

---

*Araştırma Makalesi / Research Article*

---

## **İzmir Körfezi Doğusunun Sığ Kayma Dalgası Hız Yapısının 2B'lu Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYD) Yöntemiyle Araştırılması**

Eren PAMUK<sup>1\*</sup>, Mustafa AKGÜN<sup>1</sup>, Özkan Cevdet ÖZDAĞ<sup>2</sup>, Eren ŞAHİN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İZMİR,

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Ege Bölgesi Uygulama ve Araştırma Merkezi, İZMİR,

<sup>3</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İZMİR

---

### **Özet**

Deprem-zemin-yapı ortak davranışı konusunda günümüze değin yapılan çalışmalardan elde edilen ortak sonuç, deprem sırasında mühendislik yapısında meydana gelebilecek zararlar hem zeminin dinamik özellikleriyle hem de zemin tepki spektrumları ile ilişkili olduğudur. Bu durumda, deprem sırasında oluşabilecek olası zararları kontrol altına alabilmek için zeminlerin çalışma alanına özgün dinamik deprem yükü altında yapacağı davranışların özgün olarak doğru ve güvenilir bir şekilde tanımlanması gerekir. Bunun için, zemin-anakaya tanımlarının S dalga hızı ( $V_s$ ) değerlerindeki değişimlere göre yapılması büyük önem taşır. Bu kavramlardan yola çıkarak İzmir Körfezi doğusunda; zeminin deprem sırasındaki davranışını belirlemede önemli rol oynayan ve geoteknik deprem analizinde önemli bir giriş parametresi olan  $V_s$  bilgisi 2B'lu olarak yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (ÇKYD) yöntemiyle elde edilmiştir. Toplam 15 profil boyunca yapılan ÇKYD profil ölçümleri sonucunda bazı noktalarda zeminin 30 metreden daha kalın olduğu ve tüm alanda zemin içinde yanal ve düşey yönde  $V_s$  değerlerinde ani değişimler olduğu saptanmıştır. Diğer bir deyişle, zemini oluşturan tabakalar yatay, yarı sonsuz, homojen ve izotrop yapıda değildir

**Anahtar Kelimeler** ÇKYD Yöntemi, Kayma dalgası hızı ( $V_s$ ), İzmir Körfezi.

---

## **Investigation of Shallow Shear Wave Velocity Structure of East of Izmir Bay using 2D Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) method**

### **Abstract**

The common results obtained from the studies of earthquake-soil-structure common behavior until today show that the possible damages during an earthquake on the structures are related with the dynamic features of soil and soil response spectrums. In this case, behaviour of soil under the dynamic earthquake loads should be determined accurately and reliably in order to control possible damage that may occur during an earthquake. For this purpose, definition of soil-bedrock according to changing of S-wave velocity ( $V_s$ ) is very important. In line with these concepts,  $V_s$  which is a very important parameter that defines the behaviour of the soil during an earthquake and it is one of the initially used data in geotechnical analysis were obtained from 2D multichannel analysis of surface waves (MASW) method in east of Izmir Bay. As a result of total 15 profiles of MASW measurements, it was determined that soil depth is thicker than 30 meters at some profiles and  $V_s$  values suddenly change in horizontal and vertical directions at all profiles. In other words, the layers forming the soil are not horizontal, half space, homogeneous and isotropic structure.

**Keywords:** MASW method, Shear wave velocity, İzmir Bay

---

---

\*Sorumlu yazar: [eren.pamuk@deu.edu.tr](mailto:eren.pamuk@deu.edu.tr)

Geliş Tarihi: 11.08.2016, Kabul Tarihi: 14.10.2016

## 1. Giriş

Dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer alan Türkiye'nin, İzmir ve çevresinin de içerisinde bulunduğu %42'lik kısmı birinci derece deprem kuşağı üzerindedir [1]. İzmir ve çevresi Batı Anadolu'daki fay zonlarının etkisiyle, tarihsel ve aletsel dönemde birçok deprem etkisinde kalmıştır. Bu depremlerden özellikle Torbalı merkezli (1928) ve merkezi Dikili'ye yakın (1939) olanlar yüksek oranda can ve mal kaybına yol açmıştır [1].

Bir bölgede deprem-zemin ortak davranışı tanımlanırken zemin-anakaya modelleri temel alınmaktadır. Ayrıca anakaya olarak tanımlanan ortam kendi içinde mühendislik ve sismik anakaya olarak sınıflandırılmaktadır. Bu tanımlamalarda kayma dalga hızı (Vs) değerleri temel alınır. Vs değerinin 760 m/s den küçük olduğu alanlar zemin, büyük olduğu alanlarda anakaya olarak tanımlanır. Ayrıca anakaya içinde bulunan ve Vs değerinin 3000 m/s ile 760 m/s arasında olan kesimler mühendislik anakayasını oluşturmaktadır [2,3,4]. Bu tanımlara göre zemin dinamik analizlerinin yapılması için zemin-mühendislik anakayasası modellerinin hazırlanması; zemin tepki spektrumunu tanımlamak için de zemin ve mühendislik-sismik anakaya modellerinin hazırlanması gerekir. Zemin dinamik analizlerinde mühendislik anakayasası olarak adlandırılan bölgede deformasyonun elastik seviyelerde olduğu kabul edilir [5,6]. Zemin-anakaya modellerini özgün olarak hazırlanması çalışmalarında da, gerekli araştırma derinliğine göre seçilecek yerinde yöntemler (yüzey ve kuyu içi sismik yöntemler) kullanılır [3].

ÇKYD yöntemi 1B ve 2B'lu olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kansas (ABD) 'da yapılan çalışmada ÇKYD yöntemi kullanılarak mühendislik anakayasası dağılım haritası oluşturulmuştur [7]. Mohamed vd. [8] yapmış oldukları çalışmada 2B'lu ÇKYD yöntemiyle beraber farklı jeofizik yöntemler de kullanarak 2B'lu Vs-derinlik kesitleri oluşturmuş, mühendislik anakayasası sınırlarını belirlemiştir. Rehman vd. [9] Suudi Arabistan'daki Bahrah alanında ÇKYD yöntemini 2B'lu olarak uygulayarak mühendislik anakayasası derinliklerini haritalamışlardır. Stephenson vd. [10] ise Virjinya (ABD) 'de yapmış oldukları çalışmada ÇKYD ve ReMi yöntemlerini birlikte kullanarak anakaya derinliklerini belirlemişlerdir. Özdağ vd. [11] Karşıyaka (İzmir) için yerinde elastik tasarım spektrum hesaplamaları için gerekli olan zemin-anakaya modellerini yüzey dalgası yöntemlerini oluşturmuşlardır. Akgün vd. [12] Menemen ovası içerisinde yapmış oldukları çalışmalar ile zemin-anakaya modellerini çalışma alanına özgün olarak tanımlamışlardır. Pamuk vd. [13] Vs değerlerini kullanarak Bornova ilçesinde (İzmir) zemin kalınlığını belirlemek için ÇKYD yöntemini kullanmışlardır. Pamuk [14] Buca (İzmir)'de 2B'lu ÇKYD uygulaması ile Vs hızlarının yatay ve düşey değişimlerini irdelemiştir. Pamuk vd. [15] yapmış oldukları çalışmada farklı seviyeler için Vs değerlerini haritalayarak mühendislik anakayasası-zemin ayırımını tanımlamaya çalışmışlardır.

