurulu olan ivmeölçerler: BOL (üst sıra) ve DZC (alt sıra) kuvvetli yer hareketi istasyonları

Titreşim veri toplama ve işleme konularında uzman Prof. Dr. Michael Asten önderliğinde, jeofizik ve inşaat mühendislerinden oluşan proje ekibi, belirtilen iki ayrı sahada MMSPAC yöntemi kullanılarak titreşim ölçümleri gerçekleştirmiştir. Hassas titreşim ölçümleri alınırken geniş bantlı sismometreler gereklidir. Bu amaçla, Mülga Afet İşleri Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 4 adet Güralp marka CMG-6TD tipi üç-bileşenli sismometre kullanılmıştır. Sismometre örneği Şekil 16'da verilmiştir.

MMSPAC yöntemi için veri toplanırken en önemli unsur, arazide titreşim kaydı alan aletlerin en uygun dizilimini belirlemektir. Arazide, alıcılar farklı şekillerde bir daire üzerine yerleştirilebilirler. En yaygın olanı en az dört noktada kayıt alınan dizilim türüdür. Bu projede de temin edilmiş olan sismometre sayısına ve ölçüm alınacak sahalara uygunluğu açısından dört noktada kayıt alan dizilim şekli uygulanmıştır. Bu tür bir dizilim için, sismometrelerden biri dairenin merkezi olarak kabul edilen bir noktaya yerleştirilir. Şekil 17'de gösterildiği gibi merkez istasyon baz alınarak, diğer üç sismometre merkezden belirli bir yarıçap değeri kadar uzakta olan noktalara yerleştirilir.



Şekil 16. Güralp marka CMG-6TD sismometre (Fotograf <http://www.guralp.com/products/6TD/> adresinden alınarak düzenlenmiştir)

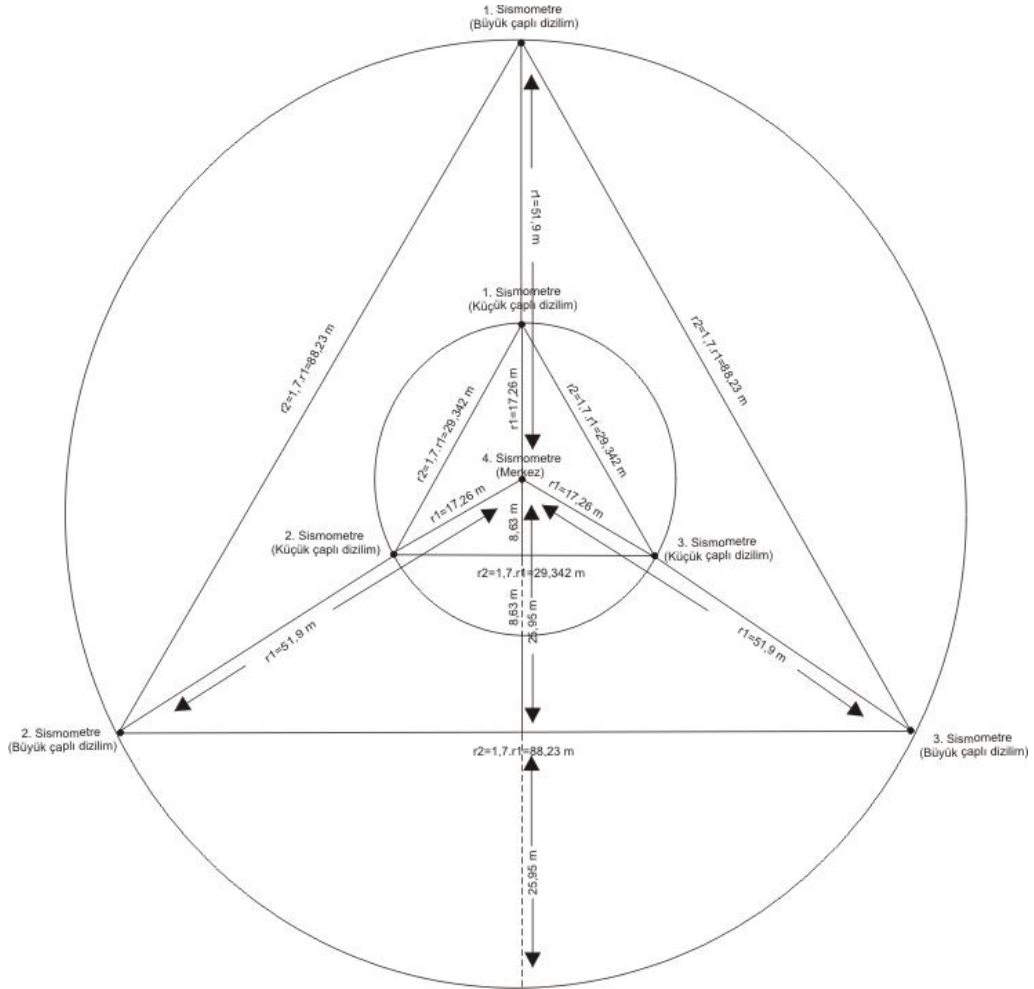


Şekil 17. Dört sismometre ile MMSPAC Yöntemi için arazi düzeneği

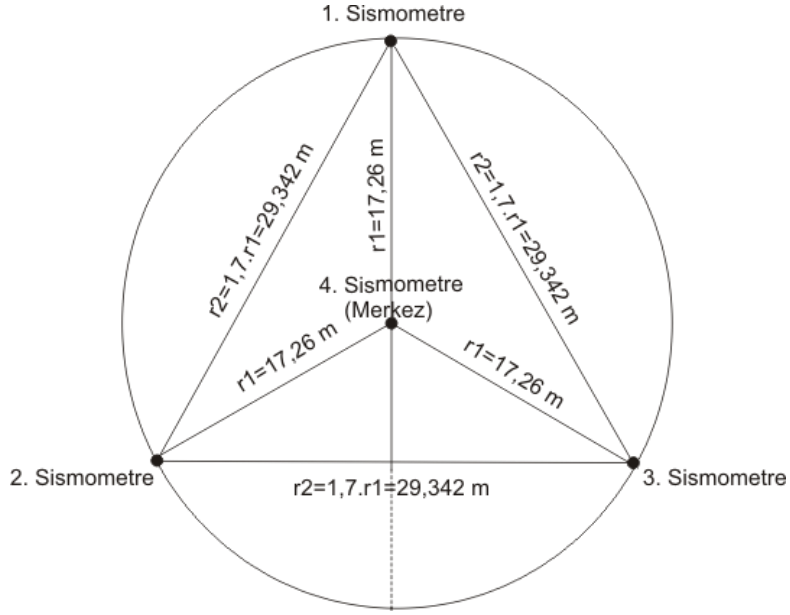
Bolu ve Düzce'de belirlenen sahalarda farklı istasyon-arası mesafelere sahip üçgenler oluşturacak şekilde üç ayrı dizilim kullanılarak mikrotremor verisi toplanmıştır. Düzce'de yapılan küçük dizilim yarıçapı 17,26 metre, büyük dizilim yarıçapı 51,9 metredir (Şekil 18). Bolu'da yapılan çalışmada dizilim yarıçapı 19,22 metredir (Şekil 19). Boludaki sahada daha büyük bir açılıma yer olmadığı için tek dizilimle çalışılmıştır. Bu merkezli-üçgen dizilimlerde toplanan Rayleigh dalgalarına ait veriler MMSPAC, H/V ve f-k yöntemleri için kullanılmıştır. Bu biçimde her sahada 2 tane istasyon-arası (Şekil 17'de r_1 , r_2 mesafelerinde) uyumluluk

(inter-station coherency) hesapları yapılmıştır. Sahada uygulanmış olan bu dizilim, yüksek modların faz hızına etkisini de göz önüne alacak, yalnızca temel modda yayılan Rayleigh dalgaları için değil, yüksek modlar için de doğru S-dalgası hız profilleri vermektedir (Asten, 2001). Birden fazla "r" istasyon-arası mesafesinde uyumlulukları kullanarak yüksek modlardaki yüzey dalgalarına ait frekans bantlarını da çözebildiği için bu dizilimle yapılan SPAC analizlerine MMSPAC (multi-mode, çoklu-mod SPAC) ismi verilir (Asten, 2006).

Arazide diğer bir önemli unsur ise kayıtların senkronizasyonudur. Bu amaçla titreşim ölçümleri sırasında sismometrelerin saatleri uydu üzerinden senkronize edilmiş, proje ekibi her bir dizilim için en az otuz dakika mikrotremor kaydı almıştır. Merkez istasyonlarda senkronizasyon kontrolü ve mikrotremor verisi toplanması sırasındaki arazi fotoğrafları Şekil 20'de verilmektedir.



Şekil 18. Düzce sahasında kullanılan dizilim krokisi



Şekil 19. Bolu sahasında kullanılan dizilim krokisi



Şekil 20. Bolu ve Düzce saha çalışmaları sırasında merkez istasyonda veri toplama ve senkronizasyon çalışmaları

Ölçülen mikrotremor kayıtlarını değerlendirirken temel varsayım, zaman ve mekanda titreşim oluşumunun rassal süreç (stochastic process) olarak kabulüdür. Literatür özetinde de belirtildiği gibi mikrotremor veri değerlendirilmesi amacıyla üç temel yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, ilk kez Aki (1957) ve Henstridge (1979) tarafından önerilen, sonrasında Asten (2001; 2006) tarafından geliştirilerek tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olan SPAC yöntemi; Toksöz (1964), Lacoss vd. (1969) ve Capon (1969) tarafından geliştirilmiş olan f-k yöntemi; ve Nakamura (1989) tarafından literatüre kazandırılan HVSR yöntemidir. Bu çalışmada veriler, derinlerdeki S-dalga hızlarını bulma ve yüksek modları yakalamakta en

güvenilir yöntem olan MMSPAC yöntemi ile değerlendirilmiş, elde edilen sonuçların doğruluğu f-k ve HVSR yöntemleriyle de sınanmıştır. Sözü edilen bu yöntemler ayrıntılı olarak aşağıda sunulmuştur.

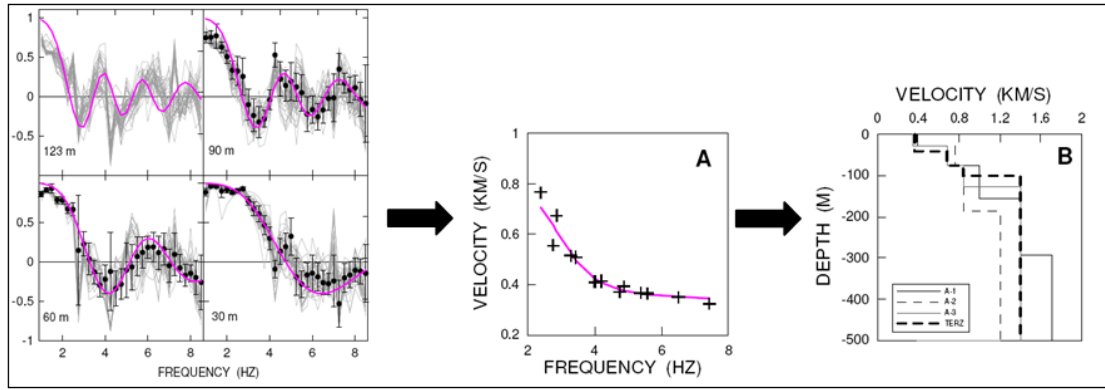
3.2 MMSPAC Yöntemi ile Veri Değerlendirilmesi

Uzaysal Özilişki yöntemi olarak da bilinen SPAC yöntemi, temel olarak mikrotremorlerin uzay ve zaman durağanlığı özelliklerini kullanarak alıcı (istasyon) çiftleri arasındaki uyumluluğun değerlendirilmesine dayanır. Belirli bir frekanstaki yüzey dalgası faz hızı, birbirine r mesafede ölçülen titreşim kayıtlarından ve o frekanstaki dalganın bileşenlerinin SPAC (uzaysal özilişki) katsayılarından hesaplanabilir (Ekincioğlu, 2007). Rayleigh dalgalarının herhangi bir f frekansındaki SPAC ya da özilişki uyumluluk katsayısı $c(f)$, sıfıncı dereceden birinci cins Bessel fonksiyonundaki $v(f)$ faz hızı ile ilişkilendirilmiştir (Claprod ve Asten, 2009):

$$c(f) = J_0\left(\frac{2\pi fr}{v(f)}\right) \quad (1)$$

Geleneksel SPAC yönteminde Denklem 1'de verilen SPAC katsayısından her bir frekansa karşılık gelen faz hızı değerleri ile dispersiyon eğrisi elde edilmektedir. Bu dispersiyon eğrisinin ters çözümü ile tek boyutlu S-dalga hızı profilleri hesaplanmaktadır. Şekil 21, şematik olarak uzaysal özilişki (SPAC) katsayılarından S-dalga hızlarının elde edilmesi aşamalarını göstermektedir.

Bolu ve Düzce sahalarında toplanan verilerin değerlendirilmesinde, Prof.Dr. Michael Asten'in sağladığı IDL tabanlı MMSPAC işleme ve ters çözüm yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımda, merkezde kayıt alan sismometrenin bulunduğu istasyona ait üç bileşen; diğer sismometrelerin bulunduğu istasyonlara ait kayıtların ise yalnızca düşey bileşenleri dikkate alınmıştır.

