



3-D Upper crustal velocity structure of the Inner Gulf of Izmir from ambient noise tomography

Emre Mulumulu^{1*}, Çağlar Özer², Elçin Gök³, Francisco J. Chavez-Garcia⁴, Orhan Polat³

¹The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Dokuz Eylul University, Izmir 35390 Turkey

²Earthquake Research Center, Ataturk University, Erzurum 25240 Turkey

³Department of Geophysics, Dokuz Eylul University, Izmir 35390 Turkey

⁴Instituto de Ingenieria , Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Coyoacan 04510 Mexico

Highlights:

- Revealing of Izmir upper crustal velocity structure
- Obtaining shear wave velocity from group velocity inversion
- Application of ambient noise tomography with local network

Keywords:

- Ambient noise tomography
- Cross-correlation
- Surface waves
- Crustal velocity structure
- Izmir

Article Info:

Research Article
Received: 14.09.2018
Accepted: 23.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.460109

Acknowledgement:

Tubitak-Kamag 106g159,
deu-bap 2016.kb.fen.013
Tubitak - 1001 111y015

Correspondence:

Author: Orhan Polat
e-mail:
orhan.polat@deu.edu.tr
phone: +90 232 3017266

Graphical/Tabular Abstract

This study aims to reveal upper-crustal velocity structure of Inner part of Izmir Gulf by using ambient noise tomography. One-year noise data have been used from 17 stations belong to IzmirNET. Rayleigh wave group velocities which present good signal/noise ratio have been obtained from dispersion curves by using multiple filter technique. Results have been mapped for 2, 4 and 6s periods. Then, shear wave velocities have been computed from inversion of group velocities which are obtained from local dispersion curves for different periods.

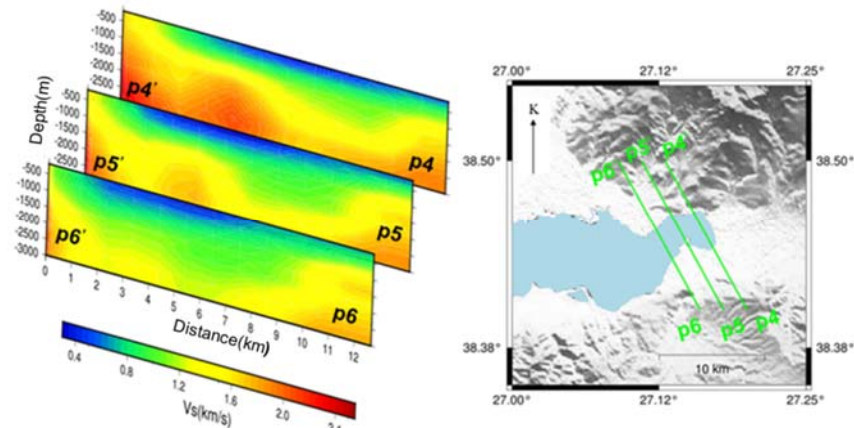


Figure A. Depth slices of 3-D seismic velocities of Inner part of Izmir Gulf from ambient noise tomography

Purpose: Aim of this study is to determine upper crustal velocity structure beneath Inner part of Izmir Gulf by using ambient noise tomography.

Theory and Methods:

Consider two receivers at different positions surrounded by energy sources located on arbitrary surrounding boundary. The wave-field emanating from each source propagates into the medium and is recorded at both receivers. The signals recorded at the two receivers are then cross-correlated. If the cross-correlations from all of the sources are subsequently stacked, the energy that travelled along paths between stations will add constructively and the resulting signal will approximate the Green's function between receivers as if one of the receivers had actually been a source.

Results:

Low velocity areas representing alluvial deposits beneath Inner part of Izmir Gulf, have been precisely observed down to 3 km on group and shear wave maps. Added to this, it is also detected not only the existence of low velocities but also high values in the vertical depth slices of inner part of the Gulf.

Conclusion:

This method may provide precise and high resolution images of crustal structure and upper mantle by using ambient noise tomography without seismic events. It can be applied in the future to the whole part of Izmir and Aegean Region by using broad-band data set.



Doğal gürültü tomografisinden İzmir İç körfezi'nin 3-B üst kabuk hız yapısı

Emre Mulumulu^{1*}, Çağlar Özer², Elçin Gök³, Francisco J. Chavez-Garcia⁴, Orhan Polat³

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Buca, İzmir 35390 Türkiye

²Atatürk Üniversitesi, Deprem Araştırma Merkezi, Erzurum 25240 Türkiye

³Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sismoloji Anabilim Dalı, Buca, İzmir 35390 Türkiye

⁴Instituto de Ingenieria, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Ciudad Universitaria, Coyoacan 04510 Mexico

ÖNEÇİKANLAR

- İzmir'in üst kabuk hız yapısının aydınlatılması
- Ters çözüm ile grup hızlarından kayma dalgası hızlarına geçiş
- Yerel ağ ile sismik gürültü tomografisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.09.2018

Kabul: 23.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.460109

Anahtar Kelimeler:

Doğal gürültü tomografisi
çapraz ilişki
yüzey dalgaları
kabuk hız yapısı
İzmir

ÖZET

Bu çalışmada doğal gürültü tomografisi yöntemi kullanılarak İzmir İç Körfezi 3-B üst kabuk hız yapısının ortaya konması hedeflenmiştir. Çalışmada İzmirNET'e bağlı 17 istasyondan elde edilen 1 yıl uzunluğunda doğal gürültü verileri kullanılmıştır. Yeterli sinyal/gürültü oranına sahip verilerden yola çıkılarak çoklu süzgeç tekniği yardımıyla dispersiyon eğrilerinden Rayleigh dalgası grup hızları elde edilmiştir. Sonuçlar 2, 4 ve 6 saniye periyot aralıkları için haritalanmıştır. Daha sonra aynı periyotlara ait yerel dispersiyon eğrileri kullanılarak grup hızının ters çözümünden kayma dalgası hızları elde edilmiştir. Körfez içi ve yakın çevresinde bulunan çökel birimlere bağlı düşük hızlı alanlar, grup hızı ve kayma dalgası hızı haritalarında 3 km derinliğe kadar net bir şekilde gözlenmiştir. Bununla birlikte derinlik kesitlerinde körfezin iç kısmında sadece düşük değil yüksek hızlı alanların da varlığı saptanmıştır. Yöntem, doğal gürültü tomografisi tekniği kullanılarak depremlere ihtiyaç duymadan kabuk ve üst manto hakkında hassas ve yüksek çözünürlüklü görüntü sağlayabilir. İleride geniş-bant veri seti kullanılarak Ege Bölgesine, Türkiye'ye veya yakın coğrafyamızda yer alan bir bölgeye uygulanabilir.

3-D Upper crustal velocity structure of the Inner Gulf of Izmir from ambient noise tomography

HIGHLIGHTS

- Revealing of Izmir upper crustal velocity structure
- Obtaining shear wave velocity from group velocity inversion
- Application of Ambient noise tomography with local network

Article Info

Research Article

Received: 14.09.2018

Accepted: 23.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.460109

Keywords:

Ambient noise tomography
cross-correlation
surface waves
crustal velocity structure
Izmir

ABSTRACT

This study aims to reveal upper-crustal velocity structure of Inner part of Izmir Gulf by using ambient noise tomography. One-year noise data have been used from 17 stations belong to İzmirNET. Rayleigh wave group velocities which present good signal/noise ratio have been obtained from dispersion curves by using multiple filter technique. Results have been mapped for 2, 4 and 6 s period intervals. Then, shear wave velocities have been obtained from the inversion of group velocity by using local dispersion curves belongs to same periods. Low velocity areas representing alluvial deposits beneath Inner part of Izmir Gulf, have been precisely observed down to 3 km on group and shear wave maps. Added to this, it is also detected not only the existence of low velocities but also high values in the depth slices of inner part of the Gulf. This method may provide precise and high resolution images of crustal structure and upper mantle by using ambient noise tomography without seismic events. It can be applied in the future to the Aegean Region, Turkey or neighbouring countries by using broad-band data set.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: emre.mulumulu@gmail.com, caglarozzer@atauni.tr, elcin.gok@deu.edu.tr, orhan.polat@deu.edu.tr /

Tel: +90 232 301 7266

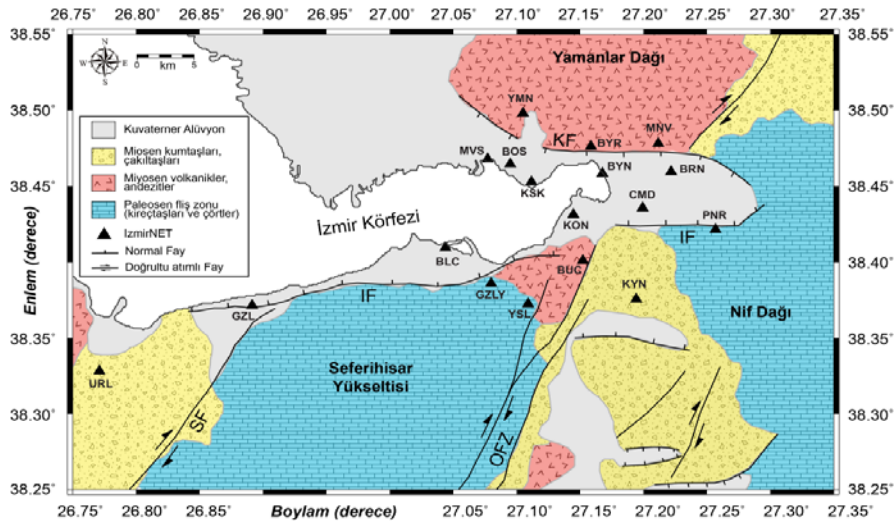
1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde verilerin dijitalleşmesi, internet aracılığı ile paylaşılması ve tüm dünya genelinde istasyon sayılarının artmasıyla doğal gürültü tomografisi [1] kabuk çalışmalarında araştırmacılar arasında oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Bu çalışma kapsamında doğal gürültü tomografisi kullanılarak İzmir ve çevresinin sığ derinliklerdeki 3-B kabuk hız yapısının ortaya konması hedeflenmiştir. Türkiye’de Anadolu Levhası’nın kayma dalgası (Vs) hız yapısını ortaya çıkarmak için 215 geniş-bant kayıtcının kullanıldığı bir doğal gürültü tomografisi çalışması yapılmıştır [2]. Çalışmada yaklaşık 14000 çapraz ilişki sonucundan yararlanılarak 8 ve 40 sn aralığında Rayleigh dalgası faz hızları ölçülmüştür. Elde edilen faz hızı haritalarından yerel dispersiyon eğrileri çıkartılarak ters çözüm yardımıyla Vs hızlarına geçilmiştir. Ortalama Vs hızı ~3,4 km/s bulunmuş ve çalışma alanının güneybatısındaki düşük sismik hızlar Likya Napları ve Bey Dağları arasındaki tektonik etkileşim ile ilişkilendirilmiştir. İran’da yapılan bir çalışmada farklı sensörlere ait 2 yıllık doğal gürültü verisinden elde edilen çapraz ilişki sonuçları incelenmiş [3] ve çoklu süzgeç tekniği yardımıyla 1-7 sn aralığında ölçülen yüzey dalgası grup hızları haritalanmıştır. İvme-ölçer ve hız-ölçer veri seti kullanılarak hesaplanan çapraz ilişkilerden elde edilen grup hızı dispersiyon eğrileri yardımıyla [4] istasyon çiftleri arasında Vs hızları belirlenmiştir. İzmir İç Körfezi gibi dar bir alana benzer bir bölgede (İran-Tahran havzasında) Vs hızlarına bağlı olarak anakaya derinliğinin kuzeyden güneye 400 ile 1400 m arasında değiştiği gözlenmiştir. Kore Yarımadası’nda yürütülen büyük ölçekli bir başka çalışmada ise 206 geniş-bant kayıtcıya ait 1 yıllık veriden çapraz ilişkiler elde edilmiş [5] ve 10-70 saniye aralığında Rayleigh dalgası grup hızları haritalanmıştır. Söz konusu yarımada sismik aktivitenin düşük olması [6], tomografi çalışması için yeterli büyüklüğe ve dağılıma sahip depremlerin az sayıda olması nedeniyle

doğal gürültü tomografisi yöntemi tercih edilmiş ve yüksek çözünürlüklü sonuçlar elde edilmiştir. İzmir İç Körfez’de gerçekleştirilen çalışmada; 2015-2016 yıllarına ait düşey bileşen ivme kayıtları kullanılmış, çapraz ilişkiler hesaplanmış, dispersiyon ölçümlerinden elde edilen Rayleigh dalgası grup hızları farklı periyotlarda haritalanmış, bu haritalardan yerel dispersiyon eğrileri elde edilmiş ve ters çözüm ile ortalama 3000 m derinliğe kadar Vs sismik hız yapısı elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, mevcut jeolojik ve tektonik unsurlar ile ilişkilendirilmiştir.

2. TEKTONİK VE JEOLJİK YAPI (TECTONIC AND GEOLOGICAL STRUCTURE)

Ege Bölgesi, Doğu Akdeniz’de sismik olarak en aktif bölgelerden biridir. Anadolu Levhası’nın batıya doğru kaçışı [7] ve batıda kuzey-güney yönlü açılma rejimine bağlı olarak meydana gelen doğu-batı doğrultulu graben sistemleri ve normal faylar [8, 9] bölgedeki ana tektonik unsurları oluşturmaktadır. Çalışma alanı 26,75-27,35 D boylamları ile 38,25-38,55 K enlemleri arasında yer almakta olup İzmir İç Körfezi ve yakın çevresini temsil etmektedir. Çalışma alanındaki jeolojik birimler Geç Kretase-Paleosen yaşlı temel kayalar, Erken Miyosen-Erken Pliyosen yaşlı eski havza çökelleri ve Pliyo-Kuvaterner yaşlı genç havza çökelleri [10] olarak 3 bölüme ayrılır. Havza tabanlarını oluşturan temel kayalar KD yönlü bir uyumsuzluk sergilemekte olup Seferihisar, Nif Dağı ve Yamanlar Dağı’nda yüzlek verirler. Bölgedeki faylar genellikle D-B ve KD-GB uzanımlıdır. İç körfezi sınırlıdır Karşıyaka Fayı ve İzmir Fayı D-B uzanımlı, çalışma alanının güneyindeki Seferihisar Fayı ve Orhanlı-Tuzla Fayı KD-GB uzanımlıdır (Şekil 1). İzmir ve çevresi jeotermal enerji kaynağı olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Aliğa, Balçova, Çeşme, Menemen, Seferihisar ve Urla’da bulunan jeotermal sistemler ve sıcak su çıkışları [11] bölgedeki temel jeotermal kaynaklardır.



Şekil 1. Çalışma alanının jeoloji haritası ve İzmirNET yerel kuvvetli yer hareketi istasyonlarının konumu. İF: İzmir Fayı, KF: Karşıyaka Fayı, OTF: Orhanlı-Tuzla Fayı, SF: Seferihisar Fayı [10, 12] (Geology map of the study area and location of İzmirNET local strong-ground motion station network. IF: İzmir Fault, KF: Karsiyaka Fault, OTF: Orhanli-Tuzla Fault, SF: Seferihisar Fault)

3. VERİ VE YÖNTEM (DATA AND METHOD)

Deprem etkinliği yüksek bölgelerde, kısa zaman aralığında Sinyal/Gürültü (S/G) oranı yüksek kayıtlar yardımıyla, bölgenin yeraltı sismik hız yapısı yüksek çözünürlükte görüntülenebilmektedir [13-16]. Çalışma alanının geometrisi, bu alandaki sismik aktivitenin düşük olması, deprem verilerinden tomografi çalışması için S/G oranı yüksek yeterli sayıda deprem olmaması nedeniyle doğal gürültü tomografisi yöntemi tercih edilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan doğal gürültü veri seti İzmirNET yerel kuvvetli yer hareketi deprem istasyon ağından elde edilmiştir. İzmirNET; Dokuz Eylül Üniversitesi, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ile İzmir Büyükşehir Belediyesi arasındaki işbirliği sonucu kurulmuştur. İzmirNET Guralp/CMG5TD ivme-ölçer sensörlerden oluşmakta ve sürekli kayıt yapmaktadır.

Rayleigh dalgası grup hızlarını elde etmek için çalışmada 1 yıl uzunluğunda düşey bileşen ivme-ölçer kayıtları kullanılmış ve veri setinden eksik ya da hatalı olan dosyalar ayıklanmıştır. Veri setine Bensen vd. [17]'de bahsedilen veri işlem adımları uygulanmıştır. Aynı sensöre sahip kayıtlar kullanıldığından verilere aletsel düzeltme uygulanmamıştır. 1 saat uzunluğunda pencerelenen verilerden ortalama ve trend etkisi giderilmiş daha sonra saniyede 100 örnek olarak kaydedilen veri 10 örneğe düşürülmüştür. Depremler ve kültürel gürültüler gibi bozucu etkileri veriden uzaklaştırmak için zaman ortamı normalizasyon ve spektral beyazlatma işlemi uygulanmıştır. Veriler bant-geçişli süzgeç yardımıyla süzöldükten sonra çapraz ilişkiler hesaplanmıştır. S/G oranını arttırmak için veriler katlanarak ilerleyen adımlarda simetrik bileşenler kullanılmıştır (Şekil 2). Hesaplanan çapraz ilişkiler detaylı olarak incelendikten sonra yüzey dalgası genliklerinin ortaya çıkmadığı ya da S/G oranının yetersiz olduğu çiftler veri setinden çıkartılmıştır. Daha sonra çoklu süzgeç tekniği [4] ile dispersiyon eğrilerinden Rayleigh dalgası grup hızları ölçülmüştür (Şekil 3). Literatürde, dispersiyon ölçümlerinde dalgaların ilerledikleri ortamın özelliklerini yansıtabilmesi ve hatalı ölçümlerden kaçınmak amacıyla, bölgesel/küresel çalışmalarda istasyonlar arası mesafenin en az 3 dalga boyu uzunluğunda olması önerilmiştir [18]. Öte yandan İzmirNET benzeri

ortalama 13 km kısa istasyon mesafe aralıklarına sahip ağların kullanıldığı araştırmalarda, bu kriterin 2 ve 1,5 dalga boyuna kadar inebildiği gözlenmiştir [19-21]. Bu çalışmada dispersiyon ölçümlerinin geçerli sayılabilmesi için istasyonlar arası mesafe en az 2 dalga boyu uzunluğunda seçilmiştir.

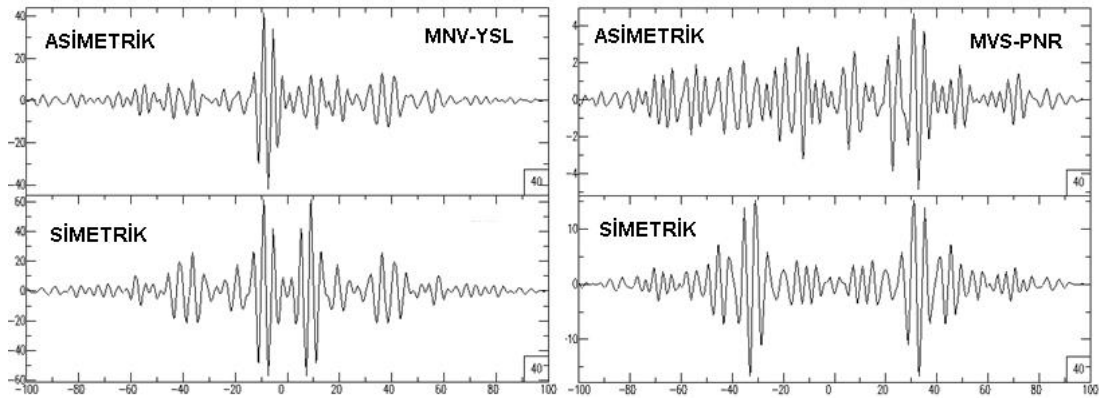
Dalga seyahat zamanına ait eikonal denklemi çözmek için grid tabanlı bir sayısal algoritma olan hızlı ilerleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem; hızın derinlikle değiştiği ortamlarda iyi sonuç vermektedir.

$$|\nabla_x \cdot T| = s(x) \quad (1)$$

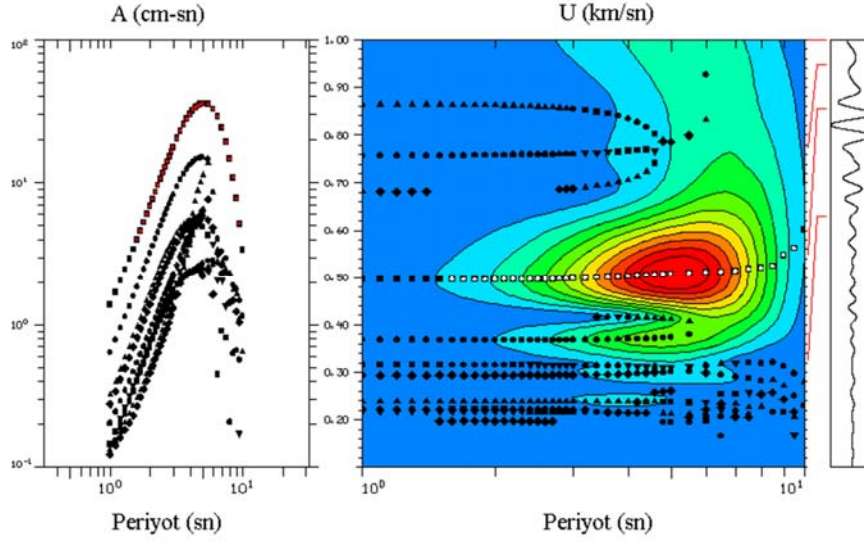
Sismik dalganın yayılımını düzenleyen (Eş. 1) no'lu eikonal denklemde ∇_x gradyan operatörü, T seyahat zamanı (sn), s(x) ise x noktasının fonksiyonu olarak yavaşlık terimini ifade etmektedir. Grid aralığı azaldıkça gerçek çözüme yakınsayan denklem sistemi, dalga cephesinde gradyan süreksizliklerinin gelişmesini ve yayılmasını doğru yönde etkileyerek çözüm kararlılığını arttırmaktadır. Yöntemin detayları [22, 23]'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

4. ÜÇ BOYUTLU HIZ YAPISI (THREE DIMENSIONAL VELOCITY STRUCTURE)

Bir istasyon çifti arasında ölçülen dispersiyon eğrisi o ortama ait farklı frekanslardaki hız bilgilerini içerir. İncelenen alana ait yeterli sayıda istasyon çifti ve ışın yolu mevcutsa ortama ait yüksek çözünürlüklü tomografik haritalar elde edilebilir. Yüzey dalgalarının örneklediği derinlik frekans ile ilişkili olduğundan [1], farklı frekans değerlerine ait haritalar yardımıyla çalışma alanı 3-B olarak modellenebilir. Veriye uygulanan S/G ve dalga boyu kriterlerinden sonra 2, 4 ve 6 sn periyotları için sırasıyla 93, 68 ve 42 adet ışın yolu elde edilmiştir (Şekil 4). Mevcut ışın yollarının çözüm kapasitesini araştırmak için dama tahtası testi uygulanmış ve sentetik seyahat süreleri hesaplanmıştır. Testte çalışma alanı karelere bölünmüş, bu karelere ardışık olarak yüksek ve düşük hız değerleri atanmıştır. Pozitif ve negatif hız değerleri ile arasında $0,02 \times 0,02^\circ$ boyutlarında grid aralığı kullanılmıştır. Karelere atanan grup hızları -0.4 'den $+0.4$ km/s'e kadar değişmektedir. Daha sonra seyahat süreleri



Şekil 2. Simetrik ve asimetric bileşen çapraz ilişki örnekleri (Symmetric and asymmetric component cross-correlation samples)



Şekil 3. MVS-PNR istasyon çiftine ait grup hızı dispersiyon eğrisi (Sol: seçilen dispersiyon eğrisine ait genlik spektrumu Sağ: Dispersiyon eğrisi ve maviden kırmızıya artan enerji diyagramı. Kareler maksimum genlik değerlerini daireler ise yerel maksimumları temsil eder. (Group velocity dispersion curve for the MVS-PNR station pair. The squares denote maximum amplitudes whereas the circles denote local maximums (Left: Amplitude spectrum of corresponding dispersion curve, Right: Dispersion curve and colour diagram representing increasing energy blue through red)

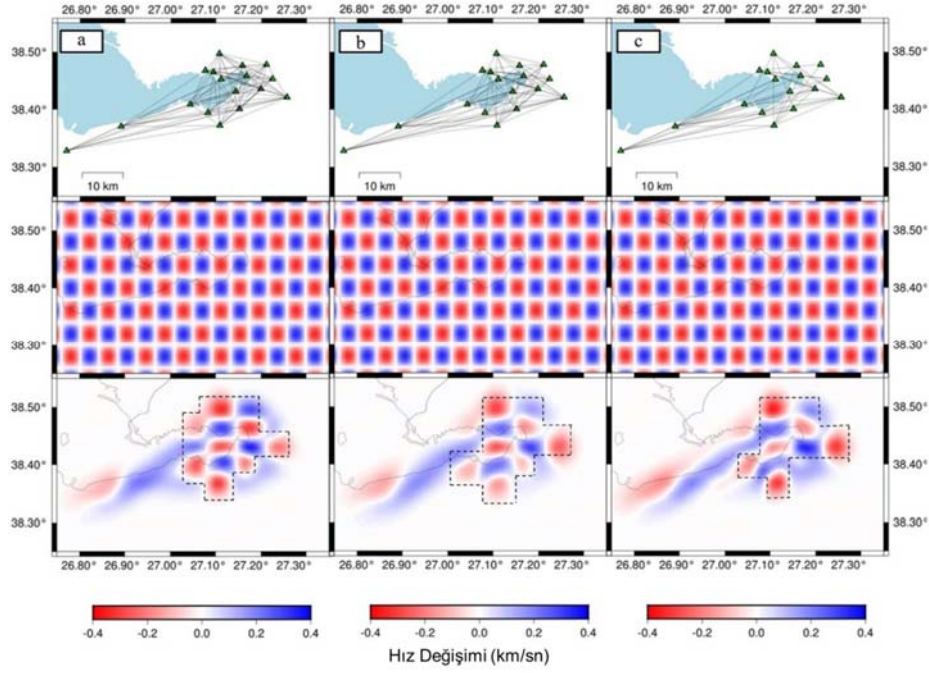
tomografi yazılımıyla çözümlenerek hız modelinin çözünürlüğü incelenmiştir. Modelde çözünürlük İzmir İç Körfezi ve yakın çevresinde yüksektir. Şekil 4'te siyah kesikli çizgiler çözünürlüğü yüksek alanı göstermektedir. Çözünürlük diğer tomografik çalışmalarda da olduğu gibi model alanının sınırlarına doğru azalmaktadır [24, 25]. Genel olarak çalışma alanının batısına gidildikçe çözünürlük azalmaktadır. Buna ek olarak artan periyota bağlı olarak ışın yolu sayısındaki azalma da çözünürlüğü olumsuz etkilemektedir. Elde edilen bulgular yorumlanırken kesik çizgi ile belirtilen ve çözünürlüğün yüksek olduğu alanlar dikkate alınmıştır.

4.1. Grup Hızı Haritaları (Group Velocity Maps)

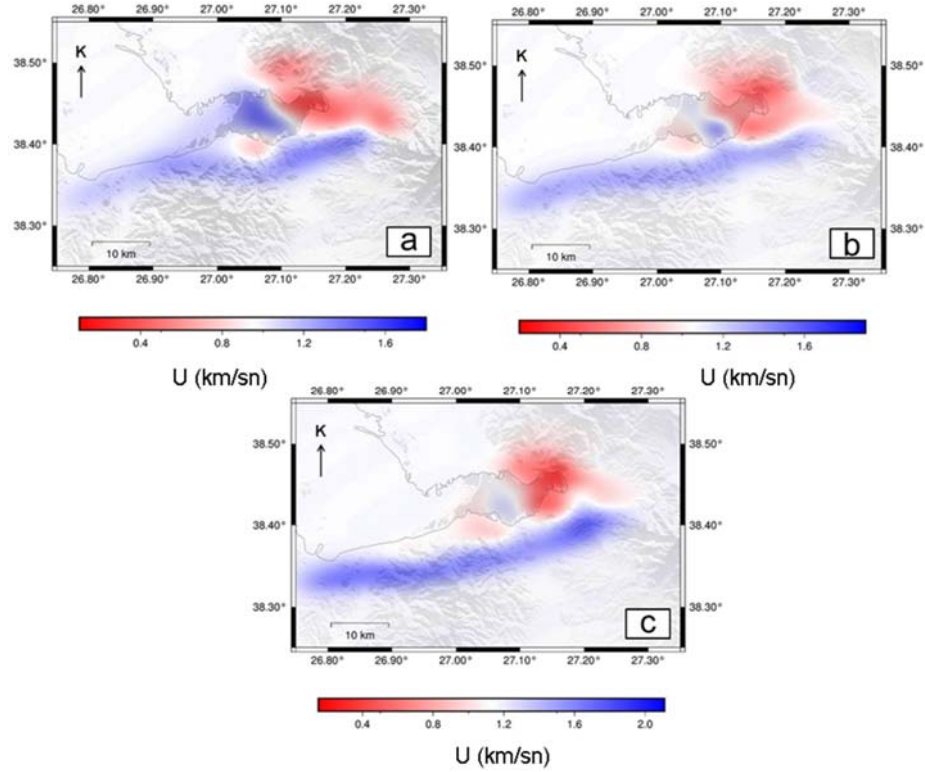
Dama tahtası testleri tamamlandıktan sonra aynı periyot değerleri için Rayleigh dalgası grup hızı haritaları üretilmiştir. Başlangıç modeli için, dispersiyon ölçümlerinden elde edilen ortalama hız değerleri kullanılmıştır. Bu değerler sırasıyla 0,954 km/sn, 1,069 km/sn ve 1,158 km/sn'dir. Elde edilen sonuçlar topoğrafya haritası üzerine eklenerek yorumlanmıştır (Şekil 5). Buna göre hesaplanan grup hızlarının jeoloji ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Özellikle iç körfezin kuzey ve doğu kesimlerinde bulunan alüvyal çökeller ile güney kesimde bulunan volkanikler arasında düşük ve yüksek net hız farkları belirlenmiştir. Jeotermal aktiviteye sahip Balçova çevresinin, incelenen tüm periyotlarda düşük hızlarla temsil edildiği gözlenmiştir. Bununla birlikte körfez içinde çözünürlüğün yüksek olduğu alanlarda da hem düşük, hem de yüksek hızla sahip alanlar dikkat çekmektedir. Literatürde, çalışma alanını da kapsayacak şekilde yapılan büyük ölçekli yerel deprem tomografisi çalışmasında da körfez içinde düşük ve yüksek hız bölgelerinin varlığı rapor edilmiştir [26].

4.2. Vs Haritaları (Vs Maps)

Grup hızı haritalarının hesaplanması sonrasında eş grid noktaları kullanılarak yerel dispersiyon eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra bu eğrilerden ters çözüm yöntemi yardımıyla Vs hızları hesaplanmıştır [4]. Başlangıç modeli için Özer ve Polat [27]'de belirtilen 1-B kabuk modeli kullanılmıştır. Yüzey dalgaları genellikle dalga boylarının 1/3'ü kadar derinliği örnekleyebilir [1]. Örneklenen maksimum derinlik çözünürlüğü hassasiyet çekirdekleri yardımıyla hesaplanabilir. Hassasiyet çekirdekleri referans model yardımıyla belirli bir derinlikteki maksimum partikül hareketini frekansın fonksiyonu olarak hesaplamaya yarar. Bu sayede incelenen periyotların yaklaşık kaç km derinlikten bilgi taşıdığı yorumlanabilir. Bu çalışmada kullanılan 2-6 sn periyot aralığı için yaklaşık 3 km derinliğe kadar hassas çözümleme yapılabilmektedir (Şekil 6). Hassasiyet çekirdekleri hesaplandıktan sonra farklı periyotlara (2, 4, 6 sn) karşılık gelen derinlikler (600, 1800, 3000 m) için 3-Boyutlu Vs hız haritaları elde edilmiştir (Şekil 7). 3-B Vs hızları incelendiğinde düşük Vs hızlarının yüzeyden itibaren 3 km derinliğe kadar devam ettiği gözlenmiştir. İlk 600 m'de iç körfez ve çevresini kapsayan geniş bir alanda düşük hızlı bir zonun varlığı göze çarpmaktadır. Bölgenin topoğrafik özellikleri de dikkate alındığında iç körfezi oluşturan Pliyo-Kuvaterner alüvyal çökellerden oluşan havzanın; güney ve doğuda gözlenen Paleosen Kireçtaşları ve filişler ile (Seferihisar Yükseltisi, Nif Dağı), kuzeyde ise geniş volkanik andezitler ile (Yamanlar Dağı) sınırlandırıldığı ve düşük hızla sahip olduğu gözlenmektedir [10]. Bu düşük hızlı iç körfez bölgesinin çapı ve boyutu, derinliğin artmasıyla birlikte azalmakta, K-G uzanımlı olacak şekilde küçülmektedir. Balçova'yı kapsayacak şekilde Güney'de gözlenen düşük hız zonlarındaki azalmaya; jeotermal



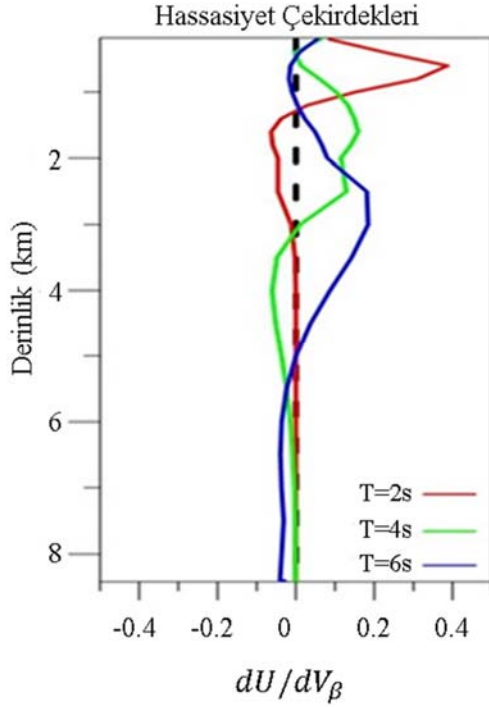
Şekil 4. Dama tahtası a) 2 sn b) 4 sn c) 6 sn periyotları için ışın yolları (üst) pozitif ve negatif grup hızları için başlangıç modeli (orta) ve çözüm sonucu (alt) (For a) 2 s b) 4 s c) 6 s checkerboard test raypaths (upper) starting models for positive and negative group velocities (middle) and results (bottom))



Şekil 5. Farklı periyotlar için grup hızı haritaları: a) 2 sn, b) 4 sn, c) 6 sn
(Group velocity maps for different periods: a) 2s, b) 4s, c) 6s)

sisteme kaynaklık eden formasyonun, fay ve çatlak sistemleri ile gözeneklilik ve ikincil permeabilite [28] kazanarak geçirimli hale gelmesinin neden olduğu sonucuna

varılmıştır. Bölgede yapılan çalışmada da, körfezin iç kesimi ve çevresinde düşük V_p , V_s ve yüksek V_p/V_s oranları rapor edilmiştir [29].

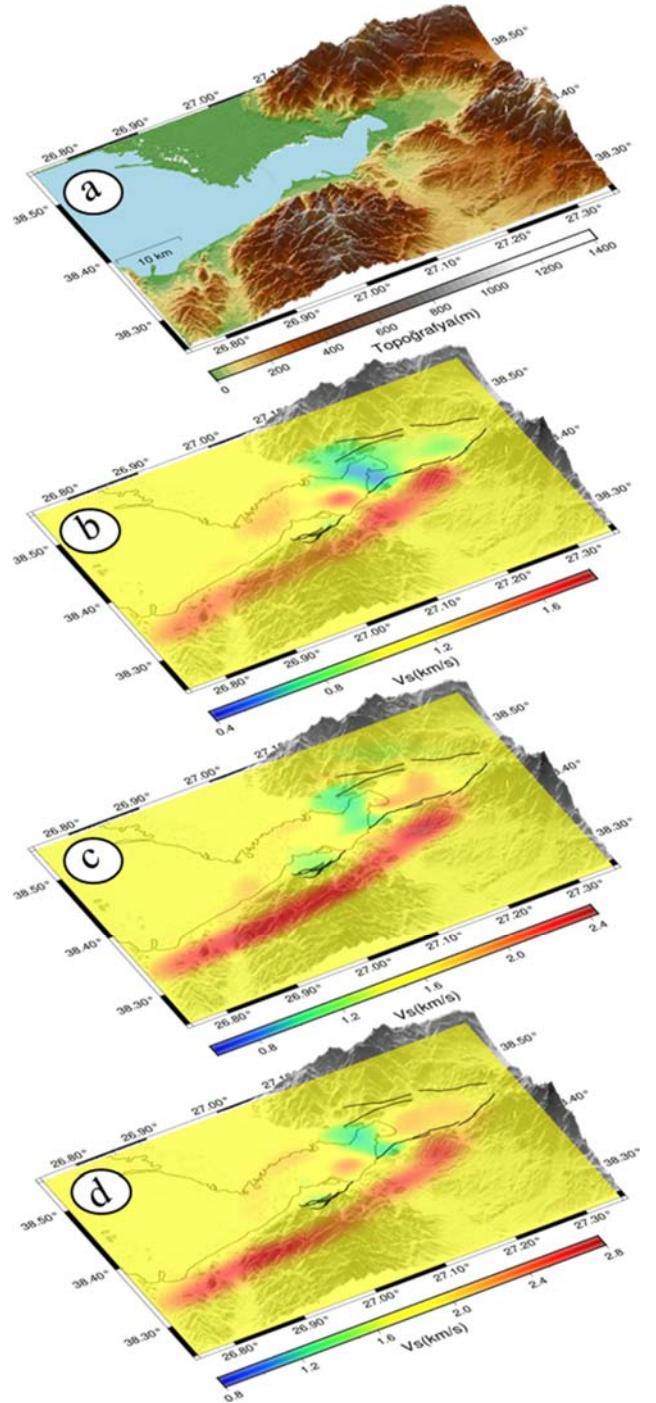


Şekil 6. Farklı periyotlar (T=2sn, 4 sn, 6 sn) için hassasiyet çekirdekleri (Sensitivity kernels for different periods (2s, 4s, 6s))

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

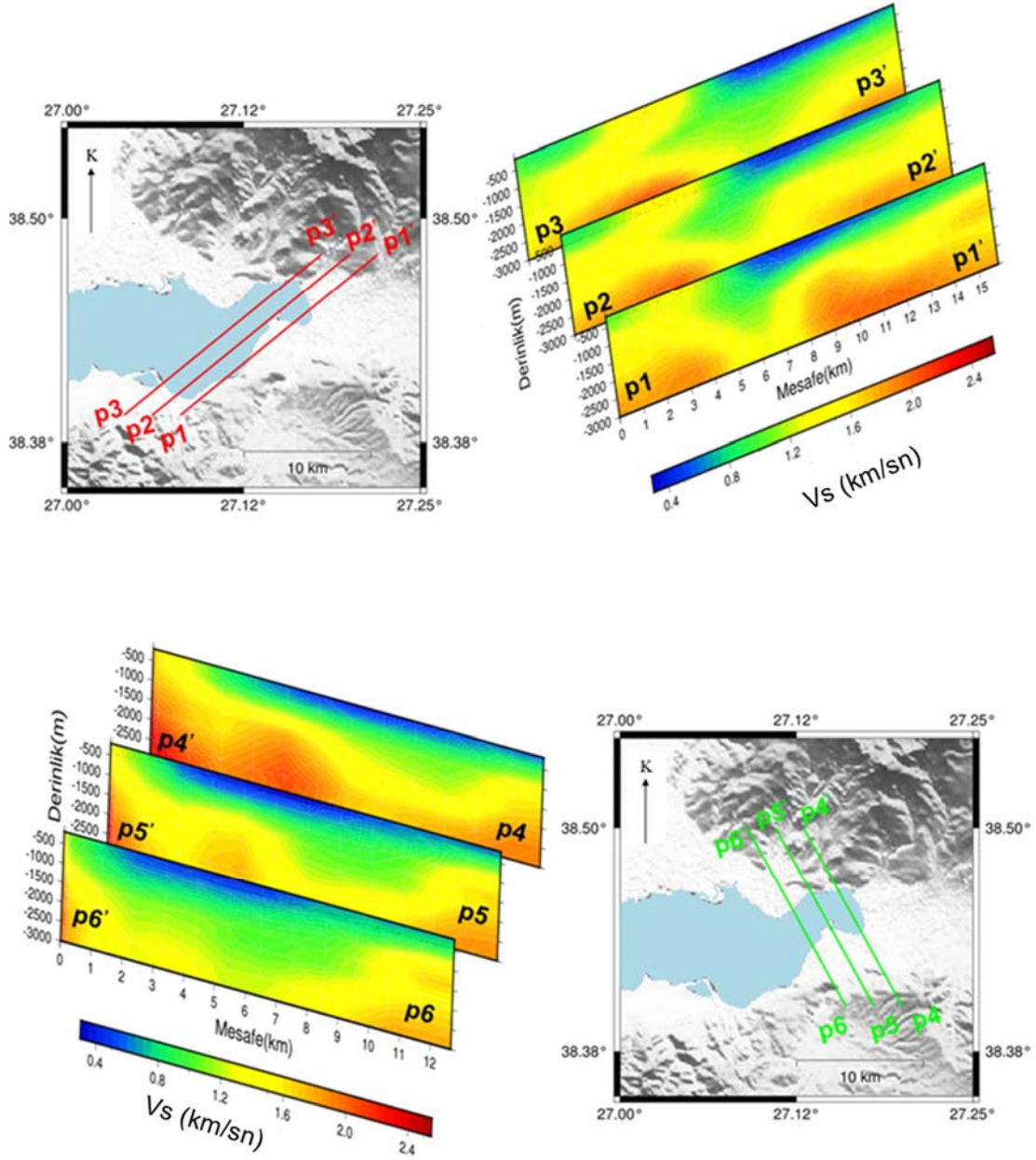
Çalışma kapsamında 17 ivme-ölçerden 1 yıllık veriye ait 136 adet istasyon çifti incelenmiş olup gerekli kriterleri sağlayan çiftlerden dispersiyon eğrileri ölçülmüştür. Elde edilen eğrilerden 2, 4 ve 6 sn için Rayleigh dalgası grup hızları haritalanmıştır. Çalışma alanına uygun bir başlangıç modelinin yardımıyla grup hızı haritalarından elde edilen yerel dispersiyon eğrileri ters çözüme sokularak grup hızlarından 3-Boyutlu Vs haritaları elde edilmiştir. Bulguların çalışma alanına ait ana jeolojik birimler ve genel topografya ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Körfez içi ve yakın çevresinde alüvyal çökelleri temsil edecek şekilde düşük hızlı (Vs) alanlar net bir şekilde gözlenmiştir. Düşey derinlik kesitlerinde körfezin iç kısmında hem düşük, hem de yüksek hızlı alanlar saptanmıştır. İstasyon aralıklarının çok yakın olmasına rağmen, 6 sn periyotuna (3 km derinliğe) kadar hız değişimleri ortaya konabilmiştir. Bulguların daha iyi yorumlanabilmesi amacıyla KD-GB ve KB-GD doğrultulu 3'er derinlik kesiti alınmıştır. Bu kesitlere ait sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir.

p1-p1' profiline bakıldığında yüzeye yakın kesimlerde düşük hızların etkisi gözlenirken profilin 8. km'sinden itibaren Yamanlar Dağı'na yaklaşıldıkça hızların derinliğe bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Profilin Bornova Ovası'ndan geçen kısmı için bölgenin zemin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda oluşturulan modeller incelenmiş olup bu modellerde sismik anakaya derinliği yaklaşık 1300 m olarak tanımlanmıştır.



Şekil 7. a) Çalışma alanının 3-Boyutlu topografik görüntüsü farklı periyotlara (2, 4, 6 sn) karşılık gelen derinlikler b)600m c) 1800m d) 3000 m için 3-Boyutlu Vs hız haritaları (a) 3-D topographic map of the study area 3-D Vs velocity maps for the depths b) 600 m c) 1800 m d) 3000 m belonging different periods (2, 4, 6 s))

Bu derinliğe kadar olan kısımlarda Vs hızı 0,2-0,65 km/sn ve Vs > 0,7 km/sn olan farklı tabakalar rapor edilmiştir [30]. Bu hızlar elde edilen sonuçlar ile uyum içindedir. Öte yandan anakaya olarak tabir edilen kısım yaklaşık olarak 1500 m'den sonra gözlenmiştir. p2-p2' ve p3-p3' numaralı profiller boyunca körfezin güney kısmında (Balçova



Şekil 8. KD-GB (üstte) ve KB-GD (altta) uzanımlı profillere ait 3-B derinlik kesitleri
(3-D depth slices aligned NE-SW (upper) and NW-SE (bottom) profiles)

civarlarında) gözlenen Vs hızlarının 1,5 km/s olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç körfezin homojen bir yapıda olmadığını ve içerisinde yüksek ve düşük hızlı alanları barındırdığının bir göstergesidir. İzmir körfezinde yürütülen 3-B yerel deprem tomografisi çalışmalarında da benzer bulgular rapor edilmiş düşük ve yüksek hız değerlerine sahip V_p ve V_p/V_s oranlarına dikkat çekilmiştir [29]. Onay [31] ise İzmir İç Körfezi'nin Seferihisar Yükselimi ve Nifdağı Yükselimi arasında bir basen oluşturarak güncel sedimentlerle dolduğuna dikkat çekmiştir ve sediment birimlerin altındaki olası volkanik birimlere ve körfez içi bir grabenleşmeye vurgu yapmıştır. Ayrıca iç körfezde gerçekleştirilen çok ışınli batimetri çalışmalarında alanın $0,1^\circ$ lik düşük bir eğime sahip olduğu, derinliğin iç körfezden

dış körfeze doğru artış gösterdiği ve morfolojik olarak farklı yapılar barındırdığı rapor edilmiştir [32]. Genel olarak alüvyal çökel alanlarda ve körfezin iç kesimlerinde ilk 600 m'de çok düşük hızlar gözlenirken (0,4-0,8 km/sn), derinlere doğru hızların arttığı gözlenmiştir. İç körfezin doğu sınırı p4-p4' profilinin başlangıç ve bitiş noktaları topoğrafik olarak yüksek noktaları kesmektedir. Bu alanlarda 1500 m'den sonra yüksek hızlar gözlenmektedir. Profilin körfez içinde ve yüzeyde topoğrafya etkisinin gözlenmediği alanlarda ise hızlar daha düşüktür. Öte yandan p5-p5' ve p6-p6' profillerinden körfez içindeki düşük hızlı zonun kalınlığının yaklaşık 2000 m'ye kadar ulaştığı gözlenmektedir. Sonraki çalışmalarda kullanılacak istasyon sayısı ve ağ aralığının artırılması yöntemin etki derinliğini ve çözünürlüğünü