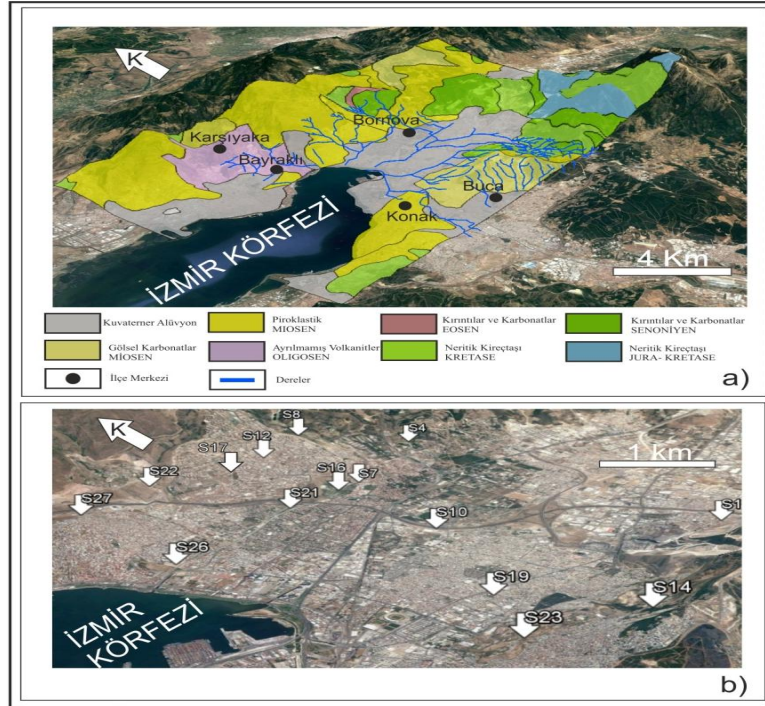
Bu çalışma kapsamında, Şekil 1'de gösterilen İzmir Körfezi doğusunda yer alan zeminlerin dinamik etkiler (deprem hareketi) altındaki davranışını kontrol edecek olan Vs değerinin yanal ve düşey değişimleri araştırılırken yerinde yapılan yöntem olan ÇKYD yöntemi kullanılmıştır. Çalışmalarda, ÇKYD yöntemi, 2B'lu ve ortalama 30 m araştırma derinliği temel alınarak uygulanmıştır. Bu amaçla çalışma alanının koşullarına göre seçilen 15 profilde ÇKYD profil ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2b). Sonraki aşamada, profil boyunca elde edilen yüzey dalgası verisi kullanılarak çeşitli veri işlem aşamalarından sonra her bir profil için 2B'lu Vs-derinlik kesitleri elde edilmiştir. Elde edilen Vs derinlik kesitleri yardımıyla uzunlukları 57.5 m - 69 m arasında değişen profiller için zemin-mühendislik anakayasası modelleri oluşturulmuştur.



Şekil 1. Çalışma alanı ve çevresinin konumu ve topoğrafik durumu

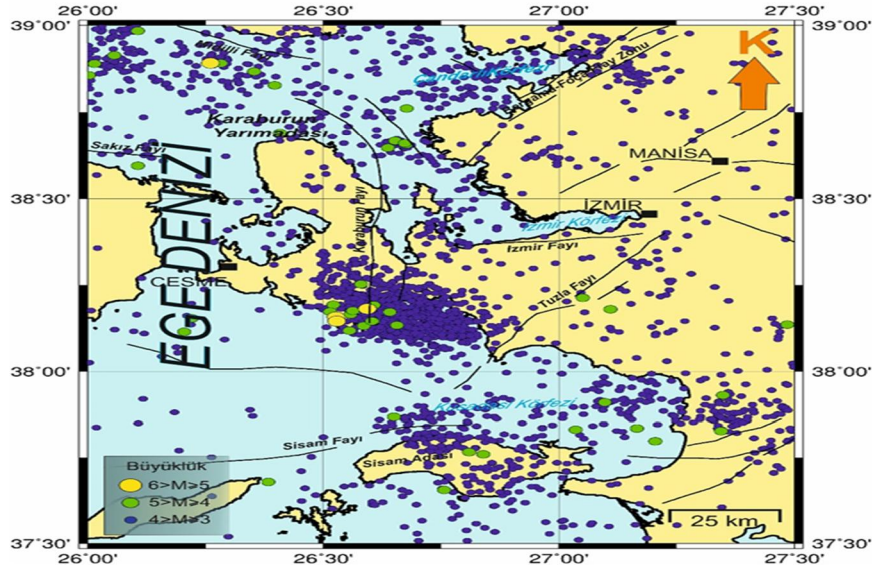
## 2. Çalışma Alanı ve Çevresinin Jeolojisi, Tektoniği ve Depremselliği

İzmir ve çevresi için jeolojik olarak anakaya, Üst Kretase yaşlı Bornova Melanjı (karmaşığı) olarak tanımlanır [16]. Bornova karmaşığının matrisi içinde daha yaşlı kireçtaşı mega-olistolitleri gelişigüzel yer almaktadır. Altındağ ve çevresinde yer alan kireçtaşları, Işıklar kireçtaşı olarak isimlendirilir [17]. Bornova karmaşığı, kumtaşı/şeyl-kalkerli şeyl ardalanmasından oluşmuştur. Bornova karmaşığı içerisinde kireçtaşı, diyabaz blokları ve çakıltası mercekleri yer almaktadır [8]. Bölgede Neojen yaşlı gösel tortullar Bornova karmaşığının üst kısmında açısız uyumsuz olarak yer alır. Sırasıyla yüzeye doğru Yamanlar volkanitleri ve bunun üzerinde de Kuvaterner yaşlı alüvyonlar uyumsuz şekilde yer almaktadır [18,19] (Şekil 2a). 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. Elde edilen Vs değerleri yorumlanırken jeolojik olarak tanımlanmış stratigrafi dikkate alınmıştır.



Şekil 2. a) Çalışma alanı ve çevresinin Jeolojisi ([20]'dan değiştirilmiştir) b) 2B'lu ÇKYD ölçü noktaları

