



## 2-Boyutlu (2B) Zemin-Anakaya Modellerinin Oluşturulması: Bornova Ovası (İzmir) Örneği

### Modelling of 2-Dimensional (2D) Soil-Bedrock Interface: A Case Study of Bornova Plain (İzmir)

Eren Pamuk <sup>1</sup>, Özkan Cevdet Özdağ <sup>2\*</sup>, Mustafa Akgün <sup>3</sup>, Tolga Gönenç <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Havadan Jeofizik Araştırmalar, 06800 Ankara, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Ege Bölgesi Uygulama ve Araştırma Merkezi, 35340 İzmir, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 35160 İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: cevdet.ozdag@deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 27.08.2018

DOI:10.21205/deufmd.2019216117

Kabul Tarihi / Accepted: 16.10.2018

Araştırma Makalesi/Research Article

*Atıf şekli/ How to cite:* PAMUK, E., ÖZDAĞ, Ö.C., AKGÜN, M., GÖNENÇ, T. (2019). 2-Boyutlu (2B) Zemin-Anakaya Modellerinin Oluşturulması: Bornova Ovası (İzmir) Örneği. DEUFMD, 21(61), 173-184.

#### Öz

Deprem-zemin ortak davranışı tanımlanırken zemin-anakaya modelleri temel alınmaktadır. Zemin anakaya tanımlamalarında kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) kullanılır.  $V_s < 760$  m/s durumunda ortam zemin;  $760$  m/s  $< V_s < 3000$  m/s durumunda ortam mühendislik anakayası ve son olarak  $V_s > 3000$  m/s durumunda ortam sismik anakaya olarak tanımlanır. Bu çalışmada, İzmir iç körfezi doğusunda yer alan Bornova ovasında 2-B zemin, mühendislik ve sismik anakaya modellerinin oluşturulması için mikrogravite ve aktif-pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışma temel olarak üç aşamadan oluşmaktadır; 1) Yüzey dalgası yöntemleri kullanılarak sismik hızların elde edilmesi, 2) Elde edilen sismik hızlardan ampirik bağıntular yardımıyla yoğunluk değerlerinin hesaplanması, 3) Mikrogravite yönteminden elde edilen yerel gravite değerlerinin bu yoğunluk değerlerine göre modellenerek 2-B zemin- anakaya modellerinin oluşturulmasıdır. Elde edilen modeller incelendiğinde özellikle körfeze yakın kesimlerde zeminin 300-400 m kalınlığında ve birbirinden farklı fiziksel özelliklere (S- Dalga hızı, yoğunluk) sahip tabakalardan oluştuğu saptanmıştır. Zemin kalınlığının kuzey-güney yönünde değiştiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin-anakaya modeli, yüzey dalgası yöntemleri, mikrogravite, Bornova ovası

#### Abstract

When the earthquake-soil common behaviour is described, soil-bedrock models are used as a fundamental knowledge. In soil-bedrock descriptions, S-wave velocity is ( $V_s$ ) used. The mediums are called as a soil where the  $V_s < 760$  m/s; the medium are called as a engineering bedrock where the  $760$  m/s  $< V_s < 3000$  m/s; lastly the mediums are called as a seismic bedrock where the equation is  $V_s > 3000$  m/s. In this research, microgravity and surface wave methods (MASW, ReMi, SPAC) were used for obtaining the 2-D soil, engineering-seismic bedrock models of Bornova plain where located at the east of İzmir bay. This study is basically composed of three phases; 1) Obtaining of seismic velocities by using surface wave methods, 2) Calculation of density values which is obtained via seismic velocities by using empirical relations, 3) Creating of soil bedrock model by using microgravity data which correlated with calculated density values.. At the regions where are especially closer to the bay, it was determined that the soil thickness is 300-400 m and it is found that the soil is composed of more than one layers which are shows different physical characteristics

individually as in S wave velocity and density. Moreover, it is observed that the soil thickness changes in the direction of N-S.

**Keywords:** Soil-bedrock model, surface wave methods, microgravity, Bornova plain

## 1. Giriş

Zemin ana kaya modelleri deprem-zemin ortak davranışı çalışmalarında temel alınmaktadır. Zemin ve anakaya tanımları ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır; Ambraseys vd. [1] yapmış oldukları çalışmada  $V_s < 760$  m/s koşulunda ortamın zemin olarak isimlendirilebileceğini, Nath [2]  $V_s > 3000$  m/s durumunda ortamın sismik anakaya,  $400 < V_s < 760$  m/s durumunda ise ortamı mühendislik anakayası olarak tanımlamış, Morikawa vd. [3]  $V_s > 3000$  m/s durumunda ortamın sismik anakaya olduğunu, Anbazhagan ve Sitharam [4]  $V_s > 760$  m/s olması durumunda ortamın mühendislik anakayası olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışma kapsamında  $V_s < 760$  m/s koşulunda ortamın zemin,  $760 < V_s < 3000$  m/s koşulunda ortamın mühendislik anakayası,  $V_s > 3000$  m/s koşulunda ise ortam için sismik anakaya tanımları kullanılmıştır [5-6].