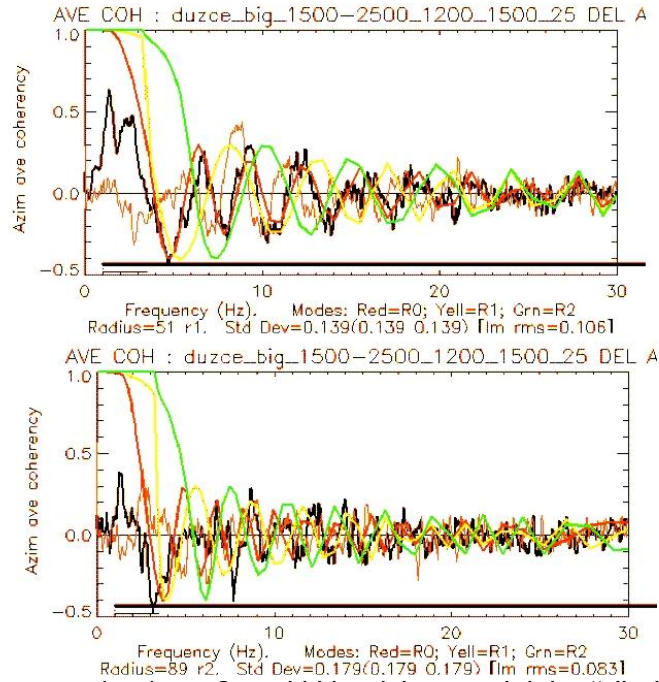


Şekil 21. SPAC Yöntemi ile Mikrotremor Veri Analizi Şeması (Maresca vd. 2006'dan derlenmiştir)

Tüm bileşenlerden sağlanan veriler incelenerek, çevresel gürültülerin az olduğu bir veri aralığı seçilmiştir. Bu veri aralığı için Denklem 1' deki uyumluluk hesabı yapılarak uyumluluk katsayısı eğrileri çizdirilmiştir. Şekil 22'de gösterilen siyah eğri DZC istasyonundaki büyük üçgen diziliminde gözlemlenmiş uyumluluğu ifade etmektedir. Elde edilen gözlemsel eğriler her bir dizilime ait r_1 (daire üzerindeki istasyon-merkez istasyon arası mesafe) ve r_2 (daire üzerindeki iki istasyon arasındaki mesafe) uzaklıkları içindir. r_1 uzaklığı için, merkezdeki istasyon ile üçgenin köşelerini oluşturan istasyonlar arasındaki uyum; r_2 uzaklığı için, üçgenin köşelerindeki istasyonlar arasındaki uyum göz önünde bulundurulmuştur. Ardından tek boyutlu kuramsal bir başlangıç hız modeli (initial velocity model) belirlenmiştir. Kuramsal model oluşturulurken, incelenen ortam için düşünülen yaklaşık tabaka sayısı belirlenmiş ve buna bağlı olarak her tabakaya ait S-dalga hızı, P-dalga hızı, kalınlık ve yoğunluk değerleri programa girilmiştir. Yazılım yardımıyla bu değerlere göre hesaplanan kuramsal eğri ile arazi verilerinden hesaplanan gözlemsel uyumluluk katsayısı eğrisi karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Şekil 22'deki kırmızı, sarı ve yeşil eğriler sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü moda ait kuramsal uyumluluk eğrilerini ifade etmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, MMSPAC yönteminin diğer mikrotremor değerlendirme yöntemlerine göre en önemli avantajı temel (fundamental) modun yanı sıra yüksek modların etkisini de göz önünde bulundurmasıdır.

Bir optimizasyon problemi olarak düşünüldüğünde MMSPAC yöntemi, kuramsal uyumluluk eğrisi ile gözlemlenen uyumluluk eğrisi arasındaki farkı, tabaka hızlarına göre minimize etmektedir. Bu aşamada kullanılan ters çözüm yöntemi, sonuçları doğrudan etkilediği için, bu projede çeşitli ters çözüm algortimaları sınanmış ve fiziksel olarak en gerçekçi sonuçları iteratif doğrulama yönteminin (iterative forward fit method) verdiği gözlemlenmiştir. İteratif

doğrulama yönteminde, geleneksel SPAC uygulamalarında olduğu gibi doğrudan dispersiyon eğrisinden ters çözüm yapılmamış, uyumluluk eğrilerine iteratif doğrulama ile yaklaşmıştır. Şekil 22'deki gözlemsel uyumluluk eğrisine en yakın kabul edilen eğriyi oluşturan modeldeki her bir tabaka için girilen S-dalga hızı (V_S), P-dalga hızı (V_P), kalınlık (H) ve yoğunluk (ρ) değerleri o tabakaya ait homojen ve izotrop değerler olarak kabul edilmiştir. DZC istasyonundaki büyük üçgen için elde edilen örnek tabaka çözümü program çıktısı olarak Şekil 23'te gösterilmiştir.



Şekil 22. DZC istasyonunda r1 ve r2 uzaklıkları için uyumluluk eğrileri (DZC istasyonu-büyük üçgen dizilimi ölçümü için örnek çözüm)

Belirtildiği üzere dispersiyon eğrilerinden doğrudan ters çözüm yapılmasa da, Şekil 24'te gösterilen dispersiyon eğrisi, çözüm sırasında geri planda sürekli kontrol edilmiştir. Şekil 24'te kırmızı noktalar gözlemsel verileri ve siyah eğriler ise farklı modlara ait kuramsal dispersiyon eğrilerini belirtmektedir. Şekil 25, bu projede kullanılmış olan MMSPAC yönteminin aşamalarını bir akış diyagramıyla göstermektedir.

Her ne kadar MMSPAC yöntemi, çözülebilen derinlikler ve yüksek modların katkısı açılarından literatürdeki diğer yöntemlerden daha doğru sonuçlar verse de, bu çalışmada MMSPAC yöntemi ile elde edilen S-dalgası hız profilleri, aşağıda açıklanmış olan Frekans-Dalga Sayısı ve HVSZ yöntemleriyle doğrulanmıştır.

XVarEdit

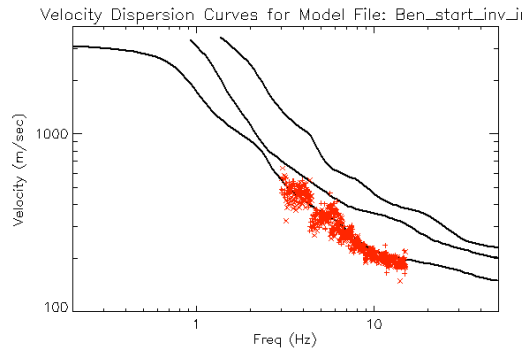
Cancel Accept

Edit layer parameters [Stop=Y to exit]

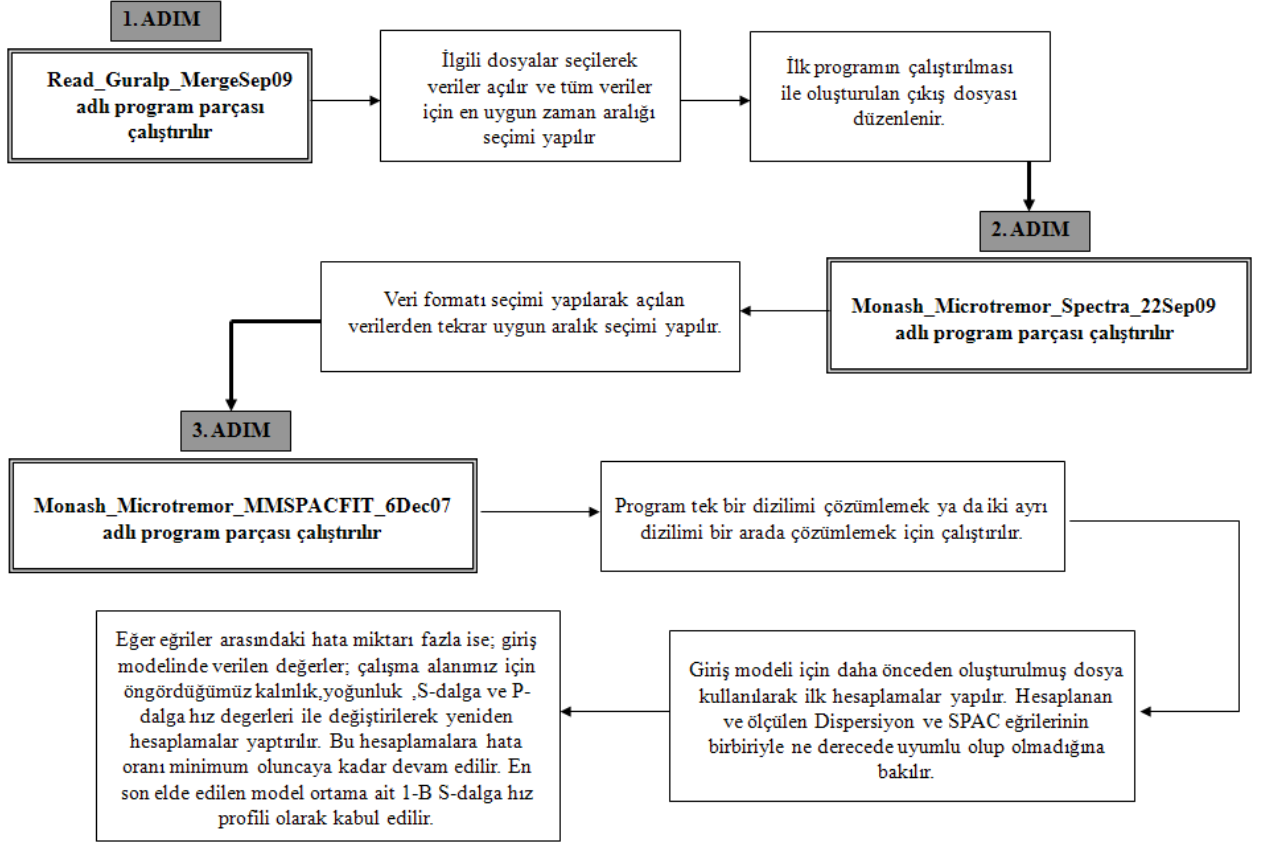
LAYER_PARAMETERS (String Array(9))

(0):	H	VP	VS	RHO	
(1):	2	550	155	1.78	0.
(2):	4	645	200	2.0	0.0
(3):	8	970	230	2.0	0.0
(4):	15	1100	350	2.14	
(5):	25	1450	500	2.14	
(6):	32	1800	700	2.14	0
(7):	64	2940	2000	2.39	
(8):	0.	6040	3490	2.8	0

Şekil 23. En küçük hata değerini veren uyumluluk eğrisini oluşturan model (DZC istasyonu- büyük üçgen dizilimi ölçümü için örnek çözüm)



Şekil 24. En küçük hata değerini veren hız modeline ait dispersiyon eğrisinin gözlemsel dispersiyon verisi ile karşılaştırılması (DZC istasyonu- büyük üçgen dizilimi ölçümü için örnek çözüm)



Şekil 25. MMSPAC yöntemine ait akış diyagramı

3.3 Frekans- Dalga Sayısı (f-k) Yöntemi ile Veri Analizi

F-k yöntemi, bir dizi alıcıda toplanmış olan verilerin iki-boyutlu frekans-dalga sayısı güç spektrumu analizine dayanır. Bu yöntemde mikrotremor güç spektrumunun her frekans için dalga sayısına göre değişiminden yüzey dalgalarının yönleri ve hızları tespit edilmektedir (Capon, 1969; Asten, 1976). Bu yöntemin MMSPAC yönteminden temel eksikliği, f-k yönteminin yalnızca belirli bir dalga yönü baskın olduğu durumlarda iyi sonuçlar vermesidir. Bu yöntemde f_0 frekansındaki faz hızı, iki boyutlu f-k spektrumundaki dalga sayıları olan k_{x0} ve k_{y0} 'a aşağıdaki gibi ilişkilendirilmiştir:

$$C_0 = \frac{2\pi f_0}{\sqrt{k_{x0}^2 + k_{y0}^2}} \quad (2)$$

Bu ilişkiden elde edilecek olan faz hızı dispersiyon eğrileri yine ters çözüm algoritmaları ile S-dalga hızı için çözümlenmektedir. MMSPAC yöntemi f-k yöntemine göre daha derinlerde gerçekçi çözümler vermekte, yüksek modların etkisini göz önüne almakta, ve dalganın yönünden bağımsız olarak, daha az sayıda istasyon ile çalışılmasına imkan tanımaktadır. Yine de bu

çalışmada MMSPAC yöntemi ile elde edilen dispersiyon eğrileri, f-k yönteminden elde edilen dispersiyon eğrileriyle karşılaştırılmıştır.