İzmir ve çevresinde yaklaşık 50-60 km yarıçaplı bir alanda deprem üretebilecek birçok fay vardır. Manisa Fayı, İzmir Fayı, Tuzla Fayı ve Gülbahçe-Karaburun Fayları önemli ölçüde deprem potansiyeline sahip faylardandır [21]. Manisa Fayı Gediz grabeninin kuzeybatı kolunda yer alan normal bir faydır. Turgutlu ile Manisa batısındaki Muradiye arasında yaklaşık 40 km uzunluğunda olan Manisa fayı çalışma alanına yaklaşık 50 km uzaklıktadır. İzmir körfezinin doğusunda bulunan İzmir fayı ise normal fay özelliğinde olup yaklaşık 35 km'dir ve D-B uzanımlıdır. Bu fayın çalışma alanına olan uzaklığı ise yaklaşık 15 km'dir. KD-GB doğrultusu olan üç parçadan oluşan Tuzla Fayı ise İzmir ile Doğanbey Burnu arasında yer alır. Bu fayın Cumalı kaplıcaları ile Ege Denizi arasındaki bölümü 15-16 km uzunluğunda ve sağ yönlü doğrultu atımlı aktif bir faydır [21]. Çalışma alanına uzaklığı ise yaklaşık 20 km'dir. Körfezin Güneybatısında yer alan Gülbahçe-Karaburun Fayı ise doğrultusu K-G, karadaki uzunluğu yaklaşık 15 km olan bir faydır. Ayrıca bu fayın en önemli özelliklerinden birisi Karaburun yarımadası ile İzmir Körfezi'ni ayıran önemli bir yapısal hat olmasıdır. Deniz kısmında ise fayın kuzeyde ve güneyde deniz içerisinde de devam ettiği sanılmakla birlikte çalışma alanına uzaklığı yaklaşık 55 km'dir [21](Şekil 3). Birinci derecede deprem kuşağında yer alan İzmir ili ve çevresi sismisite açısından oldukça aktif bir bölgedir. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi'nin homojen deprem kataloğundan elde edilen 3'den büyük ( $M>3$ ) depremler haritalanmıştır (Şekil 3) [22]. Bu harita incelendiğinde bölgenin son derece aktif olduğu ve son on yılda Richter ölçeğine göre 5'den büyük depremlerin meydana geldiği görülmektedir. Deprem anında zemin-yapı ilişkisinde meydana gelecek zararları kontrol eden parametreler; depremin parametreleri (genlik parametreleri, depremin frekans içeriği ve depremin süresi) ve mühendislik yapısının oturacağı zeminin özellikleridir. Bu nedenle olası bir deprem durumunda meydana gelebilecek hasarların en aza indirgenebilmesi için öncelikle mühendislik yapısının oturacağı zeminin deprem sırasında yapacağı davranışın doğru ve güvenilir bir şekilde tanımlanması gerekir.



Şekil 3. İzmir ve çevresinin tektoniği ve 2005-2015 yılları arasındaki deprem aktivitesi ( $M>3$ )

### 3.ÇKYD Yöntemi

#### 3.1. Yöntem Hakkında Genel Bilgiler

Jeofizik çalışmalarda yerinde yapılan yöntemler olarak kullanılan Yüzeysel dalgası analiz yöntemleriyle (SASW (Yüzeysel Dalgalarının Spektral Analizi), ÇKYD, ReMi (Kırılma-mikrotremor), SPAC (Uzaysal özilişki yöntemi), Rayleigh dalgalarının dispersif özelliğinden yararlanılarak yer altı tabakalarının Vs değerlerinin derinlikle değişimi 1B'lu ve 2B'lu olarak belirlenebilir [23, 24, 25]. Yüzeysel dalgası yöntemleri iki grupta toplanır. Bunlar; Aktif kaynaklı yöntemler (ÇKYD vb.) ve pasif kaynaklı (ReMi,

SPAC vb.) yöntemlerdir. Aktif kaynaklı yöntemler iyi sonuçlar üretmelerine rağmen iyi ve güçlü bir kaynağa ihtiyaç duyarlar. Bu yöntemlerin araştırma derinlikleri kısa boylu dalgalar kullanıldığından dolayı pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemlerine göre daha azdır. Aktif kaynaklı yöntemlerde balyoz, ağırlık düşürme, patlatma gibi kaynaklar kullanılabilir. Özellikle anakayanın derin olduğu yerlerde yerin doğal titreşim kaydını yapan pasif kaynaklı yöntemler tercih edilir [26].

Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi (Spectral Analysis of Surface Waves-SASW) yöntemindeki yetersizliğinin giderilmesi için geliştirilen ve çeşitli yapay kaynakların (balyoz, ağırlık düşürme vb.) kullanıldığı bir yöntem olan ÇKYD yöntemi ile S dalga hızı derinlik değişimleri 2B olarak tanımlanabilir [23]. ÇKYD yönteminde Vs değerlerinin elde edilmesi 3 adımdan oluşmaktadır; ilk olarak arazi aşaması ile yüzey dalgaları kaydedilir; Sonraki adımda aşağıda ayrıntılı olarak açıklanan spektral analiz yöntemleriyle dispersiyon eğrisi elde edilir; Son olarak dispersiyon eğrisinin ters çözümü ile de Vs-derinlik kesitleri elde edilmiş olur. [23] tarafından önerilen çok-kanallı yüzey dalgası analizi hesaplama yöntemini [27] aşağıdaki gibi özetlemiştir;

Zaman-uzaklık (x-t) ortamındaki bir atış topluluğunun gösterimi  $u(x, t)$  şeklinde olan fonksiyona göre Fourier dönüşümü,  $U(x, w)$  'yi elde etmek için  $u(x, t)$  zaman eksenine uygulanabilir:

$$U(x, w) = \int u(x, t)e^{iwt} dt \quad (1)$$

Burada verilen  $U(x, w)$  , iki ayrı terimin çarpımı şeklinde de açıklanabilir:

$$U(x, w) = P(x, w)A(x, w) \quad (2)$$

Burada  $P(x, w)$  ve  $A(x, w)$  ifadeleri, sırasıyla faz ve genlik spektrumlarını tanımlamaktadır.  $U(x, w)$ 'deki her bir frekans bileşeni tam olarak diğer frekanslardan ayırılmaktadır. Ayrıca varış zaman bilgisi, faz spektrumunda  $P(x, w)$  gösterilmektedir. Dalga alanı faz spektrumuna göre, belirli bir zaman farkı ile alıcılara ulaşacaktır. Bunlara ek olarak Genlik spektrumu ( $A(x, w)$ ), soğurulma ve geometrik yayılma gibi özellikler hakkında bilgiler içerirken, Faz spektrumu ( $P(x, w)$ ), dispersiyon özellikleri ile ilgili bilgileri içerir. Bundan dolayı  $U(x, w)$ , aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$U(x, w) = e^{-i\phi x} A(x, w) \quad (3)$$

Burada  $\phi$  ; faz kayması,  $w$ ; radyan cinsinden frekans ve  $c_w$ ; frekansa ( $w$ ) göre faz hızıdır. Dalga sayısı,  $k=w/c_w$  olarak tanımlanırsa  $U(x, w)$ 'ye aşağıdaki integral dönüşümünün uygulanması ile  $V(w, \phi)$  elde edilir:

$$V(w, k) = \int e^{ikx} [U(x, w)/|U(x, w)|] dx = \int e^{-e(\phi-k)x} [A(x, w)/|A(x, w)|] dx \quad (4)$$

(4) denklemindeki integral dönüşümü için öncelikle (3) no'lu denklemindeki dalga alanlarına göre bir faz hızı  $c_w (= w/\phi)$  tanımlanır. Faz düzeltmesi; faz hızına göre hesaplanan ofsete bağımlı olarak uygulandıktan sonra ofset boyunca bir frekansın dalga alanları toplanır.  $U(x, w)/|U(x, w)|$  şeklinde bir düzeltme işlemi ile her bir alıcıdaki dalga alanından soğurulmanın ve geometrik yayılmanın etkileri giderilir. Genliğin etkisi bu işlemle giderilerek faz hızı baskın olarak elde edilir. Her frekans ( $w$ ) için belirli bir aralıkta değişen hızlar kullanılarak elde edilen dalga sayısı faz kaymasına eşit olduğunda,

$$k=\phi=c_w/c_w \quad (5)$$

Elde edilir. Faz hızı  $c_w$  (5) denkleminin sağlanması durumunda hesaplanabilir [27]. Elde edilen faz hızı-frekans (dispersiyon) eğrilerinin ters çözümü ile Vs-derinlik kesitleri elde edilir.