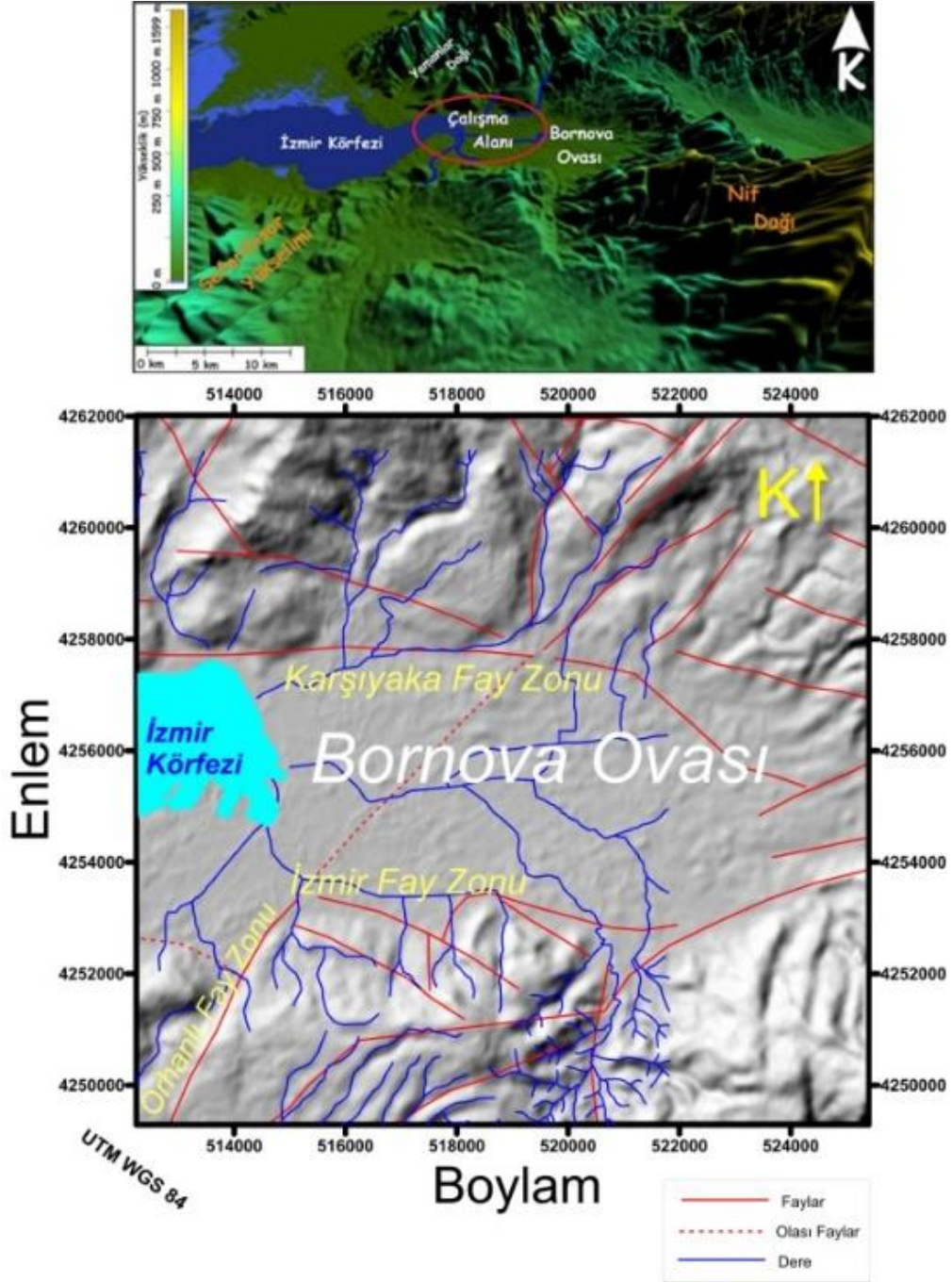
Deprem-zemin ortak davranışı çalışmalarının ilk aşamasında deprem odak noktasından sismik anakaya seviyesine kadar ivme-azalım ilişkileri kullanılır. Sismik anakaya ile zemin yüzeyi arasındaki sismik empedanslar enerji kanununa göre deprem dalgasının genliğinde değişime neden olmaktadır [7]. Ayrıca, zemin, mühendislik anakayası ve sismik anakaya arasındaki tabakaların yeraltı topoğrafyasının yatay yönde değişimi depremin zemin yüzeyindeki etkisini değiştirebilir. Bütün bu olayların ayrıntılı olarak araştırılabilmesi için 2B'lu ve/veya 3B'lu zemin-anakaya modellerinin oluşturulması gerekmektedir.

Bu çalışmada, zemin, mühendislik-sismik anakayaları arasındaki arayüzeylerin 2B'lu olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Bornova ovası ve çevresinde yüzey dalgası ve mikrogravite yöntemleri uygulanmıştır (Şekil 1). Bu çalışma temel olarak üç aşamadan

oluşmaktadır. Öncelikle yüzey dalgası yöntemleri ile sismik hızlar elde edilmiştir. Sonrasında, yoğunluk değerleri elde edilen hızlar yardımıyla ampirik bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Son olarak hesaplanan yoğunluk değerleri yardımıyla yerel gravite verileri modellenerek 2B'lu zemin-anakaya modelleri elde edilmiştir. Oluşturulan modeller incelendiğinde özellikle denize yakın kısımlarda zemin kalınlığının 300-400 m olduğu ve çok sayıda tabakadan oluştuğu görülmektedir. Çalışma alanının Kuzey ve Güneyine doğru gidildikçe zemin kalınlığının azaldığı saptanmıştır. Tabakaların topoğrafyası yatay ve düşey düzlemde değişimler göstermektedir.

## 2. Çalışma Alanı ve Çevresinin Jeolojisi

İzmir ve çevresi için jeolojik olarak anakaya, Üst Kretase yaşlı Bornova Melanjı (karmaşığı) olarak tanımlanır [9]. Bu birim aynı zamanda çalışma alanı için mühendislik ana kayası ( $V_s > 760$  m/sn) özelliğini taşımaktadır. Bornova Melanjı'nın matriksi içinde daha yaşlı kireçtaşı megakolistolitleri gelişigüzel yer almaktadırlar. Altındağ ve çevresinde yer alan kireçtaşları, Işıklar kireçtaşı olarak isimlendirilir [10]. Bornova karması, kumtaşı/şeyl-kalkerli şeyl ardalanmasından oluşmuştur. Bornova karması içerisinde kireçtaşı, diyabaz blokları ve çakıtaşı mercekleri yer almaktadır [11]. Bölgede Neojen yaşlı gösel tortullar Bornova karmasının üst kısmında açısız uyumsuz olarak yer alır. Sırasıyla yüzeye doğru Yamanlar volkanitleri ve bunun üzerinde de Kuvaterner yaşlı alüvyonlar uyumsuz şekilde yer almaktadır [11-12]. Jeolojik çalışmalara göre çalışma alanı kuzeyinde Miyosen yaşlı andezit ve türevleri, güneyinde ise neojen yaşlı kireçtaşları bulunmaktadır. Orta kısımların çöküntü alanı olma özelliği de dikkate alındığında Kuvaterner yaşlı alüvyon delta birikim alanı özellikleri gözlenmektedir (Şekil 2).

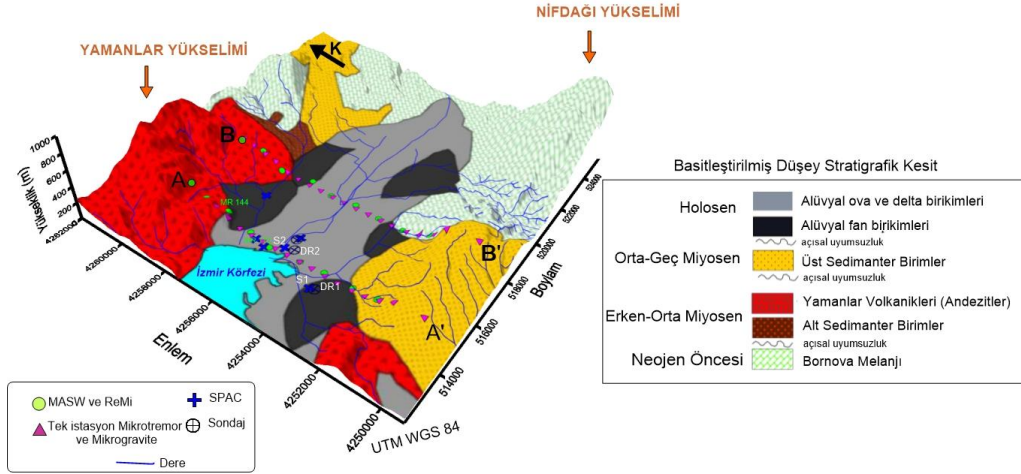


Şekil 1. Çalışma Alanının, a) topografik görünümü, b) tektonik elemanları (Faylar Uzel [8]'den alınmıştır)

### 3. Arazi Çalışmaları

Bornova ovası ve çevresinde yüzey dalgası ve mikrogravite yöntemleri kullanılarak veri seti oluşturulmuştur. Bu çalışma kapsamında iki profil boyunca 18 adet MASW ve ReMi; 38 adet

tek nokta mikrotremor ve mikrogravite; 6 adet dizilim yöntemi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Dizilim yöntemi ölçümlerinin bir kısmı da tek nokta mikrotremor ölçümü olarak ayrıca değerlendirilmiştir (Şekil 2).



