



Orta Anadolu'da kabuğa ait sismik P ve S dalga hızı yapısının belirlenmesi Determination of seismic P and S wave velocity structure of crust in Central Anatolia

İbrahim Hakan DEMİRSİKAN^{1*}, Şakir ŞAHİN², Erdinç ÖKSÜM³

^{1,2,3}Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
qqhakanqq@hotmail.com, sakirsahin@sdu.edu.tr, erdincoksum@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.10.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 26.12.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.45548

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, Orta Anadolu'da yerel depremlerin varış zamanlarından hareketle Poisson oranı Tomografisi metodu kullanılarak üç boyutlu (3-B) hız yapısını belirlenmiştir. Bu çerçevede, toplam 27.141 adet depreme ait 109.740 adet P dalgası ve 102.934 adet S dalgası varış zamanı verisi kullanılmıştır. Depremler Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne (KRDAE) bağlı Ulusal Pasif Hareket Sismik Ağı'na bağlı istasyonlar tarafından kaydedilmiştir. İnceleme alanında bulunan deprem istasyonları ve deprem merkez üssü dağılımı, elde edilen Vp ve Vs hız dağılımının 40 km'ye kadar güvenilir sonuç verdiğini göstermektedir. Dama tahtası (Checkerboard) çözünürlük testi ve ışın yolu dağılımları bu durumu doğrulamaktadır. Tomografik sonuçlar, Orta Anadolu'da kabuk ve üst mantoda yanıl heterojenliklerin varlığına işaret etmektedir. Depremlerin bölgedeki karmaşık tektonik ve jeolojik yapıdan dolayı genel olarak sismik hızın düştüğü alanlarda oluştuğu dikkati çekmektedir. Düşük veya yüksek hız değerlerine sahip olan tüm bölgelerin gerilme enerjisi birikimi için potansiyel alanlar olduğunu görülmektedir. Elde edilen P ve S dalga hızı modelleri, Orta Anadolu'daki mevcut sismotektonik yapıyı net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: P ve S dalga hızları, Sismik tomografi, Orta Anadolu, Sismik hız

Abstract

In this study, the three-dimensional (3-D) velocity structure was determined by Poisson ratio Tomography method based on the arrival time of local earthquakes in Central Anatolia. For this purpose, 109,740 P-wave and 102,934 S-wave arrival time data from 27,141 earthquakes were used. Earthquakes were recorded by stations related to the National Passive Motion Seismic Network of Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (KOERI). Distribution of the stations and earthquake epicenters shows that the Vp and Vs velocity model yield reliable results up to 40 km depth. Checkerboard resolution test and ray path distributions confirm this situation. Tomographic results indicate the presence of lateral heterogeneities in the crust and upper mantle in Central Anatolia. It is remarkable that the earthquakes occur in areas where the seismic velocity is low due to the complex tectonic and geological structure in the region. The results of the study show that all regions with low or high seismic velocities are potential areas for the accumulation of stress energy. Resulting P- and S-wave velocity models clearly show the existing seismotectonic structure in Central Anatolia.

Keywords P and S wave velocity, Seismic tomography, Center Anatolia, Seismic velocity

1 Giriş

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. Kabuk ve üst mantodaki yatay yönde heterojenitenin yüksek olduğu genç veya aktif volkanlar ve jeotermal bölgeler, telesismik ve yerel deprem verileri kullanan sismik tomografik yöntemler için uygun alanlardır [1]. Benzer çalışma Akyol ve diğ. (2006)[2] tarafından Batı Anadolu'da 1-B kabuksal P dalga hız modelini elde etmek için yapılmıştır. Bulunan hız modeli ortalama kıtasal kabuğa göre önemli ölçüde daha düşük bir kabuksal hız biçiminde tanımlanmıştır. Ayrıca hız yapısındaki önemli yanıl değişiklikler, 1-B model için büyük standart sapma değerleri içermektedir. Lei ve Zhao (2007)[3] manto üzerinde farklı kabuk modellerini tartışmıştır. Anadolu plakasının kuzeyinde yüksek hız anomalilerinin 130 km derinlikten itibaren, Arap Plakasında ise 250 km derinlikten itibaren aşağıya doğru hacimsel olarak arttığını tespit etmişlerdir. Salah ve diğ. (2014)[4] Orta Anadolu'da kaydedilmiş 6.549 adet depreme ait P ve S dalgası varış zamanını kullanarak kabuk yapısını incelemiştir. Sonuç olarak kabuğun içinde güçlü yanıl heterojenliklerin varlığını ve Orta Anadolu'nun altındaki üst

mantoda belli başlı düşük hız anomalilerinin özellikle mevcut Volkanlar ve aktif fay segmentlerinde oluştuğunu ve bu ortamlarda ortalamadan daha yüksek Poisson oranlarının yaygın olarak bulunduğunu öne sürmüştür. Salah ve diğ. (2011)[5] Doğu Anadolu'nun altındaki kabuğun P ve S dalgalarının çok sayıda varış zamanı verisinin ters çözümü ile 3-B tomografisini hesaplamıştır. P ve S dalga hızı modellerinden elde edilen anomalilerinin daha güvenilir bir şekilde yorumlanabilmesi için Poisson oranı yapılarını ortaya koymuşlardır. Tomografik sonuçların genellikle bölgenin ana tektonik özellikleriyle tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

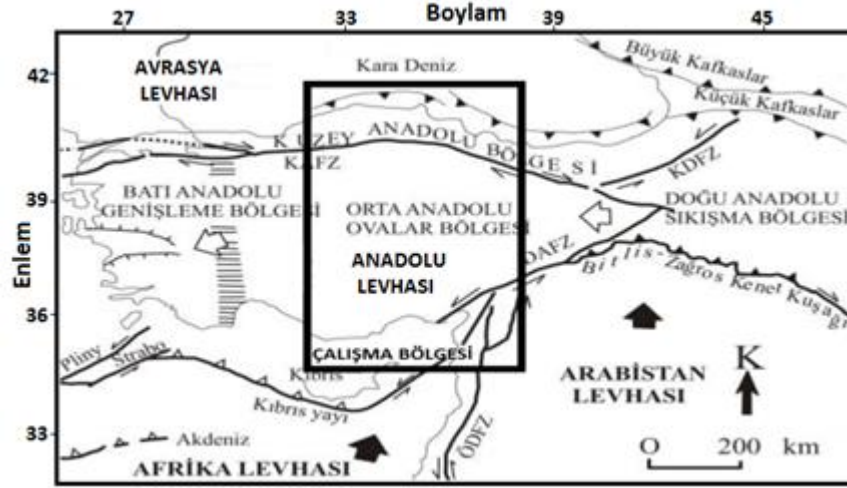
Bu çalışmada Orta Anadolu'da kabuk yapısı ve bölgenin sismotektonik özellikleri ortaya konulmuştur. Bölgede yapılan tomografik çalışmalarla birlikte alıcı fonksiyon çalışmaları (Çivgin ve Kaypak 2015) [6] tarafından birlikte değerlendirilerek bölgedeki kabuk kalınlığı ve manto yüzeyi belirlenmiştir. Elde edilen model bölgenin üç boyutlu kabuk yapısının tamamen anlaşılır ve görsel olarak tanımlanmasını sağlamıştır. Çalışma sonuçlarının, bölgede bundan sonra yapılacak sismoloji çalışmalarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2 Çalışma alanı ve bölgenin tektonik yapısı