2B'lu ÇKYD tekniğinde derinliğin ve uzaklığın bir fonksiyonu olarak 2B'u Vs dağılımının elde edilmesi hem ucuz maliyetli hem de zaman kazanımı sağlayan bir yoldur [28;29]. Son yıllarda yaygın olarak kullanılan 2B'lu Vs profillerinin temel avantajı homojen olmayan yer içerisindeki materyalin yatay yöndeki değişimin bulunabilmesidir. Bu durum da elde edilen hızların güvenilirliğini artırmaktadır [8;19;30;31;32; 33;34].

Çok kanallı ve çok atışlı yüzey dalgalarının Ortak Orta Nokta (CMP) çapraz korelasyonu (CMPCC) yüksek çözünürlüklü 2B'lu Vs profilleri için doğru faz hızı-frekans eğrilerinin elde edilmesini sağlar [35]. CMP çapraz korelasyon analizi için veri toplama 2B'lu sismik yansıma çalışmasına benzerlik göstermektedir. Sismik yansımadaki Ortak Derinlik Noktası (CDP) analizine benzer görünse de temel farklılık özgün dalga biçiminin çapraz korelasyonların CMP'deki hesaplanmasıdır.

CMP çapraz korelasyon analizi 4 adımdan oluşur [35];

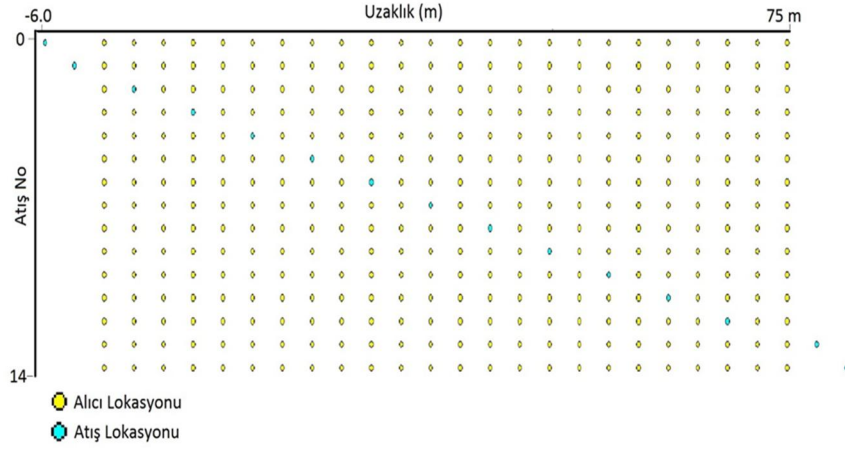
- 1- Çapraz korelasyon her bir atıştaki izlerin her çifti için hesaplanır.
- 2-Ortak orta noktaya sahip korelasyon izleri toplanır ve bu izler zaman ortamında eşit aralıklarla kümelenir. Elde edilen çapraz korelasyon toplamaları atış toplamalarına benzer ve CMP çapraz korelasyon toplamaları olarak adlandırılır.
- 3-Yüzey Dalgalarının faz hızını hesaplamak için CMP çapraz korelasyon toplamalarına çok kanallı analiz uygulanır
- 4-2B'lu S dalga hız profili en küçük kareler yöntemi gibi herhangi bir ters çözüm yöntemiyle elde edilir.

### 3.2. 2B'lu ÇKYD Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi

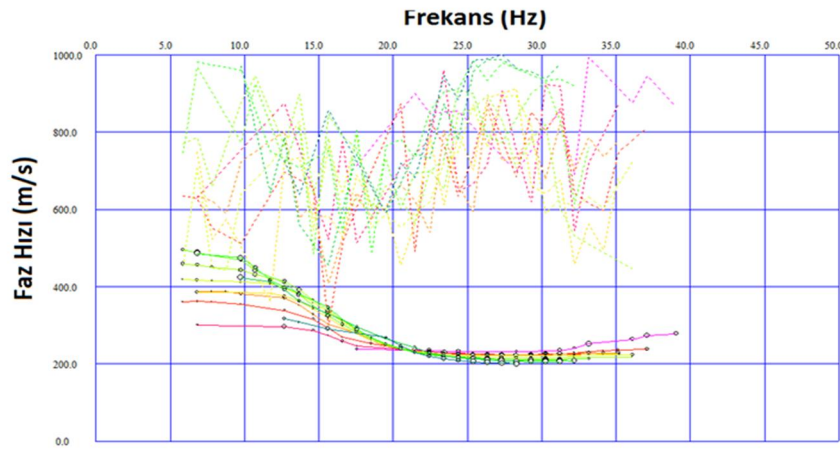
Bu çalışma kapsamında Şekil 2'de yerleri verilen toplam 15 profilde ÇKYD ölçümleri alınmıştır. ÇKYD çalışmalarında, 24 kanallı Geometrics Geode sismik aleti ve 4.5 Hz düşey yönlü düşük frekanslı alıcılar (jeofon) kullanılmıştır. Jeofon aralıkları 2.5 m veya 3 m olarak seçilmiştir. Kaynak olarak balyoz (10 kg) kullanılmıştır. ÇKYD yöntemi arazi uygulamasında her bir jeofonun arasından veya birer jeofon atlayarak veri toplanmıştır (Şekil 4). Kaynağın ilk jeofona olan uzaklığı (ofset) düz ve ters atışlarda 3 m, 6 m olarak seçilmiştir. Örnekleme aralığı 0.5-1 ms kayıt uzunluğu 2-3 sn'dir. Profil uzunlukları ise 57.5 m (1 profil) ve 69 m (14 profil)'dir. Veri kalitesini artırmak için her noktada 3 adet ölçü alınarak yığılma (stack) işlemi yapılmıştır.

2B'lu Vs-derinlik kesitinin oluşturulması çalışmalarına örnek olarak S-14 profili üzerinde yapılan işlemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. 2B'lu S dalga hızını elde edebilmek için her bir profilde bütün verilere öncelikle Ortak Orta Nokta (CMP) çapraz korelasyonu (CMPCC) toplama süreci uygulanarak ortak orta nokta ile izler gruplandırılmıştır. Bu aşama 2B'lu analiz için oldukça önemlidir. Bu işlemin sonucunda sismik kayıt sayısında azalma meydana gelir ve elde edilen kayıtlar frekans spektrum analizi için kullanılır [30]. CMPCC toplama işleminden sonra zaman ortamındaki kayıtlar yukarıda ayrıntılı olarak açıklanan faz kayması yöntemiyle frekans ortamına aktarılarak frekans spektrumunda her bir frekanstaki maksimum genlikler seçilerek dispersiyon eğrisi elde edilmiştir (Şekil 5). Dispersiyon eğrilerinin elde edilmesinden sonra ters çözüm için başlangıç modelleri oluşturulur Bu başlangıç modelleri SeisImager/SW (<http://www.geometrics.com>) yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Kullanılan yazılımda başlangıç modelleri oluşturulurken bir üçüncü dalga boyu (one-third wavelength) yaklaşımı kullanılmaktadır ve bu çalışma için başlangıç modelleri yarı sonsuz 10 tabakadan oluşmaktadır. (Şekil 6).Ters çözüm işlemi ile 2B'lu S dalga hız kesiti derinlik ve tabaka sayısına bağlı olarak elde edilmiştir (Şekil 7). Ters çözüm işlemi sırasında sönümlü en küçük kareler metodu [36;37] kullanılmıştır.