**Şekil 2.** Çalışma Alanının jeolojisi ve ölçü noktaları (jeoloji haritası [8]'den değiştirilerek alınmıştır)

### 4. Metodoloji

#### 4.1 Yüzey dalgası yöntemleri

Yüzey dalgası analiz yöntemleriyle (SASW) (Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi), MASW (Yüzey dalgalarının çok kanallı analizi), ReMi (Kırılma-mikrotremor), dizilim yöntemi (SPAC/Uzaysal özilişki yöntemi), Rayleigh dalgalarının dispersif özelliğinden yararlanılarak yer altı tabakalarının kesme dalgası hızının ( $V_s$ ) derinlikle değişimi belirlenir. [13-14-15-16] Tek istasyon mikrotremor yönteminde ise Rayleigh dalgaları kullanılarak yer hareketinin yerel zemin koşulları etkisiyle oluşturabileceği spektral oran özellikleri ve zemin baskın frekansı belirlenebilir [17].

MASW ölçülerinde 24 kanallı Geometrics Geode sismik aleti ve 4,5 Hz lik düşük frekanslı jeofonlar kullanılmıştır. Jeofon aralıkları 2,5 m veya 5 m olarak seçilmiştir. Kaynak olarak hidrolik balyoz (45 kg) veya balyoz (8 kg) kullanılmıştır. MASW yöntemi uygulamasında düz, orta ve/veya ters atışlar ile veri toplanmıştır. Kaynağın ilk jeofona olan uzaklığı (ofset) düz ve ters atışlarda 2 m, 5 m, 15 m orta atışlarda ise profilin orta noktası veya orta noktasına yakın seçilmiştir. Örnekleme aralığı 0,5-1 msn kayıt uzunluğu 2-3 sn'dir. Veri

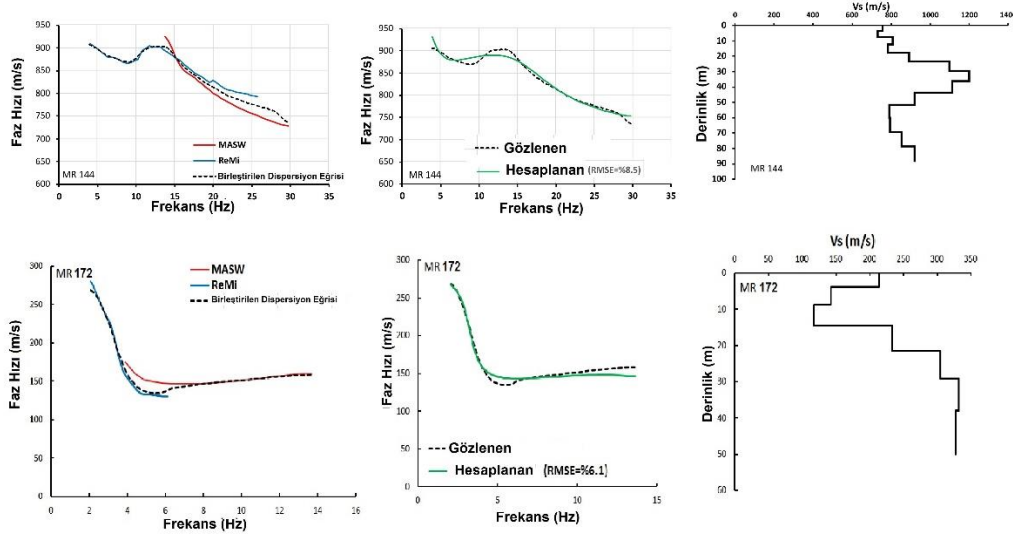
kalitesini artırmak için her noktada 3 adet ölçü alınarak yığılma (stack) işlemi yapılmıştır. MASW çalışmalarında kullanılan ekipman ile ReMi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda örnekleme aralığı 2 ms, kayıt uzunluğu 30 sn seçilmiştir ve her profilde ortalama 10 adet kayıt alınmıştır. Her ölçüde 3 adet yığılma işlemi yapılmıştır. MASW verilerinin değerlendirme aşaması temel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada yüzey dalgası verileri kaydedilir. İkinci aşamada spektral analiz yöntemleri ile her bir frekansa ait faz hızının belirlenmesinden sonra temel mod dispersiyon eğrisi çıkarılır. Son aşamada ise dispersiyon eğrisinin en küçük kareler yöntemi [18-19] ile ters çözümünden kayma dalgası hız ( $V_s$ ) profili elde edilmiştir. ReMi yönteminde de benzer veri işlem aşamaları uygulanmaktadır.

Pasif kaynaklı yüzey dalgası analizlerinde, sismik enerji genellikle düşük frekans ve uzun dalga boyları ile yayıldığı için aktif kaynaklı yöntemlere göre, daha derin yer yapılarının incelenmesine olanak verir.

MASW yöntemi ile elde edilen dispersiyon eğrileri göreceli olarak yüksek frekans aralığında (örneğin 15-50 Hz aralığı) ve sınırlı derinlik için (genellikle 30 m'ye kadar) belirlenirken, ReMi-

pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemiyle elde edilen dispersiyon eğrileri daha düşük frekans aralığını (örneğin, 3-15 Hz) ve daha derinlerin incelenmesine (genellikle 100 m'ye kadar) olanak sağlamaktadır. Hem araştırma derinliğinin artırılması hem de yüksek çözünürlükte Vs-derinlik profillerinin elde edilmesi için bu çalışmada MASW ve ReMi

yöntemleriyle elde edilen dispersiyon eğrileri birleştirilmiştir (Şekil 3). Birleştirilen dispersiyon eğrilerin ters çözümüyle Vs-derinlik profilleri elde edilmiştir (Şekil 3). Elde edilen Vs-derinlik profilleri kullanılarak 60 m seviye için hız değerleri (Vs60) A-A' ve B-B' profilleri için belirlenerek Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 3. Birleştirilmiş dispersiyon eğrisinin ters çözümü ile elde edilen Vs profilleri

Tablo1. Yüzey dalgası yöntemleri ölçü parametreleri

	MASW	ReMi	Dizilim Yöntemi
Kanal Sayısı	24	24	4
Alıcı tipi	Düşey 4.5-Hz	Düşey 4.5-Hz	Düşey 0.033 Hz
Kaynak	45 kg hidrolik çekic	-	-
Alıcı aralığı	5 m	5 m	S1 (21, 58 90 m) ; S2 (27, 52, 150 m); S4 ( 45, 90, 200 m)
Ofset	5, 10 and 15 m	-	-
Yığıma Sayısı	3	10	-
Örnekleme Aralığı	0.5 ms	2 ms	100 Hz
Kayıt Uzunluğu	1 s	30 s	En az 60 Dk (Çember Başı)
Kayıt Sistemi	Geode	Geode	Güralp CMG-6TD