3.4 HVSR (Horizontal to Vertical Spectrum Ratio- Yatay/Düşey Spektrum Oranları) Yöntemi ile Veri Analizi

HVSR yöntemi, dalga periyodu ve yerin elastik özelliklerine göre eliptik olarak yayılan Rayleigh dalgasının rezonans özelliklerini ampirik olarak değerlendiren bir yöntemdir (Lachet ve Bard, 1994; Tokimatsu, 1997; Scherbaum vd., 2003). HVSR yöntemi literatürde yaygın olarak, zemin tabakalarının rezonans frekanslarını zeminlerin elastik özelliklerinin derinlikle ani değişiminden yaklaşık olarak hesaplamak için kullanılmaktadır (Nakamura, 1989). Bu yöntemde temel olarak yatay yer hareketi spekturumunun düşey spektruma oranı ile elde edilen frekansa bağlı H/V değerleri zemin büyütme faktörleri olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada ise MMSPAC yöntemiyle elde edilen hız tabakalarından hesaplanan rezonans frekanslarını ve çok tabakalı zemin modeli varsayımını doğrulamak için kullanılmıştır.

Özetle, bu çalışmada mikrotremor kayıtları MMSPAC yöntemine uygun bir alıcı dizilimiyle yapılmış ve S-dalga hızları öncelikli olarak MMSPAC yöntemi ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, f-k ile HVSR yöntemleriyle ve seçilen sahalarda önceki çalışmalarda elde edilmiş olan verilerle doğrulanmıştır.

Sonuçlar, bir sonraki bölümde karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

4. Bulgular

Proje ekibi tarafından incelenen sahalara ait tek boyutlu S-dalga hız profilleri, Gereç ve Yöntem bölümünde açıklandığı gibi IDL-MMSPAC yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. MMSPAC yöntemi ile elde edilen hız profillerinin doğruluğu mikrotremör-HVSR ve f-k yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde ilk önce proje ekibindeki kullanıcıların elde ettiği sonuçlar tek tek ve karşılaştırmalı olarak sunulacak; daha sonra ise pilot bölgelerde önceki çalışmalarda elde edilmiş olan sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

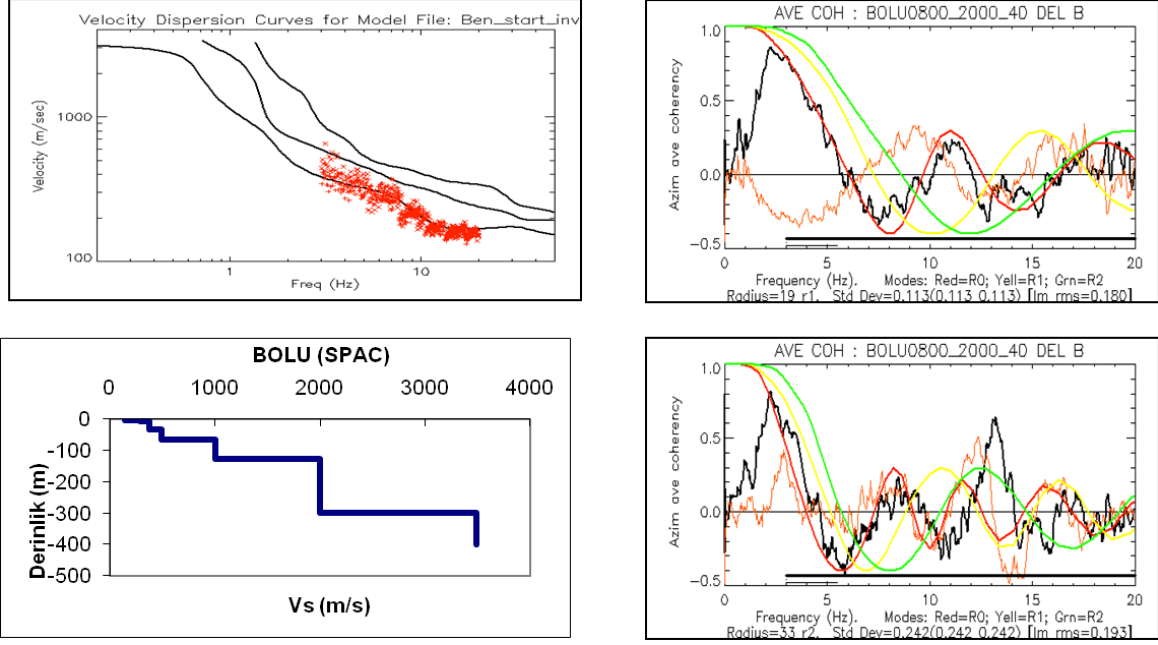
4.1 Proje Kapsamında Elde Edilen Sonuçlar

Şekil 26.a ve 26.b'de sırasıyla BOL istasyonu için proje ekibindeki birinci kullanıcıya ait MMSPAC ve HVSR yöntemleri sonuçları verilmiştir. Şekil 26.a'da gözlemsel ve teorik dispersiyon eğrileri, gözlemsel ve teorik uyumluluk eğrileri ve bunlardan elde edilen tek boyutlu S-dalga hızı profili sunulmuştur. Şekil 26.b'de ise elde edilen tek boyutlu S-dalga hız modellerine karşılık gelen teorik H/V (ellipticity) eğrileri ile ölçümlerden elde edilen H/V eğrileri frekans uzayında karşılaştırılmakta ve böylece elde edilen hız profilinin doğruluğu sınanmaktadır. Benzer biçimde proje ekibindeki diğer kullanıcıların BOL istasyonu için elde ettiği sonuçlar Şekil 27-29'da; DZC istasyonu için elde edilen sonuçlar ise Şekil 30-33'te sunulmuştur.

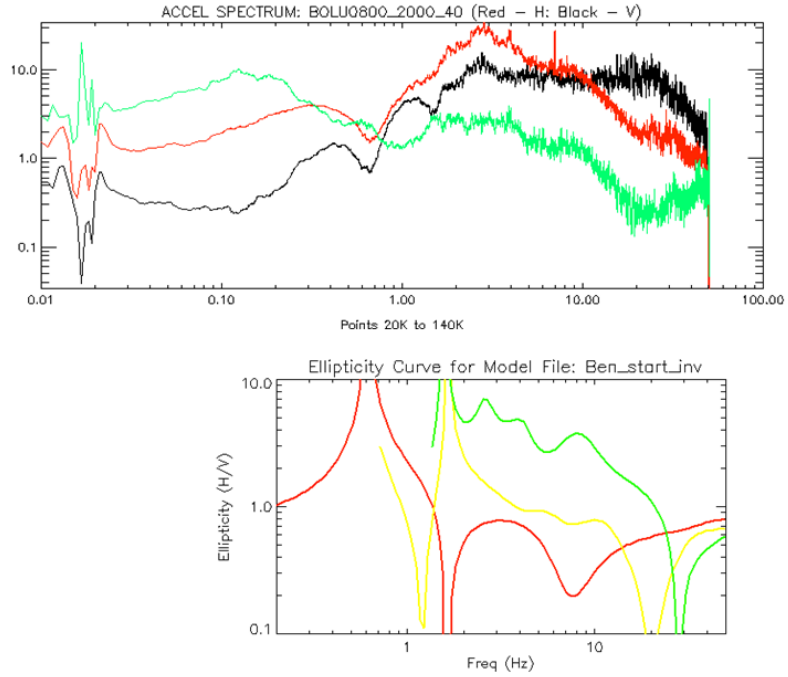
Şekil 26-33'te gözlemlendiği gibi, her kullanıcı mikrotremör verisinden seçtiği özgün aralıkla analiz yapmış ve benzer ancak tıpatıp aynı olmayan hız profilleri elde etmiştir. Yine görüldüğü üzere, proje ekibindeki her bir kullanıcı tarafından MMSPAC yönteminden elde edilen hız profillerine karşılık gelen teorik H/V eğrileri ile ölçümlerden elde edilen H/V eğrileri temel periyot açısından birbirleriyle uyumludur. Yine H/V eğrilerinden anlaşıldığı üzere MMSPAC yöntemi yüksek modların etkisini görebilmektedir. Çünkü gözlemlenen H/V eğrileri ile MMSPAC yöntemiyle elde edilen hız profillerinin yüksek modlara ait teorik H/V eğrileri bazı frekans değerlerinde birbirlerine çok yakındır.

BOL ve DZC istasyonları için ana kaya derinlikleri sırasıyla yaklaşık olarak 300 ve 150 metre olarak belirlenmiştir. BOL istasyonunda 1000 m/s'den yüksek hızlara yaklaşık 100 metrede erişilmişken, DZC istasyonunda 150 metrede yaklaşık olarak 2000 m/s hıza ulaşılmıştır. H/V

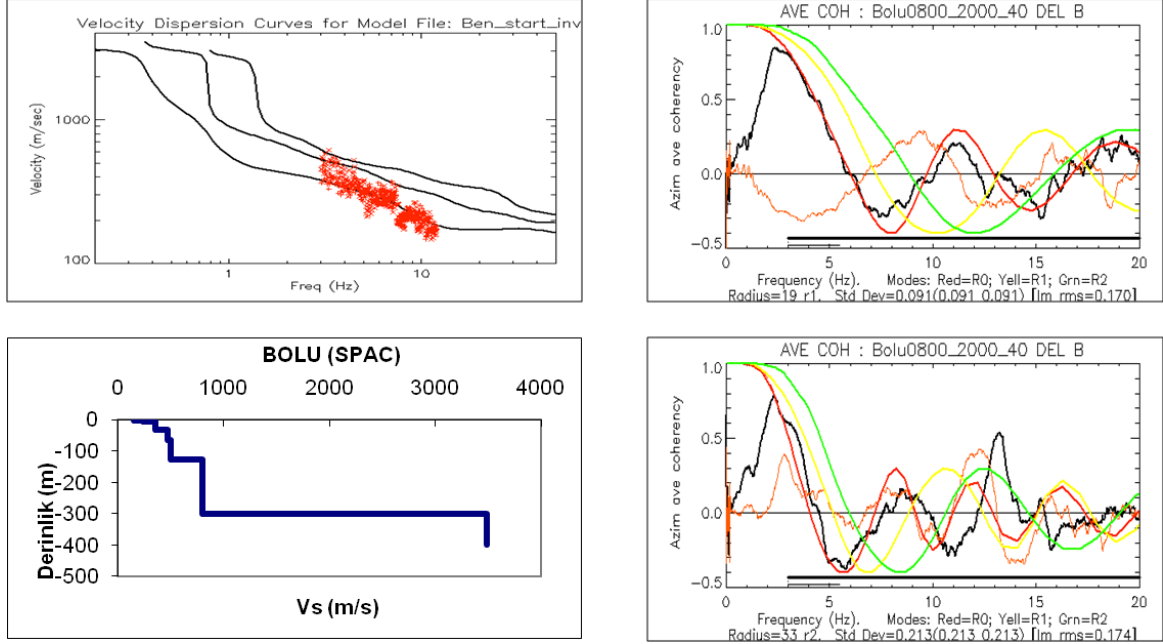
eğrilerinden temel hakim frekanslar BOL istasyonunda yaklaşık olarak 3-4 Hz iken DZC istasyonunda 2-3 Hz civarında belirlenmiştir.



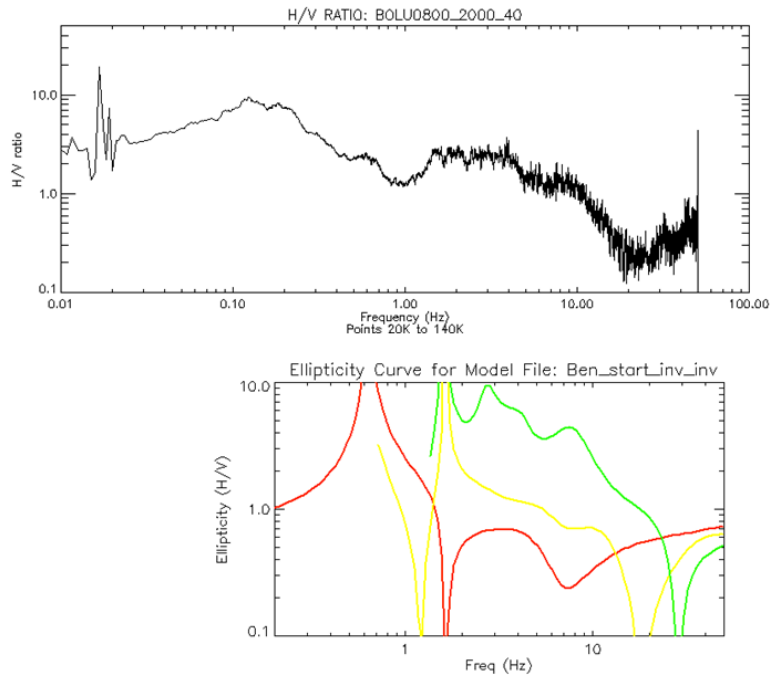
Şekil 26.a BOL istasyonunda 1. kullanıcı MMSPAC sonucu