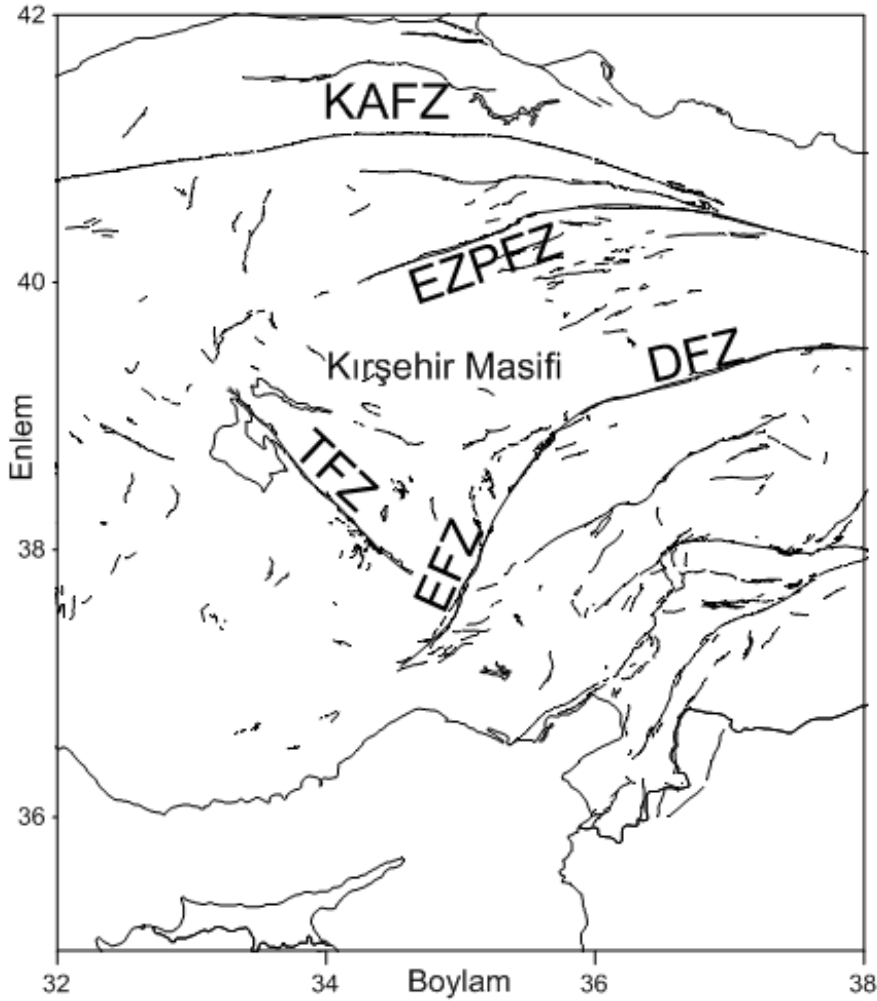
Çalışma alanı, Orta Anadolu Bölgesi'nin 35° K- 42° K enlemleri ve 32° D- 38° D boylamları ile sınırlanan alandır (Şekil 1).

Bölgede KRDAE'ye ait olan birçok kayıt istasyonu bulunmaktadır. Orta Anadolu konumu itibariyle Kuzey Anadolu Fay Zonu, Doğu Anadolu Fay Zonu ve Ege çöküntü graben sistemi arasında kalmış çok geniş bir alanı kapsamaktadır (Şekil 1). Bölgede doğuya doğru uzanan Metamorfik-Kristalin masifler hâkimdir. Çalışma alanında KD-GB ve KB-GD

doğrultulu birbirinden bağımsız faylar sistemleri yer almaktadır. Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Tuzgölü Fay Zonu (TFZ), Ecemiş Fay Zonu (EFZ), Ezinepazarı Fay Zonu (EZPFZ), Deliler Fay Zonu (DFZ) ile Kırşehir Masifi'nde yer alan diri faylar bölgede bulunan önemli aktif tektonik unsurlardır (Şekil 2).



Şekil 1: Türkiye'nin Neotektonik dönemini şekillendiren ana tektonik yapılar ve çalışma alanı (Bozkurt, 2001'den uyarlanmıştır)[7].

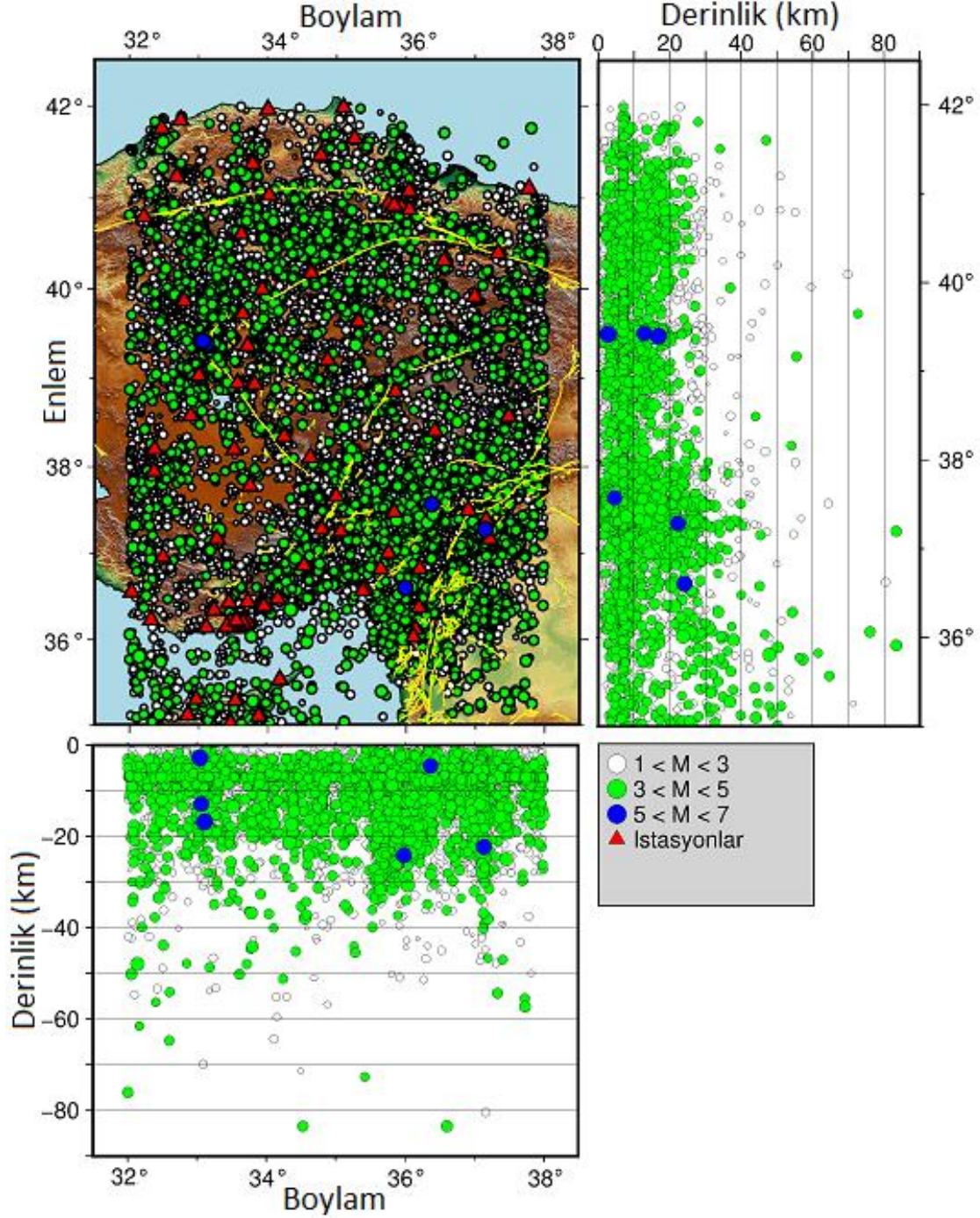


Şekil 2: Orta Anadolu'nun ana tektonik birimleri (MTA Türkiye Diri fay haritasından uyarlanmıştır. Burada; KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, TFZ: Tuzgölü Fay Zonu, EFZ: Ecemiş Fay Zonu, EZPFZ: Ezinepazarı Fay Zonu, DFZ: Deliler Fay Zonu)'dur, [8].

3 Veri

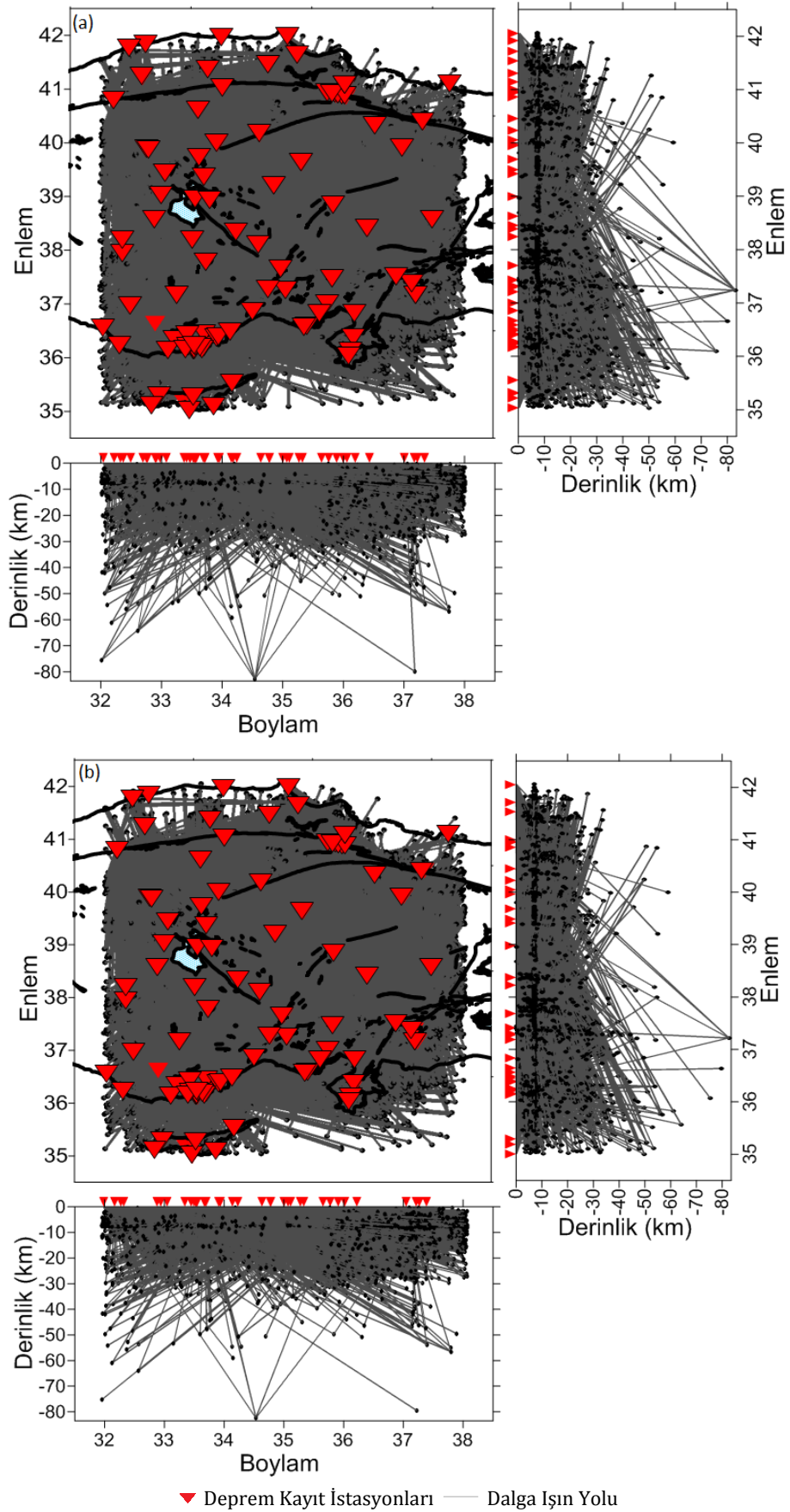
Orta Anadolu Bölgesi'nde 35°-42° Kuzey enlemleri ile 32°-38° Doğu boylamları arasında kalan alanda, 2007-2016 yılları arasında meydana gelmiş 27.141 adet depreme ait 109.740 adet P dalgası ve 102.934 adet S dalgası varış zamanı verisi kullanılmıştır (Şekil 3). P ve S dalga fazlarına ait ışın

yollarının yatay ve düşey yöndeki dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. Bölgede bulunan 87 adet geniş-bant ve 5 adet kısa-periyot alıcılı olmak üzere toplam 92 adet deprem istasyonunca kaydedilmiş yerel deprem verisi kullanılmıştır. Bazı depremler sadece 4 istasyon ya da daha azı tarafından kaydedilmiş olması nedeniyle ters çözüme dahil edilmemiştir. Bu veriler KRDAE'ye bağlı istasyonlar tarafından kaydedilmiştir [9].



▲ Deprem Kayıt İstasyonları • Bölgede Oluşan Depremler

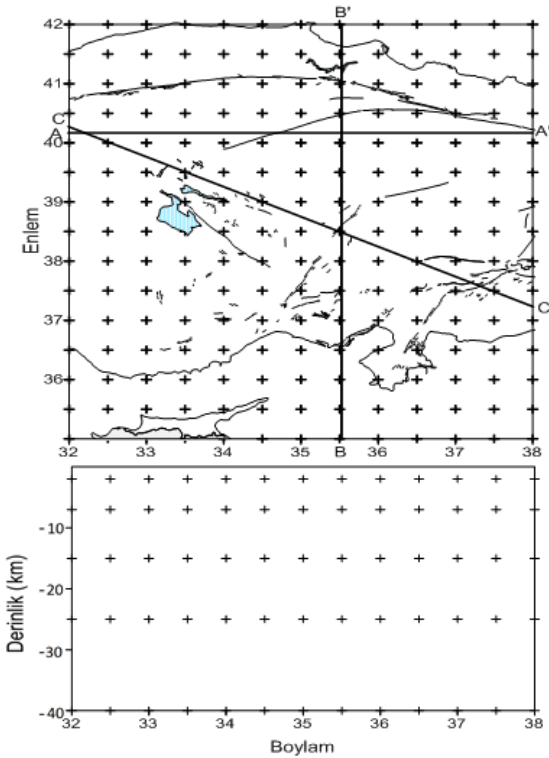
Şekil 3: Kullanılan 27.141 adet depremin çalışma bölgesindeki dağılımı. Depremlerin büyüklük aralığı renklendirme ile belirtilmiş, istasyonlar ise kırmızı üçgenlerle gösterilmiştir. Bölgedeki faylar topografya üzerinde sarı düz çizgiler ile verilmiştir.



Şekil 4: (a) P ve (b) S dalgası ışın yolları. Kırmızı üçgenler deprem istasyonlarının, noktalar depremlerin konumunu belirlemektedir.

4 Yöntem

Orta Anadolu'da sismik hız yapısını belirlemek için Zhao ve diğ. (1992) [10] tarafından geliştirilen Poisson Tomografisi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde P ve S dalgası varış zamanlarının ters çözümünden hareketle 3-B sismik hız yapısı belirlenir. Model, birkaç karmaşık şekilli sismik hız süreksizliğini içeren genel bir hız yapısına uyarlanabilir ve modelin her yerinde 3-B hız değişimlerine izin verir. Süreksizlikler, Conrad ve Moho süreksizlikleri gibi bilinen jeolojik sınırları temsil eder. Bunun için başlangıç dama tahtası modeli tanımlanırken, inceleme alanı hücrelere bölünmüş, her bir hücredeki hız dağılımı tanımlanmıştır (Şekil 5). Hız dağılımı tanımlanırken, inceleme alanındaki yaklaşık hız değişimleri dikkate alınarak başlangıç hız modeli olarak Tablo 1'de verilen hız değerleri kullanılmıştır [11]. Yine bu çalışmadan hareketle V_p/V_s oranı 1.75 olarak alınmıştır. Modeldeki herhangi bir noktada hız değişimi, o noktayı çevreleyen sekiz düğüm noktasındaki hız değişimlerinin doğrusal interpolasyonu ile hesaplanmaktadır. Varış zamanlarını ve ışın yollarını doğru bir şekilde hesaplamak için yinelemeli olarak kullanılan Pseudo Bending tekniğine dayalı 3-B ışın izleme ve Snell yasası kullanılmıştır [10],[12],[13]. Yöntemde istasyon yükseklikleri de dikkate alınmıştır.

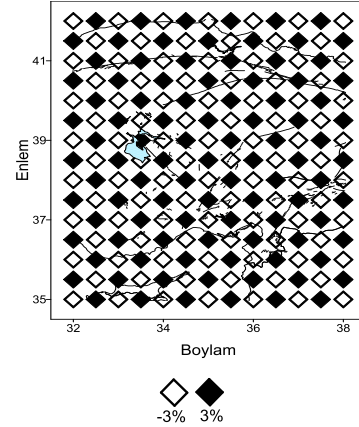


Şekil 5: Yatay (a) ve düşey (b) yönlerde grid aralıklarının konumu. Grid aralıkları yatay yönde 0.5° ve düşey yönde ise 0, -2, -7, -25 ve -40 km derinliklerindedir. Düşey (derinlik) kesitlerinin yerleri A-A', B-B' ve C-C' olarak gösterilmektedir.

Tablo 1: Başlangıç hız değerleri [11].

Derinlik (km)	V_p (km/sn.)	V_s (km/sn.)
0	3.86	2.20
7	5.99	3.42
25	6.20	3.54
81	8.10	4.62

Dama tahtası testi için başlangıç modeli belirlenmesi aşamasında (Şekil 6), inceleme alanının genişliği, bölgedeki olası hız değişimleri dikkate alınarak, yatay ve düşey yönde hücre aralığı ve hız dağılımları değiştirilmek suretiyle çok sayıda deneme yapılmıştır. Bu denemeler sonucunda, inceleme alanı yatay yönde 0.5° ve düşey yönde 2, 7 15, 20 ve 40 km aralıklarla, pozitif ve negatif anomalilerden oluşan hücrelere bölündüğünde uygun sonuçlar elde edildiği görülmüştür. İnceleme alanındaki ışın yollarının tamamlanması amacıyla model derinliği 40 km'ye kadar tanımlanmıştır. P ve S dalga hızı anomalileri için genlikler $\pm\%3$ olarak belirlenmiştir (Şekil 6).



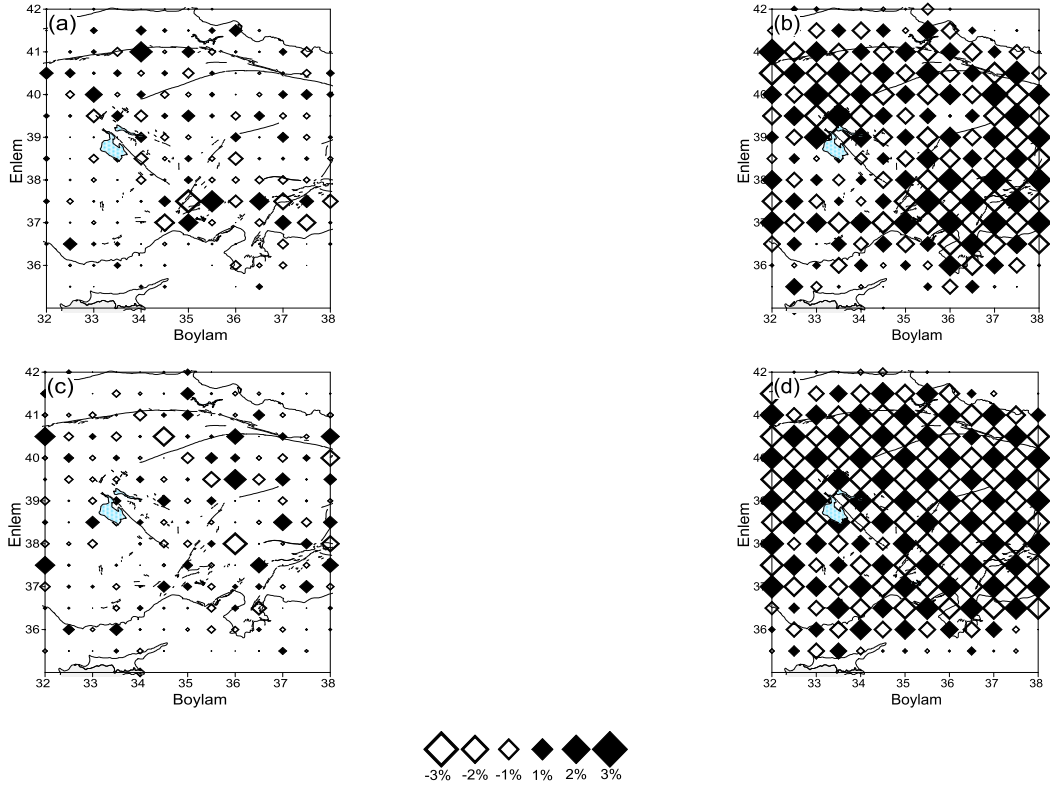
Şekil 6: P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir.

Tomografik metotlar, yukarıda belirtilen parametreler dâhilinde sismik dalgalarının seyahat zamanlarının ters çözümüne dayanır [13]. Kabuk ve manto yapısını görüntüleme model için parametre oluşturulurken yapının geometrik şekli dikkate alınır [14] (Şekil 5).

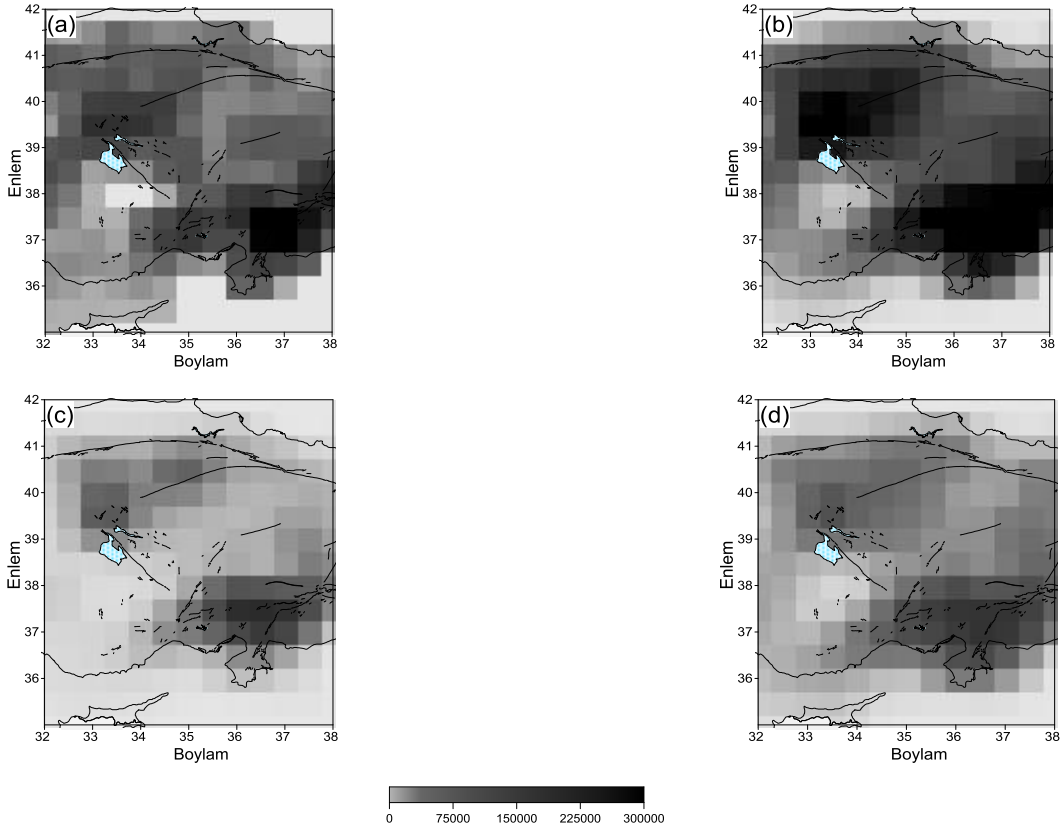
Kullandığımız yazılım TOMOG3D Fortran 77 dilinde yazılmış olup, bu yazılım için oluşturulan arayüz ile elde edilen TOMOTOOLS programı P ve S hız yapısının belirlenmesinde kullanılmıştır [15]. Bu program kaydedilen yerel depremlerin varış zamanlarının ters çözümünden kabuk ve üst manto hız yapısının belirlenmesi için tasarlanmıştır. Önceki algoritmalar ile benzerlik olsa da, TOMOTOOLS birkaç önemli avantaja sahiptir. Bunlar; var olan karmaşık hız süreksizliklerinin oldukça gerçekçi bir modelle uyum sağlar ve hızlar arasındaki 3-B varyasyonların elde edilmesine imkân verir.

5 Tartışma

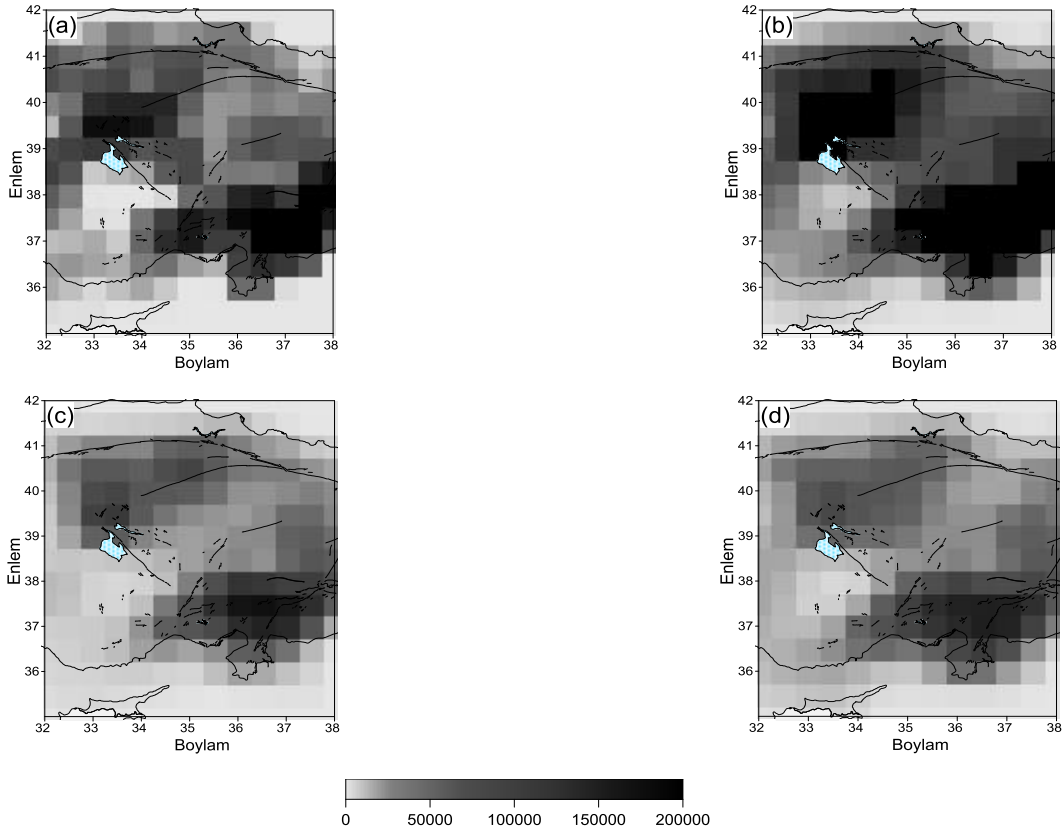
Orta Anadolu Bölgesi ve çevresinde oluşan yerel depremlerin P ve S dalgalarının varış zamanlarına ters çözüm tekniği uygulanarak, bölgede üç boyutlu hız değişimleri belirlenmiştir. Başlangıçta dama tahtası çözünürlük modeli oluşturulmuş ve Tablo 1'de verilen hız modeline göre çözünürlük testleri uygulanmıştır (Şekil 6). Bu çözünürlük modelinin, P ve S dalga hızı için dört farklı derinlikte (2, 7, 15 ve 25 km) uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 7). P ve S dalgası için belirtilen bu derinliklerde dalga ışın çarpma (ray hit count) değişimleri bunu doğrular niteliktedir (Şekil 8-9). Bölgede hız değişiminin oldukça fazla olduğu görülmektedir. P ve S dalga hızı yüzdelik değişimlerinin yukarıda verilen derinliklere göre yatay yönde dağılımı ve bu çalışmada kullanılan depremlerin odak derinlikleri ile korale edilmiştir (Şekil 10-11).



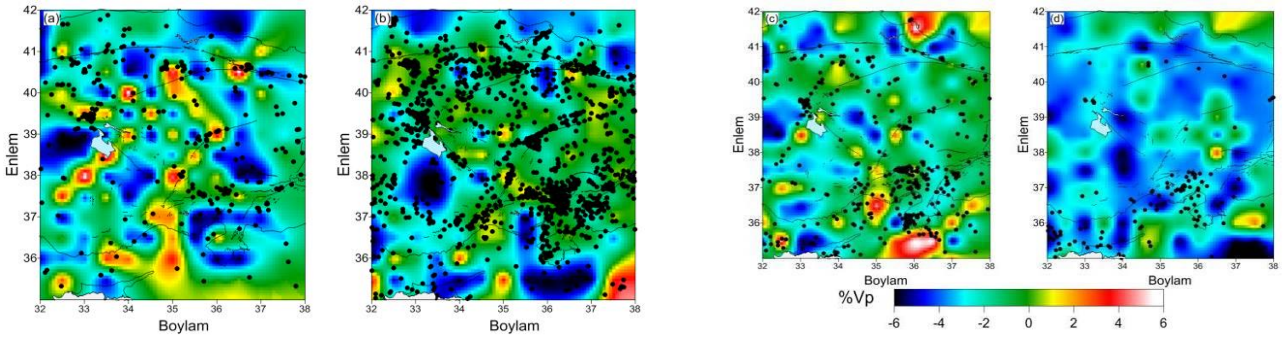
Şekil 7: P- dalga hızı için dört farklı derinlikte 2 (a), 7 (b), 15 (c) ve 25 (d) km dama tahtası çözünürlük modeli sonucu. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük değişimleri göstermektedir. Değişim aralığı en altta verilmiştir.



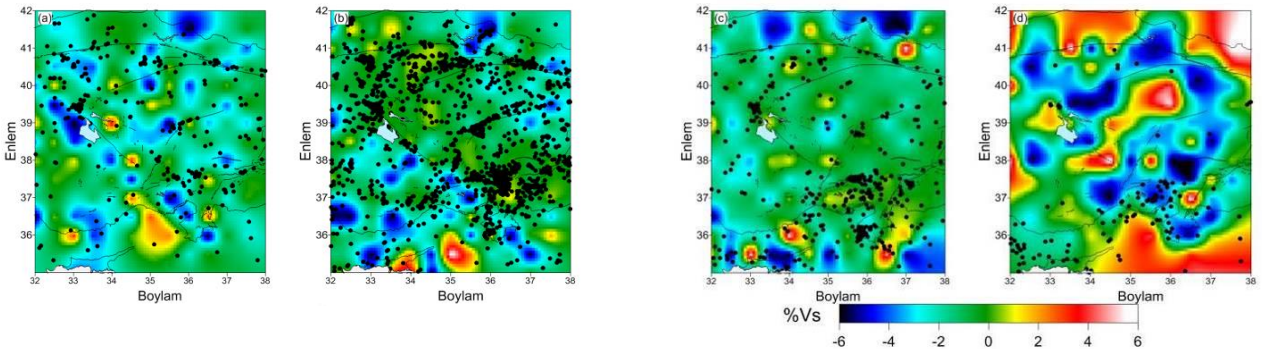
Şekil 8: P- dalga hızı için dört farklı derinlikte 2 (a), 7 (b), 15 (c) ve 25 (d) km dalga ışın çarpma sayıları (ray hitcount) haritaları. Sayı aralığı en altta verilmiştir.



Şekil 9: S- dalga hızı için dört farklı derinlikte 2 (a), 7 (b), 15 (c) ve 25 (d) km dalga ışın çarpma sayıları (ray hitcount) haritaları. Sayı aralığı en altta verilmiştir.



Şekil 10: Orta Anadolu'da dört farklı derinlikte 2 (a), 7 (b), 15 (c) ve 25 (d) km P- dalgası % hız değişimi. Siyah noktalar depremleri, kırmızı ve mavi renkler sırasıyla yüksek ve düşük hız değişimlerini göstermektedir.



Şekil 11: Orta Anadolu'da dört farklı derinlikte 2 (a), 7 (b), 15 (c), 25 (d) km S- dalgası % hız değişimi. Siyah noktalar depremleri, kırmızı ve mavi renkler sırasıyla yüksek ve düşük hız değişimlerini göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen tomografik sonuçlarda genellikle düşük hız anomalileri görülmekte ve bu durum esas olarak Orta Anadolu'da yer alan geniş çaplı faylanma ve sedimanter havzaların varlığından kaynaklanmaktadır. Tuz gölü havzası altında düşük P dalga hızı 2.1 km/sn'den başlayıp, 5-8 km derinliklerde 4.0-4.2 km/sn'ye ve 12 km derinlikte 6.15 km/sn'ye ulaşmaktadır [16]. Yüzeğe yakın bu düşük hız değerlerinin gözlemlenmesine, evaporitlerin ve tortul tabakaların neden olduğu söylenebilir. Hearn ve Ni (1994) [17] Anadolu Plakası'nın altında yaklaşık 7.8 km/sn ile temsil edilen düşük Pn hızı gözlemlenmişlerdir. Rodgers ve diğ. (1997) [18], Orta Anadolu'da üst manto boyunca muhtemel kısmi eriyiği gösteren zayıf Sn yayılımı, düşük Pn hızı ve volkanizmanın olduğunu saptamışlardır.

Saunders ve diğ. (1998) [19] tarafından, ANTO istasyonunun altındaki üst mantoda muhtemel bir düşük hızlı zonun varlığı tespit edilmiştir. Al-Lazkive diğ. (2004) [20], Anadolu platosunun altında yer alan büyük ölçekli (~500 km) düşük (<8 km/sn), ayrıca inceleme alanında küçük ölçekli (~200 km) çok düşük (<7.8 km/s) Pn hızı anomalilerini gözlemlenmişlerdir. Geniş ölçekli düşük hızlı bölgelerin sıcak ve duraysız manto yükselimine bağlı olarak oluştuğu düşünülmektedir. Anadolu plakasının altındaki düşük Pn hızlı bölgeler kısmen Avrasya'nın altındaki Tethyanokyanusal litosferin yitiminden kaynaklanmaktadır. Benzer çalışmalar ile Anadolu Platosu'nun altında Sn hızı yaklaşık 4,3- 4,5 km/sn olarak hesaplamıştır [21]. Erduran ve diğ. (2007) [22], S dalga hızını yüzeğe yakın seviyelerde 2.2 km/sn, 10 km derinlikte 3.6 km/sn olarak tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada Anadolu Plakası'nda üst mantoya ait S dalga hızı 4.27 km/s olarak tespit edilmiştir. Bu değer nispeten düşük kesme dalgası hızı olarak tanımlanabilir. Bu gözlemlerin diğer çalışmaların sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmüştür [23]-[26].

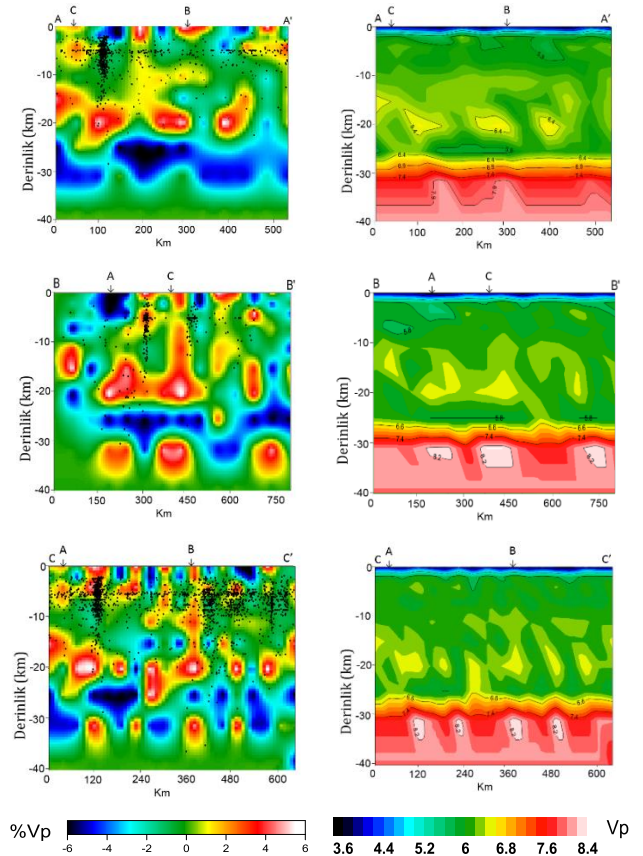
Çalışma bölgesinde üç ayrı doğrultuda kesit alınarak düşey yönde P dalga hızı değişimleri ve Vp, Vs hız değerleri tespit edilmiştir (Şekil 11-12). Elde edilen sonuçların bölgede yapılan diğer çalışmalardan çıkan sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışma bölgesel anlamda manto malzemesinin nerelerde kabuk içerisine doğru ilerlediğini de göstermesi bakımından ayrıca önem taşımaktadır. Doğrultuların kesişim noktalarında birbirlerine ve yatay kesit haritalarındaki P ve S hız değerleri ile uyumluluğu göze çarpmaktadır. Kesitlerden hareketle, Orta Anadolu'da Moho derinliği yaklaşık olarak 33 km civarında olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 12-13). Bu sonuç Salah ve diğ. (2014)[4] ve Çıvgın ve Kaypak (2017)[6] tarafından elde edilen bulgular ile uyumludur.

P ve S dalga hızı yüzdelik değişimlerinin derinliklere göre değişim haritaları üzerine, bu çalışmada kullanılan depremler konumlandırılmıştır. Depremlerin genellikle düşük P ve düşükten yükseğe geçiş bölgelerinde kümelendiği gözlenmektedir (Şekil 10-11). Bu kümelenmenin en yoğun olduğu derinlikler 0-10 km arasındadır. Bu derinlik aynı zamanda yüzdelik P ve S dalgası değişimlerinin düştüğü bölgeleri ifade etmektedir.

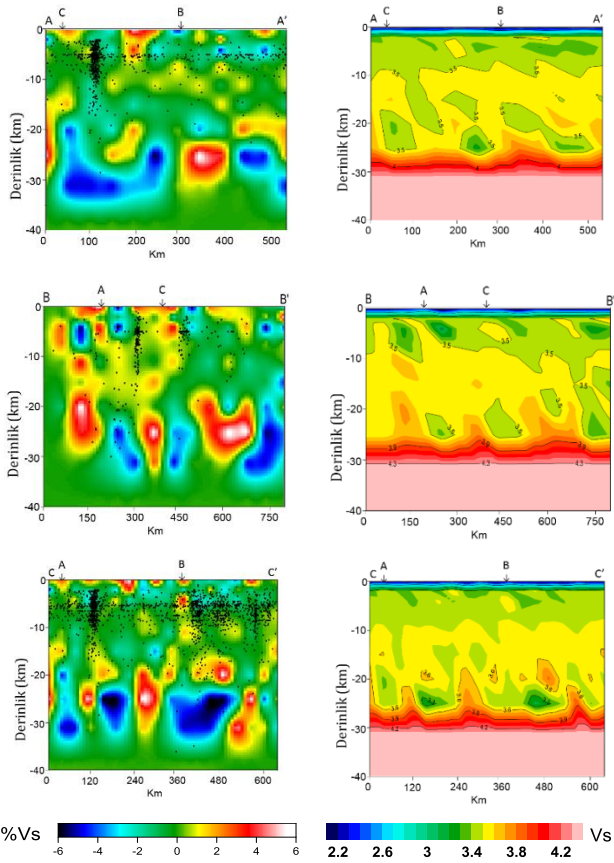
Bilim (2017)[27], Yozgat batolidlerinde ve çevresinde yapılan Bouger Gravitesi ve manyetik çalışmasında, Conrad yüzeyi derinliğini 19.5 km ile 21.5 km arasında, Moho (Mohorovičić) derinliğini yaklaşık olarak 34 km ile 39 km arasında tespit etmişlerdir. Bu çalışma alanı olarak sınırlı kalmıştır. Ancak

çalışma alanı içinde bir bölge olmasından dolayı kıyaslama açısından önemlidir.

Arslan ve diğ. (2010),[28] yaptığı gravite çalışmasında tüm Türkiye için kabuk kalınlığını en sığ 31.4 km en kalın 50 km olarak nitelendirmiştir. Bu çalışma ile bizim çalışmamız kıyaslandığında, Kırşehir masifinin bulunduğu alanda kabuk kalınlığının 35 km ile 40 km arasında olduğu görülmüştür. Akın (2016),[29]'da Türkiye için görünür yoğunluk verileri hesaplamış ve bu veriler ile sismik hızlar kıyaslanmıştır. Daha sonra hem görünür yoğunluk, hem de bu hızları yorumlayarak Conrad süreksizliğinin üç-boyutlu yapısını ortaya koymuştur. Anadolu'nun kıtasal kabuk kalınlığı dağılımı göz önünde bulundurularak, farklı derinlik seviyeleri için yoğunluk haritaları oluşturmuştur. En düşük yoğunluk 2.23 gr/cm³, en yüksek yoğunluk 3 gr/cm³ ve ortalama yoğunluk değeri 2.698 gr/cm³ olarak hesaplamıştır. Buna bağlı olarak sismik hızlar ise, en düşük 3.20 km/sn, en yüksek 6.83 km/sn ve Moho süreksizliğine kadar olan kıtasal kabuk için sismik hız ortalaması 5.66 km/sn olarak hesaplamıştır. Conrad süreksizliğinin Türkiye'deki ortalama derinliğini 16 km olarak bulmuştur. Çalışmada Kırşehir Masifi ve çevresinde Conrad ve Moho derinliklerinin sırasıyla yaklaşık 15-18 km ve 35-40 km olduğunu ileri sürmüşlerdir. Tarafımızdan elde edilen sonuçların Akın (2016) [29] değerlerine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 12: P dalgası kesitler. A-A', B-B' ve C-C' yönlü çalışılan hatlar boyunca sırası ile (a), (b) ve (c) P dalga hızı değişimlerine ait düşey kesitler. Siyah noktalar depremleri, kırmızı renk yüksek hız oranını mavi renk ise düşük hız oranını göstermektedir.



Şekil 13: S dalgası kesitler. A-A', B-B' ve C-C' yönlü çalışılan hatlar boyunca sırası ile (a), (b) ve (c) S dalga hızı değişimlerine ait düşey kesitler. Siyah noktalar depremleri, kırmızı renk yüksek hız oranını mavi renk ise düşük hız oranını göstermektedir.

Ateş ve diğ. (2012)[30] tarafından 2 boyutlu havadan Manyetik ve Bouger Gravite anomalilerini kullanılarak yaptıkları çalışmada, Türkiye için kabuk kalınlığını batıda 28 km, doğuya doğru gittikçe kalınlaşan bir trendle, İran sınırında 42 km ye ulaştığını ileri sürmüşlerdir. Orta Anadolu'da kabuk kalınlığının 32 ile 38 km arasında değiştiğini ortaya koymuşlardır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçların Ateş ve diğ. (2012),[30] ile uyumlu olduğu görülmektedir.

6 Sonuçlar

KRDAE'ye bağlı 92 istasyon tarafından kaydedilen yerel depremlere ait çok sayıda P ve S dalgası seyahat zamanı ters çözümüne tomografik metot kullanılarak, Orta Anadolu'nun 3-B sismik dalga hız yapısı belirlenmiştir. Dama tahtası çözünürlük testi sonuçları, ışın vuruş sayısı ve ışın yolu haritaları, elde edilen hız anomalilerinin yaklaşık 40 km derinliğe kadar güvenilir sonuç verdiğini göstermektedir. Tomografik çalışmalardan şu sonuçlar çıkarılabilir:

- 1) Kabuk hız yapısı genel olarak ortalamadan daha düşük hız ile karakterize edilir. Düşük hız ile karakterize edilen zonlar, aktif fay segmentlerinin ve volkanik aktivitenin olduğu bölgelerde daha belirgindir,
- 2) Düşük Vp ve Vs anomalilerine sahip bölgeler, hemen hemen tüm derinliklerde açıkça görülmektedir. Bunlar, alt kabukta ve eriyen mantoda kısmi eriyiğin

kabuk içerisine doğru hareketi şeklinde yorumlanabilir,

- 3) Bölgede depremlerin bazılarının yüksek hızlı bölgelerde meydana gelmesine rağmen, büyük bir çoğunluğu, düşük hızlı bölgelerde, dolayısıyla aktif fayların ve heterojenitenin yüksek olduğu alanlarda yoğunlaştığı dikkati çekmektedir. Orta Anadolu'da, birçok sedimanter havza, Senozoyik volkanikleri ve yaygın fay zonları mevcuttur. Düşük hızlı bölgelerin varlığı bu tür yapılardan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, düşük Pn ve Sn hızlarının varlığı bu gözlemleri desteklemektedir.

Bölgede hız değişimleri heterojen bir yapı göstermektedir. Hız değişimlerinin en fazla olduğu 0-10 km arası derinlikte depremlerin kümeleştiği görülmüştür. Fakat 20 km derinlikten sonra P dalgası hızındaki düşüşte bir azalmanın olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra derinlik arttıkça hız da doğru orantılı olarak artmaktadır. Yaklaşık 33 km'de dalga hızı genel olarak artmakta ve bu derinlikte en yüksek seviyesine ulaşmaktadır. Gözlemediğimiz S dalgalarının hız değişimleri bu derinlikte P dalga yapısına benzer nitelikte davranmaktadır. Bu, yaklaşık 33 km civarında bir formasyon değişiminin olduğunu düşündürmektedir. Çalışma bölgesinde üç ayrı doğrultuda kesit alınmış, kesitlerin kesişim noktalarında birbirlerine ve P ve S dalga hızı değişim haritalarına olan uyumluluğu gözlenmiştir. Ayrıca kesitlerden Orta Anadolu'da ortalama Moho derinliğinin yaklaşık olarak 33 km olduğu tahmin edilmektedir.

7 Kaynaklar

- [1] Iyer HM. "A review of crust and upper mantle structure studies of the Snake River plain-yellow stone volcanic system: A major lithospheric anomaly in the western USA". *Tectonophysics*, 105(1-4), 291-308, 1984.
- [2] Akyol N, Zhu L, Mitchell BJ, Sözbilir H, Kekovalı K. "Crustal structure and local seismicity in western Anatolia". *Geophysical Journal International*, 166(3), 1259-1269, 2006.
- [3] Lei J, Zhao D. "Teleismic P-wave tomography and the upper mantle structure of the central Tien Shan orogenic belt". *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 162(3), 165-185, 2007.
- [4] Salah MK, Şahin Ş, Topatan U. "Crustal velocity and Vp/Vs structures beneath central Anatolia from local seismic tomography". *Arabian Journal Geosciences*, 7(10), 4101-4118, 2014.
- [5] Salah MK, Şahin Ş, Aydın U. "Seismic velocity and Poisson's ratio tomography of the crust beneath east Anatolia". *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(3), 746-761, 2011.
- [6] Çıvıgın B, Kaypak B. "Estimation of the crustal structure in Central Anatolia (Turkey) using receiver functions". *Turkish Journal of Earth Sciences*, 26, 314-330, 2017.
- [7] Bozkurt E. "Neotectonics of Turkey - a synthesis". *Geodinamica Acta*, 14, 3-30, 2001.
- [8] Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü. "Türkiye Diri Fay Haritası". Ankara, Türkiye, 2013.
- [9] Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, "Türkiye Deprem Verileri Kataloğu". İstanbul, Türkiye, 2018.
- [10] Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi, S. "Tomographic imaging of P- and S-wave velocity structure beneath north eastern Japan". *Journal of Geophysical Research*, 97, 19909-19928, 1992.

- [11] Çevikbilen S, Biryol CB, Beck S, Zandt G, Taymaz T, Adiyaman HE, Özacar A. "3-D structure along the North Anatolian Fault Zone in North-Central Anatolia revealed by local earthquake tomography". *Geophysical Journal International*, 188(3), 819-849, 2012.
- [12] Um J, Thurber C. "A fast algorithm for two-point seismic ray tracing". *Bulletin Seismological Society of America*, 77, 972-986, 1987.
- [13] Zhao D, Hasegawa A, Kanamori H. "Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional and teleseismic events". *Journal of Geophysical Research*, 99, 22313-22329, 1994.
- [14] Thurber CH, Aki K. "Three-dimensional seismic imaging". *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 15, 115-139, 1987.
- [15] Salah MK, Şahin Ş, Destici C. "Seismic velocity and Poisson's ratio tomography of the crust beneath southwest Anatolia: an insight into the occurrence of large earthquakes". *Journal of Seismology*, 11, 415-432, 2007.
- [16] Farouk M, Zhao D. "Tomo tools programme for Windows V 1.0". Geodynamics Research Center (GRC), Ehime University, Japan, Scientific Report, 1, 2006.
- [17] Hearn TM, Ni J. "Pn velocities beneath continental collision zones: the Turkish-Iranian Plateau". *Geophysical Journal International*, 117(2), 273-283, 1994.
- [18] Rodgers AJ, Ni JF, Hearn TM. "Propagation characteristics of short period Sn and Lg in the Middle East". *Bulletin Seismological Society of America*, 87(2), 396-413, 1997.
- [19] Saunders P, Priestley K, Taymaz T. "Variations in the crustal structure beneath western Turkey". *Geophysical Journal International*, 134(2), 373-389, 1998.
- [20] Al-Lazki AI, Sandvol E, Seber D, Barazangi M, Turkelli N, Mohamad R. "Pn tomographic imaging of mantle lid velocity and anisotropy at the junction of the Arabian, Eurasian and African plates". *Geophysical Journal International*, 158(3), 1024-1040, 2004.
- [21] Tezel T, Erduran M, Alptekin Ö. "Crustal shear wave velocity structure of Turkey by surface wave dispersion analysis". *Annals Geophysics*, 50(2), 177-190, 2007.
- [22] Erduran M, Çakir Ö, Tezel T, Şahin Ş, Alptekin Ö. "Anatolian surface wave evaluated at GEOFON station ISP Isparta, Turkey". *Tectonophysics*, 434(1), 39-54, 2007.
- [23] Meier T, Dietrich K, Stöckhert B, Harjes HP. "One-dimensional models of shear wave velocity for the eastern Mediterranean obtained from the inversion of Rayleigh wave phase velocities and tectonic implications". *Geophysical Journal International*, 156(1), 45-58, 2004.
- [24] Karagianni EE, Papazachos CB, Panagiotopoulos DG, Suhadolc P, Vuan A, Panza GF. "Shear velocity structure in the Aegean area obtained by inversion of Rayleigh waves". *Geophysical Journal International*, 160(1), 127-143, 2005.
- [25] Pasyanos ME. "A variable resolution surface wave dispersion study of Eurasia, North Africa, and surrounding regions". *Journal of Geophysical Research*, 110(B12301), 1-22, 2005.
- [26] Maggi A, Priestly K. "Surface waveform tomography of the Turkish-Iranian plateau". *Geophysical Journal International* 160(3), 1068-1080, 2005.
- [27] Bilim F. "Investigating Moho depth, Curie Point, and heat flow variations of the Yozgat Batholith and its surrounding area, North central Anatolia, Turkey, using gravity and magnetic anomalies". *Turkish Journal of Earth Sciences*, 26, 410-420, 2017.
- [28] Arslan S, Akin U, Alaca A. "Investigation of Crustal Structure of Turkey by Means of Gravity Data". *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 140(140), 55-71, 2010.
- [29] Akin U. "Gravite Verilerinden Türkiye'nin Sismik Hız dağılımı ve Kabuk Yapısının Ortaya Çıkarılması". *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 153,185-202, 2016.
- [30] Ateş A, Bilim, F. Büyüksaraç A, Aydemir A, Bektaş Ö, Aslan Y. "Crustal structure of Turkey from aeromagnetic, gravity and deep seismic reflection data". *Surveys in Geophysics*, 33(5), 869-885, 2012.