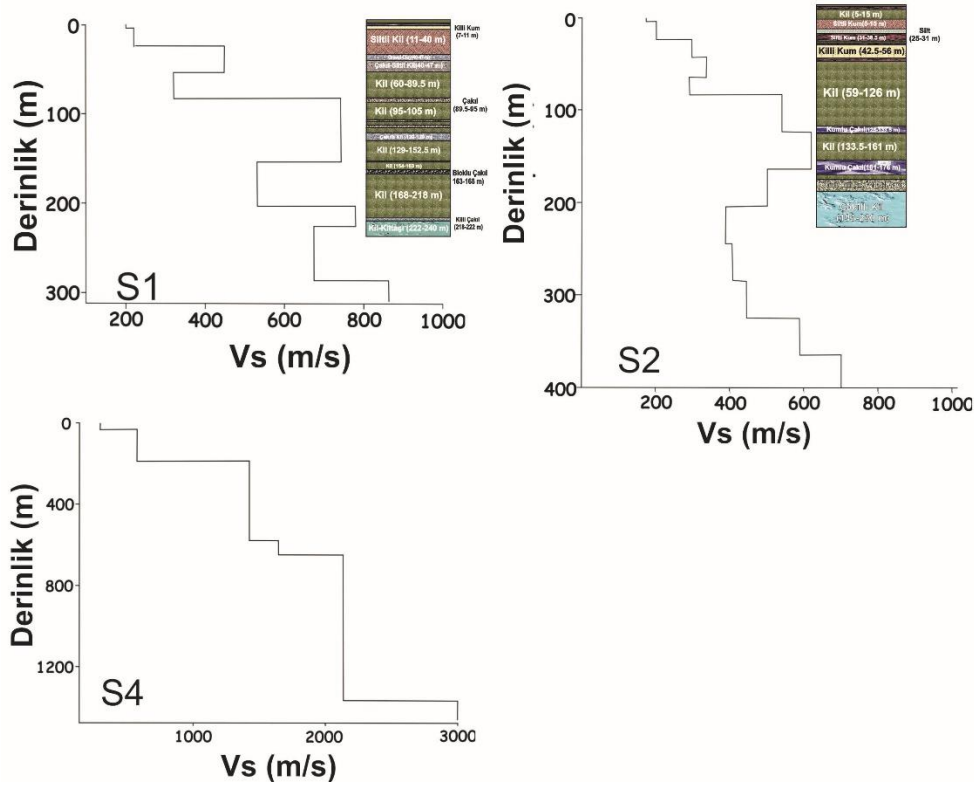
Alüvyon kalınlığının fazla olduğu yerlerde derin Vs profillerinin elde edilebilmesi için Pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemi olan dizilim yöntemi kullanılabilir. Aki tarafından geliştirilen bu yöntem[15], sismik dalgaların zamansal ve mekansal spektrumları arasındaki ilişkinin belirlenmesinde kullanılır. Aki yaptığı çalışmada [15], kısa periyotlu (<1 Hz) mikrotremor kayıtlarını kullanarak yerel zemin yapısına ait bilgileri kestirmeye çalışmıştır. Yöntem,

mikrotremor kayıtları içinden yüzey dalgalarının ayırt edilmesinde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir [16-20].

Her bir ölçüm noktasında 4 adet Güralp CMG-6TD sismometre kullanılarak dairesel dizilimler elde edilmiştir. Üç bileşen kayıt alınmış, analizlerde sadece düşey bileşen kayıtları kullanılarak elde edilen Rayleigh dalgasının dispersiyon eğrileri Vs derinlik profillerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Geometrik

dizilimlerde istasyonlardan biri dairenin merkezinde diğerleri ise daire üzerinde bulunan bir eşkenar üçgenin köşe noktalarındadır. Tüm ölçüm noktalarında 3 farklı yarıçapa sahip dizilimler oluşturulmuştur. Ölçüm süreleri tüm yarıçaplar için 40 dk-60 dk arasında değişmektedir. Dizilim mikrotremor ölçümleri kullanılarak her bir yarıçaplı ağ için istasyonlar arasındaki ilişkinin tanımlanabilmesi için daireler belirlenmiştir. Oluşturulan her bir alıcı çifti için SPAC katsayıları hesaplanmış ve azimutal ortalamaları alınmıştır. Yani her bir daire için kullanılan sismometre sayısına bağlı

olarak halkalar ve bu halkalar için kalan istasyonlar arasındaki ilişki tanımlanmıştır. Gözlemsel değerlerden elde edilen SPAC katsayıları ile teorik Bessel fonksiyonu arasındaki uyum araştırılmış ve uyumlu olduğu frekans aralığına ait değerler kullanılarak dispersiyon eğrisi elde edilmiştir [16]. Elde edilen Dispersiyon eğrisinin ters çözümü ile de 1B'lu Vs-derinlik kesitleri elde edilmiştir (Şekil 4). Ayrıca Çalışma alanında yapılan karotlu zemin sondajlarında jeolojik olarak ana kaya özelliği taşıyan bir birim gözlenmemiştir.



Şekil 4. Dizilim yönteminden elde edilen Vs profillerinin örnekleri

Çalışma alanında toplam 38 noktada tek istasyon mikrotremor verileri Güralp CMG 6TD marka hız ölçer sismometre ile toplanmıştır. Mikrotremor kayıtları minimum 30 dk boyunca ve 100 Hz örnekleme aralığı ile alınmıştır. Mikrotremor verilerinin değerlendirilmesinde Nakamura yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle mikrotremor verilerinin trend etkisi giderildikten sonra 0.05-20 Hz aralığında bant geçişli süzgeç uygulanmıştır. 80 sn'lik pencereler seçilerek %5 cosinüs taper uygulanmıştır. Her bir pencere için Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak her bir bileşene ait genlik spektrumları elde

edilmiştir. Elde edilen spektrumlara ise band genişliği  $b=40$  seçilerek Konno-Ohmachi [16] yuvarlatması uygulanmıştır. Sonuç olarak Yatay bileşen genlik spektrumların düşey bileşen genlik spektrumlarına oranlanması ile H/V spektral oranları elde edilmiştir. Elde edilen H/V spektral oran grafiklerinde maksimum genliğe karşılık gelen frekans değeri baskın frekans olarak belirlenmiştir. Elde edilen baskın frekans değerleri A-A' ve B-B' profilleri için Şekil 5'te verilmiştir.