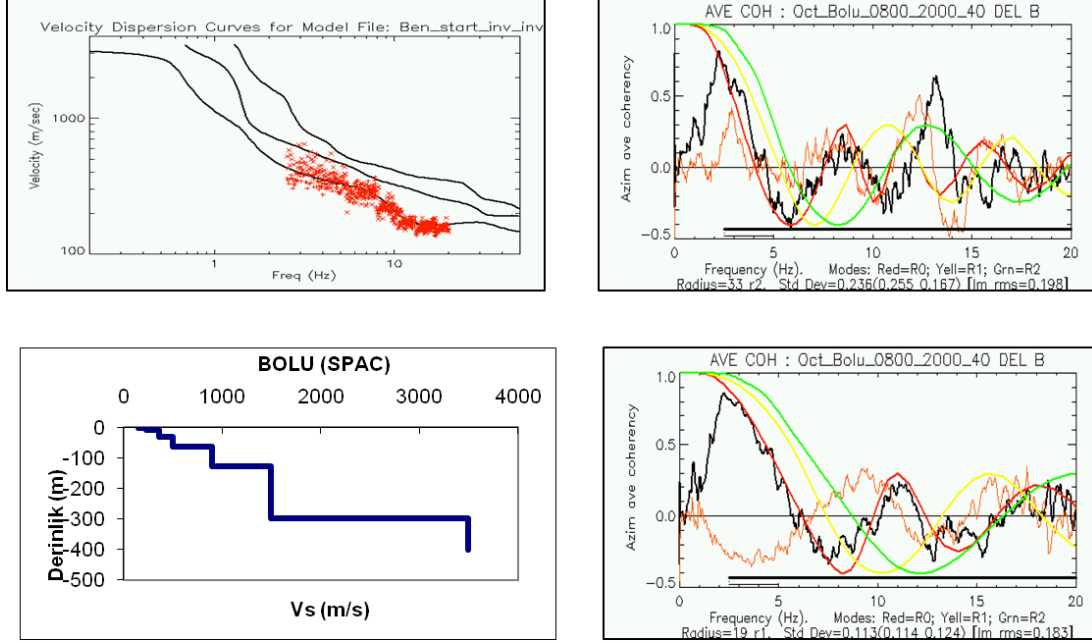
Şekil 26.b BOL istasyonunda 1. kullanıcı HVSR sonucu



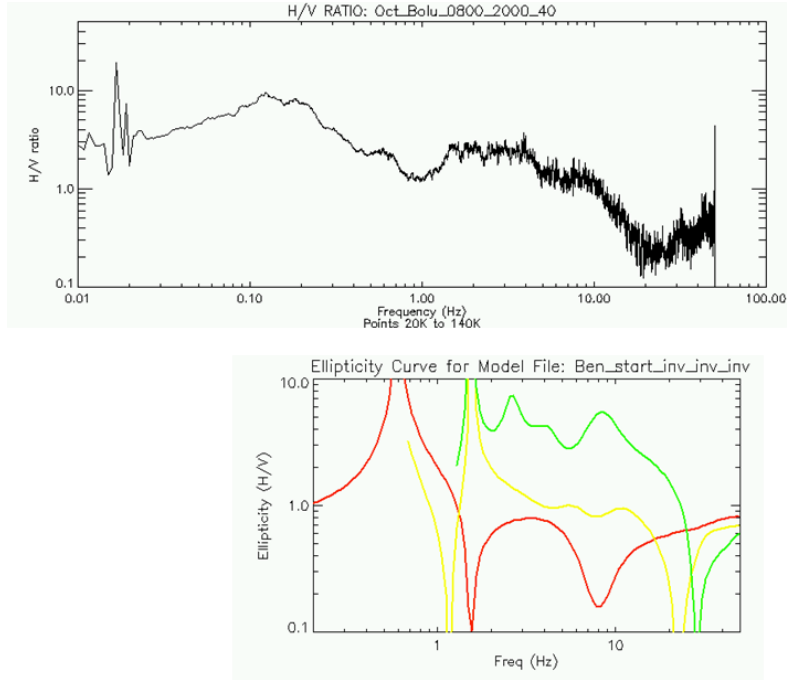
Şekil 27.a BOL istasyonunda 2. kullanıcı MMSPAC sonucu



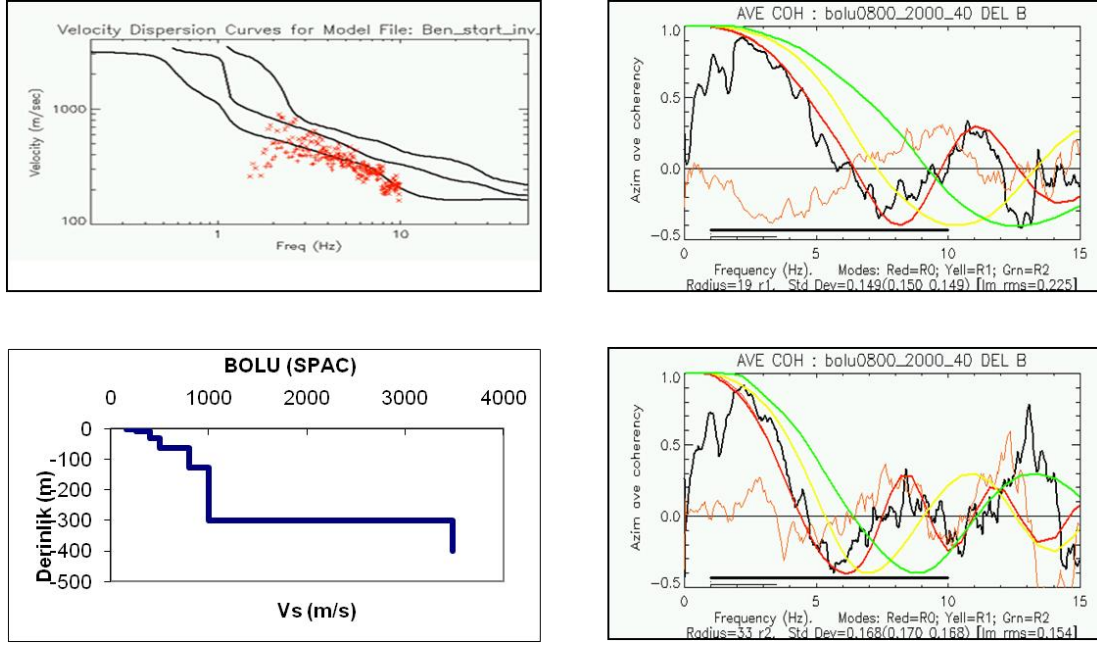
Şekil 27.b BOL istasyonunda 2. kullanıcı HVSr sonucu



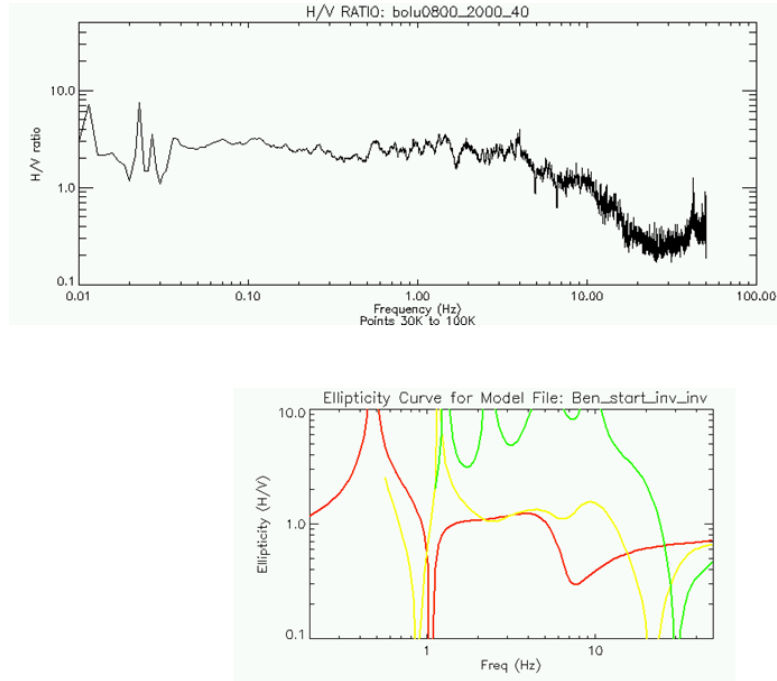
Şekil 28.a BOL istasyonunda 3. kullanıcı MMSPAC sonucu



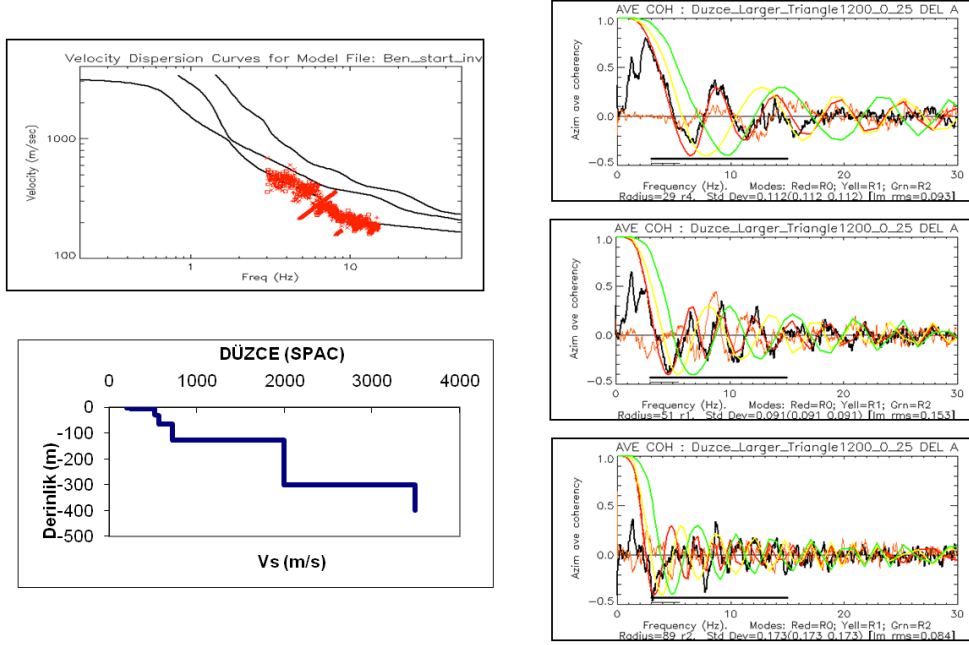
Şekil 28.b BOL istasyonunda 3. kullanıcı HVSr sonucu



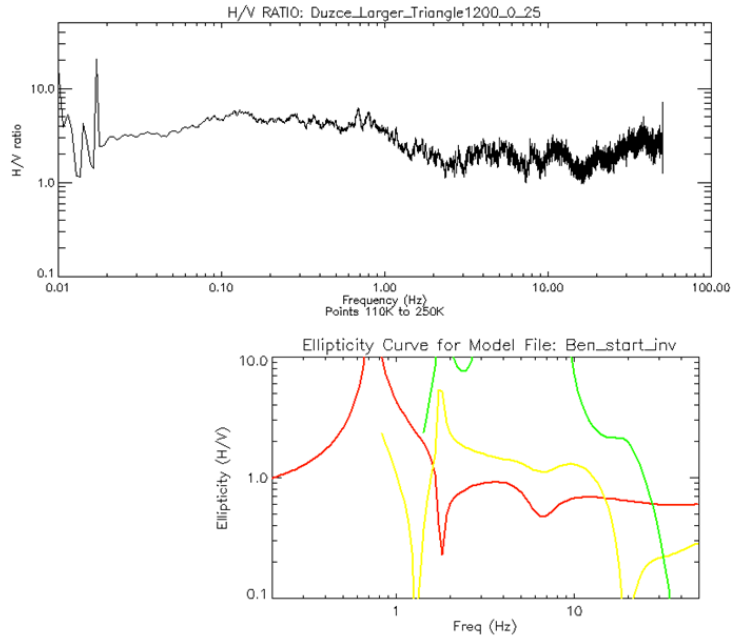
Şekil 29.a BOL istasyonunda 4. kullanıcı MMSPAC sonucu



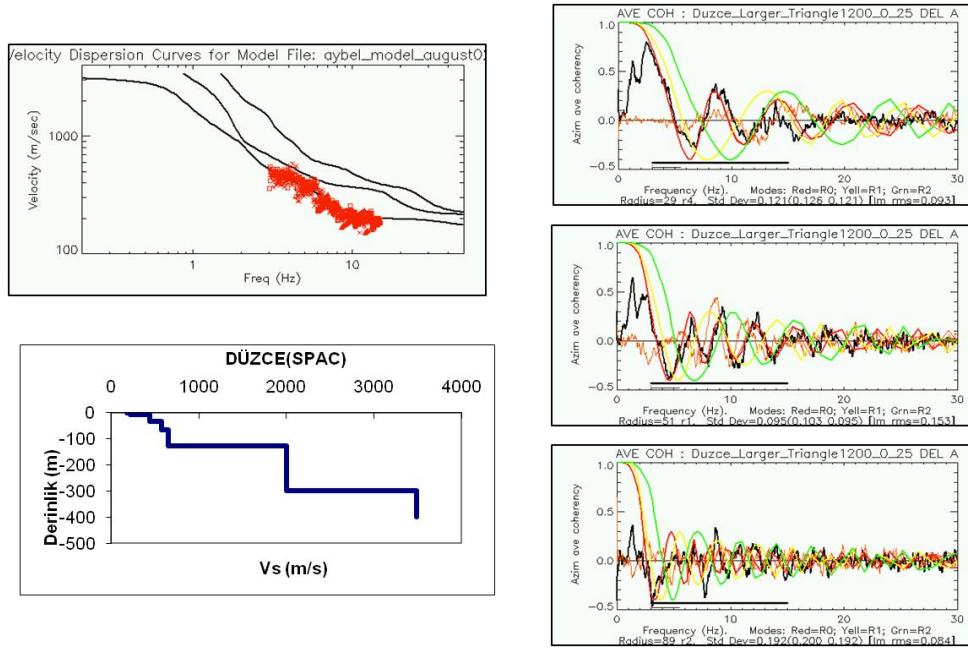
Şekil 29.b BOL istasyonunda 4. kullanıcı HVSR sonucu



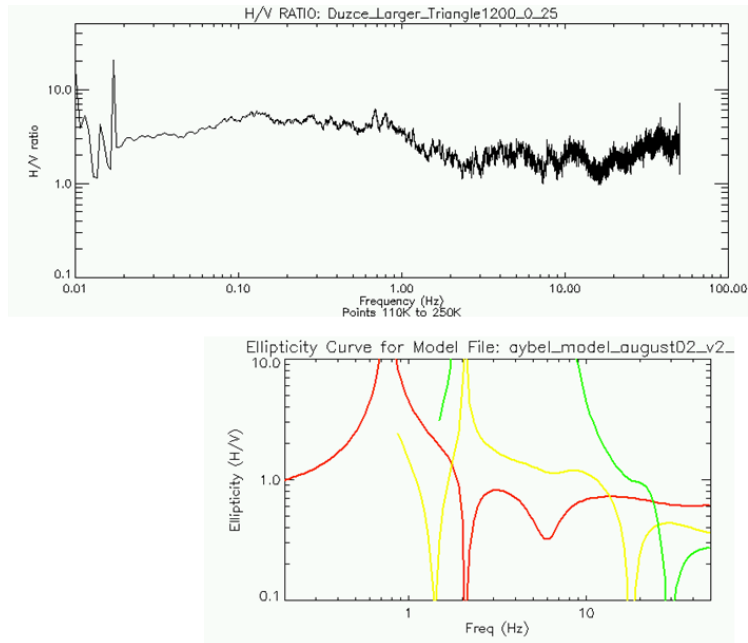
Şekil 30.a DZC istasyonunda 1. kullanıcı MMSpac sonucu



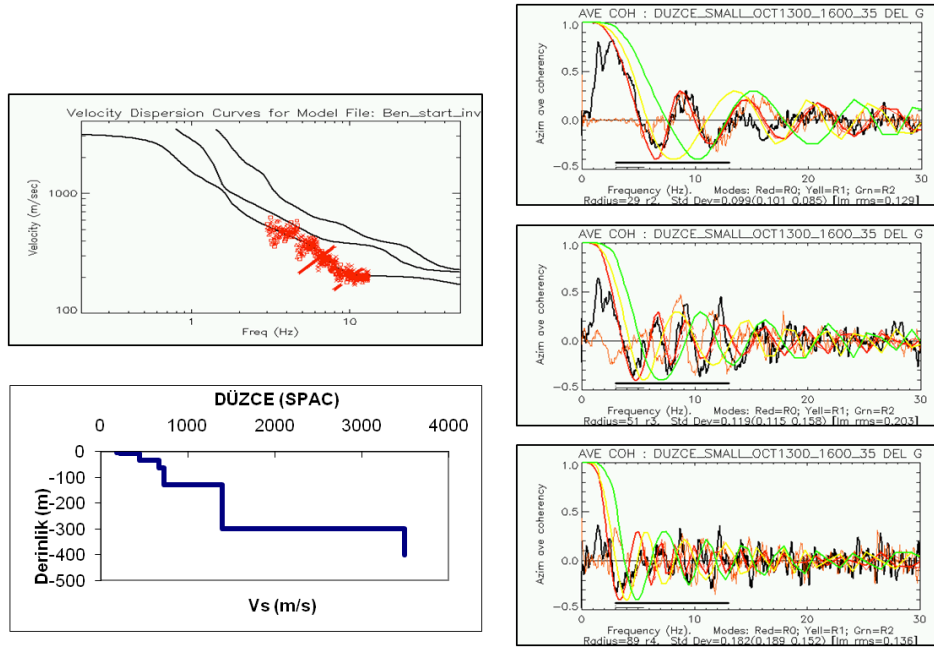
Şekil 30.b DZC istasyonunda 1. kullanıcı HVSR sonucu



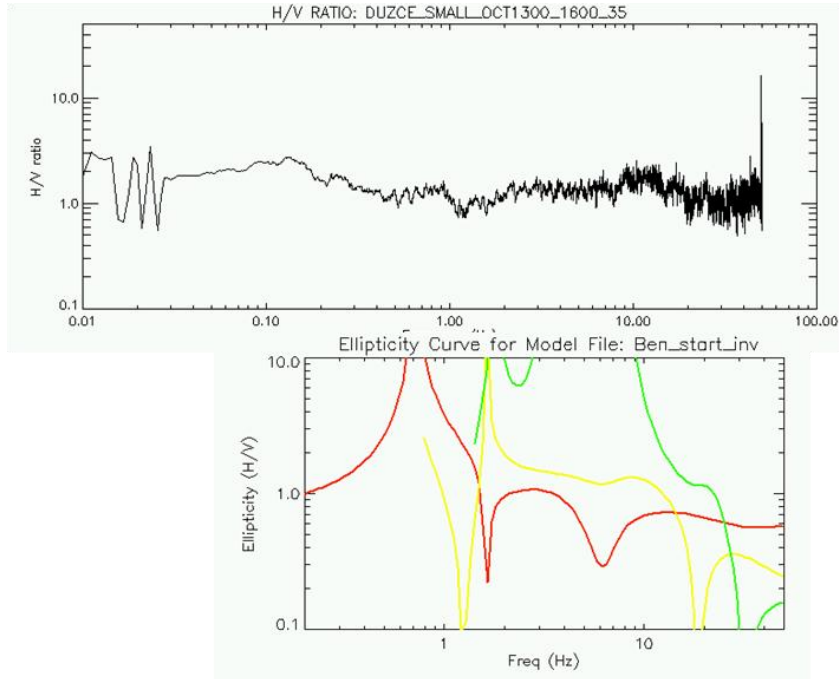
Şekil 31.a DZC istasyonunda 2. kullanıcı MMSPAC sonucu



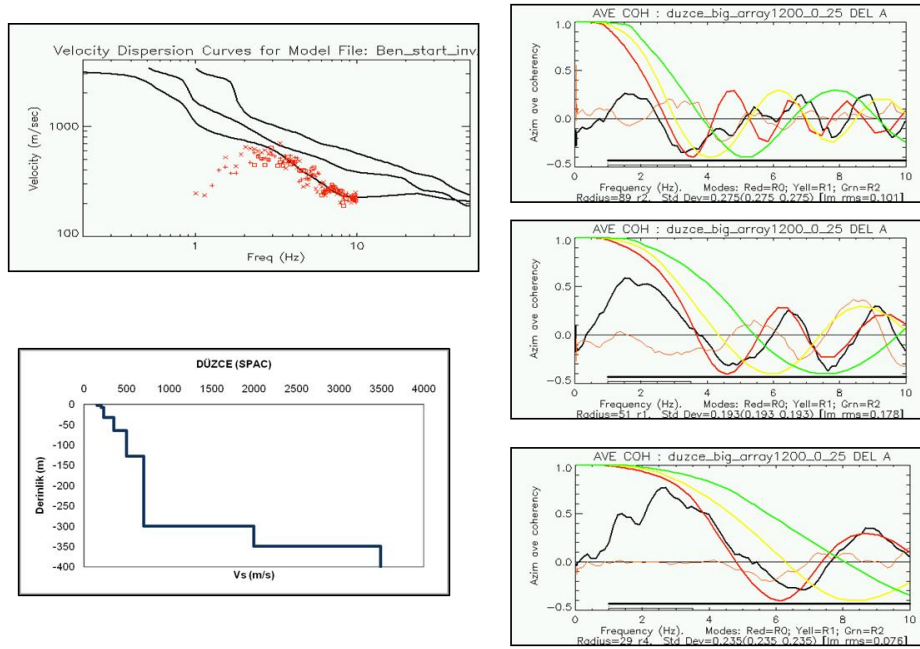
Şekil 31.b DZC istasyonunda 2. kullanıcı HVSR sonucu



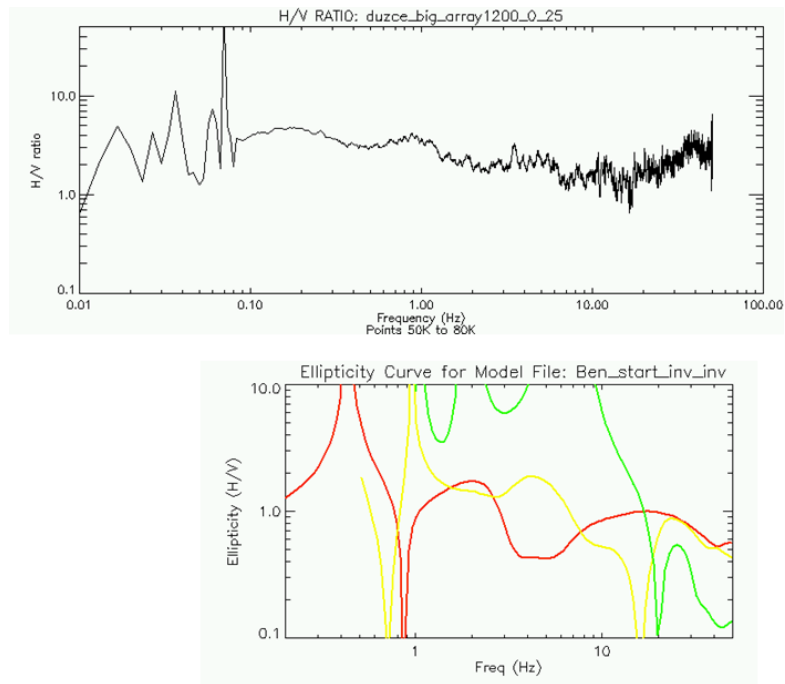
Şekil 32.a DZC istasyonunda 3. kullanıcı MMSPAC sonucu