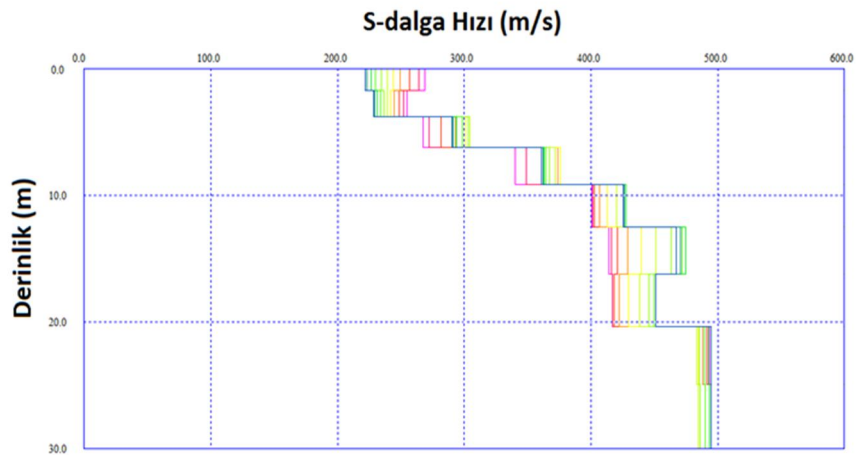




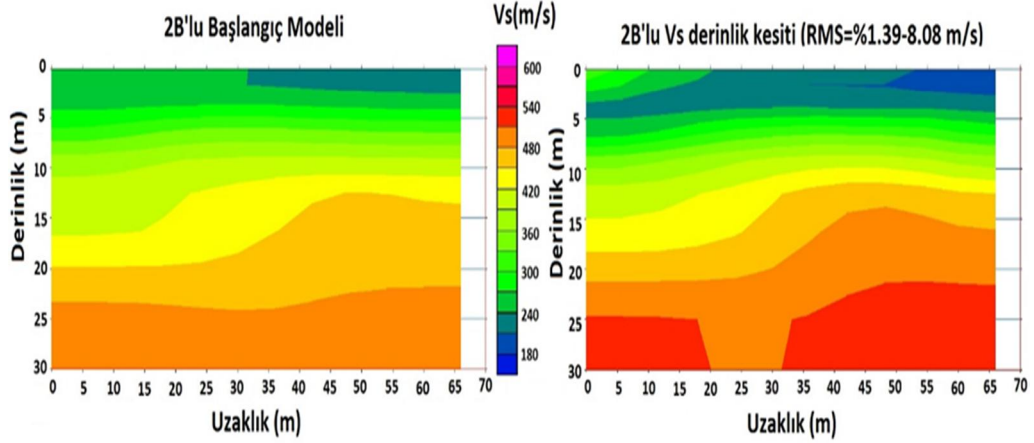
Şekil 4. S-14 profilinin 2B'li ÇKYD ölçü geometrisi (1'er jeofon atlanarak atışlar gerçekleştirilmiştir.)



Şekil 5. S-14 profili için CMPCC sonucu elde edilen dispersiyon eğrileri (devamlı çizgileri dispersiyon eğrilerini, Kesikli çizgiler ve siyah halkalar sinyal/gürültü oranını göstermektedir)



Şekil 6. S-14 profili için ters çözümde kullanılan başlangıç modelleri (Her bir renk şekil 5'te verilen aynı dispersiyon eğrileri için kullanılmıştır.)



Şekil 7. S-14 profili için 1B'lu başlangıç modellerinin interpolasyonu ile elde edilen 2B'lu başlangıç modeli ve ters çözüm sonucu elde edilen 2B'lu Vs-derinlik kesiti (RMS hata %1.39).

Benzer veri işlem adımlarından sonra elde edilen tüm 2B'lu Vs-derinlik kesitleri Şekil 8'de verilmiştir. Elde edilen 15 adet 2B'lu kesit hangi jeolojik birimin üzerinde olduğuna bağlı olarak elde edilen hızlarının birbirine yakınlık durumuna göre 5 gruba ayrılmıştır (Şekil 8a,b,c,d,e).

Kretase Neritik Kireçtaşı üzerinde bulunan S1 profili incelendiğinde (Şekil 8a); Hızlar yüzeyden itibaren 390-800 m/s arasındadır. Yaklaşık 10 m derinlikten itibaren yüksek hızlı bir tabakanın varlığı dikkat çekmektedir. Ve bu birim yatay olarak devamlılığı vardır. Yüzeyde bulunan kireçtaşlarının çeşitli atmosferik nedenlerle uğramış olduğu alterasyonlar ve diğer etmenler nedeniyle nispeten daha düşük hızlara sahip olmuş olabilir..

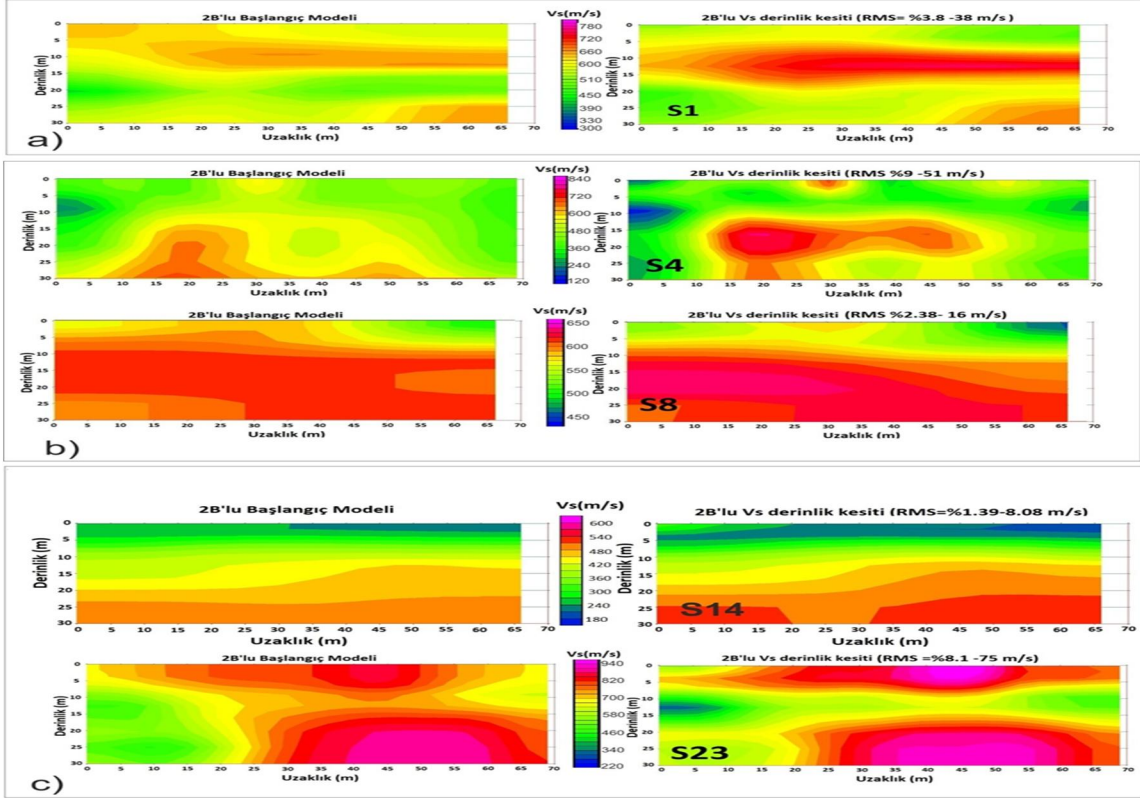
Miosen Karasal Kırıntıları üzerinde bulunan S4 ve S8 profilleri incelendiğinde (Şekil 8b); S dalga hızları 120 ile 850 m/s arasında değişmektedir. S4 profilinde 10 m derinlikten itibaren kesitin orta kesimlerinde hızlar 700 m/s'nin üzerindedir. S8 profilinde ise 10 m derinlikten itibaren hızı yaklaşık 600 m/s olan ve yatay yönde çok fazla bir değişimin olmadığı bir tabaka gözlemlenmiştir.