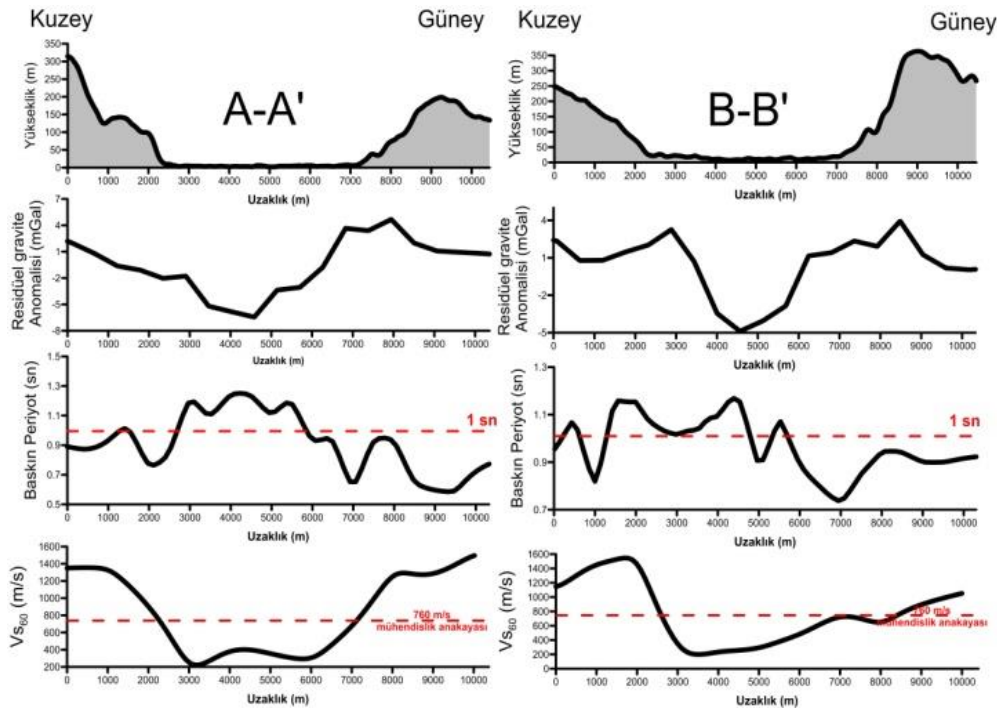
#### 4.2 Mikrogravite yöntemi

Temeli yoğunluk farkından kaynaklanan yer çekimi ivmesinin düşey bileşenin ölçülmesine dayanan mikrogravite yöntemi, kabuk modelleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmakla birlikte [21-22] anakaya-zemin ara yüzey topoğrafyasının araştırılması ve zemin modellerinin oluşturulmasında da son yıllarda yüzey dalgası yöntemleriyle birlikte kullanılmaktadır [5-6-21-22-23-24-25]

Bu çalışma kapsamında Scintrex CG-5 gravite cihazı kullanılarak yaklaşık kuzey-güney yönlü A-A' ve B-B' 10 km'lik profiller boyunca 500 m örnekleme aralığı ile gravite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm planlaması dahilinde ana baz istasyonu olarak Dokuz Eylül Üniversitesi Kampüsü içinde mutlak gravite değeri belirlenmiş olan sabit istasyon kullanılmıştır. Tüm ölçümler bu istasyona bağlanarak sonlandırılmıştır. Toplamda 7 profil ölçüm alınmıştır. Çalışılan saha genelinde tilt açısı değerlerinin doğru bir şekilde elde edilebilmesi, standart sapma değerlerinin ve hata miktarının düşük olmasını sağlamak amacıyla ölçümler minimum 60 sn süreli 5-15

tekrarlı okuma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veri seti ilgili düzeltmeler yapılarak (Enlem, Yükseklik, , terrain) çalışma alanına ait Bouguer gravite değerleri elde edilmiştir.

A-A' ve B-B' profillerinde baskın periyot, Vs60 Yerel gravite anomali değerleri ile yükseklik değerleri karşılaştırılmıştır. Kesitlerin orta kısımlarında körfez kıyısına karşılık gelen yerlerde baskın periyot değerleri topoğrafyanın azalmasıyla beklendiği gibi artmıştır. Bu kısımlarda artan alüvyon kalınlığı nedeniyle yeraltı topoğrafyasını takip eden yerel gravite değerlerinde düşük değerler dikkat çekmektedir. Körfezden kuzey ve güney yönüne gidildikçe topoğrafya ani bir şekilde artmakta, bununla uyumlu olarak periyot değerleri azalmakta olup, gravite değerleri de artmaktadır. Vs60 değerleri incelendiğinde ise Bornova ovasında 760 m/s'den daha düşük hızlar elde edilmiştir. Aynı bölgelerde baskın periyot değerlerinin 1 sn'nin üzerinde olması birbirini destekleyen bir durumdur. Dolayısıyla her iki profilde karşılaştırılan bu dört değer her birini ile son derece uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 5).



**Şekil 5.** A-A' ve B-B' profillerinde yerel gravite anomali, Vs60, baskın periyot ve topoğrafya değerlerinin karşılaştırılması

### 4.3 2-Boyutlu zemin-anakaya modellerinin oluşturulması

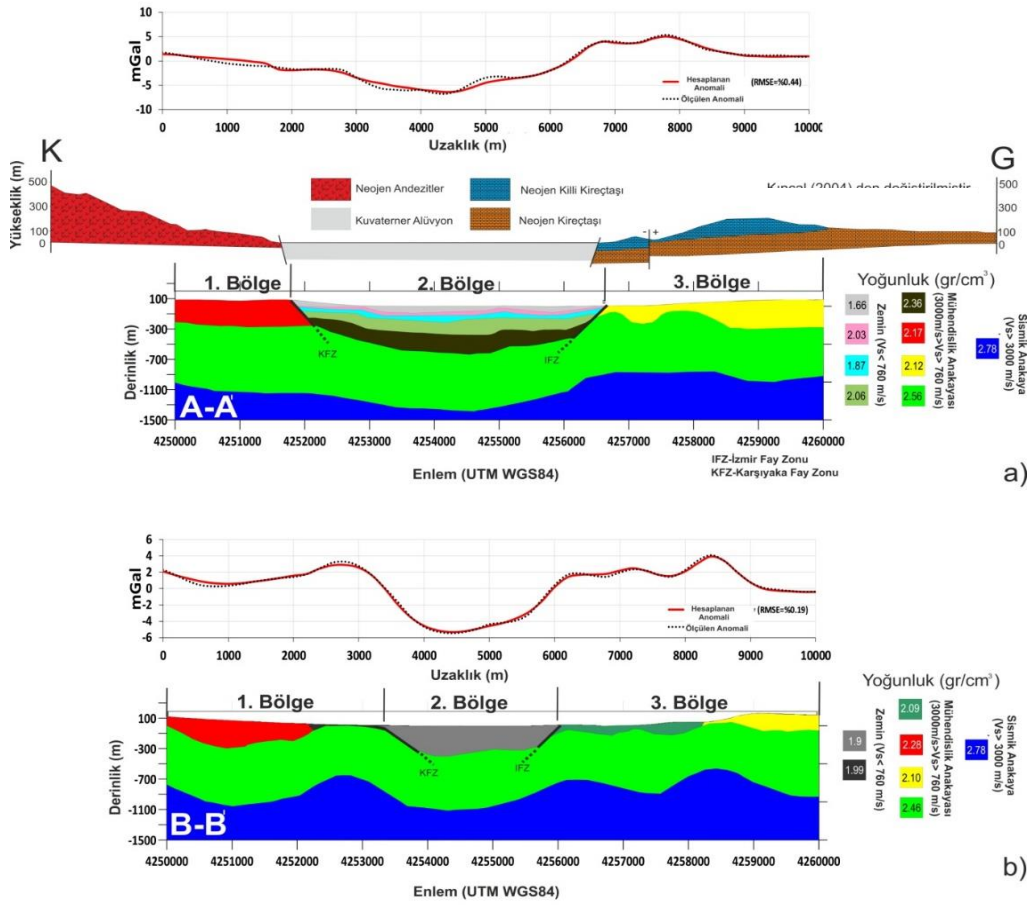
A-A' ve B-B' profilleri üzerindeki yerel gravite anomalisinden 2B'lu zemin-anakaya modelleri oluşturmak için öncelikle modellemede kullanılacak yoğunluk değerleri S-Hızı değerlerinden yararlanılarak, Tablo 1'de verilen bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan yoğunluk değerleri kullanılarak [26] yaklaşımı ile zemin-anakaya modelleri elde edilmiştir (Şekil 6). zemin-anakaya modellerinde A-A' profili için modellemede

