



MARMARA BÖLGESİ P DALGA HIZI DEĞİŞİMİ VE KABUK KALINLIĞININ BELİRLENMESİ

İbrahim Hakan DEMİRSİKAN*, Şakir ŞAHİN, Erdinç ÖKSÜM

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*P Dalga Hızı,
Sismik Tomografi,
Sismik Hız,
Marmara Bölgesi,
Kabuk Yapısı.*

Öz

Bu çalışmada Marmara bölgesi ve Marmara denizi altındaki kabuk yapısının üç boyutlu P- dalgası tomografi görüntülerini belirledik. Bu işlem yapılırken Poisson Oranı Tomografi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle cisim dalgalarının varış zamanlarının parametrelerini hesaplanmıştır. Çalışma alanında 2007-2019 yılları arasında meydana gelen 121574 adet depremin P- dalgası varış zamanları bölgenin üç boyutlu hız yapısını belirlemek için kullanılmıştır. Başlangıç hız modeli olarak bir çok model ile dama tahtası çözünürlük testi uygulanmış en yüksek çözünürlüğü aldığımız hız modeli ile tomografi yöntemi yapılmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlardan, Marmara'nın orta kesiminde hızların düştüğü saptanmıştır. Genel olarak hızların derinliği yaklaşık olarak 15 km'den itibaren Sismik hızlar düşüş göstermektedir. Diğer çalışmalardan farklı olarak Kuzey Anadolu Fay Zonunun kolları üzerinde hangi segmentlerde P- dalga hızlarının düştüğü belirlenmiştir. Marmara bölgesinin ortalama Moho derinliği ise 28 km olarak saptanmıştır. Marmara bölgesinin kabuk yapısındaki bu düşük hızlı alanları belirlemek büyük depremler üretebilecek segmentlerin saptanması bakımından önemlidir. Bu da marmara bölgesinin kabuk yapısının belirlenmesini önemli kılmaktadır.

DETERMINATION OF MARMARA REGION P WAVE VELOCITY AND THE CRUSTAL THICKNESS

Keywords

*P wave velocity,
Seismic Tomography,
Seismic Velocity,
Marmara Region,
Crustal Structures.*

Abstract

In this study, we determined three-dimensional P- wave tomography images of the crustal structure of the Marmara region and under the Marmara Sea. Poisson Ratio Tomography method was used in this process. With this method, the parameters of the arrival times of the body waves were calculated. The P- wave arrival times of 121574 earthquakes that occurred in the study area between 2007 and 2019 were used to determine the three-dimensional velocity structure of the region. As the initial velocity model, the checkerboard resolution test was applied with many models, and the tomography method was performed with the velocity model, where we got the highest resolution. From the results we obtained, it was determined that the velocities decreased in the central part of Marmara. In general, the seismic velocities show a decrease from the depth of the velocities approximately 15 km. Unlike other studies, it was determined in which segments the P-wave velocities decreased on the branches of the North Anatolian Fault Zone. The average Moho depth of the Marmara region is 28 km. Identifying these low-velocity areas in the crustal structure of the Marmara region is important in terms of identifying segments that can produce large earthquakes. This makes it important to determine the crustal structure of the Marmara region.

Alıntı / Cite

Demirsikan, İ.H., Şahin, Ş., Öksüm, E., (2022). Marmara Bölgesi P Dalga Hızı Değişimi ve Kabuk Kalınlığının Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 110-125.

* İlgili yazar / Corresponding author: ibrahimdemirsikan@sdu.edu.tr, +90-246-211-1352

| Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number) | Makale Süreci / Article Process | |
|--|---|------------|
| İ. H. Demirsikan, 0000-0003-2332-4035 | Başvuru Tarihi / Submission Date | 10.05.2021 |
| Ş. Şahin, 0000-0001-6345-5270 | Revizyon Tarihi / Revision Date | 09.09.2021 |
| E. Öksüm, 0000-0001-8386-9411 | Kabul Tarihi / Accepted Date | 05.10.2021 |
| | Yayın Tarihi / Published Date | 23.03.2022 |

1. Giriş (Introduction)

Sismik tomografi'nin kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Kabuk ve üst mantonun üç boyutlu olarak hız yapısını ortaya çıkarmak amacıyla yerel veya bölgesel olarak uygulanabilir bir yöntemdir. Üç boyutlu sismik tomografi özellikle deprem etkinliğinin fazla olduğu ve volkanik aktivitenin yoğun olduğu bölgelerde başarıyla uygulanmaktadır. Yatay yönde kabuk ve üst mantodaki heterojenitenin yüksek olduğu genç veya aktif volkanlar ve jeotermal bölgeler, telesismik ve yerel depremleri kullanan sismik tomografi yöntemleri için uygun alanları oluşturmaktadır (Iyer, 1984). Marmara bölgesinin aktif sismisitesinden dolayı Sismik tomografi yöntemi başarılı sonuçlar vermektedir. Marmara bölgesinde son çeyrek yüzyılda 17 Ağustos 1999 Gölcük ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri gibi iki önemli deprem meydana gelmiştir. Bu aktivitenin son çeyrek yüzyılda arttığı aşikardır. Son 10 yıla baktığımızda Marmara Denizi'ni 7 Haziran 2012 tarihinde Marmara Ereğlisi-Tekirdağ açıklarında 5.1 (Ml) büyüklüğünde ve 26 Eylül 2019 tarihinde Silivri açıklarında büyüklüğü 5.7 (Mw) olan 2 adet deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin iki segment arasında (Kumburgaz-Tekirdağ segmenti) olduğu gözlemlenmiştir. Bu oluşan depremler bölgenin kabuk yapısının incelenmesini önemli kılmaktadır. Bu çalışmada ise Marmara bölgesindeki Kuzey Anadolu Fay Zonunun kolları üzerindeki segmentlerin sismik hız değişimlerini belirleme amacı taşımaktadır.

Çalışma bölgesinde yapılan Nakamura vd. (2002), Karabulut vd. (2003), Barış vd. (2005) Tunç (2008), Koulakov vd. (2009), Bohnhoff vd. (2017) ve Gholamrezaie vd. (2019) diğer çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar yeni yapılan çalışmalara ışık tutmakta ve gün geçtikçe bu yeni çalışmaların sayısı artmaktadır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Zhao vd., (1992) tarafından yapılan çalışmada sismik tomografi yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışma Tomografik Yöntemimizin temel taşı oluşturulmaktadır. Bir dizi karmaşık şekilli sismik hız süreksizliği ve modelleme alanındaki hızlarda üç boyutlu değişimler ile genel bir hız yapısına uyum sağlamak için geliştirilmiş bir yöntemdir. Snell yasasını yinelemeli olarak kullanan etkili bir üç boyutlu ışın izleme algoritması geliştirilmiştir. Bu yöntem, kuzeydoğu Japonya'nın altındaki P ve S dalgası tomografik görüntülerini incelemek için 470 sığ ve orta derinlikli depremlerden 18.679 varış süresine uygulanmıştır. Pasifik plakasındaki dalma batma zonunun belirlenmesi için ilk P ve S dalgası varış zamanlarına ek olarak, Moho'da dönüşüme uğrayan SP ve PS fazları kullanılmıştır. 200 km derinliğe kadar yüksek çözünürlüklü P ve S dalgası tomografik görüntüleri belirlenmiştir. Kabuk ve üst mantoda P dalgası için % 6 ve S dalgası için % 10 olan büyük hız varyasyonları ortaya çıktığını öne sürmüşlerdir. Kabukta aktif volkanların altında düşük hız bölgeleri bulunduğu ve düşük pasif plakaya karşılık gelen yüksek hızlı bir bölge açıkça tanımlanmıştır.

Nakamura vd. (2002) tarafından 1999 yılında olan magnitudü 7.4 Mw olan İzmit depremi odağının batısında odak uzaklığı ve odak mekanizma çözümleri ile üç boyutlu P dalga hızı yapısını belirlemişlerdir. P- dalgasından elde edilen hız yapısı, ana şok odağının batısında belirgin hız değerlerinin düşük olduğu bir alan tespit etmişlerdir.

Karabulut vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada KAFZ'nun Marmara Denizi'ndeki kollarının ve tektonik olarak aktif Çınarcık Havzası'nın 2-B hız modelini öne sürmüşlerdir. Doğu Marmarayı kapsayan 10'km derinliğe kadar olan 2 boyutlu tomografik sismik hız görüntüsünü elde etmişlerdir. Bu hız modeli'nin 7 km kabuk derinliğine kadar önemli heterojenlikler gösterdiğini öne sürmüşlerdir.

Barış vd. (2005) tarafından Marmara Bölgesi'nde 1985 - 2002 yılları arasında oluşan tüm depremlerden elde edilen faz okumalarıyla bölgenin 3 boyutlu P dalgası hız yapısı incelenmiştir. Doğuda yüksek hız alanların var olduğu İzmit ve kuzeyinde yüksek hızların görüldüğü fakat Marmara Denizi'nin orta kesiminde hızların düştüğü görülmektedir. Bu düşük hız 15 km'lik derinlik bölgelerinde hakim olduğunu söylemişlerdir. Buda bizim sonuçlarımızla uyum göstermektedir.

Tunç (2008)'tarafından Marmara Bölgesi için tomografik ters çözüm yöntemi ile üç boyutlu hız yapısı belirlenmiştir. Çalışmada, 1993-2007 yılları arasında Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından işletilen istasyonlara ait deprem verileri kullanılmıştır. KAFZ'nu üzerinde hız yapılarının oldukça ani yanal değişimler gösterdiği görülmektedir. Fay boyunca kırıklı yapı nedeniyle beklenenden

daha fazla P ve S hızı dağılımları gözlenmektedir. Fayın İzmit Körfezi'ne girdiği bölgede, hem P hem de S dalga hızlarında artış olduğunu söylemişlerdir.

Koulakov vd. (2009)' tarafından yapılan çalışmada Kuzey Anadolu fay zonunun (KAFZ) batı kısmının altındaki kabuk yapısını araştırmışlardır. Düşük hız ve yüksek zayıflama modelleri çoğunlukla KAFZ'nin kırılma bölgeleri ile ilişkilidir. Ana tortul havzaların (örn. Adapazarı, Düzce ve Kuzuluk) altında da düşük hızlar gözlenir. Yüksek hız ve düşük zayıflama modelleri, rijit olduğu varsayılan bloklarla (Kocaeli, Armutlu ve Almacık blokları) ilişkili olduğu öne sürülmüştür.