Şekil 32.b DZC istasyonunda 3. kullanıcı HVSR sonucu

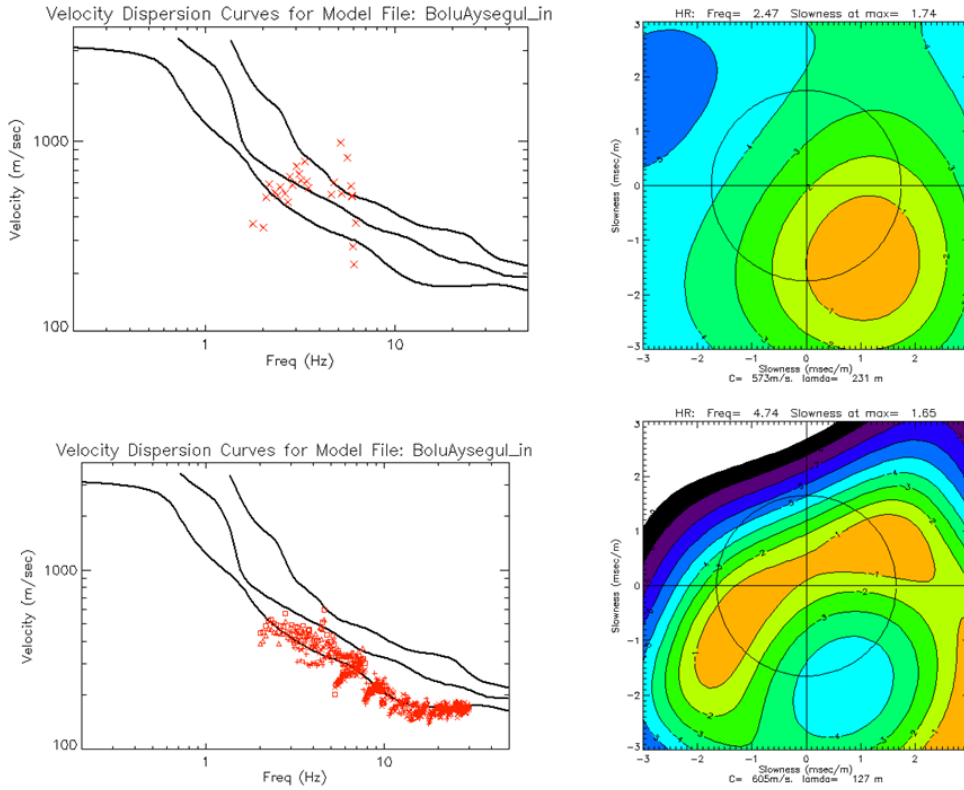


Şekil 33.a DZC istasyonunda 4. kullanıcı MMSPAC sonucu

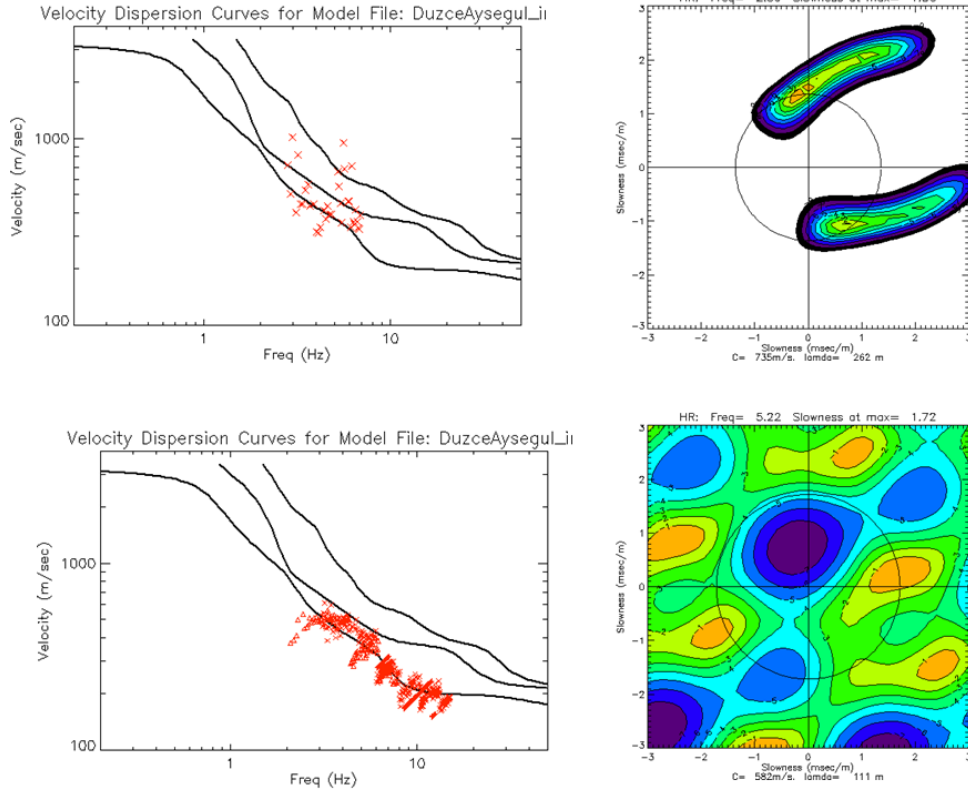


Şekil 33.b DZC istasyonunda 4. kullanıcı HVSR sonucu

Proje ekibince elde edilmiş olan hız profillerinin bir başka doğrulanma yolu daha önceden ayrıntılı olarak sözü edilen f-k yöntemidir. Şekil 34 ve Şekil 35, sırasıyla BOL ve DZC istasyonları için bir kullanıcıya ait MMSPAC yöntemiyle elde edilen dispersiyon eğrisi ile f-k yönteminden elde edilen dispersiyon eğrisini karşılaştırmaktadır. Bu şekillerde sırasıyla sol üst ve sol alt panel f-k ve MMSPAC dispersiyon eğrilerini ve sağ panel iki ayrı frekansta alınan f-k eğrilerini göstermektedir. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere, MMSPAC yönteminde elde edilmiş olan hız profilleri 30 Hz'e dek doğru çözümlenmiştir. Hem dispersiyon eğrilerinden hem de iki boyutlu f-k çizimlerinden gözlemleneceği gibi, f-k yöntemi yalnızca 4 istasyonla MMSPAC yöntemi kadar gerçekçi sonuçlar vermemektedir. Ancak DZC istasyonunda BOL'dan farklı olarak iki ayrı üçgen ve daha büyük açıklıklar kullanıldığı için f-k çözünürlüğü BOL'dan daha yüksektir (Şekil 35). Daha önce de belirtildiği üzere f-k yöntemin yüksek çözünürlüklü ve güvenilir sonuçlar vermesi için daha yoğun dizilimler kullanılmalıdır. Bu gözlem de yine MMSPAC yönteminin arazide daha elverişli bir yöntem olduğuna dikkat çekmektedir.

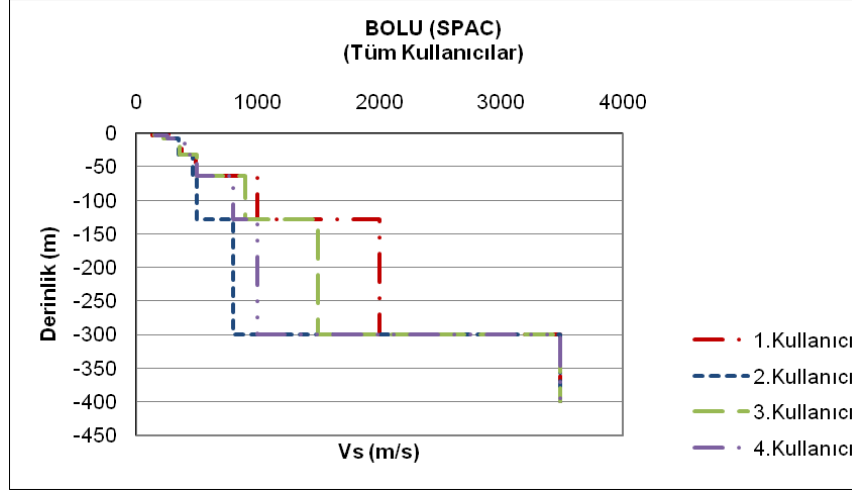


Şekil 34. BOL istasyonunda MMSPAC ve f-k yöntemlerinin karşılaştırılması



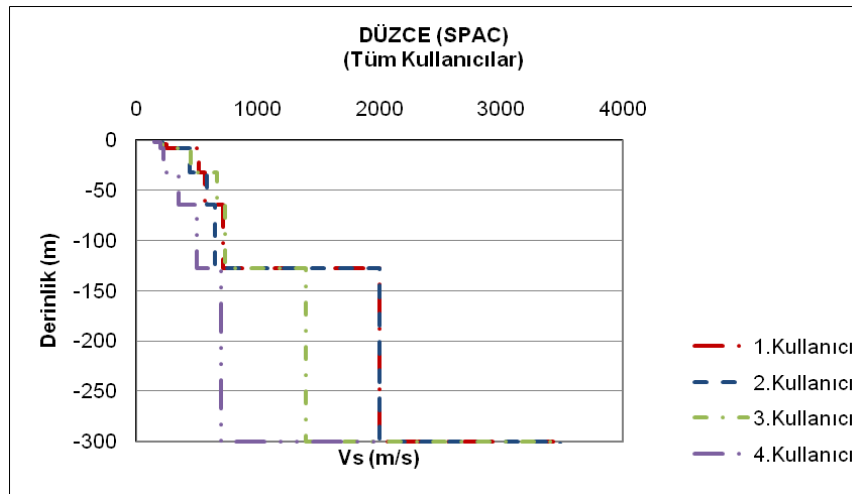
Şekil 35. DZC istasyonunda MMSpac ve f-k yöntemlerinin karşılaştırılması

Şekil 36 ve 37’de sırasıyla BOL ve DZC istasyonlarında proje ekibindeki farklı kullanıcılar tarafından elde edilmiş olan hız profilleri karşılaştırılmaktadır. Şekil 36’da gözlemlendiği gibi, 1., 3. ve 4. kullanıcılar tarafından BOL istasyonunda elde edilen hız değişimleri, ilk 150 metrede herhangi bir derinlikte birbirine en fazla %10 uzaklıktadır. 150 metre ile 300 metre arasında bu fark %40’a kadar çıkmıştır. Bunun nedeni o derinliklere karşılık gelen ara frekanslarda modeldeki hata payının daha büyük olmasıdır. 2. kullanıcının sonuçları 50 metre ve 100 metre arasında diğer kullanıcıların sonuçlarından daha büyük farklılık göstermekte ancak yaklaşık 300 metreden sonra tüm kullanıcıların sonuçları arasında bir fark kalmamaktadır. Gözlemlendiği gibi MMSpac yöntemi kullanıcılara bağlı olarak çok büyük hassasiyet göstermemekle birlikte seçilen veri aralığının gürültüsüz olması elde edilen son çözüm için önemli olmaktadır. Ters çözüm problemlerinin tümünde varolan birden fazla doğru çözüm (lokal minimum) sorunu burada da görülmekte ancak kullanılan iteratif-doğrulama algoritması bu problemi bir ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 36. BOL istasyonunda tüm kullanıcılar tarafından elde edilen hız profillerinin karşılaştırılması

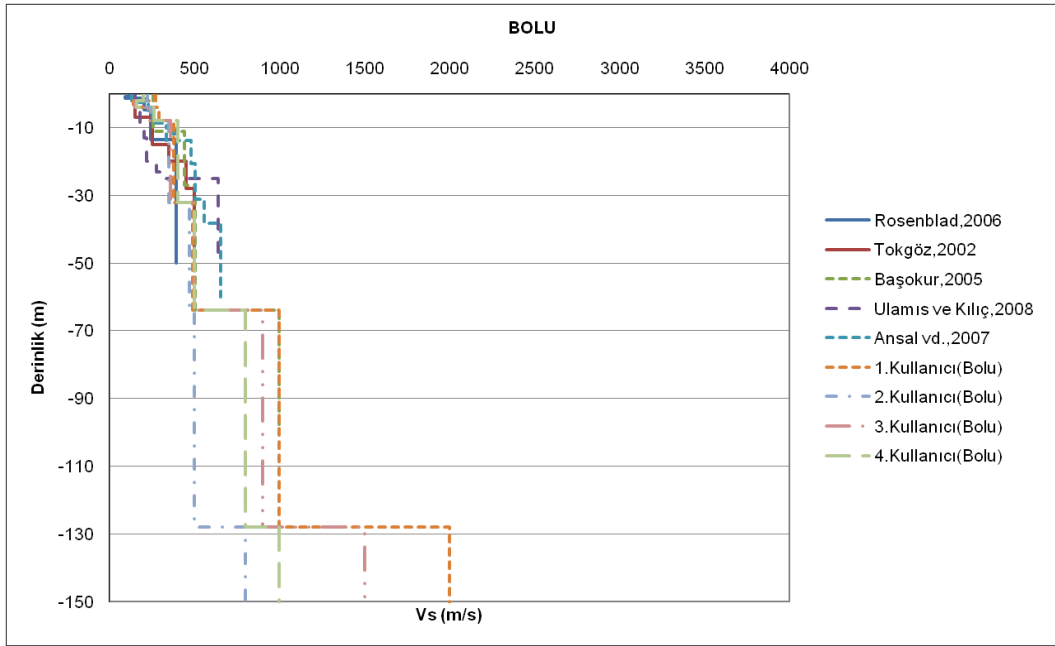
Şekil 37’de görüldüğü üzere, DZC istasyonunda derinliğe bağlı hız değişimi daha azdır ve ana kaya yüzeye daha yakındır. Tüm kullanıcıların çözümleri bu istasyonda birbirine çok yakındır. Bunun nedeni hem DZC istasyonundaki zeminin daha homojen oluşu hem de DZC istasyonunda iki adet dizilim oluşturularak zemine ait daha fazla veri alınmış olmasıdır. Bu istasyondaki hız profillerinin iki ayrı veri setinin analizi ile elde edilmesi, hem lokal minimum problemini azaltmış, hem de farklı kullanıcılar tarafından oluşturulan dispersiyon eğrilerinin birbirine çok yakın olmasını sağlamıştır. Bütün bu gözlemler, MMSPAC yönteminde ele alınan bir sahada mümkün oldukça fazla istasyon ve farklı dizilim kullanılmasının gereğine işaret etmektedir.



Şekil 37. DZC istasyonunda tüm kullanıcılar tarafından elde edilen hız profillerinin karşılaştırılması

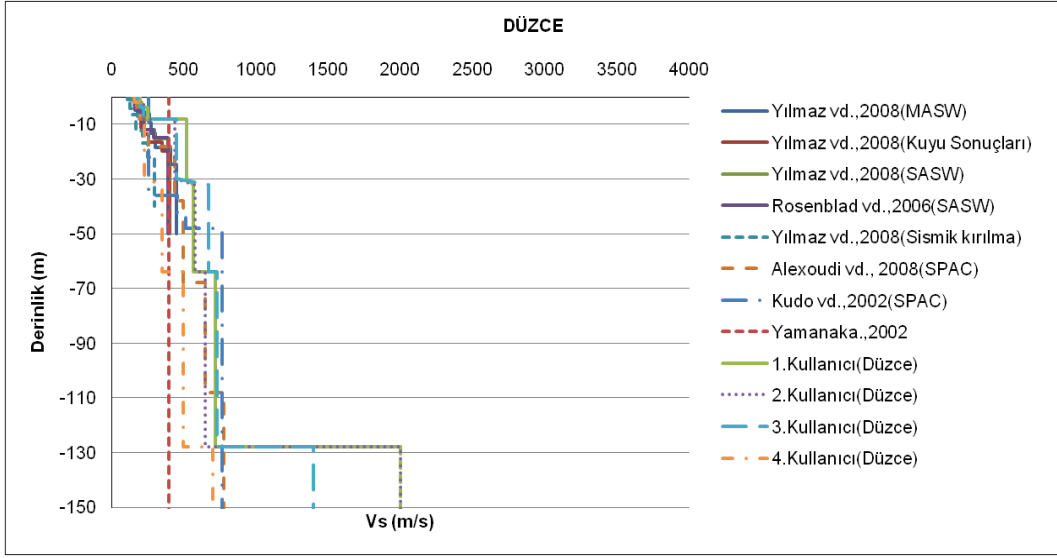
4.2 Bu Proje Kapsamında Elde Edilen Sonuçların Önceki Çalışmalar ile Karşılaştırılması

Farklı yöntemlerle elde edilen hız profilleri çoğunlukla derinliğe ve frekans aralığına bağlı olarak belirli farklılıklar göstermektedir. Ancak yine de herhangi bir derinlikte farklı yöntemlerle elde edilen ortalama dalga hızlarının birbirinden çok uzak olmaması beklenir. Bu proje kapsamında BOL ve DZC istasyonlarında MMPSAC yöntemiyle elde edilmiş olan hız profilleri, Şekil 38 ve 39'da önceki çalışmalarda elde edilmiş olan profillerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 38. BOL istasyonunda bu proje sonuçlarının önceki çalışmalarla karşılaştırılması

Şekil 38'de gözlemlendiği gibi BOL istasyonunda ilk 30 metrede önceki çalışmaların sonuçları ile bu proje sonuçları arasındaki fark oldukça küçüktür. %15-20 civarındaki bu farkların bir nedeni SPAC yönteminin çok yüksek frekansları (ya da yüzey tabakalarını) ayırtmada kırılma ya da sondaj kadar etkili olmayışıdır. Ancak her iki istasyonda da en fazla derinliğe (diğer bir deyişle düşük frekanslara) SPAC ve MMSPAC yöntemleri ile yapılan çalışmalarda inilebilmiştir (Yamanaka, 2002 ile proje ekibi). Yine her iki istasyonda 30m-50m derinlikler arasına bakıldığında alternatif yöntemler arasındaki farkın %30 civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu karşılaştırma göz önüne alındığında MMSPAC yöntemiyle ara ve düşük frekansların başarıyla çözümlendiği ve yüzeye yakın tabaka hızlarının da diğer yöntemlerden çok uzak olmadığı görülmüştür. DZC istasyonunda da benzeri gözlemler geçerlidir (Şekil 39).



Şekil 39. DZC istasyonunda bu proje sonuçlarının önceki çalışmalarla karşılaştırılması

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, jeofizik ve inşaat mühendislerinden oluşan proje ekibi, Bolu ve Düzce illerinde seçilen sahalarda mikrotremor ölçümleri gerçekleştirmiş; bu kayıtlara ait faz-hızı dispersiyon eğrilerinin ters çözümlerinden S-dalga hızının derinliğe göre değişimi elde edilmiştir. Sonuçlar H/V ve f-k yöntemleri ile bölgeye ait önceki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış; yöntem ve bulgular sınanmıştır. Bu çalışmada elde edilmiş olan temel sonuçlar ve ileride benzer çalışmalara yönelik öneriler ile proje kapsamında yapılmış olan yayınlar aşağıda sunulmuştur.

5.1 Sonuçlar

- Bu projede MMSPAC yöntemi Düzce ve Bolu'da seçilen sahalarda titreşim kayıtları ile yüzey dalgalarının faz hızı değişimini 30 Hz'e dek çözebilmiş ve bu yöntemle tek boyutlu S dalga profilleri yaklaşık 500 metre derinliklere dek başarıyla elde edilmiştir.
- Bu çalışmada elde edilmiş olan MMSPAC çözümleri ile geçmiş çalışmaların sonuçları karşılaştırıldığında, pasif kaynaklı yöntemlerin benzer sonuçlar verdiği, aktif yöntemlerin sonuçlarının ise özellikle yüzeye yakın noktalarda farklılıklar gösterebildiği gözlemlenmiştir. Önceki çalışmalarla bu çalışma sonuçları arasındaki fark mühendislik uygulamaları açısından ihmal edilebilecek ölçülerdedir. Bu farkların temel nedeni, ölçüm alınan istasyonların birebir aynı noktalar olmayışı, farklı yöntemlerin farklı hata aralıkları ve yine alternatif yöntemlerin içerdiği farklı ihmal ve varsayımlardır.
- Bu çalışmada MMSPAC algoritmasında dispersiyon eğrisinin doğrudan çözümü yerine iteratif doğrulama yöntemi kullanılmış; bu yöntemle elde edilen sonuçlara ait hata oranlarının daha düşük olduğu ve sonuçların istasyonlardaki jeolojik yapıya daha uygun olduğu gözlemlenmiştir.
- MMSPAC yöntemi, az sayıda istasyon ve dizilim kullanılmasına rağmen (baskın dalga yayılım yönlerinden bağımsız olarak) güvenilir sonuçlar vermektedir.

- MMSPAC yöntemi ve kullanılmış olan yazılım, farklı kullanıcılara göre belirli bir hassasiyet göstermekte ve ancak kullanıcı sonuçları arasındaki farklar ihmal edilebilir ölçülerde olmaktadır.
- MMSPAC yöntemi ile HVSR yöntemi birlikte kullanılabilen ve HVSR yönteminin göremediği bazı zemin tabaka arayüzlerini (peak) MMSPAC yöntemi başarıyla yakalamaktadır. Diğer bir deyişle, HVSR yönteminin etkinliği farklı zemin tabakaları arasındaki impedans ya da hız kontrastına bağlıdır ancak MMSPAC yöntemi, hız kontrastları daha az olduğunda da etkili olarak çalışmaktadır.
- Bu projede MMSPAC ve HVSR yöntemlerinde ek olarak f-k yöntemi kullanılmış ve MMSPAC yöntemiyle elde edilmiş olan hız profilleri sınanmıştır. Ancak f-k yöntemiyle elde edilmiş olan dispersiyon eğrisi ile teorik dispersiyon eğrileri çok yakın çıkmamıştır. Bunun temel nedeni, f-k yönteminin az sayıda istasyon ve dizilim ile iyi çalışmaması ve buna bağlı olarak çözünürlüğün düşük olmasıdır. Bu gözlem, f-k yöntemi ile karşılaştırıldığında MMSPAC yönteminin az sayıda istasyonla çalışabilen pratik bir yöntem olduğuna işaret etmektedir.
- Özetle, Bolu ve Düzce'de S-dalga hız profilleri, yalnızca doğada varolan pasif kaynaklı titreşimlerin analiziyle; çalışılan sahalardaki zeminlerde herhangi bir tahribata yol açmadan elde edilmiştir. Bu yöntem, patlatma, sondaj gibi çalışmaların uygun olmadığı şehirleşmiş bölgelerde yalnızca gerekli ekipmanın teminiyle kolaylıkla uygulanabilmektedir.
- Çalışmanın en önemli yaygın etkisi, alternatif bir yöntem sınanarak, Türkiye için dünyada sismik bölgelerde örnekleri bulunan bir Bölgesel Hız Modeli (Community Velocity Model) oluşturulması yönünde bir ilk adım atılmış olmasıdır.

5.2 Öneriler ve Gelecek Çalışma Planları

- İleride gerçekleştirilecek saha çalışmalarında ekipman imkanları izin verdiği ölçüde daha fazla sayıda istasyon kullanılmalı ve aynı sahada birden fazla dizilim ile veri toplanmalıdır. Bu biçimde, yoğun dizilimlerle zeminlerin temel ile yüksek modlarına ait daha fazla bilgi toplanarak, S-dalga hızları daha az belirsizlikle elde edilebilecektir.

- Bu çalışmada elde edilmiş olan zemin profilleri kullanılarak tek boyutlu dalga yayılım prensipleriyle zemin tepki analizleri yapılabilir. Hesaplanacak olan teorik büyütme faktörleri ile mikrotremor ölçümlerinden elde edilmiş olan H/V oranları karşılaştırılarak zemin büyütme faktörleri elde edilebilir.
- Bu çalışmada iki sahada elde edilmiş olan S-dalgası hızları, farklı derinliklerde alternatif yöntemlerle desteklenerek yüksek çözünürlüklü 1-boyutlu dalga hızı modelleri elde edilebilir. Örnek olarak herhangi bir sahada ana kaya derinliklerine dek MMSPAC ile elde edilecek olan dalga hızları, yüzeye yakın tabakalarda, SPT, kırılma, sondaj gibi çalışmalarla tamamlanmalıdır. Öte yandan MMSPAC yönteminin çözebildiği derinliklerin daha altındaki üst kabuk tabakalara ait dalga hızları ise tomografi gibi yöntemlerle belirlenmelidir. Bu biçimde, farklı derinliklerde etkili olan alternatif yöntemlerin sonuçları bir arada kullanılarak en üst zemin tabakalarından başlayıp kabuk derinliklerine dek inen gerçekçi ve güvenilir hız modelleri elde edilebilecektir.
- Yakın gelecekte, bu ve benzeri çalışmaların en önemli çıktı hedefi, dünyada örnekleri olan 3-boyutlu hız modellerini ülkemiz için de elde etmek olmalıdır. Kuzey Anadolu Fay Hattı boyunca hız yapısı yüksek çözünürlüklü olarak bilinmeyen çeşitli havzalar (basin) bulunmaktadır (Örnek olarak Düzce, Erzincan havzaları gibi). Bu havzalarda sözü edilen hız modellerini oluşturma çabaları, yukarıda tarif edilen alternatif yöntemlerin bir arada kullanılmasını gerektirecek ve hem arazi hem de sayısal modelleme çalışmalarını beraberinde getirecektir.
- Bu ve benzeri çalışma sonuçları, uzun vadede ülkemizdeki çok önemli bir başka boşluğu doldurabileceklerdir. Bilindiği üzere ülkemizdeki kuvvetli yer hareketi ağı her geçen gün daha da genişlemektedir ancak hala çok az sayıda istasyonla kayıt alınan birçok sismik tehlikesi yüksek bölge vardır. Örnek olarak, Erzincan yakınlarında, bölgedeki yoğun sismik aktivite ile örtüşmeyen seyrek bir kuvvetli yer hareketi ağı bulunmaktadır. Benzeri olarak az sayıda istasyon bulunan bölgelerde sentetik yer hareketi modelleri ve dalga yayılım simülasyonları önem kazanmaktadır. Dalga yayılım yöntemleri, mühendislik açısından önemli frekanslarda çözüm yapabilmek için çok yüksek çözünürlüklü hız modelleri gerektirmektedir. Bu ve benzeri çalışmalarda hız modelleri elde edildikten sonra ilgili bölgelerde dalga yayılımı simülasyonları yapılmalı ve sentetik yer hareketleri elde edilmelidir. Bu yer hareketleri, geçmiş kayıt

bulunmayan bölgelerde sismik tasarım, hasar dağılımları ve sigorta prim hesaplarında kullanılabilir.

- Yine benzeri çalışmalar sonucu belirlenecek olan zemin bilgilerine ait yüksek çözünürlüklü çıktılar, ileride öncelikli olarak yerel zemin koşullarına bağlı olarak deprem tehlike haritalarının geliştirilmesinde; zemin koşullarından ötürü oluşabilecek yapı hasar dağılımlarını belirlemekte; mikrobölgelendirme çalışmalarında; azalım ilişkilerinde ve yer hareketi modellerinde kullanılacaktır.

5.3 Proje Kapsamında Yapılan Yayınlar

M. Asten, A. Askan, E.E. Ekincioğlu, F.N. Şişman and B. Uğurhan, Site Characterization in Northwestern Turkey Based on Spatial Autocorrelation Technique: A Comparative Study on Site Hazard Estimation, *Seismological Research Letters*, Volume 81, No. 2 , pp. 382, (2010).

F.N. Şişman and A. Askan, Site Amplifications Using H/V Technique: A Case Study in Düzce and Bolu, *Türkiye 19. Jeofizik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitapçığı (CD)*, Kasım 2010, Ankara, (2010).

M. Asten, A. Askan, E.E. Ekincioğlu, F.N. Şişman and B. Uğurhan, Site Characterization in Bolu and Düzce Using MMSPAC Technique, (*Bulletin of the Seismological Society of America* dergisi için hazırlanma aşamasında), (2010).

F.N. Şişman, Estimation of Site Amplifications in Seismically Active Regions Using Alternative Methods, *Yüksek Lisans tez çalışması*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Deprem Çalışmaları Ana Bilim Dalı, Ankara, (2009-devam ediyor).

Teşekkür

109M390 no'lu bu Tübitak Hızlı Destek Projesi'ni mümkün kılan tüm Tübitak birimlerine ve yetkililerine teşekkür ederiz. Arazi çalışmaları sırasında verdikleri destek için Prof. Dr. Sadık Bakır, Prof. Dr. Şerif Barış, Dr. Murat Nurlu, Mete Mirzalıoğlu ve Derya Şahinbaz'a ve tüm proje süresince yoğun emek harcayan Prof.Dr. Michael Asten'a şükranlarımızı sunuyoruz. Yine arazi çalışmaları sırasında sahada verdikleri destekten ötürü Bolu Bayındırlık ve İskan İl Müdürlüğü ile Düzce Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Akgün, S. ve Bekler, T. Mikrotremor yönteminin zemin problemlerindeki uygulamaları ve Çanakkale'den örnekler. Ulusal Mühendislik ve Eğitim Sempozyumu, Kocaeli Üniversitesi, İzmit, (2007).

Aki, K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors: *Bulletin Earthquake Research Institute* 35, 415-456, (1957).

Alexoudi, M., Manou, D. And Pitilakis, K. Seismic Vulnerability Analysis of Waste-Water System: Methodology and Application for Kocaeli and Düzce Earthquakes Based on the Microzonation Study of Düzce, The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China (2008).

Aki, K. A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of earth's crust. *Geophysics*, 30, p. 665-666 (1964).

Ansal, A., İyisan, R, and Güllü, H. Microtremor Measurements for the Microzonation of Dinar", *Pageoph*, Special Issue, Vol.158, N.11. 2525-2541, (2001).

Ansal, A., Kurtuluş, A. ve Tönük, G. Bolu İl Merkezi Sismik Mikrobölgeleme Çalışması, BU Kandilli Rasathanesi Ve Deprem Araştırma Enstitüsü Araştırma Raporu, Bölüm 2, (2007).

Arai, H., and Tokimatsu, K. S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum: *Bulletin of the Seismological Society of America* 94, No.1, 53-63, (2004).

Asten M.W. The use of microseisms in geophysical exploration: PhD Thesis, Macquarie University, (1976).

Asten, M. The Spatial Auto-Correlation Method for Phase Velocity of Microseisms – Another Method for Characterization of Sedimentary Overburden: in Earthquake Codes in the Real World, Australian Earthquake Engineering Soc., Proceedings of the 2001 Conference, Canberra, Paper 28, (2001).

Asten, M.W., Dhu, T., Jones, A. and Jones, T. Comparison of shear velocities measured from microtremor array studies and SCPT data acquired for earthquake site hazard classification in the northern suburbs of Perth W.A.. Proceedings of Conference of the Australian Earthquake Engineering Soc., 12 p., Melbourne, (2003).

Asten, M., and D. Boore. Microtremor methods applied to hazard site zonation in the Santa Clara Valley, *Seismol. Res. Lett.*, 76, 257, (2005).

Asten, M. On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods, *Geophysics*, 71, V153– V162, (2006).

Bakir, B. S., Yılmaz, M.T., Yakut, A., Gulkan,P. Re-examination of damage distribution in Adapazari: Geotechnical considerations, *Engineering Structures*, 27 (7), 1002-1013, (2005).

Başokur, A. T. Yapı-Yeri İncelemelerinde Makaslama Dalgası Hız Kesitinin Remi Yöntemi İle Saptanması, Kocaeli Deprem Sempozyumu 2005, 23-25 Mart 2005, Kocaeli, (2005).

Bol, E., Arel, E., Önalp, A. Yerel Zemin Koşullarının Deprem Hasarına Etkisi-Adapazarı Örneği, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul, pp. 233-244, (2007).

Brocher, T. Key Elements of Regional Seismic Velocity Models for ground motion simulations, Proc. of Int. Workshop on Long-Period Ground Motion simulations and velocity structures, Tokyo, Nov 14-15, (2006).

Capon, J. High resolution frequency-wavenumber analysis. Proc. Inst. Elect. And Electron Eng., 57, p. 1408-1418, (1969).

Capon, J. Signal processing and frequency-wavenumber spectrum analysis for a large aperture seismic array. *Methods in Computational Physics*, 13, p. 1-59, (1973).

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

Claprod, M. And Asten, M. Initial results from spatially averaged coherency, frequency-wavenumber, and horizontal to vertical spectrum ratio microtremor survey methods for site hazard study at Launceston, *Exploration Geophysics*, 40, 132–142, (2009).

Ekinciöglu, E. E. Dairesel Dizilimli Mikrotremorlar Ve Spac Yöntemi İle Yakın Yüzey S Dalgası Hız Yapısının Belirlenmesi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 160 sayfa, (2007).

Henstridge, J.D. A signal processing method for circular arrays: *Geophysics* 44, No.2, 179-184, (1979).

Karabulut, S., Ceyhan, U., Osmansahin, I., Ozcep, F., Alp, H. Gundogdu, O. Microzonation studies based on geophysical data in Buyukcekmece (İstanbul) region, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Abstract Book, pp. 330, (2006).

Komatitsch, D., Liu, Q., Tromp, J., Süss, P., Stidham, C., and Shaw, J.H. Simulations of ground motion in the Los Angeles basin based upon the spectral-element method: *Bulletin of the Seismological Society of America* 94, No.1, 187-206, (2004).

Kramer, S.L. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall , Upper Saddle River, NJ., 643 p, (1996).

Kudo, K., Kanno, T., Okada, H., Özel, O., Erdik, M., Sasatani, T., Higashi, S., Takahashi, M., and Yoshida, K. Site-specific issues for strong motions during the Kocaeli, Turkey, earthquake of 17 August 1999, as inferred from array observations of microtremors and aftershocks: *Bulletin of the Seismological Society of America* 92, No.1, 448-465, (2002).

Lachet, C., and Bard, P.-Y. Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique: *Journal of the Physics of the Earth* 42, 377-397, (1994).

Lacoss, R.T., Kelly, E.J., and Toksöz, M.N. Estimation of seismic noise structure using arrays: *Geophysics* 34, No.1, February 1969, 21-38, (1969).

Louie, J.N. Faster, Better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, p. 347-364, (2001).

Magistrale, H., S. Day, R. Clayton, and R. Graves. The SCEC southern California reference 3D seismic velocity model version 2, *Bull. Seism. Soc. Am.* 90 (6B), S65-S76, (2000).

Maresca, R., Nardone, L., Galluzzo, D., La Rocca, M., Del Pezzo, E. Application of the SPAC Method to Ambient Noise Recorded in the Vesuvius Area (Italy), Third International Symposium on The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, 30 August - 1 September 2006, Paper Number: 073 (2006).

Nakamura, Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Q. Rep. Railway Tech. Res. Inst.*, 30, 25–30, (1989).

Nazarian, S. and Desai, M.R. Automated surface wave method: Field testing. *Journal of Geotechnical Engineering*, 199, p. 1094-1111, (1993).

Okada, H. The Microtremor Survey Method, Geophysical Monograph Series no. 12, SEG, Tulsa, (2003).

Olsen, K.B., Nigbor, O.R., and Konno, T. 3D viscoelastic wave propagation in the Upper Borrego valley, California, constrained by borehole and surface data: *Bulletin of the Seismological Society of America* 90, No.1, 134-150, (2000).

Özel, O. ve Sasatani, T. A site effect study of the Adapazari basin, Turkey, from strong- and weak-motion data, *Journal of Seismology*, 8 (4), 559-572, (2004).

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

Rosenblad, B., Rathje, E. M. and K.H. Stokoe. Shear Wave Velocity Profiling by the SASW Method at Selected Strong-Motion Stations in Turkey, Project Final Report, peer.berkeley.edu/lifelines/lifelines_pre_2006/.../2A02a-FR.pdf, (2006).

Scherbaum, F., Hinzen, K.-G., and Ohrnberger, M. Determination of shallow shear wave velocity profiles in the Cologne, Germany area using ambient vibrations: *Geophysical Journal International* 152, 597-612, (2003).

Schmidt, R.O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-34, p. 276-280, (1986).

Siyahi, B., ve Selçuk, M.E. Yerel Zemin Koşullarının Belirlenmesinde Mikrotremor Ölçümlerinin Kullanılması: Adapazarı Örneği, Kocaeli Earthquake Symposium, pp. 1167-1177, (2005).

Stephenson, W.J., Hartzell, S., Frankel, A.D., Asten, M., Carver, D.L., Kim, W.Y. Site characterization for urban seismic hazards in lower Manhattan, New York City, from microtremor array analysis, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L03301, doi: 10.1029/2008GL036444, (2009).

Tokgöz, O. E. Bolu Ve Yakın Çevresinde Mikrotremor Verileri İle Yer Etkisinin İncelenmesi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, (2002).

Tokimatsu, K. Geotechnical site characterization using surface waves: in Ishihara (ed.). *Earthquake Geotechnical Engineering*, Balkema, (1997).

Toksöz, M.N. Microseisms and an attempted application to exploration, *Geophysics* 29, No.2, 154-177, (1964).

Toksöz, M.N. and Lacoss, R.T. Microseisms: mode structures and sources. *Science*, 159, p. 872-873, (1968).

Ulamis K. and Kılıc R. Liquefaction potential of Quaternary alluvium in Bolu settlement area, Turkey, *Environ. Geol.*, 55:1029–1038, (2008).

Yamanaka, H., Kato, M., Hashimoto, M., Gulerce, U., Iyisan, R., Ansal, A. Microtremor and earthquake observations in Adapazari and Duzce, Turkey, for estimations of site amplifications, Proc. Assessment of Seismic Local-Site Effects at Plural Test Sites, Ministry of Education, Science, Sports and Culture, Research Grant No: 11694134, Japan, March 2002, 129-136, (2002).

Yılmaz, Ö., Eser, M., Berilgen, M. Sismik Mikrozonlamaya Mahsus Entegre Sismik Ve Geoteknik İnceleme, Kocaeli Earthquake Symposium, pp. 1211-1213, (2005).

Yılmaz, Ö., Savaşkan, E., Bakır, S., Yılmaz, T., Eser, M., Akkar, S., Tüzel, B., İravul, Y., Özmen, Ö., Denizlioğlu, Z. ve Alkan, A., Gürbüz, M. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Pekin, Çin, Bildiri No. 03-03-0014. Shallow seismic and geotechnical site surveys at the Turkish national grid for strong-motion seismograph stations, (2008).

Yılmaz, Ö., Eser, M., Sandikkaya, A., Akkar, S., Bakır, S. ve Yılmaz, T. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Pekin, Çin, Bildiri No. 03-03-0014. Comparison of shear-wave velocity-depth profiles from downhole and surface seismic experiments, (2008).

Zor, E., Cevher, M., Mengüç, G., Soydabaş M., Bilgiç, A., Ayan, E., Özalaybey, S. Kocaeli İlinde Zemin Sınıflaması Ve Sismik Tehlike Değerlendirme Çalışmaları, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul, pp. 133-144, (2007).

Zywicki, D.J. Advanced Signal Processing Methods Applied to Engineering Analysis of Seismic Surface Waves, Ph.D. Diss., Georgia Institute of Technology, Atlanta, 226 p., USA, (1999).

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 109M390
Proje Başlığı: Sismik Tehlikenin Yüksek Olduğu Kentsel Alanlarda Mikrotremor ve Gelişmiş Çoklu-Mod Uzaysal Özilişki (MMSPAC) Yöntemi ile Zeminlerin Özelliklerinin Belirlenmesi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Yürütücü: Y. Doç. Dr. Ayşegül Askan Gündoğan Araştırmacı: Doç. Dr. Selma Kadioğlu
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnönü Bulvarı, 06531 Ankara
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: -
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 15 Ekim 2009- 15 Ekim 2010
Öz (en çok 70 kelime) Bu proje kapsamında Bolu ve Düzce illerinde mikrotremor ölçümleri gerçekleştirilmiş; mikrotremor kayıtlarından MMSPAC yöntemiyle S-dalga hızının derinliğe göre değişimi elde edilmiştir. Proje kapsamında elde edilen sonuçlar önceki çalışmalarda elde edilmiş olan bulgularla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucu belirlenmiş olan zemin bilgilerine ait çıktılar, ileride yerel zemin koşullarına bağlı olarak deprem tehlike haritalarının geliştirilmesinde; zemin koşullarından ötürü oluşabilecek yapı hasar dağılımlarını belirlemekte; mikrobölgelendirme çalışmalarında; üç boyutlu zemin modellemelerinde ve azalım ilişkilerinde kullanılabilir.
Anahtar Kelimeler: Mikrotremor, yüzey dalgaları, MMSPAC yöntemi, ters-çözüm, S-dalga hızı
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
Projeden Yapılan Yayınlar: M. Asten, A. Askan, E.E. Ekincioğlu, F.N. Şişman and B. Uğurhan, Site Characterization in Northwestern Turkey Based on Spatial Autocorrelation Technique: A Comparative Study on Site Hazard Estimation, <i>Seismological Research Letters</i> , Volume 81, No. 2 , pp. 382, (2010). F.N. Şişman and A. Askan, Site Amplifications Using H/V Technique: A Case Study in Düzce and Bolu, <i>Türkiye 19. Jeofizik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitapçığı (CD)</i> , Kasım 2010, Ankara, (2010). M. Asten, A. Askan, E.E. Ekincioğlu, F.N. Şişman and B. Uğurhan, Site Characterization in Bolu and Düzce Using MMSPAC Technique, (<i>Bulletin of the Seismological Society of America</i> dergisi için hazırlanma aşamasında), (2010). F.N. Şişman, Estimation of Site Amplifications in Seismically Active Regions Using Alternative Methods, <i>Yüksek Lisans tez çalışması</i> , Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Deprem Çalışmaları Ana Bilim Dalı, Ankara., (2009-devam ediyor).