kullanılan değerler Tablo 2'de verilmiştir. Modellemede toplam 9 tabaka kullanılmıştır. Bunların dört tanesi zemin özelliği gösteren tabakalar ( $V_s < 760$  m/s), dört tanesi mühendislik anakayasası özelliği gösteren tabakalar ( $760$  m/s  $< V_s < 3000$  m/s), son tabaka ise kayma dalga hızı  $3000$  m/s değerine sahip olan sismik anakaya tabakasıdır. Bu tabakaların modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen fiziksel parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu tabakaların olası jeolojik içerikleri, çalışma alanının jeolojisi derin sondajlar yardımıyla belirlenmiştir.

**Tablo 2.** A-A' profilinde 2B'lu zemin-anakaya modeli parametreleri

Tabakalar	Ortalama $V_s$ (m/s)	Kalınlık değişimi (m)	Ortalama Yoğunluk ( $gr/cm^3$ )	Olası jeolojik içerik
Zemin-1	200	15-120	1,66	Kil, siltli kil (yaygın olarak)
Zemin-2	600	30-110	2,03	Kil, kumlu çakıl (yaygın olarak)
Zemin-3	400	40-100	1,87	Kil, çakıllı kum (yaygın olarak)
Zemin-4	650	60-150	2,06	Killi çakıl, kil-kiltaşı
Mühendislik anakayasası-1	1200	100-300	2,36	Bornova Melanjı ??
Mühendislik anakayasası-2	2000	600-850	2,56	Bornova Melanjı ??
Mühendislik anakayasası-3	860	300-400	2,17	Neojen Andezitler
Mühendislik anakayasası-4	770	100-350	2,12	Neojen Kireçtaşları
Sismik anakaya	>3000	-	2,78	Menderes Masifi ??





Şekil 6. a) A-A' profili boyunca elde edilen 2B'li zemin-ankaya modeli ve jeolojik kesit (Kıncal [12]) b) B-B' profili boyunca elde edilen 2B'li zemin-ankaya modeli

Tablo 3. Vs-Vp ile yoğunluk arasındaki ilişkiler (P dalga hızı;  $V_p=V_s*1.74$  denklemi ile hesaplanmıştır.)

Referans	Formül	Malzeme
Destici [27]	$\rho=0.6*(V_s^{0.2})$	zemin-ankaya
Keçeli [28]	$\rho=0.44*(V_s^{0.25})$	Teorik
Komazawa vd[29]	$\rho=0.7904*(V_s^{0.138})$	?
Uyanık [30]	$\rho=0.4*(V_p^{0.22})$	zemin-ankaya
Uyanık ve Çathoğlu [31]	$\rho=0.7*(V_s*V_p)^{0.08}$	zemin-ankaya

### 5. Sonuçlar ve Öneriler

Yüzey dalgası yöntemleri ve mikrogravite yöntemi kullanılarak S dalga hızı ve yoğunluk değerlerine göre A-A' ve B-B' kesitleri boyunca

zemin-ankaya modelleri 2 boyutlu olarak elde edilmiştir. Körfeze yakın kesimlerde akarsu ve dere yataklarının etkisi alüvyon birikimi nedeni ile zemin kalınlığı 400 m'ye kadar ulaşmaktadır. Bu durum bu alanlarda yapılmış olan ortalama 240 m derinlikli derin sondajlar ile de desteklenmektedir. Yanal ve düşey yönde gözlenen Jeolojik özellikler ile Vs ve yoğunluk ( $gr/cm^3$ ) değerlerindeki değişimler temel alınarak 2-B'li zemin-ankaya modellerinde 3 bölge tanımlanmıştır. Bu bölgeler; 1.bölge, 2.bölge ve 3.bölge olarak isimlendirilmiştir (Şekil 6).

A-A' profilinde, 1.bölgede, sismik anakayaya kadar Vs hızı 760 m/s'den büyük olan 2 farklı tabaka mühendislik anakayasası olarak belirlenmiştir. Bu bölgede sismik ankaya derinliği yaklaşık olarak 1000 m'dir. En üste

ortalama Vs değeri 860 m/s olan ve ortalama yoğunluğu 2,17 gr/cm<sup>3</sup> olan bir tabaka bulunmaktadır. Onun altında ortalama Vs değeri 2000 m/s olan ve ortalama yoğunluğu 2,56 gr/cm<sup>3</sup> olan bir tabaka yer almaktadır. En altta ise Vs değeri 3000 m/s'den büyük ve ortalama yoğunluğu 2,78 gr/cm<sup>3</sup> olan sismik anakaya tabakası bulunmaktadır. Bölgenin jeolojisi ve önceki çalışmalar dikkate alındığında; en üstteki birim yüzey jeolojik kesit bilindiğinden dolayı neojen andezit, onun altındaki birim olasılıkla Bornova karmaşığı ve en alttaki birim ise olasılıkla menderes masifidir. 2. bölgede ise Vs değeri 760 m/s'den düşük ve toplam zemin kalınlığı yaklaşık 300 m olan 4 farklı tabaka saptanmıştır. Bu tabakaların yoğunlukları 1,66 ile 2,06 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Ortalama Vs değerleri ise 200-650 m/s arasındadır. Bu birimlerin altında sismik anakayaya kadar, Vs değeri 760 m/s'den büyük iki farklı tabaka mevcuttur. Sismik anakaya derinliği bu bölgede yaklaşık 1300 m'dir. Bölgedeki mevcut derin sondajlar yardımıyla Vs <760 m/s olan 4 zemin tabakasının jeolojik içeriği yaygın olarak Kil, siltli kil, kumlu çakıl, çakıllı kum, kil-kiltaş birimlerinden oluştuğu görülmektedir. Mühendislik anakayasını belirleyen iki tabaka ise Bornova karmaşığı birimidir. Bu tabakaların ilki Bornova Karmaşığı biriminin farklı etkiler altında fiziksel parametrelerinin (Vs, yoğunluk) değişmiş olabileceği öngörülmüştür. 3. bölgede ise 1. Bölgeye benzer şekilde sismik anakayaya kadar Vs hızı 760 m/s'den büyük olan 2 farklı tabaka mühendislik anakayasını belirlemiştir. Bu bölgede sismik anakaya derinliği yaklaşık olarak 1000 m'dir. En üste ortalama Vs değeri 770 m/s olan ve ortalama yoğunluğu 2,12 gr/cm<sup>3</sup> olan bir tabaka bulunmaktadır. Onun altında ortalama Vs değeri 2000 m/s olan ve ortalama yoğunluğu 2,56 gr/cm<sup>3</sup> olan bir tabaka yer almaktadır. En altta ise Vs değeri 3000 m/s'den büyük ve ortalama yoğunluğu 2,78 olan sismik anakaya tabakası bulunmaktadır. Bölgenin jeolojisi ve önceki çalışmalar dikkate alındığında; en üstteki birim yüzey jeolojik kesit bilindiğinden dolayı neojen kireçtaşları, onun altındaki birim olasılıkla Bornova karmaşığı ve en alttaki birim ise olasılıkla menderes masifidir.