Miosen Gölsel Karbonatları üzerinde bulunan S14 ve S23 profilleri incelendiğinde (Şekil 8c); Vs değerleri 180 ile 940 m/s arasında değişmektedir. S14 profilinde 5 m kalınlığında çok düşük hız değerlerine ( $V_s > 200$  m/s) sahip bir tabaka vardır. Bu derinlikten sonra hızlar 30 m derinliğe kadar artarak devam etmektedir ve 600 m/s değerlerine ulaşmaktadır. S23 profilinde 940 m/s'lere ulaşan yüksek hızlar dikkat çekmektedir. Yaklaşık 8 m derinlikte başlayan ve yaklaşık 18 m'ye kadar devam eden ve yatay devamlılığı olan düşük hızlı zon dikkat çekmektedir.

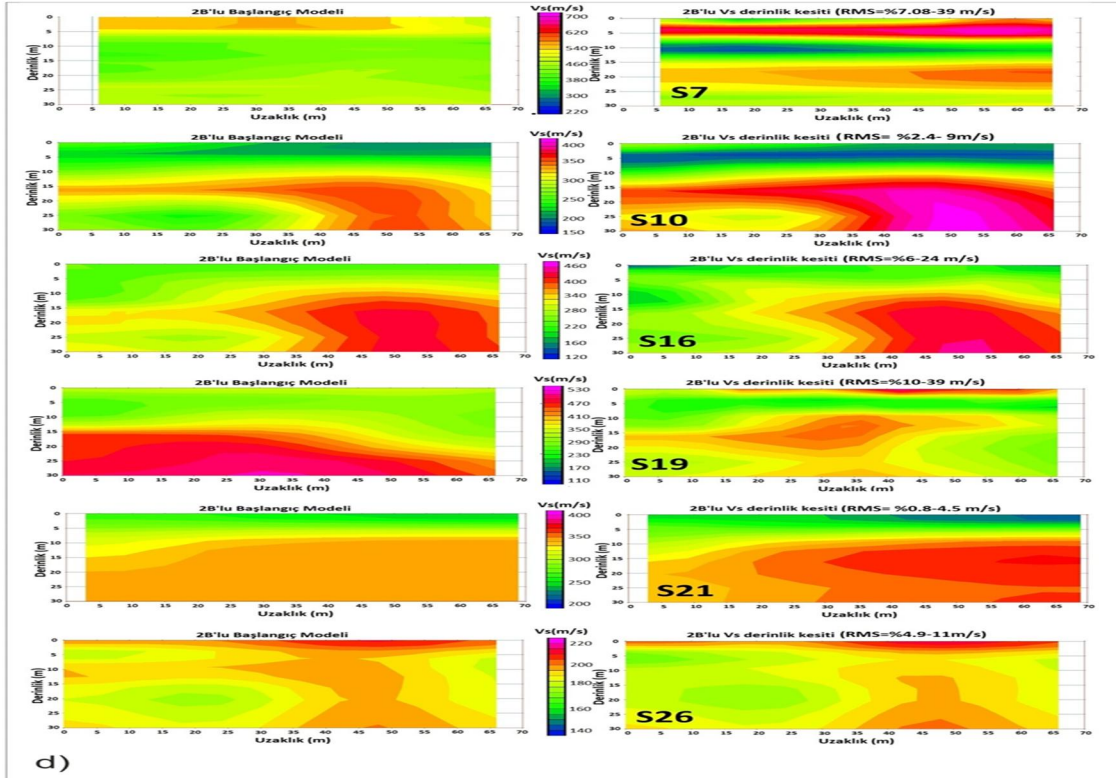
Kuvaterner Alüvyon üzerinde bulunan S7, S10, S16, S19, S21 ve S26 profilleri incelendiğinde (Şekil 8d); Vs değerleri 110 ile 700 m/s arasında değişmektedir. Bu ölçü noktaları bölgedeki literatüre göre üzere alüvyon birikiminin fazla olduğu ve zemin kalınlığının 400 m değerlerine kadar ulaştığı Bornova ovasında bulunmaktadır [3]. Körfeze en yakın S26 profili en düşük hız değerlerine sahip olup, bu değerler 140 ile 220 m/s arasındadır. Diğer profillerde ise genellikle nispeten daha düşük hız tabakasının altında hız artarak devam etmektedir. Ayrıca bu profillerde yatay yönde hızlar değişim göstermektedir.

Miosen Piroklastikleri üzerinde bulunan S12, S17, S22 ve S27 profilleri incelendiğinde (Şekil 8e); S dalga hızları 180 ile 1100 m/s arasında değişmektedir. S12 ve S17 profillerinde ise profilin ortalarından sonuna kadar uzanan ve ortalama 15 m derinliğe kadar nispeten yüksek hızlı yerler dikkat çekmektedir. S22 profilinde 10 m derinlikte kesitin ortalarına kadar uzanan düşük hızlı bir zon bulunmaktadır. S27 profilinde ise 5 ile 20 m arasında yüksek hızlı tabaka dikkat çekmektedir.