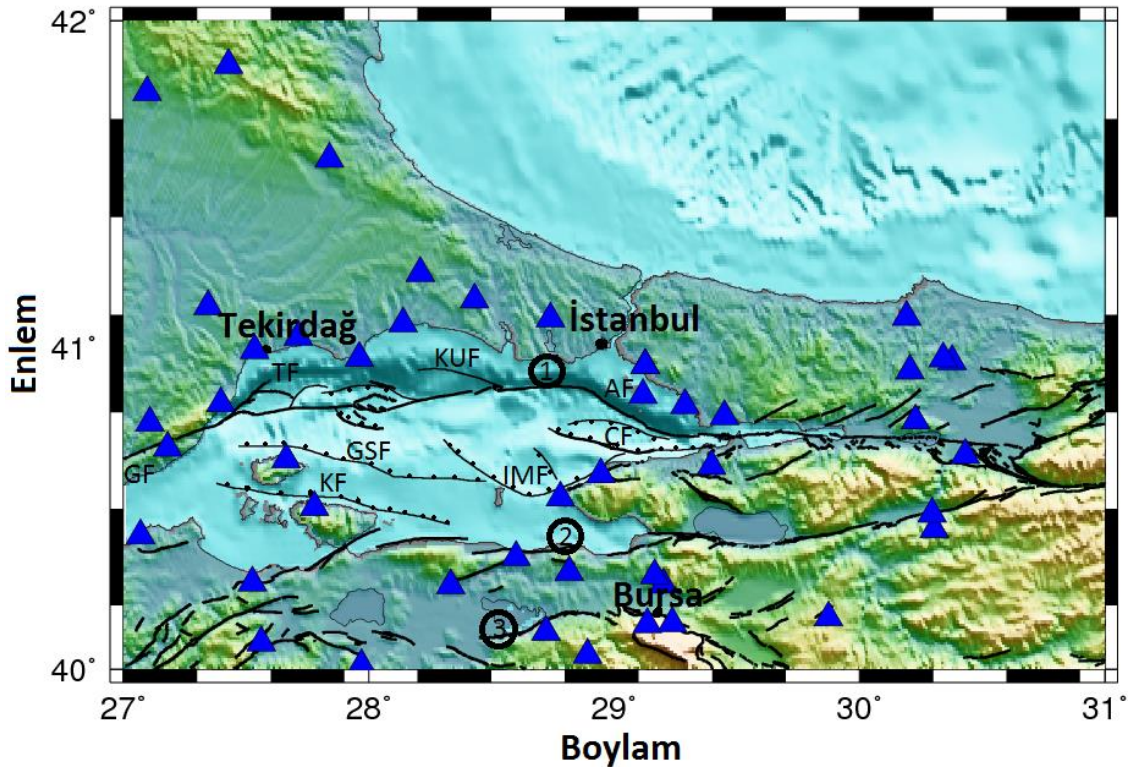
Bohnhoff vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, yoğun sismik aktivite ve hasar yapıcı deprem yaratma potansiyeli göz önüne alındığında, KAFZ'nun batı kısmı ciddi bir doğal tehlike oluşturmaktadır olduğu ortaya konulmuştur. Bu bölgedeki uzun vadeli projelerden biri, Türkiye'nin ilk sondaj sismometre ağı projesi olan GONAF (Kuzey Anadolu Fayı Jeofizik Kuyu Gözlemevi) dir. GONAF, bölgedeki mikrosismik aktiviteyi tespit etmek, incelemek ve izlemek amacıyla kurulmuştur. Aynı zamanda Kuzey Anadolu'nun batı bölümünü kırması beklenen büyük bir Marmara depreminden önce, sırasında ve sonrasında fiziksel süreçleri gözlemlemiştir.

Gholamrezaie vd. (2019) tarafından Kuzey Marmara Denizi'nin P-dalga hızları heterojenitesi ilk varış zamanları kullanılarak ters çözüm tekniği ile üç boyutlu tomografik olarak tespit edilmiştir. Yerel deprem tomografisi için 3 boyutlu bir başlangıç modeli oluşturmuşlardır. Elde edilen özelliklerin güvenilirliği dama tahtası testleri ayrıca derin penetrasyonlu çok kanallı sismik profiller, geniş açılı yansıma ve kırılma modeli profiller ile karşılaştırılmalı olarak kontrol etmişlerdir. Sonuç olarak KAFZ kuzey kolunun Tekirdağ ve Adalar segmentlerinin altında gravite değerlerinin yükseldiğini bu yükselmenin nedeninin manto sokulumu olabileceğini öne sürmüşlerdir. Bizim çalışmamızda ise KAFZ kuzey kolunun Tekirdağ ve Adalar segmentlerinin altında hızların düştüğü görülmektedir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Çalışma Alanı (Study Area)

Çalışma alanı, Marmara Bölgesi'nin 40°K- 42° K enlemleri ve 27°D – 31°D boylamları ile sınırlanan alandır. Bölgede Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne (KRDAE) ait olan 38 adet kayıt istasyonu bulunmaktadır (Şekil 1).



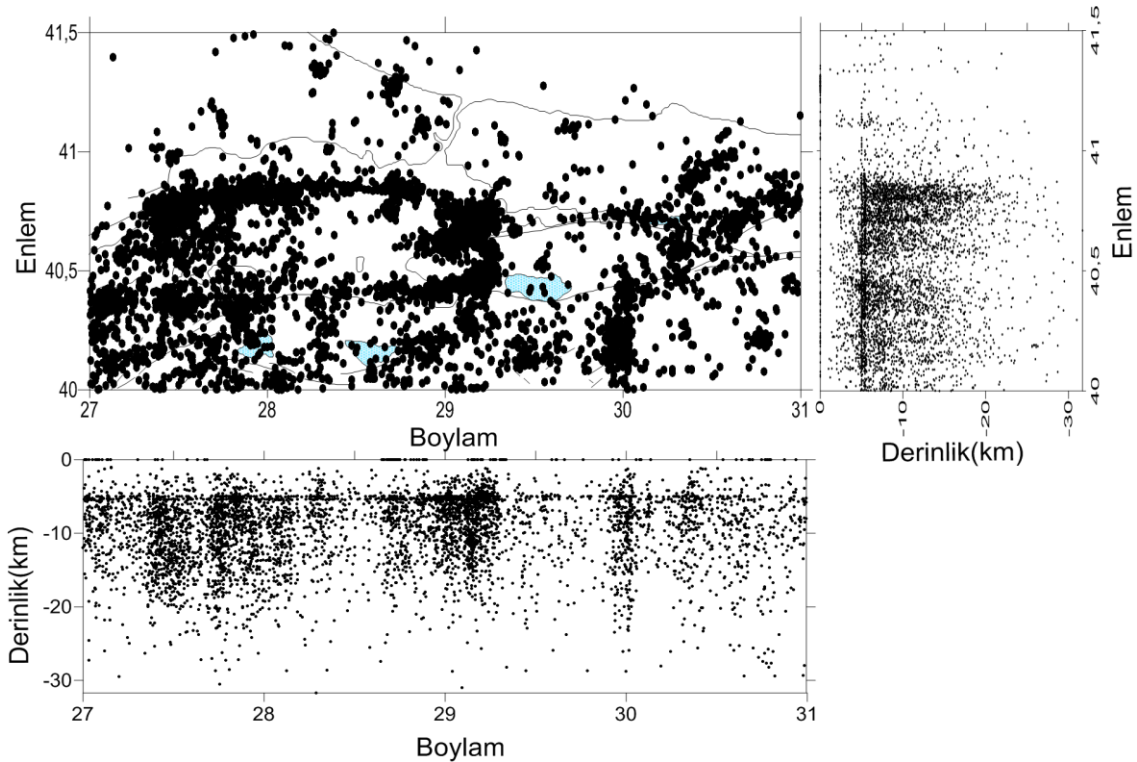
Şekil 1. Çalışma alanı ve Marmara Bölgesi tektonik unsurları (MTA, 2013). Bölgesinin genel tektoniğini oluşturan kuzey, orta ve güney kolları sırasıyla 1, 2 ve 3 numara ve siyah çizgi ile gösterilmiştir. Burada, GF; Ganos Fayını, TF; Tekirdağ fayını, KUF; Kumburgaz fayını, AF; Adalar fayını, KF; Kapıdağ fayını, GSF; Güney sınır fayını, IMF; İmrallı fayını, ÇF; Çınarcık faylarını ifade etmektedir. Mavi üçgenler bölgedeki kayıt istasyonlarını göstermektedir (The study area and the tectonic elements of the

Marmara Region (MTA, 2013). The northern, middle and southern branches that make up the general tectonics of the region are shown with 1, 2 and 3 numbers and black lines. GF; Ganos Fault, TF; Tekirdag fault, KuF; Kumburgaz fault, AF; Adalar fault, KF; Kapıdağ fault, GSF; Southern boundary fault, İmF; İmralı fault, CF; It represents the Çınarcık faults. Blue triangles indicate registration stations in the area)

Çalışma alanı içerisinde Kuzey kol, doğudan batıya doğru Gölcük-Karamürsel-Darıca, Adalar, Avcular, Kumburgaz, Tekirdağ ve Ganos olmak üzere altı parçadan oluşmaktadır. Orta kol ise, Geyve- Mekece- İznik Gölü güneyi-Gemlik Körfezine kadar uzanmakta olup, Kapıdağ Yarımadasının Güneyine doğru KD-GB doğrultusunda ilerler(Şengör, 1980). Bu kol doğudan batıya doğru Gençali, Gemlik, İznik-Mekece, Zeytinbağı, Bandırma, Edincik ve Sinekçi fayları olmak üzere yedi parçadan oluşmaktadır. Güney kol ise, Ulubat, Edremit, Yenice-Gönen, Manyas ve ve Biga-Çan fay zonlarından oluşur (MTA, 2013).