olumlu yönde etkileyecek ve kabuk hız yapısının daha detaylı olarak aydınlatılmasına yardımcı olacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında eğitim gören Emre Mulumulu'nun yüksek lisans tez çalışmasıdır. Hesaplamalarda FMST [21] ve Computer Programs in Seismology [4] yazılımları kullanılmıştır. Şekillerin büyük kısmı Linux tabanlı GMT v5 [33] ve SAC [34] programları ile üretilmiştir. Bu araştırma, 106G159 no'lu TÜBİTAK-KAMAG, 111Y015 no'lu TÜBİTAK-1001 ve 2016.KB.FEN.013 no'lu DEÜ-BAP projeleri tarafından desteklenmiştir. Araştırma süresince bilgisayar altyapısından yararlandığımız Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Sismoloji Laboratuvarına (DEÜ SismoLab) ve program PASPA kapsamında Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Dirección General de Asuntos del Personal Académicos of Universidad Nacional Autónoma de México'ya teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yang, Y., Ritzwoller, M.H., Levshin, A.L., Shapiro, N.M., Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe, *Geophys. J. Int.*, 168(1), 259-274, 2007.
2. Delph, J.R., Biryol, C.B., Beck, S.L., Zandt, G., Ward, K.M., Shear wave velocity structure of the Anatolian Plate: anomalously slow crust in southwestern Turkey, *Geophys. J. Int.*, 202(1), 261-276, 2015.
3. Shirzad, T., Shomali, Z.H., Shallow crustal structure of the Tehran basin in Iran resolved by ambient noise tomography, *Geophys. J. Int.* 196(2), 1162-1176, 2014.
4. Herrmann, R.B., Computer programs in seismology: an evolving tool for instruction and research, *Seism. Res. Lett.*, 84(6), 1081-1088, 2013.
5. Witek, M., van der Lee, S., Kang, T.S., Rayleigh wave group velocity distributions for East Asia using ambient seismic noise, *Geophys. Res. Lett.*, 41(22), 8045-8052, 2014.
6. Choi, J., Kang, T.S., Baag, C.E., Three-dimensional surface wave tomography for the upper crustal velocity structure of southern Korea using seismic noise correlations, *Geosci. J.*, 13(4), 423-432, 2009.
7. Tezel T., Erduran M., Alptekin Ö., Crustal shear wave velocity structure of Turkey by surface wave dispersion analysis, *Ann. Geophys.*, 50 (2), 177-190, 2007.
8. Reilinger, R., McClusky, S., Paradissis, D., Ergintav, S., Vernant, P., Geodetic constraints on the tectonic evolution of the Aegean region and strain accumulation along the Hellenic subduction zone, *Tectonophysics*, 488(1-4), 22-30, 2010.
9. Polat, O., Ozyalin, S., WinFOC: A new software for focal mechanisms solution, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 345-360, 2018.
10. Gok, E., Chávez-García, F.J., Polat, O., Effect of soil conditions on predicted ground motion: Case study from Western Anatolia, Turkey, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 229, 88-97, 2014.
11. Yilmazer, S., Alacali M., Distribution of hot water resources and potentials of Izmir province, *Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey*, 1-5, 24-29 Nisan 2005.
12. Polat ,O., Ceken, U., Uran, T., Gok, E., Yilmaz, N., Beyhan, M., Koc, N., Arslan, B., Yilmaz, D., Utku, M., IzmirNet: A strong-motion network in metropolitan Izmir, Western Anatolia, Turkey, *Seism. Res. Lett.*, 80(5), 831-838, 2009.
13. Kaypak, B., Three-dimensional Vp and Vp/Vs structure of the upper crust in the Erzincan Basin (eastern Turkey), *J. Geophys. Res.*, 113, 1-20, 2008.
14. Kaypak, B., Gokkaya, G., 3-D imaging of the upper crust beneath the Denizli geothermal region by local earthquake tomography, western Turkey, *J. Volcanol. Geotherm.Res.*, 211-212, 47-60, 2012.
15. Salah, M. K., Şahin, S., Destici, C., Seismic velocity and Poisson's ratio tomography of the crust beneath southwest Anatolia: an insight into the occurrence of large earthquakes, *J. Seismol.*, 11(4), 415-432, 2007.
16. Salah, M. K., Şahin, Ş., Topatan, U., Crustal velocity and Vp/Vs structures beneath central Anatolia from local seismic tomography, *Arab. J. Geosci.*, 7(10), 4101-4118, 2014.
17. Bensen, G.D., Ritzwoller, M.H., Barmin, M.P., Levshin, A.L., Lin, F., Moschetti, M.P., Shapiro, N.M., Yang, Y., Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophys. J. Int.*, 169(3), 1239-1260, 2007.
18. Yao, H., van Der Hilst, R.D., de Hoop, M.V., Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis-1. Phase velocity maps, *Geophys. J. Int.*, 166(2), 732-744, 2006.
19. Calò, M., Kinnaert, X., Dorbath, C., Procedure to construct three-dimensional models of geothermal areas using seismic noise cross-correlations: application to the Soultz-sous-Forêts-enchanced geothermal site, *Geophys. J. Int.*, 194(3), 1893-1899, 2013.
20. Fallahi, M.J., Obermann, A., Lupi, M., Karyono, K., Mazzini, A., The plumbing system feeding the Lusi eruption revealed by ambient noise tomography, *J. Geophys. Res.:Sol EA*, 122(10), 1-14, 2017.
21. Li, Z., Ni, S., Zhang, B., Bao, F., Zhang, S., Deng, Y., Yuen, D.A., Shallow magma chamber under the Wudalianchi Volcanic Field unveiled by seismic imaging with dense array, *Geophys. Res. Lett.*, 43(10), 4954-4961, 2016.
22. Rawlinson, N., Sambridge, M., The fast marching method: and effective tool for tomographic imaging and tracking multiple phases in complex layered media, *Explor. Geophys.*, 36(4), 341-350, 2005.
23. Sethian J.A., A fast marching level set method for monotonically advancing fronts, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 93(4), 1591-1595, 1996.

24. Ozer, C., Ozyazicioglu, M., Gok, E., Polat, O., Imaging the crustal structure throughout the East Anatolian Fault Zone, Turkey, by local earthquake tomography, *Pure Appl. Geophys.*, 2018, <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2076-6>.
25. Stankiewicz, J., Weber, M. H., Mohsen, A., Hofstetter, R., Dead Sea Basin Imaged by ambient seismic noise tomography, *Pure Appl. Geophys.*, 169(2), 615-623, 2012.
26. Ozer C., Polat, O., 3-D crustal velocity structure of Izmir and surroundings, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(3), 733-747, 2017.
27. Özer Ç., Polat, O., Determination of 1-D (One-Dimensional) seismic velocity structure of Izmir and surroundings, *Journal of Science and Engineering of Dokuz Eylul University*, 19(55), 147-168, 2017 (Turkish with English abstract).
28. Ildem, F., The tectonic setting of Izmir Bay and its surroundings and their relations with the geothermal systems, MSc Thesis, Dokuz Eylul University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Izmir, 2005 (Turkish with English abstract).
29. Özer, Ç., Investigation of crustal structure using local earthquake tomography in Aegean Region of Turkey, PhD Thesis, Dokuz Eylul University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 2017.
30. Pamuk, E., Investigation of soil dynamic characteristics and modeling soil-bedrock interfaces of Bornova Plain and its surroundings (Eastern İzmir Bay / Western Turkey), PhD Thesis, Dokuz Eylul University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 2018.
31. Onay, Ş., Geophysical Investigations About Active Tectonics of the Izmir Inner Bay, PhD Thesis, Dokuz Eylul University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Izmir, 2012 (Turkish with English abstract).
32. Coskun, S., Dondurur, D., Ciftci, G., Aydemir, A., Drahor, M. G., Natural and Anthropogenic Submarine Morphologies Revealed by High Resolution Acoustic Data in the Gulf of Izmir, western Turkey, *Marine and Petroleum Geology*, 71, 211-224, 2016.
33. Wessel P., Smith W.H.F., GMT Version 5.1-Generic mapping tools graphics, Laboratory for Satellite Altimetry, NOAA/NESDIS/NODC, 123 p. 2004.
34. Goldstein, P., Dodge, D., Firpo, M., Minner, L., SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologist and engineers, invited contribution to "The IASPEI International handbook of earthquake and engineering seismology", Edited by Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., Kisslinger, C., Academic Press, London, United Kingdom, 2003.