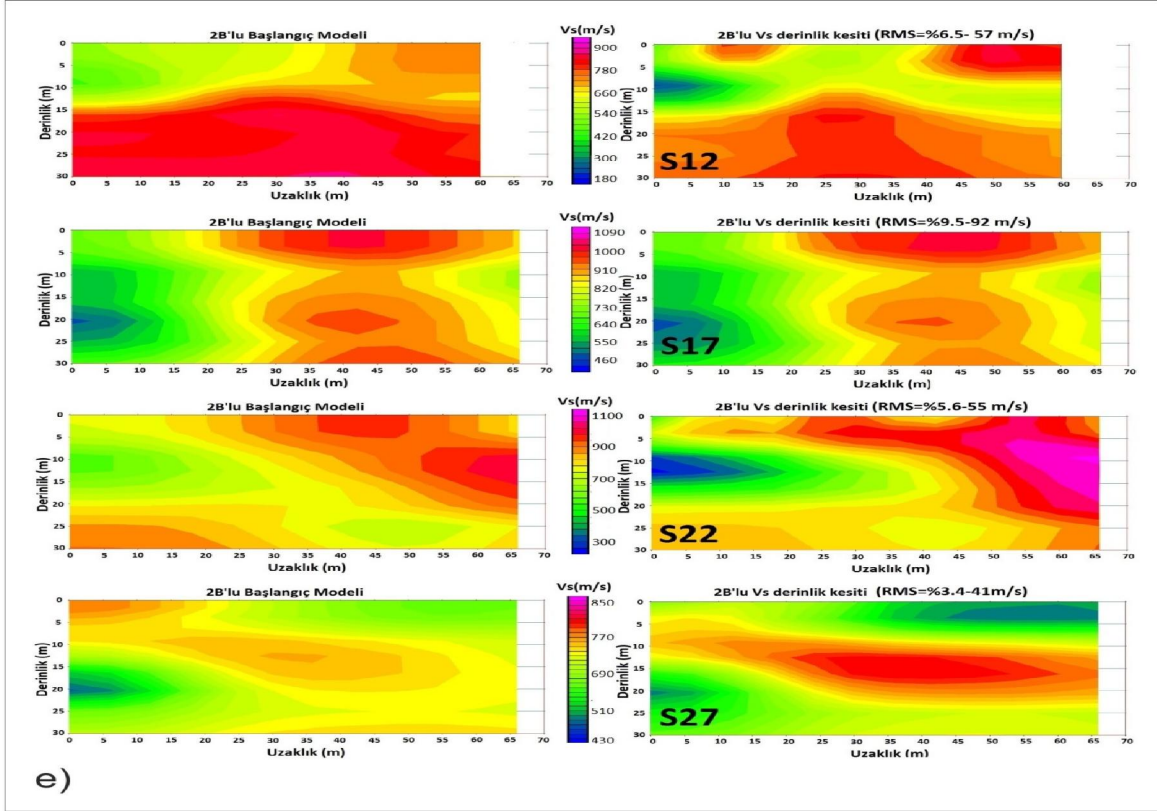




Şekil 8. Ters çözüm için kullanılan başlangıç modelleri ve elde edilen S dalgası hız kesitlerinin 2B'lu gösterimi  
a) S1 b) S4 ve S8 c) S14 ve S23



Şekil 8 (devamı). Ters çözüm için kullanılan başlangıç modelleri ve elde edilen S dalgası hız kesitlerinin 2B'lu gösterimi d) S7, S10, S16, S19, S21 ve S26.



**Şekil 8 (devamı).** Ters çözüm için kullanılan başlangıç modelleri ve elde edilen S dalga hız kesitlerinin 2B'lu gösterimi e) S12, S17, S22 ve S27.

**Tablo 1.** ÇKYD ölçülerinin geometri bilgileri ve elde edilen Vs değerlerinin değişimleri

Profil Adı	X-(UTM WGS 84)	Y-(UTM WGS 84)	Profil Uzunluğu (m)	Profil Yönü	Jeofon Aralığı (m)	Kot (m)	Jeolojik Birim	Elde Edilen Vs aralığı (m/s)
S1	520649	4253125	69	K-G	3	73	Kretase Neritik Kireçtaşı	390-800
S4	520450	4258305	69	KD-GB	3	100	Miosen Karasal Kırıntıları	150-850
S7	518614	4257484	69	K-G	3	34	Kuvaterner Alüvyon	240-720
S8	519122	4259298	69	GB-KD	3	174	Miosen Karasal Kırıntıları	420-660
S10	517959	4255613	69	K-G	3	15	Kuvaterner Alüvyon	160-420
S12	518091	4258933	57.5	KB-GD	2.5	158	Miosen Piroklastikleri	180-1000
S14	516753	4251646	69	KB-GD	3	127	Miosen Gölsel Karbonatları	200-540
S16	518221	4257606	69	K-G	3	30	Kuvaterner Alüvyon	120-480
S17	517492	4258909	69	GB-KD	3	127	Miosen Piroklastikleri	400-1100
S19	516635	4253632	69	K-G	3	12	Kuvaterner Alüvyon	110-540
S21	517317	4257613	69	D-B	3	15	Kuvaterner Alüvyon	180-420

S22	516475	4259446	69	KD-GB	3	95	Miosen Piroklastikleri	240-1100
S23	515645	4252453	69	KB-GD	3	78	Miosen Gölsel Karbonatları	250-1100
S26	515065	4257195	69	G-K	3	6	Kuvaterner Alüvyon	130-230
S27	515027	4258920	69	GD-KB	3	186	Miosen Piroklastikleri	540-900

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, İzmir Körfezi doğusunda yer alan zeminlerin dinamik etkiler (deprem hareketi) altındaki davranışını kontrol edecek olan Vs değerleri toplam 15 profilde 2B'lu ÇKYD yöntemi ile incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirmelerin sonucunda;

- Elde edilen Vs-derinlik kesitleri incelendiğinde özellikle denize yakın kesimlerde Bornova ovasını oluşturan derelerin biriktirdiği zeminin kalınlığının 30 m'den fazla olduğu, körfezin güney ve kuzey kesimlerine doğru bu kalınlığın azaldığı saptanmıştır. Zemin kalınlığı 30 m'den daha az olduğu saptanan S1, S12, S17, S22, S23 ve S27 profillerinde zemin-mühendislik anakayasası modelleri oluşturulmuştur. Diğer profiller de ise Vs>760 m/s koşulu sağlanamadığı için bu modeller oluşturulamamıştır.

- Çalışma alanı genelinde, elde edilen 2B'lu kesitler incelendiğinde, yatay ve düşey yönlerde Vs değerlerinde ani değişimler gözlenmektedir. Dolayısıyla zemini oluşturan tabakalar elastik özellikleri yönünden yatay, yarı sonsuz, homojen ve izotrop özellikte değildir.

- Çalışma alanı kuzeyinde ve güneyinde yeralan S1, S8, S12, S14, S22, S23 ve S27 profillerinde Vs dalga hızı değerleri diğer alanlara göre daha yüksektir. Ancak bu profillerin hemen hemen hepsinde yüzeyde zemin etkisi gözlenmektedir (Vs<760 m/s olduğu için)

- S7, S10, S16, S19, S21 ve S26 profillerinde zemin kalınlığı hem 30m 'den daha kalın hem de Vs değerleri çok düşük değerlerdedir. Bunun anlamı zemin içinde veya yüzeyinde depreme bağlı dinamik davranış sonucu deformasyon elastik sınırların dışında oluşabilir (Elastoplastik veya plastik sınırlarda).

- Mühendislik anakayasına ulaşamayan profillerde mühendislik anakayasına ulaşmak için pasif kaynaklı diğer jeofizik yöntemlerin ( ReMi, SPAC vb.) uygulanması önerilmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan veriler DEÜ BAP 2015KBFEN032 numaralı proje kapsamında toplanmıştır. Bu çalışma Eren Pamuk'un doktora tez çalışmasının bir parçasını oluşturmaktadır. Şekil 3 GMT [38] programı kullanılarak hazırlanmıştır.

#### Kaynaklar

1. Aktepe, E., Aydın, C. 2013. İzmir Çevresinde Yapılan Sismotektonik Araştırmaların CBS ve Mekansal İstatistik Yöntemler Kullanılarak Değerlendirilmesi. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 11-13.
2. 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.

3. Akgün, M., Gönenç, T., Pamukçu, O., Özyalın, Ş., Özdağ, Ö.C. 2013. Mühendislik Ana Kayasının Belirlenmesine Yönelik Jeofizik Yöntemlerin Bütünleşik Yorumu: İzmir Yeni Kent Merkezi Uygulamaları, Jeofizik Dergisi, 1304-12.
4. Nath, S. K. 2007, Seismic Microzonation Framework – Principles and Applications, at the Microzonation Workshop at Indian Institute of Science, Bangalore during June 26-27, 2007. Published in the Proceedings volume, pp. 07 – 35.
5. NEHRP 2003. Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, Fema 450.
6. Kramer, S. L. 1996. Geotechnical earthquake engineering. Pearson Education India.
7. Miller, R.D., Xia, J., Park, C.B., Ivanov, J. 1999. Using MASW to map bedrock in Olathe, Kansas [Exp. Abs.], Soc. Explor. Geophys. 1, 433–436.
8. Mohamed, A. M., El Ata, A. A., Azim, F. A., Taha, M. A. 2013. Site-specific shear wave velocity investigation for geotechnical engineering applications using seismic refraction and 2D multi-channel analysis of surface waves.NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2(1), 88-101.
9. Rehman, F., El-Hady, S. M., Atef, A. H., Harbi, H. M. 2016. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for seismic site characterization using 2D genetic algorithm at Bahrah area, Wadi Fatima, Saudi Arabia. Arabian Journal of Geosciences, 9(8), 1-13.
10. Stephenson, W. J., Odum, J. K., McNamara, D. E., Williams, R. A., Angster, S. J. 2015. Ground-motion site effects from multimethod shear-wave velocity characterization at 16 seismograph stations deployed for aftershocks of the August 2011 Mineral, Virginia, earthquake. Geological Society of America Special Papers, 509, 47-65.
11. Özdağ, Ö. C., Gönenç, T., Akgün, M., Uluğ, A., Pamukçu, O., İpek, Y. 2015. Yerinde Elastik Tasarım Spektrum Hesaplamaları İçin Gerekli Olan Zemin-Ana Kaya Modelleri İle Zemin Dinamik Analizi Parametrelerinin Jeofizik Yöntemlerle Elde Edilmesi İzmir Körfezi Kuzeyinde Yapılan Örnek Çalışma. Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 11 Mayıs-14 Mayıs, İstanbul.
12. Akgün, M., Gönenç, T., Pamukçu, O., Özyalın, Ş. 2014. Investigation of the relationship between ground and engineering bedrock at northern part of the Gulf of İzmir by borehole data supported geophysical works. Journal of Earth System Science, 123(3): 545-564.
13. Pamuk, E., Özdağ, Ö. C., Akgün, M. 2016. Analysis shear wave velocity structure obtained from surface wave methods in Bornova, İzmir. In AIP Conference Proceedings (Vol. 20009, No. 2016).
14. Pamuk, E. 2016. Shear Wave Velocity (Vs) Investigation using 2D Multichannel Analysis of Surface Waves Method (MASW). Conference Proceedings of 7th International Geosciences Student Conference 139-141.
15. Pamuk, E., Özkan Cevdet Özdağ, Ö.C., Akgün, M. 2016. Soil –Engineering Bedrock Investigation using Shear Wave Velocity (Vs) in Konak (İzmir) Conference Proceedings of 7th International Geosciences Student Conference 136-138.
16. Özbek, D. 1981. Altındağ Köyü (İzmir) çevresinin jeoloji ve Altındağ taş ocaklarının mühendislik jeolojisi, Bitirme Ödevi, Ege Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir.
17. Özer, S., İrtəm, O. 1982. Işıklar-Altındağ (Bornova-İzmir) alanı Üst Kretase kireçtaşlarının jeolojik konumu, stratigrafisi ve fasiyes özellikleri, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 25, 41-47.
18. 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.
19. Kıncal, 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.
20. M.T.A. (2002). Türkiye'nin Jeoloji Haritası (1: 500 000).

21. Emre, Ö., Özalp, S., Doğan, A., Özaksoy, V., Yıldırım, C., Göktaş, F. 2005. İzmir yakın çevresinin diri fayları ve deprem potansiyelleri: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi Rapor No: 10754, 57.
22. UIDM (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi, Deprem Araştırma Enstitüsü Ulusal Deprem İzleme Merkezi), 2015. Web Sayfası: <http://www.koeri.boun.edu.tr>
23. Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. 1999. Multichannel analysis of Surface Waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
24. Louie, J.N. 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347-364.
25. Okada, H. 2003. *The Microtremor Survey Method (Geophysical Monograph Series no. 12)*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.
26. Pamuk, E. 2014. İzmir (Buca) bölgesinde yüzey dalgası yöntemleriyle elde edilen kayma dalgası hızlarının ( $V_s$ ) analizi ve mikrotremor uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
27. Çaylak, Ç. 2009. Çok kanallı yüzey dalgası verisinin ters-çözüm teknikleri ile çok sığ yapıların araştırılması, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
28. Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., Ivanov, J. 2007. Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. *The Leading Edge*, 26 (1), 60-64.
29. Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., Ivanov, J. 2000. Construction of 2-D vertical shear-wave velocity field by the multichannel analysis of surface waves technique. *Proceeding of the symposium of the Application of Geophysics to Engineering Environmental Problems (SAGEEP 2000)* Arlington, VA., February 20-24, 1197-1206.
30. Park, C. B. 2005. MASW horizontal resolution in 2D shear-velocity ( $V_s$ ) mapping. *Kansas geological survey open-file report*, 4, 2005.
31. Luo, Y., Xia, J., Liu, J., Xu, Y., Liu, Q. 2008. Generation of a pseudo-2D shear-wave velocity section by inversion of a series of 1D dispersion curves. *Journal of Applied Geophysics*, 64(3), 115-124.
32. Luo, Y., Xia, J., Xu, Y., Zeng, C., Miller, R. D., Liu, Q. 2009. Dipping-interface mapping using mode-separated Rayleigh waves. *Pure and Applied Geophysics*, 166(3), 353-374.
33. Grit, M., Kanli, A. I. 2016. Integrated Seismic Survey for Detecting Landslide Effects on High Speed Rail Line at Istanbul-Turkey. *Open Geosciences*, 8(1), 161-173.
34. Hayashi, K., Craig, M. 2016. S-Wave Velocity Measurement and the Effect of Basin Geometry on Site Response, East San Francisco Bay Area, California, Usa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*.
35. Hayashi, K., Suzuki, H. 2004. CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data. *Exploration Geophysics*, 35(1), 7-13.
36. Levenberg, K. 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares, *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164-168.
37. Marquardt, D. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *SIAM Journal*, 11, 431-441.
38. Wessel, P., Smith, W.H.F. 2004. GMT Version 5.1-*Generic Mapping Tools Graphics*, Laboratory for Sattelite Altimetry", NOAA/NESDIS/NODC, 123.