3.2. Veri ve Yöntem (Data and Method)

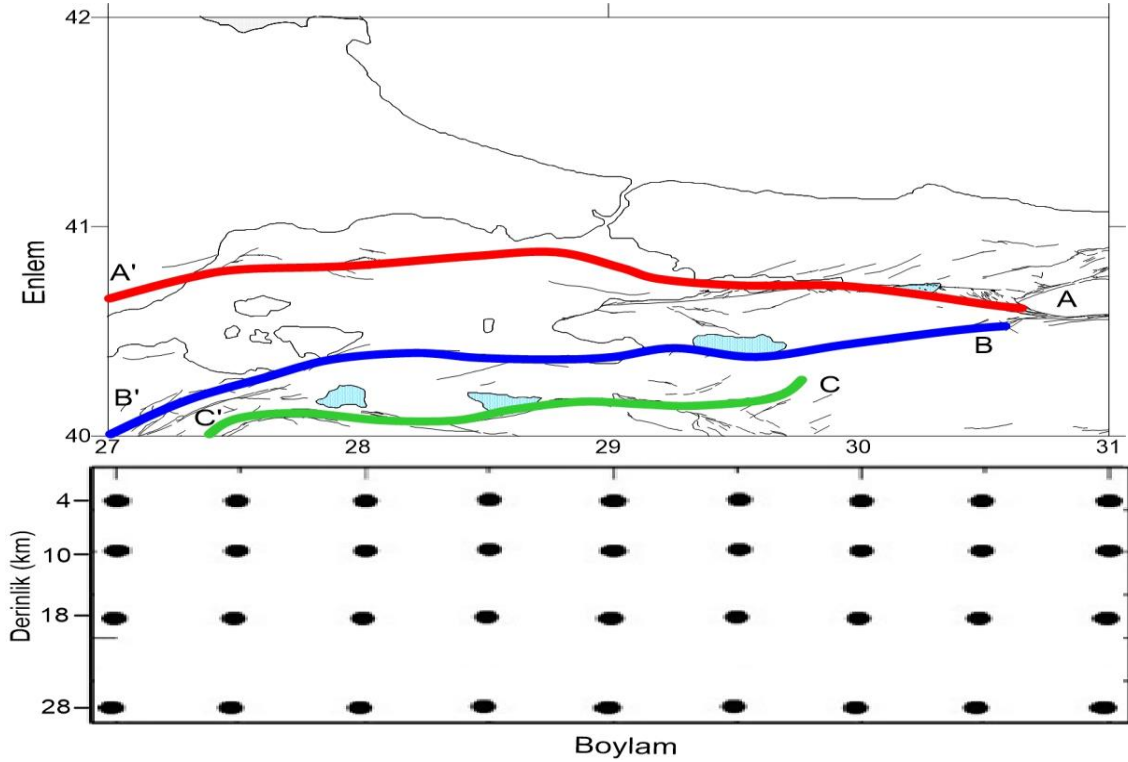
Marmara Bölgesi'nde 40°K- 42°K enlemleri ve 27°D – 31°D boylamları arasında 2007 - 2019 yılları arasında oluşan 132956 adet depreme ait 112574 adet P dalgası varış zamanı verisi kullanılmıştır. (Şekil 2). Bu veriler Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne (KRDAE) ait olan slusal sismik ağa bağlı, toplam 38 adet deprem istasyonu tarafından kaydedilmiştir(Şekil 1). Kullanılan ağa bağlı istasyonların örnekleme aralığı 50 Hz'dir. Veri kalitesi için sadece 4 istasyon ya da daha fazlası tarafından kaydedilen kaliteli veriler, Tomografi yönteminde kullanılmıştır.



Şekil 2. Çalışma bölgesindeki depremler verileri ve depremlerin derinlik dağılımları (Earthquake data in the study area and depth distribution of earthquakes)

Tomografik yöntemler cisim dalgaları olan P ve S dalgalarının varış zamanlarını analiz eder. Bu analiz sırasında oluşturulan modelin parametrelerini belirlemek tomografik yöntemlerin ana görevidir (Thurber ve Aki, 1987). Tomografik yöntem, kabuk ve manto yapısını belirlemek için modelin değerleri saptanır. Bu yapının geometrik şekli parametrelendirilirken öncelikli olarak bu şekil belirlenmeye çalışılır (Salah vd., 2007, Akyol vd., 2006, Soyuer, 2012). Hız dağılımı derinlikle değişimi belirlemek için iki boyutlu grid ağı oluşturulur (Şekil 3). Bu grid ağının derinlik dağılımındaki noktalardaki hız değişimleri belirlenir. Daha sonra bu noktalardaki hız değişimleri bilindiği zaman, grid ağı içerisinde herhangi bir noktanın hız değeri, o noktanın çevresindeki dört adet düğümünün uzaklığına bağlı oransal olarak interpolasyonu alınarak saptanır. Daha sonra bu oransal interpolasyon fonksiyonu kullanılarak gerçek hızlar hesaplanır (Zhao vd., 1992; Zhao vd., 1994; Zhao, 2001; Salah ve Zhao 2003; Zhao, 2004). Kullandığımız program TOMOG3D bilgisayar programı Fortran 77 dilinde yazılan programın arayüz programı olan TOMOTOOLS programıdır. Bu program yerel ağı tarafından kaydedilen depremlerin varış zamanlarını kullanarak bölgedeki hız değerlerini hesaplar. Tüm bu yapılan işlemlerin sonucunda kabuk ve üst manto için üç boyutlu bir sismik hız modeli üretmiş olur. Daha önce yapılan Yerel Deprem

Tomografisi (LET) algoritmaları ile benzerliği olsa da, TOMOTOOLS karmaşık hız süreksizlikleri için gerçeğe yakın bir modelleme yapması ile diğer algoritmalarından ön plandadır. Aynı zamanda hızlar arasındaki üç boyutlu varyasyonların elde edilmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. TOMOTOOLS'un bir önemli artışı daha güçlü ve verimli bir üç boyutlu ışın izleme güzergahlarını kapsamaktadır (Farouk ve Zhao, 2006).



Şekil 3. P- dalga hızı Tomografisi ve Checker Board analizi için oluşturulan derinlik grid düğümleri ve çalışma alanındaki KAFZ kolları üzerinden alınan A-A', B-B' ve C-C' kesitleri (A-A', B-B' and C-C' sections taken over the depth grid nodes and NAFZ arms in the study area created for P-wave velocity Tomography and Checker Board analysis)

A-A' kesiti Kuzey Anadolu Fay Zonunun kuzey kolundaki Düzce-Karamürsel segmentinden başlayıp Ganos segmentine kadar uzanan bir kesit, B-B' kesiti KAFZ orta kolundaki İznik-Mekece segmentinden başlayıp Biga-Çan kadar uzanan, C-C' kesiti ise KAFZ güney kolundaki Bursa-İnegöl segmentinden başlayıp Evciler segmentine kadar uzanan bir kesittir. Checkerboard ve Tomografi sonuçlarını alacağımız derinlik düğümleri 4km, 10km, 18km ve 28 km olarak gridlenmiştir (Şekil 3).

3.3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

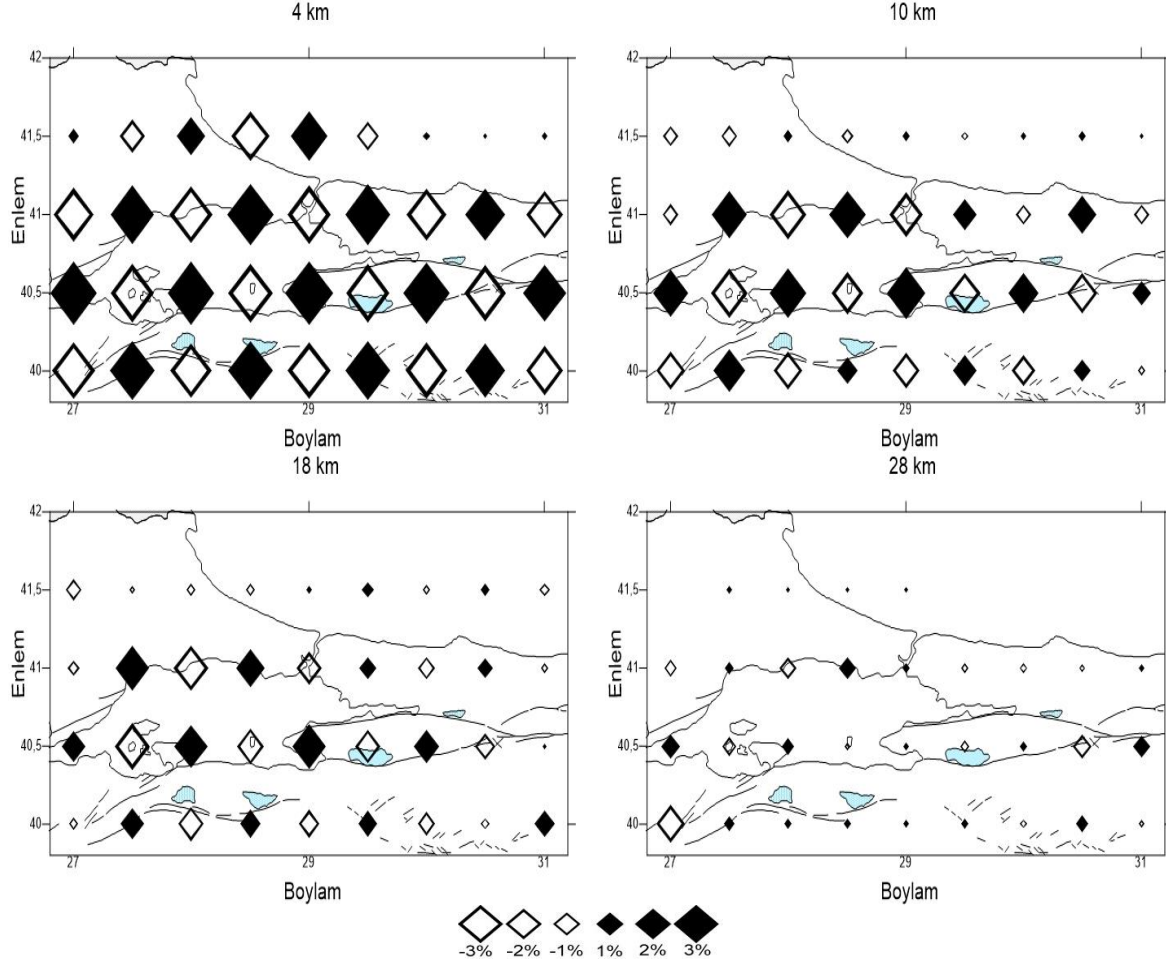
Sismik tomografi çalışmalarında, dama tahtası çözünürlük testleri, çözünürlüğün nerelerde yeterli, nerelerde zayıf olduğu ve yapılacak yorumun anlamlılığı ile güvenilirliği konusunda önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu testler, çözümün doğruluğunun belirlenmesinde önemli bir yere sahip olup, çözünürlüğün yeterliliğinin değerlendirilmesi için geliştirilen yöntemlerdir. Tomografi çalışmalarında çözünürlüğü kontrol etmek için en yaygın sentetik test olarak Dama tahtası modeli kullanılır. Bu tez çalışmasında yapay testlerin bir türü olan CRT (dama tahtası çözünürlük testi) kullanılmıştır. CRT aynı zamanda bir doğruluk testidir. Bu test Humphreys ve Clayton (1988) tarafından geliştirilmiştir. Ard arda gelen pozitif ve negatif olacak şekilde belirlenen hız değişimi çalışma bölgesi için üç boyutlu olacak şekilde tasarlanır. Bu testte veri setine ters çözüm uygulanarak çözünürlük haritaları elde edilir ve çözünürlüğün yüksek ve zayıf olduğu yerler ortaya konulur.

Bu çalışmada, çalışma alanımız için en uyumlu hız modelini belirlemek yani modelimize en uygun hız değerini seçmek için, bölgede daha önce yapılmış jeofizik çalışmalarda tespit edilen hız ve derinlik modelleri kullanarak dama tahtası çözünürlük modelleri elde edilmiştir. Akyol vd. (2006), Barış vd. (2002), Horasan vd. (2002), Nakamura vd. (2002), Özalaybey vd. (2002) ve Çevikbilen vd. 2011 tarafından üretilen hız modelleri kullanılarak Marmara Bölgesi için belirli derinliklerde dama tahtası çözünürlük haritaları oluşturulmuştur.

Checkerboard modeli başlangıç hız değerlerimizi; bölge için, Tablo 1' deki Akyol vd. 2006 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

Tablo 1. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Akyol et al. 2006)

| Derinlik (km) | Vp (km/sn) | Vs (km/sn) |
|---------------|------------|------------|
| 0 | 3.86 | 2.20 |
| 7 | 5.99 | 3.42 |
| 25 | 6.20 | 3.54 |
| 81 | 8.10 | 4.62 |



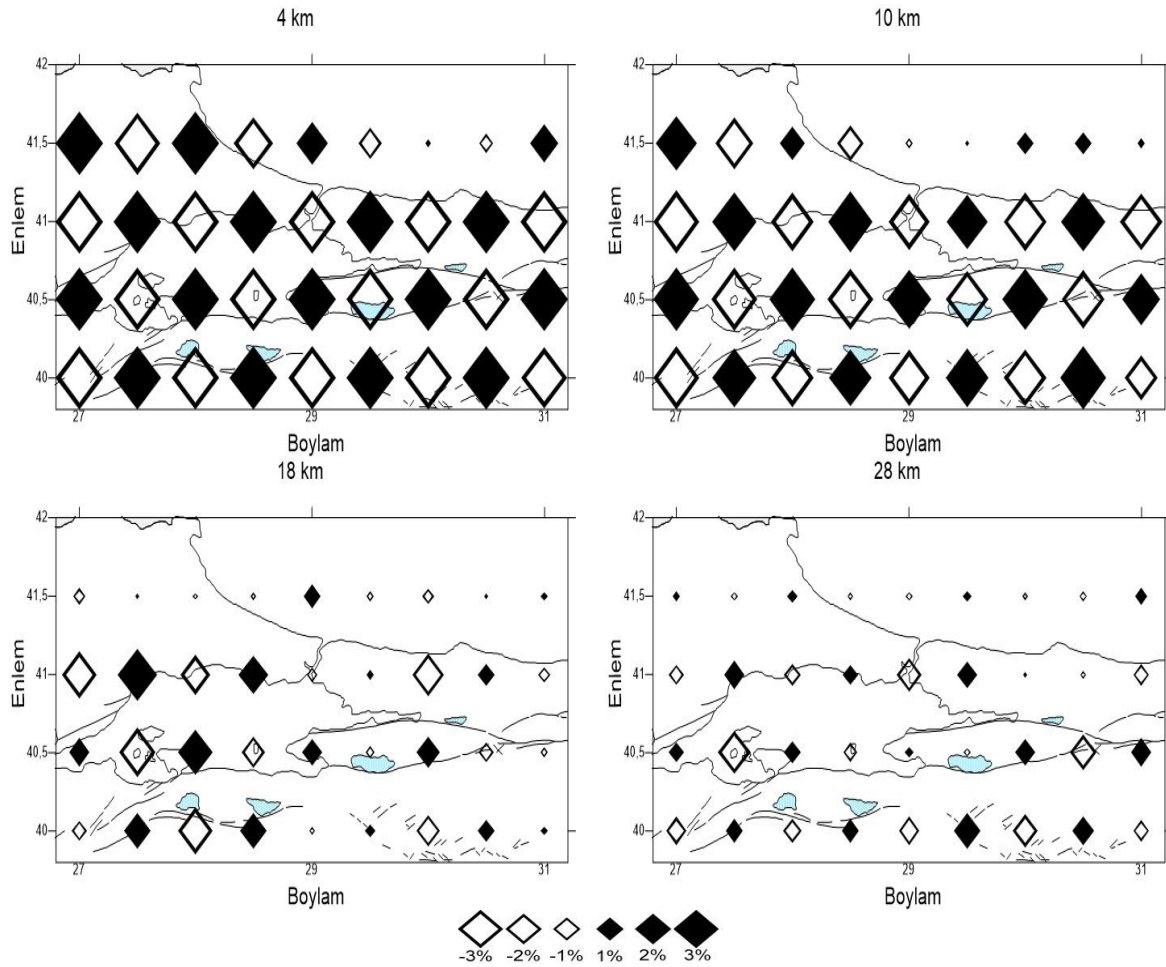
Şekil 4. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. The scale of change is given below)

Akyol vd. 2006 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanılarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında 10 km ye kadar iyi çözünürlük vermesine rağmen 18 km civarında çözünürlük düşmekte ve daha derinlerde iyice azalmaktadır (Şekil 4).

Checkerboard modeli başlangıç hız değerlerimizi; bölge için, Tablo 2' deki Barış vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

Tablo 2. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Barış et al. 2002)

| Derinlik (km) | Vp (km/sn) | Vs (km/sn) |
|---------------|------------|------------|
| 0.0 | 4.50 | 2,50 |
| 5.0 | 6.00 | 3,50 |
| 30.0 | 8.00 | 4.50 |
| 90.0 | 8.50 | 5.00 |



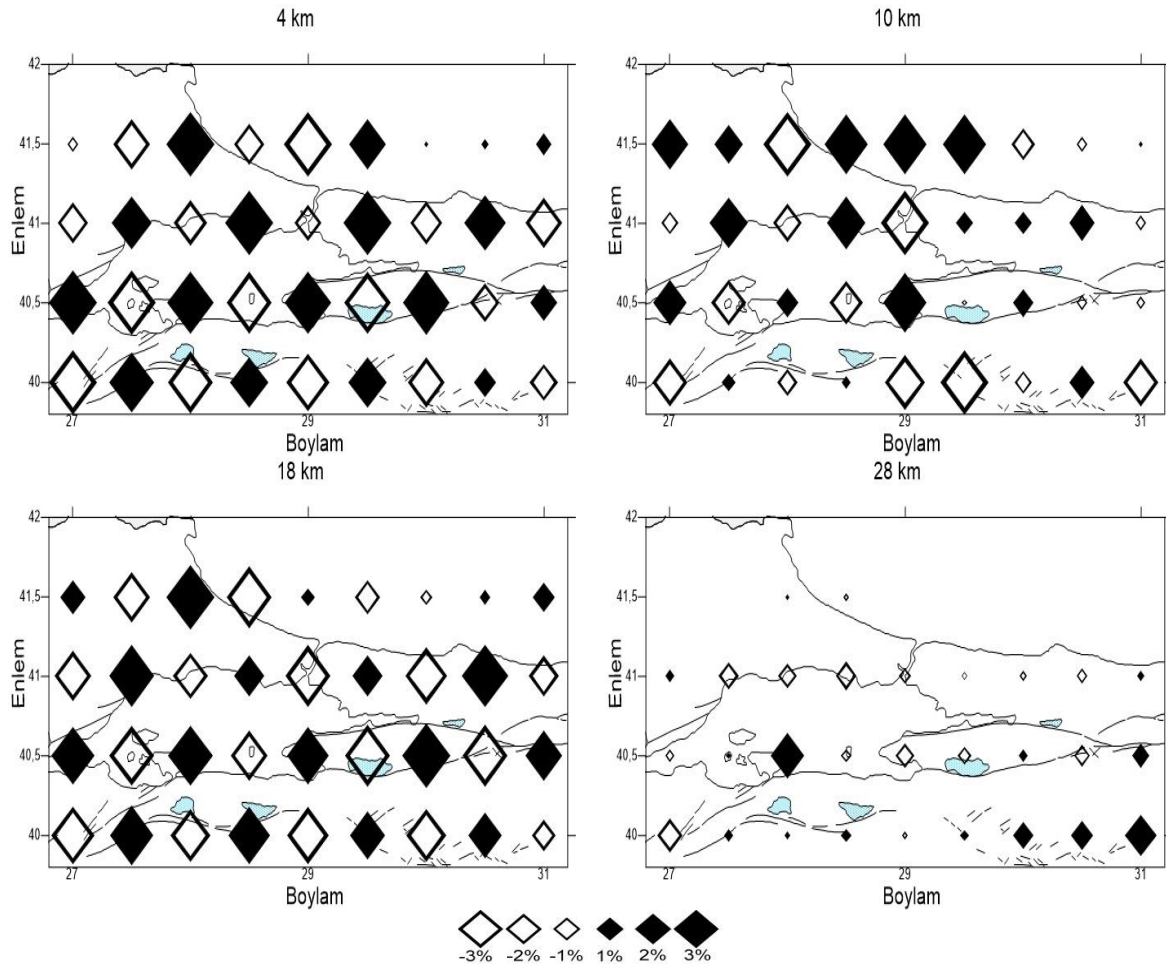
Şekil 5. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. Change scale is given below)

Barış vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanılarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında yine Akyol vd. 2006 gibi 10 km ye kadar çözünürlüğün çok iyi olmasına rağmen 18 km civarında çözünürlük düşmekte ve daha derinlerde iyice azalmaktadır (Şekil 5).