B-B' kesiti incelendiğinde ise; 1.bölgede, A-A' kesitindeki 1. bölgeye benzer olarak sismik anakayaya kadar Vs hızı 760 m/s'den büyük olan 2 farklı tabaka mühendislik anakayasını belirlemiştir. Bu bölgede sismik anakaya derinliği yaklaşık olarak 1100 m'dir. En üste

ortalama Vs değeri 860 m/s olan ve ortalama yoğunluğu 2,17 gr/cm<sup>3</sup> olan ve jeolojik olarak neojen andezitleri olarak isimlendirilen bu tabakanın ortalama derinliği 300 m'dir. Andezitlerin sağ tarafında ise kuvaterner yaşlı alüvyal fan birikimleri vardır. Bu tabakaların altında olasılıkla jeolojik birimi Bornova karmaşığı olan tabaka A-A''ne benzer şekilde olası jeolojik birimi mederes masifi olan sismik anakayaya kadar devam etmektedir. 2. bölge incelendiğinde Vs değeri 760 m/s'den düşük toplam zemin kalınlığı yaklaşık 300 m olan zemin tabakası görülmektedir. Bu birimlerin altında ise sismik anakayaya kadar Vs değeri 760 m/s'den büyük iki farklı tabaka vardır. Sismik anakaya derinliği bu bölgede yaklaşık 1200 m'dir. 3.bölgede ise sismik anakayaya kadar Vs değeri 760 m/s'den büyük olan 3 farklı tabaka mühendislik anakayasını belirlemiştir. En altta ise Vs değeri 3000 m/s'den büyük ve ortalama yoğunluğu 2,78 gr/cm<sup>3</sup> olan sismik anakaya tabakası bulunmaktadır.

Şekil 4'te verilen S1 ve S2 noktalarına ait sondaj loglarında yer yer gözlenen kil taşları S-dalga hızlarında artışa neden olmuştur. Bu durum mühendislik ana kayasına ulaşıldığı izlenimini vermektedir. Bununla birlikte bu hız artışlarının devamlılığı yoktur. Bu durumda mühendislik ana kayası birimi tespit edilirken S-dalga hızının devamlılığında incelenmelidir. Çalışma kapsamında bu durumun incelenmesi mikrogravite ve dizilim yöntemi ölçülerinin ortak yorumlanması sonucunda mümkün olmuştur. (Şekil 4). Bununla beraber S1 ve S2 noktaları için sondaj logları incelendiğinde ağırlıklı olarak killi birimler gözlenmiştir. Killi birimlerin çakıl/su vb. içeriklerinin farklılığından dolayı farklı S-dalga hızlarına sahip olduğu ancak bu hızların mühendislik ana kayası özelliği gösterecek kadar yüksek olmadığı açıkça görülmektedir.

Tablo-2'deki yoğunluk ve hız bilgileri kullanılarak modellenen A-A' kesitinin doğusunda bulunan B-B' kesitinde, tabaka kalınlıklarının yatay ve düşey yönde değiştiği görülmektedir. Yatay yönde devamlılık gösteren iki tabaka vardır. Bunlardan birincisi olası jeolojik birimi menderes masifi olan sismik anakaya; ikincisi ise ortalama Vs değeri 2000 m/s olan ve ortalama yoğunluğu 2,56 gr/cm<sup>3</sup> olan olası jeolojik birimi Bornova karmaşığı birimidir.

Elde edilen 2B'lu modeller ile baskın periyot değerleri karşılaştırıldığında; zemin kalınlığının

300-400 m'lere ulaştığı 2. bölgelerde periyot değerlerinin 1 sn'nin üzerinde olduğu görülmektedir. Yine bu bölgelerde MASW, ReMi ve dizilim yöntemiyle elde edilen sığ ve derin Vs derinlik kesitleri ile baskın periyot değerleri karşılaştırıldığında yüksek periyot değerlerinin ( $t > 1$  sn) ve  $V_s < 760$  m/s değerlerinin Bornova ovasında elde edildiği görülmüştür. Bornova ovasından kuzey ve güney yönüne doğru gidildikçe periyot değerlerindeki azalış ve Vs değerlerindeki artış dikkat çekmektedir. Andezitler, kireçtaşları ve Bornova melanjı üzerinde gerçekleştirilen tek istasyon mikrotremor yönteminin sonuçlarına göre baskın periyot değerlerinin 1 sn'nin altında olduğu görülmektedir.

Çalışma alanını etkileyecek olası bir depremde özellikle 2. bölgede odaklanma problemlerinin ve havza kenarından oluşan yüzey dalgalarının etkisinin görülme olasılığı bulunmaktadır. Ayrıca, 2. bölgede saptanan anakaya ve zemin arasında sismik empedanslar olmasından dolayı deprem dalgaları rezonans etkisi yaratabilir. Bu durumun 2. bölge üzerinde inşaa edilecek mühendislik yapılarının dinamik yük hesaplamalarında dikkate alınması önerilir. Bu tip havza etkisi gözlenen alanlarda yapılacak mühendislik hesaplamalarının 1 boyutta değil 2 ve 3 boyutta yapılması gerekliliği bu çalışmada da görüldüğü üzere büyük önem taşımaktadır.

Bornova ovasında 400 m değerlerine kadar zemin kalınlığı ve hakim periyot değerleri ortalama olarak 1-1,5 sn civarında olması Türk Deprem yönetmeliğinde (TDY) [32] tanımlanan zemin sınıflamalarına uymadığı gibi birçok zemin sınıflamasına da uymamaktadır. Zemin kalınlığının bu denli fazla olduğu yerlerde zemin sınıflaması için Vs30 tanımının kullanılmaması gerekir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre TDY [32]'de kullanılan tasarım spektrumları yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır. Yüksek katlı yapıların hızla inşa edildiği çalışma alanı için elde edilen 2B'lu zemin modelleri dikkate alınarak yapı yapılacak bölge için özel tasarım spektrumlarının oluşturulması önerilmektedir.

Zemin deformasyon analizlerinin yapılabilmesi için mühendislik anakayasası üzerinde elde edilmiş olan deprem kaydına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kayıt üç farklı yolla elde edilebilir. Bunlar sırasıyla; 1- Mühendislik anakayasası üzerinde bulunan deprem kayıt cihazlarıyla; 2- Zemin üzerinde kaydedilen depremi mühendislik anakayasasına kadar elde edilen zemin profillerinden hesaplanan zemin

transfer fonksiyonu yardımıyla ; 3- Senaryo depremlerinin kullanılmasıyla. Zemin transfer fonksiyonlarının doğru ve güvenilir bir biçimde hesaplanabilmesi için Vs-derinlik kesitlerinin en azından mühendislik anakayasasına kadar bilinmesi gerekir. Çalışma alanı için hazırlanan iki profil boyunca zemin transfer fonksiyonlarının hesaplanması için kullanılabilir modeller üretilmiştir.