Checkerboard modeli başlangıç hız değerlerimizi; bölge için, Tablo 3' deki Horasan vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

Tablo 3. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Horasan et al. 2002)

| Derinlik (km) | V _p (km/sn) | V _s (km/sn) |
|---------------|------------------------|------------------------|
| 0.0 | 3.50 | 2,20 |
| 4.0 | 5.90 | 3,40 |
| 17.5 | 6.20 | 3.60 |
| 32.0 | 8.00 | 4.40 |



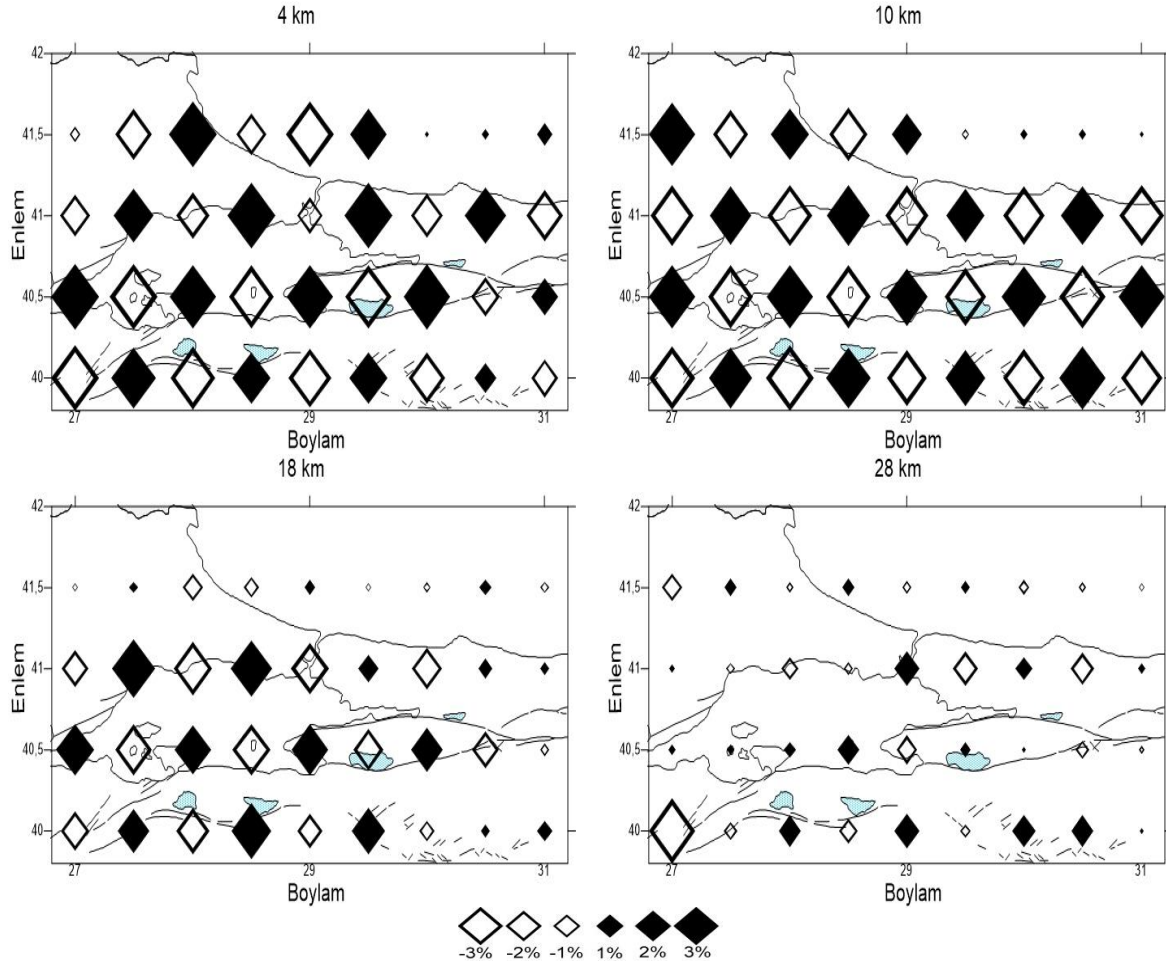
Şekil 6. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. Change scale is given below)

Horasan vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanılarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında 10 km ve civarında modelimize uymayan pozitif hızlarda ard arda sıralanma görülmektedir. 18 km civarında çözünürlüğün iyi olmasına rağmen 28 km'ye kadar çözünürlük düşmektedir (Şekil 6).

Checkerboard modeli başlangıç hız değerlerimizi; bölge için, Tablo 4' deki Nakamura vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

Tablo 4. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Nakamura et al. 2002)

| Derinlik (km) | V _p (km/sn) |
|---------------|------------------------|
| 1.0 | 3.50 |
| 7.0 | 5.70 |
| 24.0 | 6.80 |
| 81.0 | 7.80 |



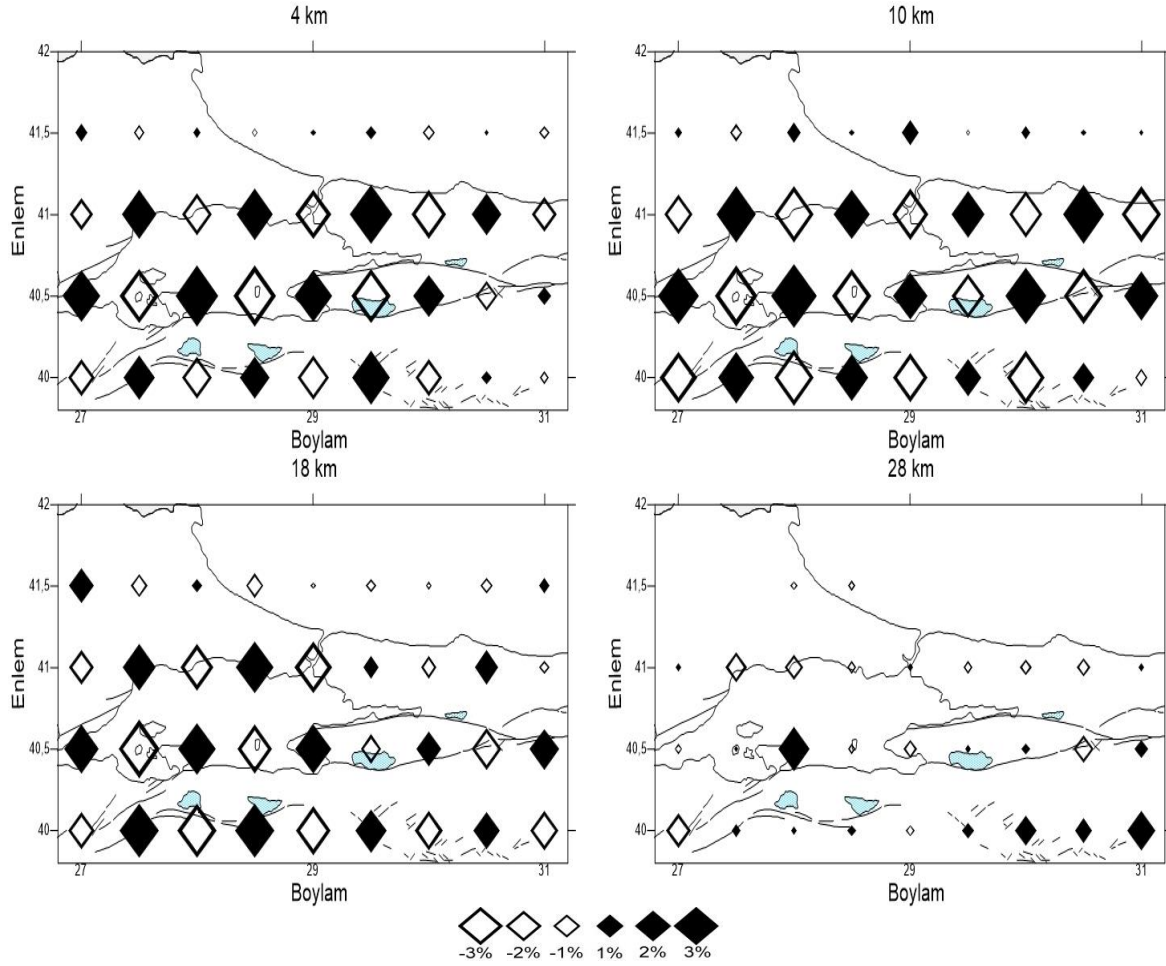
Şekil 7. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. Change scale is given below)

Nakamura vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanılarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında 10 km ve civarında iyi çözünürlük vermekte fakat 18 km civarında çözünürlük nispeten iyi olmasına rağmen 28 km'ye kadar çözünürlük bozulmakta ve düşmektedir (Şekil 7).

Checkerboard modeli başlangıç hız değerlerimizi; bölge için, Tablo 5' deki Özalaybey vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

Tablo 5. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Özalaybey et al. 2002)

| Derinlik (km) | V _p (km/sn) | V _s (km/sn) |
|---------------|------------------------|------------------------|
| 0.0 | 2.90 | 1.68 |
| 1.0 | 5.70 | 3.29 |
| 6.0 | 6.10 | 3.53 |
| 20.0 | 6.80 | 3.93 |



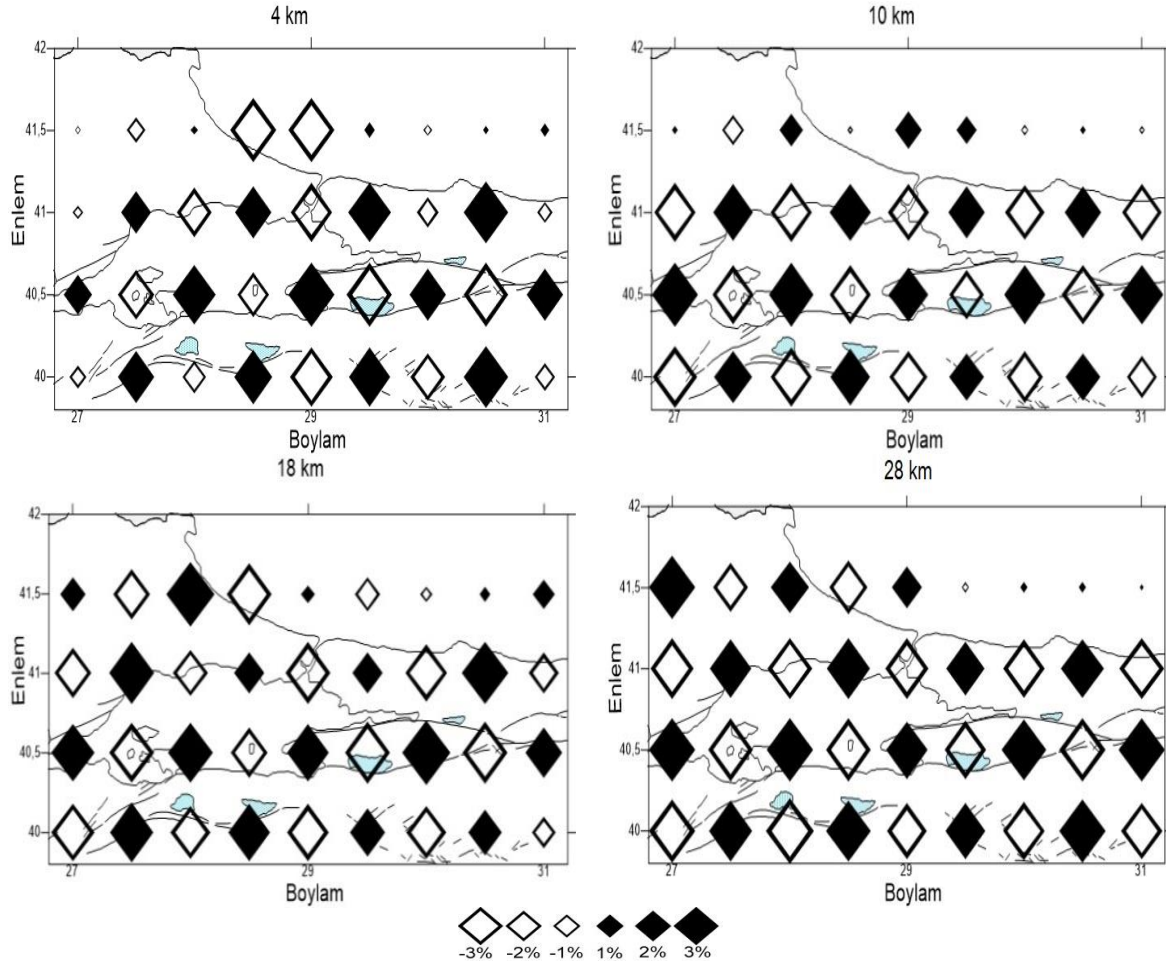
Şekil 8. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. Change scale is given below)

Özalaybey vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında 18 km ve civarında kadar olan derinliklerde iyi çözünürlük vermekte fakat 28 km civarında çözünürlük yok denecek kadar bozulmakta ve düşmektedir (Şekil 8).

Checkerboard modeli için başlangıç hız değerlerimizi bölge ile uyumlu olduğumu düşündüğümüz Tablo 6' deki Çevikbilen vd. 2011 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

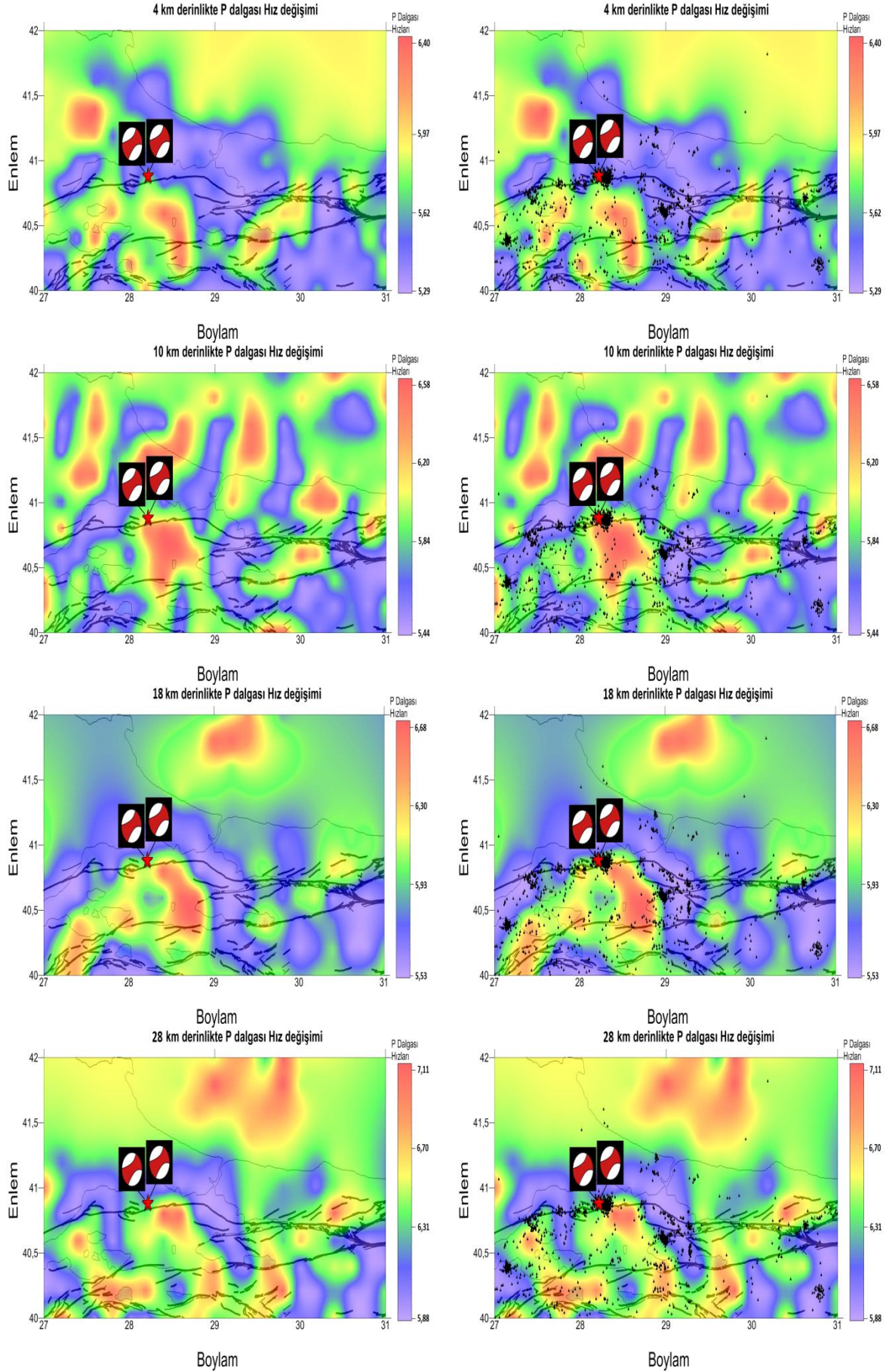
Tablo 6. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Çevikbilen et al. 2011)

| Derinlik (km) | Vp (km/sn) | Vs (km/sn) |
|---------------|------------|------------|
| 0 | 3.86 | 2.20 |
| 7 | 5.99 | 3.42 |
| 25 | 6.20 | 3.54 |
| 81 | 8.10 | 4.62 |



Şekil 9. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. Change scale is given below)

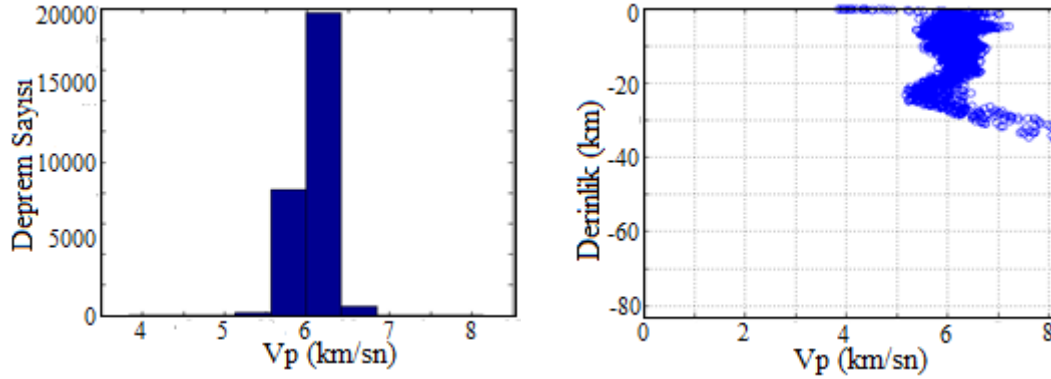
Çevikbilen vd. 2011 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanılarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında tüm grid düğüm derinliklerinde 4km, 10km, 18km ve 28km için çözünürlüklerin yüksek olduğu gözlemlenmektedir. 4 km ve civarında çalışma bölgesinin batısında yüzey jeolojisinden kaynaklı çözünürlük az düşse de, dama tahtası çözünürlük testi için +3 ile +3 arasında değişen çözünürlük farkları diğer modellere göre belirgin şekilde iyi görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 10. Sırası ile 4, 10, 18 ve 28 km derinlikler için P- dalga hız değişimleri. Siyah noktalar son 1 yıl içinde oluşan depremleri gösterirken 24 ve 26 Eylül 2019 tarihlerinde meydana gelen magnitüdü 5 ve üzeri iki adet depremin fay mekanizma çözümleri kırmızı-beyaz toplanla gösterilmiştir. Pdalga hızları sağdaki renk sıkalasında gösterilmiştir (P-wave

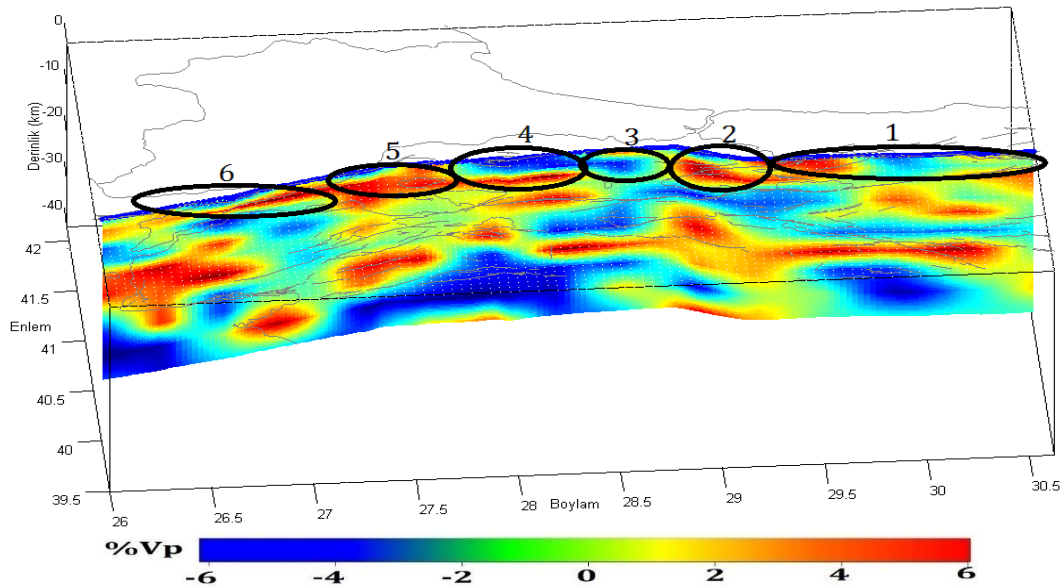
velocity variations for depths of 4, 10, 18 and 28 km. The black dots show the earthquakes that have occurred in the last 1 year, the fault mechanism solutions of the two earthquakes with a magnitude of 5 and above that occurred on September 24 and 26, 2019 are shown with red-white balls. Pwave speeds are shown in the right color scale)

Tomografi sonuçlarına 18km derinlikte P dalgası hızlarında genel bir düşüş yaşandığı gözlemlenmektedir. Daha sonra 25 km'den sonra P dalga hızının yüksek artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Oluşan depremler P dalgasının yüksek hızdan düşük hıza geçiş bölgelerinde kümeleştiği gözlemlenmiştir(Şekil 10).



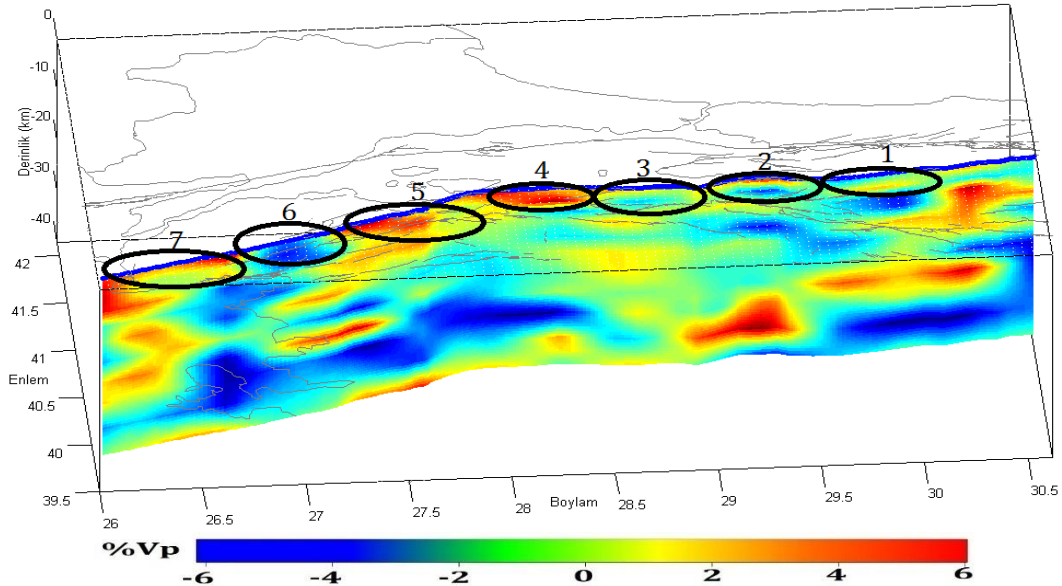
Şekil 11. P dalgası hızı ile deprem sayısı arasındaki ilişki ve P dalga hızının Derinlik ile değişimleri grafikleri (Graphs of the relationship between P wave velocity and the number of earthquakes and the variation of P wave velocity with Depth)

Şekil 11'de gerçek hız değerleri ile deprem sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Marmara Bölgesinde depremler P dalgası hızının 3.5 ila 8.3 km/sn aralığında olan bölgelerde olduğu tespit edilmiştir. Ancak en fazla depremin olduğu alan P dalgası için 5 ila 7 km/s'dir. P dalga hızının derinlik ile değişimleri grafiği depremlerin odak derinliği ile P dalga hızları arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Depremler yüzeye yakın alanlarda düşük hızlı alanlarda oluşmakta ve geniş alana yayılmaktadır. Ancak derine doğru indikçe hızın daha yüksek olduğu alanlarda meydana gelmektedir. 28-32 km derinlikten sonra alt kabukta depremlerin P dalgası hızının sıkışmanın olduğu bazı yerlerde 7 ila 8.3 km/sn arasında değişen alanlarda meydana geldiği tespit edilmiştir. P dalga hızlarının 15 km ye kadar artış gösterdiği daha sonrasında ise 15 km den sonra genel bir düşüş gösterdiği görülmektedir. 25 km den sonra ise tekrar yükseldiği grafikten gözlemlenmektedir. Bu derinlik değişim grafiklerinden görüleceği üzere 15-25 km arası derinlikte hızların düştüğü alanların varlığından söz edilebilir.



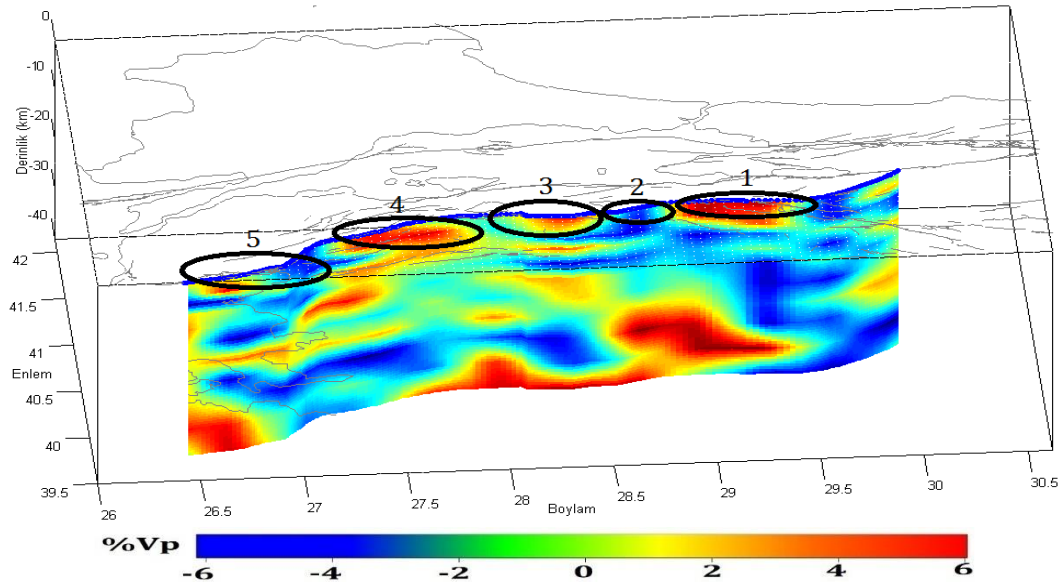
Şekil 12. KAFZ kuzey kolu P- dalga yüzdelik hız değişimi kesiti. Kol üzerinde daire ile numaralandırılan fay parçaları MTA 2013 Türkiye Diri Fay haritası'ndaki fay segmentlerinin yerleridir. Değişim skala şeklinin altında verilmiştir (Cross section of the NAFZ north branch P-wave percentage velocity change. The fault segments numbered with circles on the locations of the fault segments in the MTA 2013 Turkey Active Fault map. The change scale is given below the figure)

Şekil 12'de Kuzey kol, 1) Gölcük-Karamürsel-Darıca, 2) Adalar, 3) Çınarcık, 4)Avcılar, 5) Kumburgaz, 6) Tekirdağ, 7) Ganos segmentlerinden oluşmaktadır (MTA 2013). Bu kol üzerinde Adalar segmenti, Tekirdağ ve Ganos segmentlerinin olduğu bölgede P dalgası hız değerlerinin yükseldiği dolayısı ile sıkışmanın arttığı gözlemlenmiştir. Diğer bir yandan Kumburgaz ve Avcılar segmentlerinde hızlarda önemli düşüşler görülmüştür.



Şekil 13. KAFZ orta kolu P- dalga yüzdelik hız değişimi kesiti. Kol üzerinde daire ile numaralandırılan fay parçaları MTA 2013 Türkiye Diri Fay haritası'ndaki fay segmentlerinin yerleridir. Değişim skala şeklinin altında verilmiştir (Cross section of the NAFZ middle arm P-wave percent velocity change. The fault segments numbered with circles on the locations of the fault segments in the MTA 2013 Turkey Active Fault map. The change scale is given below the figure)

Şekil 13'de numaralandırılan 1) İznik Mekece, 2) Gemlik, 3) Zeytinbağı, 4) Bandırma, 5) Edincik, 6) Sinekçi, 7) Biga-Çan segmentleri orta kolu oluşturur (MTA 2013). Bu kol üzerinde ise, Bandırma, Edincik ve Biga-Çan segmentlerinin olduğu bölgelerde hızlar yükselmiştir. Sadece Sinekçi segmentinde P dalgası hızlarının yoğun bir şekilde düştüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 14. KAFZ güney kolu P- dalga yüzdelik hız değişimi kesiti. Kol üzerinde daire ile numaralandırılan fay parçaları MTA 2013 Türkiye Diri Fay haritası'ndaki fay segmentlerinin yerleridir. Değişim skala şeklinin altında verilmiştir (Cross section of the NAFZ south branch P-wave percentile velocity change. The fault segments numbered with circles on the locations of the fault segments in the MTA 2013 Turkey Active Fault map. The change scale is given below the figure)

Şekil 14'de güney kol ise 1) İnegöl Bursa, 2) Ulubat, 3) Manyas, 4) Yenice-Gönen, 5) Evciler segmentlerinde oluşmaktadır (MTA 2013). İnegöl-Bursa ve Yenice-Gönen segmentlerinin olduğu yerde P dalgası hızlarının yükseldiği görülmektedir. Manyas segmentinde ise bu iki segmente göre nispeten daha az bir hızlarda artış görülmektedir. Ulubat segmentinde ise bu segmentlerin tam tersi olarak sismik P dalgası hızlarında önemli ölçüde düşüş gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Kuzey kolun Kumburgaz, Tekirdağ ve Ganos segmentlerinin bulunduğu bölgenin altından başlayan, Marmara denizini komple kat edip, Güney kola kadar uzanan ve 20 km derinlik civarında sismik hızların düştüğü havza görülmektedir (Şekil 12-13-14).

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yüze yakın alanlarda heterojeniteye bağlı olarak P dalgası hızlarında kısa mesafelerde değişim görülmektedir. Bu sonuçlar Tunç (2008)'deki sonuçlar ile uyumludur. Gözlemediğimiz P dalgalarının hız yapıları genelde derinlere doğru artış göstermektedir. Ayrıca derinlik kesitlerinden sismik hızların ortalama 28 km'den itibaren en yüksek seviyesine ulaşmaktadır. Bu seviyenin bölgede 28 ile 32 km arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu da Marmara bölgesindeki Moho derinliği yaklaşık olarak bu aralıkta olduğunu göstermektedir. Bu sonuçta önceki çalışmalarda belirlenen Moho derinliği ile uyum içerisindedir. Depremlerin yüzdelik hız değişimlerinin yüksek ve yüksekten düşük değerlere geçiş bölgelerinde kümelendiği gözlemlenmiştir (Şekil 10). Marmara denizi içerisinden geçen Kuzey Anadolu Fay hattı üzerindeki hız değişimlerinin yüksek olduğu Kuzey kol olarak tanımlanan bu hat altı segmentten oluşmaktadır (MTA 2013). Bunlardan Adalar, Tekirdağ ve Ganos segmentlerinde hızların yükseldiği dolayısı ile rijit bir oluşum olduğu buda bu segmentlerdeki hızları arttırdığı tespit edilmiştir. Bu sonuç Gholamrezaie vd. (2019) tarafından yapılan Kuzey Marmara Denizi'nin altında yaklaşık olarak aynı bölgelerdeki dom oluşumu yorumu ile uyumludur denilebilir. Aynı zamanda Bohnhoff vd. (2017)'tarafından yapılan Marmaranın batısının deprem tehlikesi daha fazla olduğunu belirttiği çalışma ile de uyumludur. Orta kolda ise Bandırma, Edincik ve Biga-Çan segmentlerinde hızların yükseldiği tespit edilmiştir. Güney kolda ise hızların önemli derecede arttığı İnegöl-Bursa ve Yenice-Gönen fay segmentlerinde görülmektedir. Bu sonuçlar Barış vd. (2005)'tarafından yapılan Marmaranın doğusundaki hızların arttığı bölgelerle uyumludur. Marmara denizinin altında, Tekirdağ ve Kumburhaz segmentlerinden başlayıp, üç kolu boydan boya kat eden düşük hız havzası (Şekil 12-13-14), nakamura vd. (2002)'tarafından Marmaranın batısında hızların düştüğü alan, Koulakov vd. (2009)'tarafından belirlenen düşük hız bölgeleri ve Barış vd. (2005) tarafından 15 km derinlikten itibaren Marmaranın orta kesimlerinde hızların düştüğünü belirlediği çalışmalar ile uyumludur. Aynı zamanda depremlerin derinlikle değişim grafiğinde 15 ile 25 km arasında hızların düştüğü açıkça görülmektedir (Şekil 11). Sismik Tomografi ile Marmara bölgesinde P hız değerlerinin arttığı ve düştüğü alanlar tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçların çalışma bölgesindeki daha önce yapılan bu çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu araştırma Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 05546 numaralı ÖYP (Öğretim Elemanı Yetiştirme Programı) projesi tarafından desteklenmiştir. Bu çalışma İbrahim Hakan DEMİRSEKİKAN'ın doktora tezinin bir parçasıdır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Akyol, N., Zhu, L. Mitchell, B. J., Sözbilir, H., Kekovalı, K., 2006. Crustal structure and local seismicity in western Anatolia. *Geophys. J. Int.*, 10.1111/j.1365246X.2006.03053.
- Alpar B., Altınok Y., Gazioglu C., Yücel Z.Y. 2002. Tsunami Hazard Assessment in Istanbul. *Journal of Black Sea / Mediterranean Environment*. Issn: 1304-9550.
- Barış, Ş., Ito, A., Üçer, S. B., Honkura, Y., Kafadar, N., Pektaş, R., Komut, T., Işıkar, A. M., 2002. Microearthquake activity before the İzmit Earthquake in the Eastern Marmara Region, Turkey (1 January 1993-17 August 1999). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 1, pp. 394-405.
- Barış, Ş., Nakajima, J., Hasegawa, A., Honkura, Y., Ito, A., Üçer, S. B., 2005. Three-dimensional structure of Vp, Vs, and Vp/Vs in the upper crust of the Marmara region, NW Turkey. *Earth Planets Space* 57, 1019-1038.
- Bohnhoff M., Dresen G.H., Ceken U., Kadarioglu F.T., Kartal R.F., Kilic T., Nurlu M., Yanik K., Acarel D., Bulut F., Ito H., Johnson W., Malin P.E., Mencin D. 2017. Ganos Fault Zone Network: Imaging North Anatolian Fault Zone In The Western Marmara Region, Turkey, Based On A Dense Local Seismic Network. *Sci. Dril.*, 22, 19-28, 2017. doi:10.5194/sd-22-19-2017
- Çevikbilen, S., Biryol, C. B., Beck, S., Zandt G., Taymaz T., Adıyaman H. E., Özacar A., 2011. 3-D Structure along the North Anatolian Fault Zone in North-Central Anatolia revealed by local earthquake tomography. *Geophys. J. Int.* 2012 188, 819-849.
- Farouk, M., Zhao, D., 2006. Tomo Tools Programme for Windows V 1.0. Geodynamics Research Center (GRC) Ehime University.
- Gholamrezaie E., Scheck-Wenderoth M., Heidbach O. and Strecker M.R. 2019. 3-D crustal density model of the Sea of Marmara. *Solid Earth*, 10, 785-807. DOI:10.5194/se-10-785-2019.
- Horasan, G., Gülen, L., Pınar, A., Kalafat, D., Özel, N., Kuleli, H. S., Işıkar, A. M., 2002. Lithospheric structure of the Marmara and Aegean regions, western Turkey. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 322-329.
- Humphreys, E., Clayton, R. W., 1988. Adaptation of back projection tomography to seismic travel time problems. *J. Geophys. Res.*, 93, 1073-1085.
- Karabulut H., Özalaybey, S., Taymaz, T., Aktar, M., Selvi, O., Kocabeyoğlu, A., 2003. "A tomographic image of the shallow crustal structure in the Eastern Marmara", *Geophysical Research Letters*, 30, 24, 2277.

- Koulakov I., Bindi D., Parolai S., Grosser H., Milkereit C., 2009. Distribution of seismic velocities and attenuation in the crust beneath the North Anatolian Fault (Turkey) from local earthquake tomography, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100 (1), 207-224.
- Maden Tetkik ve Arama (MTA), 2013. Yenilemiş diri fay haritaları. Erişim Tarihi: 03.05.2021.<https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/yenilenmis-diri-fay-haritalari>.
- Nakamura, A., Hasegawa, A., Ito, A., Üçer, B., Barış, Ş., Honkura, Y., Kono, T., Hori, S., Pektaş, R., Komut, T., Çelik, C., Işıkara, A. M., 2002. P-wave velocity structure of the crust and its relationship to the occurrence of the İzmit, Turkey, earthquake and aftershocks. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92, 330-338.
- Özalaybey, S., Ergin, M., Aktar, M., Tapırdamaz, C., Biçmen, F., Yörük, A., 2002. The 1999 İzmit earthquake sequence in Turkey: seismological and tectonic aspects. *Bull. Seis. Soc. Am.* 92, 376-386.
- Salah, M. K., Zhao, D., 2003. Mapping the crustal thickness in southwest Japan using Moho-reflected waves. *Physics of Earth and Planetary Interiors* 141, 79-94.
- Salah, M. K., Şahin, Ş., Destici, C., 2007. Seismic velocity and Poisson's ratio tomography of the crust beneath southwest Anatolia: an insight into the occurrence of large earthquakes. *J. Seismol.* 11, 415-432, doi: 10.1007/s10950-007-9062-2.
- Soyuer, D., 2012. Marmara bölgesinin kabuk ve hız dağılımının 3-boyutlu sismik tomografi ile incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi.
- Sengör, A.M.C., 1980, Türkiye'nin neotektoniğinin esasları, Türkiye jeoloji Kurumu, Konferans serisi:2.
- Thurber, C. H., Aki, K., 1987. Three-dimensional seismic imaging, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 15, 115-139.
- Tunç, B., 2008. Marmara Bölgesinin üç- boyutlu hız yapısının Sismik tomografi ile belirlenmesi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli.
- Zhao, D., Hasegawa, A., Horiuchi, S., 1992. Tomographic imaging of P- and S-wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.* 97, 19909-19928.
- Zhao, D., Hasegawa, A., Kanamori, H., 1994. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional and teleseismic events. *J. Geophys. Res.* 99, 22313-22329.
- Zhao, D., 2001. New advances of seismic tomography and its applications to subduction zones and earthquake fault zones: a review. *The Island Arc* 10, 68-84.
- Zhao, D., 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight in to deep Earth dynamics. *Phys. EarthPlanet. Inter.* 146, 3-34.