AA' ve BB' kesitlerinde Mühendislik Anakayasası-1 olarak isimlendirilen birim her ne kadar yüksek yoğunluk ve hız değerine sahip olsada, bu birimin bu çalışmada elde edilen verilere göre farklı jeolojik içeriklere sahip Bornova Karmaşığı olup olmadığı ayrı bir tartışma konusu olmalıdır. Çünkü Bornova Karmaşığı biriminin profiller boyunca (yaklaşık 10 km) sürekliliği hız ve yoğunluk değerine bağlı olarak bir bütün olarak modellemede ortaya konulmuştur. Fakat Mühendislik Anakayasası-1 biriminin havza boyunca sürekliliğinin sınırlandığı modellerde gözlenmekte ve buranın sediman istifinin temelini oluşturan farklı bir tabakanın da olabileceği düşünülebilir. Özellikle profillerdeki ikinci bölgede yapılacak derin sondajlar bu soru işaretlerinin aydınlatılması için oldukça önemli olacaktır.

#### Teşekkür

Bu çalışma Eren PAMUK'un doktora tez çalışmalarının bir kısmını oluşturmaktadır. Ayrıca, bu çalışma DEÜ BAP 2015.KB.FEN.032 no'lu proje ile desteklenmiştir.

#### Kaynakça

- [1] Ambraseys, N. N., Simpson, K. U., Bommer, J. J., (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 25 (4), 371-400.
- [2] Nath, S. K. (2008). Seismic microzonation framework-principles & applications. In *Proceedings of Workshop on Microzonation*, Indian Institute of Science, Bangalore (sf. 9-35).
- [3] Morikawa, N., Senna, S., Hayakawa, Y., Fujiwara, H., (2008). Application and verification of the 'Recipe' to strong-motion evaluation for the 2005 west off Fukuoka earthquake (Mw= 6.6). In *Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng.*, paper (No. 02-0039).
- [4] Anbazhagan, P., Sitharam, T.G., (2009). Spatial variability of the depth of weathered and engineering bedrock using multichannel analysis of surface wave method. *Pure and Applied Geophysics* 166 (3), 409-428.
- [5] Akgün, M., Gönenç, T., Pamukçu, O., Özyalın, Ş., & Özdağ, Ö. C. (2013a). Mühendislik Ana Kayasının Belirlenmesine Yönelik Jeofizik Yöntemlerin Bütünleşik Yorumu: İzmir Yeni Kent Merkezi Uygulamaları. *Jeofizik Dergisi*, 1304-12.

- [6] Pamuk, E., Akgün, M., Özdağ, Ö. C., & Gönenc, T. (2017). 2D Soil and Engineering-Seismic Bedrock Modeling of Eastern Part of İzmir Inner Bay/Turkey. *Journal of Applied Geophysics*.137,104-117
- [7] Yalçinkaya, E. (2010). Zemin Neden Bu Kadar Önemli. *Jeofizik Bülteni*.
- [8] Uzel, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., (2012). Neotectonic evolution of an actively growing superimposed basin in western Anatolia: The inner bay of Izmir, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences* 21 (4), 439-471.
- [9] Özbek, D. (1981). Altındağ Köyü (İzmir) çevresinin jeoloji ve Altındağ taş ocaklarının mühendislik jeolojisi, Bitirme Ödevi, Ege Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- [10] Özer, S., İrtem, O. (1982). Işıklar-Altındağ (Bornova-İzmir) alanı Üst Kretase kireçtaşlarının jeolojik konumu, stratigrafisi ve fasiyes özellikleri, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 25, 41-47.
- [11] Erdoğan, B. (1990). İzmir-Ankara Zonu'nun İzmir ile Seferihisar arasındaki bölgede stratigrafik özellikleri ve tektonik evrimi. *TPJP Bülteni*. c. 2/1-Aralık 1990. 1-20.
- [12] Kınca, C. (2004). İzmir İç Körfezi çevresinde yer alan birimlerin coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- [13] Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- [14] 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, 347-364.
- [15] Aki, K., (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute* 35, 415-456.
- [16] Okada, H., (2003). The Microtremor Survey Method. *Geophysical Monograph*, No. 12, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa
- [17] Nakamura, Y., (1989). A method for dynamic characteristics estimation of sub-surface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute* 30, 25-33.
- [18] Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares, *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164-168.
- [19] Marquardt, D. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *SIAM Journal*, 11, 431-441.
- [20] Karabulut, S. (2012). İstanbul kenti için yer tepkisi ve 3 boyutlu (3-B) kayma dalga hız (Vs) yapısının belirlenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- [21] Pamukçu, O., Gönenc, T., Uyanık, O., Sözbilir, H., & Çakmak, O. (2014). A microgravity model for the city of İzmir (Western Anatolia) and its tectonic implementations. *Acta Geophysica*, 62(4), 849-871.
- [22] Pamukçu, O., Gönenc, T., Çırmık, A. Y., Demirbaş, Ş., & Tosun, S. (2015). Vertical And Horizontal Analysis Of Crustal Structure In Eastern Anatolia Region. *Bulletin Of The Mineral Research and Exploration*, (151).
- [23] Xu, C. and Butt, S.D., (2006). Evaluation of MASW techniques to image steeply dipping cavities in laterally inhomogeneous terrain. *Journal of Applied Geophysics* 59 (2), 106-116
- [24] Crice, D., (2005). MASW, the wave of future editorial. *Journal of Engineering Geophysics* 10 (2) 77-79.
- [25] Akgün, M., Gönenc, T., Tunçel, A., & Pamukçu, O. (2013b). A multi-approach geophysical estimation of soil dynamic properties in settlements: a case study in Güzelbahçe-İzmir (Western Anatolia). *Journal of Geophysics and Engineering*, 10(4), 045001.
- [26] Talwani, M., Worzel, J. L., Landisman, M., (1959). Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research* 64 (1), 49-59.
- [27] Destici, C. (2001). Sismik dalga hızları ile dinamik ve statik parametrelerin ilişkilendirilmesi, SDÜ MMF Jeofizik Müh. Böl. Lisans Tezi, Isparta (yayınlanmamıştır).
- [28] Keçeli, D. A. (2009). Uygulamalı Jeofizik. *TMMOB JFMO Eğitim Yayınları*, (9).
- [29] Komazawa, M., Morikawa, H., Nakamura, K., Akamatsu, J., Nishimura, K., Sawada, S., Erken, A., Onalp, A., (2002). Bedrock structure in Adapazari, Turkey—a possible cause of severe damage by the 1999 Kocaeli earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22 (9), 829-836.
- [30] Uyanık, O. (2002). Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi, Doktora Tezi, DEU. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 200s.
- [31] Uyanık, O., & Çatlıoğlu, B. (2015). Sismik Hızlardan Yoğunluğun Belirlenmesi. *Jeofizik dergisi*. 17, 3-15
- [32] Türk Deprem Yönetmeliği, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi.