

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015802 (664-675)

AKU J. Sci. Eng.18 (2018) 015802 (664-675)

DOI: 10.5578/fmbd.67406

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Marmara Bölgesi İçin Kapsamlı SKS Polarizasyon Analizleri ve Üst Manto Deformasyonu Hakkında DüşündükleriTuna Eken¹

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34469 Sarıyer-İstanbul.*
e-posta: eken@itu.edu.tr

Geliş Tarihi:14.01.2018 ; Kabul Tarihi:17.08.2018

Özet

Bu çalışmada, telesismik (uzak) depremlere ait dalga formu kayıtları üzerinde gözlenen SKS fazı kullanılarak Marmara Bölgesi'nin altında kalan manto yapısının deformasyonu ile ilişkili anizotropik bulgular incelenmiştir. Bu amaçla kullanılan 34 adet istasyonda, tek-tabakalı anizotropi modeli varsayılarak hesaplanan 572 adet iyi kalitede SKS ayrışması parametresi, hızlı ve yavaş S dalgaları arasındaki zaman gecikmelerinin 0.97 sn ile 2.17 sn aralığında değiştiğini göstermektedir. İstasyon ortalamaları alınarak hesaplanan hızlanma polarizasyonu yönleri K10°D ile K63°D arasında değişerek büyük çoğunlukla KD-GB yönlü bir dağılıma işaret etmektedir. Hesaplanan istasyon ortalaması alınmış zaman gecikmeleri ve hızlanma yönleri, Anadolu için elde edilen ortalama değerlerle benzer bir dağılım gösterir. Bu ise bize, Marmara Bölgesi altında gözlenen sismik anizotropinin, Hellenik Yay'ı boyunca Anadolu kıtası altına dalım yapan Afrika levhasının geriye çekme etkisi sonucu şekillenen manto konveksiyon akımları ve buna bağlı gelişen kafes tipi tercihi yönelim (LPO) ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, SKS ayrışma parametrelerinin yönsel değişimleri üzerine uygulanan iki-tabakalı anizotropik yapı modellemeleri bu sonucu destekler niteliktedir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, Marmara Bölgesi için önceki yıllarda lokal S dalgaları kullanılarak gözlemlenmiş üst-kabuk (8-10 km) anizotropisi ile kıyaslandığında, deformasyonun düşey yönde kabuktan litosfer boyunca üst mantoya kadar sürekli bir şekilde iletilmediğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler

SKS ayrışma analizi; Sismik anizotropi; İki-tabakalı anizotropik modelleme.

Comprehensive SKS Polarization Analyses in the Marmara Region and Implications for the Upper Mantle Deformation**Abstract**

In the present study, deformation pattern within the upper mantle part beneath the Marmara region was investigated using SKS phases observed on the waveform recordings of teleseismic events. 572 good-quality SKS splitting measurements observed at 34 seismic stations, assuming a single-layer anisotropy, resulted in splitting time delays (TD) between fast and slow S-waves ranging from 0.97 s to 2.17 s. Station-averaged fast polarization directions exhibits an overall NE-SW oriented distribution. They vary between N10°E and N63°E. Station-averaged splitting measurements are in a good accordance with those obtained at various parts of Anatolia as this implies observed seismic anisotropy beneath the Marmara region is likely due to the mantle convection flow and associated lattice preferred orientation (LPO) that have been developed by the roll-back effect of subducting African plate beneath the Anatolia along the Hellenic Trench. Two-layer anisotropy modeling results inferred from directional dependency of apparent SKS splitting parameters tend to support this result. Comparison of the findings from present study with those from local S-wave splitting-derived upper crust (8-10 km) anisotropy results suggest that there is no a vertical coherency in transmitting the deformation from the crust to lithosphere and upper mantle in the study area.

Keywords

SKS splitting analysis; Seismic anisotropy; Two-layer anisotropic modeling.

1. Giriş

Levha hareketlerine neden olan dinamik kuvvetlerin hem bölgesel hem de küresel ölçeklerde kesin olarak bilinebilmesi, gezegenimizin tarihi ve onu şekillendiren süreçleri (dağ oluşumları, levha yakınlaşmaları vb.) anlamamız bakımından oldukça önemlidir. Levha sınır zonlarında etkili olan ve yer üzerinde de şekil değiştirmelerle görülen deformasyonla ilgili ipuçları, litosferik ve manto ölçeğinde tektonik faaliyetleri kontrol eden kuvvet dengelerini ve reolojiyi izah etmede anahtar bir rol oynar. Litosfer içinde dağılım gösteren deformasyonu açıklamak için başlıca iki ana model önerilmektedir: i) kabuk-manto içerisinde kinematik olarak eşleşme (England and Houseman 1986), ii) üst kabukta etkili olan deformasyonu mantodan ayıran düşük vizkoziteli orta veya alt kabuk tabaka modeli (Bird 1991). İlk modelde, derinlikle birlikte deformasyon dağılımının uyumlu bir şekilde kabuk ve manto içerisine iletilmesi söz konusudur. İkinci tip model ise, içerdiği zayıf bir alt kabuğun varlığı ile deformasyonun derinlere iletilmediğini öne sürmüş örneğin Tibet Plato'su için gözlenen yükselme ve topoğrafik değişimlerin nedenini açıklamakta kullanılmıştır (Royden *et al.* 1997).

Yukarıda değinilen modelleri destekleyebilecek gözlemsel bulguların başında Küresel Konum Belirleme Sistemi (GPS) gibi jeodezik veya sismik anizotropi gibi sismolojik ölçüm ve modellemeler gelmektedir. GPS ölçümleri esasen yüzey ve yüzeye yakın kinematikleri belirlemede kullanılmaktadır (örneğin Reilinger *et al.* 2006). Sismik anizotropi ölçümleri ise yerin alt kabuk ve manto tabakaları gibi daha derin yapıları ile ilişkili olarak yer içerisinde derinlerdeki deformasyonun tipi hakkında bize önemli ipuçları sağlayabilir. Örneğin, üst kabukta anizotropi bölgede hâkim olan stres rejimine duyarlı sıralı kırıklar tarafından kontrol edilir. Bu etki özellikle aktif fay zonları yakınında farkedilir düzeydedir (Bones and Zoback 2006; Eken *et al.* 2013). Alt kabuk veya manto gibi daha derin kısımlarda sismik anizotropi, kesme gerinimlerine

daha duyarlı olup bu durumda manto kinematiklerini kestirmede birincil kaynak olarak düşünülebilir. Üst manto içerisinde anizotropi, olivin minerali kristallerinin gerinime bağlı olarak meydana gelen kafes tercihi yönelimi sonucu gelişir (Fouch and Rondenay 2006). Bu tip bir durumda sismik hızlar için hızlanma eksenini, kesme deformasyonunun maksimum uzanımı yönünde olacaktır. Olivin mineralinin kristalografik a-ekseni, sismik P dalgalarının en yüksek hızda hareket ettiği yöne karşılık gelirken, yatay düzlem üzerinde konumlanmış a-ekseni olması durumunda, bu eksen hızlı sismik SKS fazının ve de Rayleigh yüzey dalgalarının faz hızlarının en yüksek olduğu yöne karşılık gelmektedir (Fouch and Rondenay 2006). Ancak bu çeşit bir genelleme her zaman doğru olmayabilir çünkü kayaç örnekleri üzerine yapılmış laboratuvar deneyleri ve sayısal modeller, mineral içerisindeki kristalografik yönelme ve deformasyon arasındaki ilişkinin deformasyonun gücü ve tipi, basınç, sıcaklık, ergime ve kayacın ihtiva ettiği su miktarı gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır (Long and Becker 2010 ve içerisindeki referanslar). Özellikle yüksek gerilme ve basınç değişimlerinin olduğu veya sıvılaştırmanın olduğu durumlarda a-ekseni, makaslama kuvveti yönüne paralelden ziyade dik olarak gelişir (Katayama *et al.* 2004). Bununla beraber bu tip bir anizotropi için gerekli koşullar sadece manto sıkışması olarak görülen köşe yitim zonları için geçerlidir (Lassak *et al.* 2006). Bu tip bir anizotropi birçok çalışma için ihmal edilen bir durumdur (Fouch and Rondenay, 2006). Öte taraftan alt kabuk içerisinde, mika minerali kristallerinin LPO tipi yönelimi sonucu gelişen anizotropi, sismik dalgaların makaslama gerilmesi yönleri boyunca hızlanmalarına neden olur (Weiss *et al.* 1999).

Kristalografik yönelme ve deformasyon arasındaki ilişki hakkında ciddi ipuçları verebilecek olan sismik anizotropinin yer içerisinde farklı derinliklerinde büyüklüğünün ve gerçek yönelim geometrisinin güvenilir bir şekilde belirlenmesi,

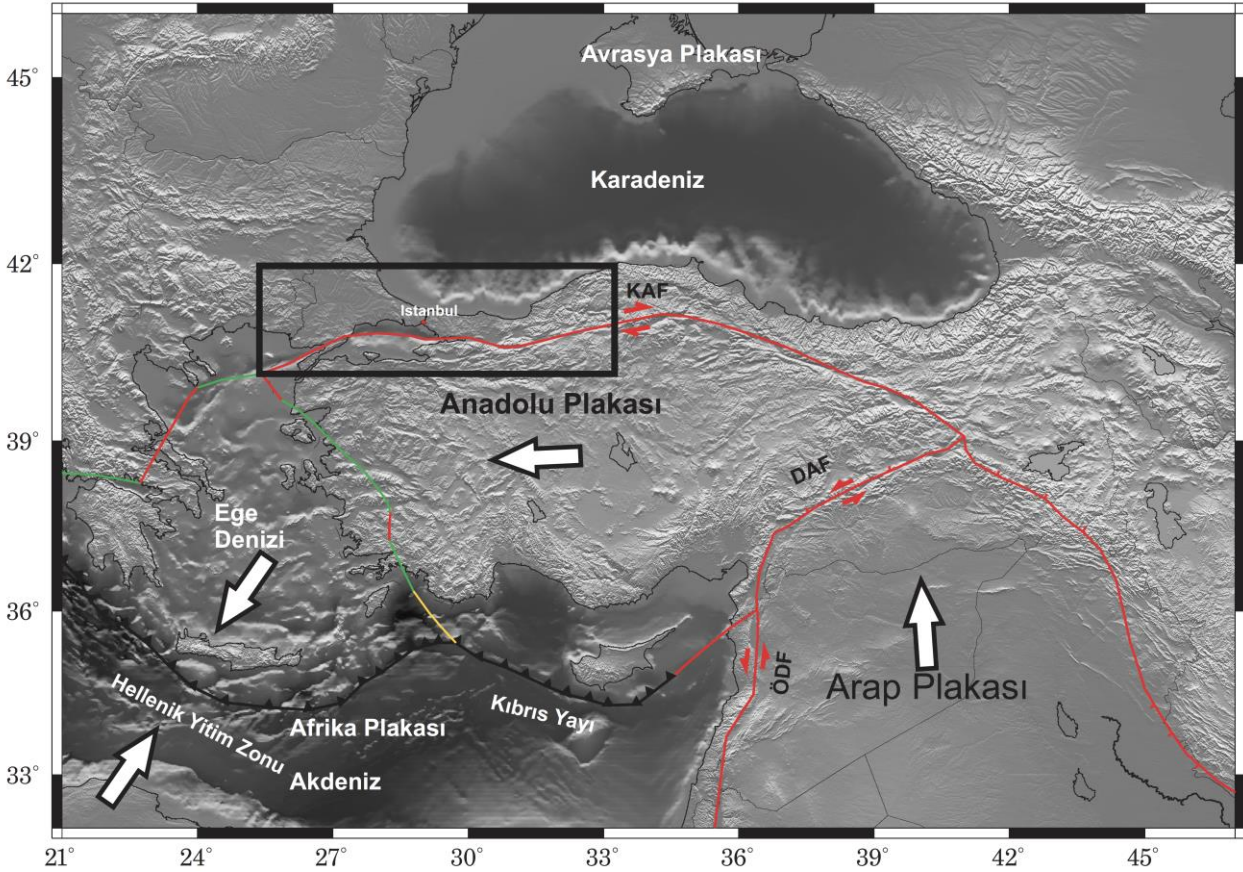
kıtaların oluşumu ve de evrimleri ile ilgili çalışmalar için birinci derecede bilgi kaynağı sağlayabilir. Anizotropiden elde edilebilecek bilgi yanal olarak değişim gösteren cisim kuvvetlerinin veya çarpışmasal sınır kuvvetlerinin üst mantodaki davranış biçimlerini açığa kavuşturabileceği gibi, manto litosferinin altında yatan astenosfer ile nasıl etkileşim halinde olduğunu anlayabilmemiz için de ipuçları sağlar. Derinliğe bağlı olarak anizotropik parametrelerin yüksek çözünürlükte kestirilmesi bize alt kabuk, manto litosferi ve astenosfer arasındaki etkileşim veya ayrışma ilişkileri hakkında da bir ipucu verebilir.

Bu çalışmanın amacı, Marmara Bölgesi'nde sürekli olarak kayıt alan geniş-bantlı sismik istasyonların SKS fazı gözlemlerinden faydalanarak litosfer ve altında kalan astenosferik yapının anizotropik karakteristiklerini ortaya çıkarmaktır. SKS ayrışma ölçümleri için, uzun süreli çalışan

sismometre kayıtlarının kullanılması, gözlem sayısını arttıracak için istasyon bazlı ortalamaları alınmış sismik hızlanma yönü ve zaman gecikmelerinin güvenilirliğini güçlendirecektir. Manto için tahmin edilen SKS ayrışma parametrelerinin, kabuk için hesaplanan lokal S ayrışma parametreleri ile ilişkisi bölgede KAFZ'nin derinliklerine doğru deformasyonun nasıl iletildiğine dair önemli ipuçları vermektedir.

2. Çalışma Alanı

Çalışma alanımızın karakteristik olarak en belirgin tektonik özelliği, güneydeki Anadolu levhası ile kuzeyde yer alan Avrasya levhasını birbirinden ayıran bir sınır teşkil eden 1600 km uzunluğundaki kıtalararası sağ yanal atımlı Kuzey Anadolu Fay Zonu'dur (KAFZ) (Şekil 1).



Şekil 1. Türkiye ve yakın çevresinin tektonik özellikleri. Levha sınırları verisi Bird (2003)'ten alınmıştır. Burada yitim zonları siyah, kıtasal transform faylar kırmızı, kıtasal rift sınırı yeşil ve yayılması sırtı sınırı ise sarı renkli çizgiler ile gösterilmektedir. Burada KAF, DAF, ÖDF sırasıyla, Kuzey Anadolu Fayı, Doğu Anadolu Fayı ve Ölü Deniz Fayı'nın kısaltmasıdır. Beyaz oklar bölgedeki levha hareketlerinin yönlerini göstermektedir. Siyah dikdörtgen içerisinde kalan alan çalışma alanını temsil etmektedir.

KAFZ'nin Marmara Denizi içerisinde kalan kısmı hariç geri kalan kısmında toplamda yaklaşık 900 km'den daha büyük uzunlukta bir kısmı, batıya doğru göç eder nitelikteki yıkıcı depremler sayesinde geçen yüzyılda kırılmıştır (Barka 1999). 1999 İzmit (Mw7.4) ve Düzce (Mw7.2) yırtılmalarından sonra KAFZ'nin batı kısımlarına doğru yoğunlaşan sismolojik çalışmalar, bölgede yoğun şekilde meydana gelen mikro-deprem aktivitesini gözler önüne sermektedir (Taymaz *et al.* 2001; Bohnhoff *et al.* 2013). Fichtner *et al.* (2013a,b) tarafından yapılan tam dalgaformu tomografi modellemesi sonucu, KAFZ'nin doğu ve de orta kısımlarında 100 km derinliklere kadar dar düşük hız zonu gözlemlenmesine rağmen sadece SKS ayırılması ile elde edilebilmiş anizotropik sismik dalga hızlanma yönleri (Biryol *et al.* 2010) litosferik derinliklerde fayın devam ettiğini ima edecek şekilde fay doğrultusuna paralel değildir. S-alıcı fonksiyon analizlerinin detaylı olarak incelenmesi, bölgede genel olarak litosferik manto kalınlığının 100km'nin altında olduğunu göstermiştir (Kind *et al.* 2015).

KAFZ boyunca sismik anizotropi çalışmaları kabuk ve özellikle üst mantoyu temsil etmeleri bakımından ikiye ayrılırlar. Birinci gruptaki çalışmalara bakıldığında; KAFZ'nin farklı bölümlerinde meydana gelen mikro deprem kayıtlarından elde edilen S-dalgalarına uygulanan ayırma analizleri: i) sismik anizotropinin daha çok 8-10 km'lik üst kabuktan kaynaklandığını, ii) incelenen depremler için hesaplanan hızlanma yönleri ile bu depremleri oluşturan faylara uzaklıkları arasında bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur (Tadokoro *et al.* 2002; Peng and Ben-Zion 2004; Hurd and Bohnhoff 2012; Eken *et al.* 2013). Eken *et al.* (2013) lokal S-dalgalarından elde edilen hızlanma yönlerinin yatay yöndeki değişimlerini incelediğinde, sismik anizotropinin üst kabukta hem yapısal hem de stres rejimi ile ilişkili olarak gelişebileceği sonucuna varmıştır. KAFZ'nin orta kesiminde, incelenen farklı bir veri seti ile farklı yönlerden gelen uzak depremler için elde edilen P-alıcı fonksiyonların yatay bileşenlerine uygulanan harmonik analiz yöntemi, kabuğun ilk 15 km

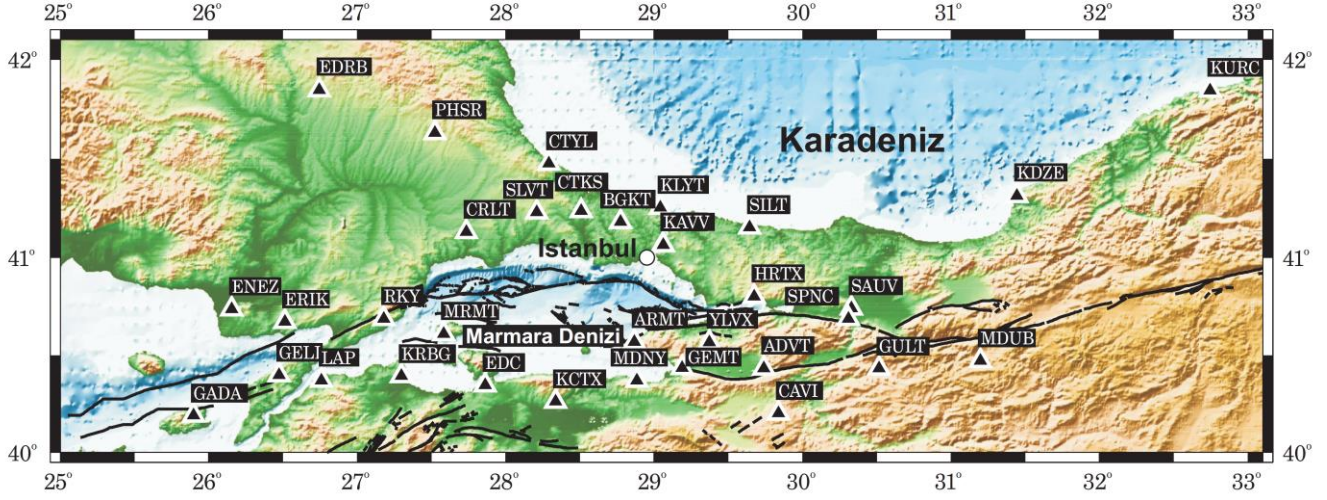
derinliği için güçlü anizotropik belirtiler yakalamıştır (Licciardi *et al.* 2018). KAFZ altında yer almakta olan kabuk için benzer anizotropik derinliklere, Çubuk-Sabuncu *et al.* (2017) tarafından uygulanan tam dalgaformu ters çözümü ile elde edilen radyal anizotropi sonuçlarında da ulaşılmıştır. Farklı frekans içeriklerine sahip lokal ve telesmik deprem verileri kullanılarak gözlenen veya modellenen birbiri ile uyumlu bu sonuçlar, karmaşık jeolojik ve tektonik etkenlerin, anizotropik parametrelerin KAFZ'nin orta ve batı kısımlarındaki değişimlerinde bir kontrolü olduğu şeklinde yorumlanabilir. Manto'ya yönelik çalışmalarda ise; KAFZ'nin orta kesimi için Biryol *et al.* (2010) tarafından yapılan, daha düşük frekanslı ve genel olarak litosfer ve üst manto anizotropisini örnekleyebilen SKS fazı ayırma ölçümleri, sismik dalga hızlanma yönünün K43°D gibi ortalama bir yönelim ile genelde tüm manto boyunca uyumlu bir şekilde KD-GB yönlü olduğunu göstermektedir. Daha geniş bölgesel bir ölçekte Arabistan, Avrasya ve Anadolu levhalarının çarpışma kuşağı boyunca SKS ayırma analizlerinden elde edilen anizotropik yönler (bkz. Sandvol *et al.* 2003; Evangelidis *et al.* 2011; Paul *et al.* 2014; Yolsal-Çevikbilen 2014, Confal *et al.* 2016), Biryol *et al.* (2010) tarafından bulunan yönler ile çok uyumludur. Bu uyum, bölgede sismik anizotropinin, genel olarak Helenik yitim zonu boyunca Anadolu levhası altına dalan Afrika levhasının güneybatı doğrultulu geri çekilmesine bağlı olarak gelişen astenosfer içerisindeki manto konveksiyon akımları ile doğrudan ilişkili olabileceğine işaret eder.

3. Veri ve Yöntem

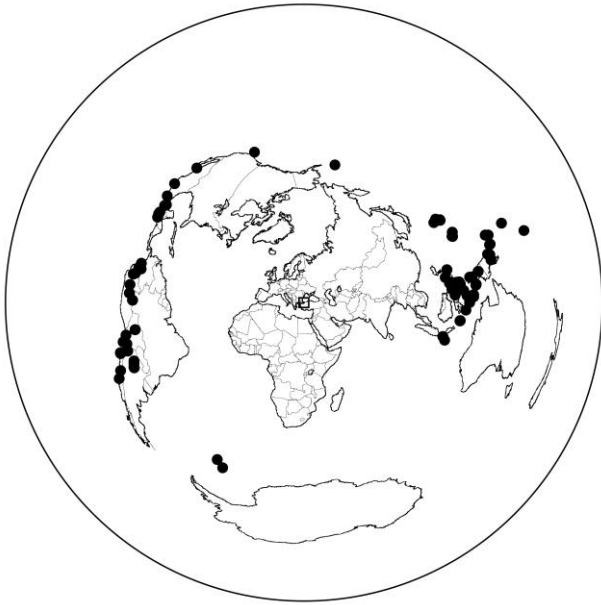
Bu çalışmada kullanılan ve SKS fazını içeren dalga formları, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) tarafından 50 Hz ve 100 Hz arasında değişen örnekleme aralığı ile çalışan 34 adet genişbantlı istasyondan elde edilmiştir (Şekil 2). Analiz edilen telesmik depremlerin dış merkez uzaklıkları 85° ile 142° arasında seçilerek SKS fazının diğer istenmeyen bozucu (bkz. S, PS, veya ScS) fazlardan ayrımı sağlanmıştır. Bir sonraki aşamada, 2005 ve 2013 yılları için aletsel büyüklüğü M5.9 ve

üzeri olarak seçilen 133 adet depreme ait dalga formu kayıtları görsel olarak incelenerek içlerinden 78 adet depreme ait (Şekil 3) yeterince iyi kalitede

kaydın SKS ayrışma analizi için kullanılması kararlaştırılmıştır.



Şekil 2. Bu çalışmada analiz edilen kalıcı geniş-bantlı istasyonların dağılımı (siyah üçgenler). KAFZ'nin geçtiği noktalar siyah renkli sınırlar ile temsil edilmektedir. Fay verisi Armijo et al. (2005)'ten alınmıştır.



Şekil 3. Bu çalışmada kullanılan 2005 ve 2013 yılları arasında meydana gelmiş dış merkez uzaklıkları 85° ve 142° arasında değişen ve aletsel büyüklüğü M5.9 ve üzeri olan 133 adet depremin dağılımını (siyah daire).

SKS ayrışma analizi, çekirdek-manto sınırında kırılan SKS ve SKKS fazlarını kullanarak manto içerisinde

anizotropiyi ölçmek için kullanılan tekniklerin en yaygınıdır. Bu yöntem anizotropinin varlığını etkili bir şekilde teşhis edebilecek bir yöntemdir. S-dalgaları anizotropik bir ortama girdiğinde farklı yayılım hızlarına sahip olan birbirinin benzeri iki dalgacıya ayırır (Fouch and Rondenay 2006). SKS fazları için anizotropinin net etkisi izotropik bir ortamda tamamen radyal doğrultuda olması beklenen parçacık hareketinin, anizotropik ortamda enine (transversal) bileşene transferi olarak gözlemlenir. Ayrışma parametreleri, muhtemel sismik dalga hızlanma yönleri ve zaman gecikmesi değerleri arasında yapılan bir arama algoritması sonucunda belirlenebilir. Bulunan optimum ayrışma parametreleri gözlenen dalga formlarına düzeltme şeklinde uygulandığı vakit transversal bileşen üzerindeki enerjinin minimum olduğu görülür (Silver and Chan 1991). Ölçülen sismik dalga hızlanma yönü (FPD) ve ayrışma zaman gecikmesi (TD) parametreleri sismik anizotropinin yayılım yolu boyunca birleşik etkisini temsil eder. Anizotropik ortamda etkin kristallografik eksenin yöneliminin yatay yönde olduğu ve sadece tekdüze anizotropik özellikli vetek tabakalı yapının olduğu

durumlarda, FPD klasik olarak hızlı eksenin yönelimini işaret ettiği şeklinde yorumlanırken TD değeri ise anizotropik tabaka kalınlığı ve anizotropinin büyüklüğü ile ilişkilendirilir. Böylesi bir durumda, gerçekte olan hızlı eksene paralel veya dik yönlerden istasyona yaklaşan ve hiçbir ayrımlaşma belirtisi göstermeyen dalgalar haricinde tüm yönlerden gelen depremler için aynı tipte ölçüm sonuçlarının elde edilmesi gerekir. Daha karmaşık tipte geometrilerin (örneğin eğim eksenli anizotropi veya çoklu anizotropik tabaka) gerçek yapıyı temsil etmesi durumunda, FPD ve TD değerleri depremin geliş yönüne göre değişim gösterecek olduğundan bu gözlemlerin doğrudan yorumlanması zordur (Fouch and Rondenay 2006).

SKS analizleri, Silver ve Chan (1991) tarafından geliştirilen ve transversal bileşenin enerjisinin minimize edilmesini amaçlayan sistematik model parametresi arama yönteminden yararlanarak, hızlanma yönü için 1°'lik ve zaman gecikmesi için 0.05 sn'lik artışlarla elde edilen uyumsuzluk yüzeyi (bu durumda transversal bileşen enerji miktarı) kullanılarak iki yatay bileşende kaydedilen SKS fazı üzerine uygulandı. Bu tip veri analizi öncesi, sayısal olan ham dalga formu üzerine 0.05 ve 0.25 Hz aralığında bant geçişli Butterworth tipi bir süzgeç ile SKS fazı daha belirgin hale getirildi. SKS fazını daha iyi yakalayacak şekilde analiz penceresi belirleyebilmek için Kennett and Engdahl (1991) tarafından geliştirilen IASP91 bir boyutlu (1B), derinlikle değişen hız modeli kullanılarak teorik SKS faz varışları hesaplandı. Bunun üzerine analiz penceresi, SKS varış zamanının 15 sn öncesi ve 25 sn sonrasını kapsayacak şekilde belirlendi. Bu çalışmada kullanılan SKS ayrışması analizi, yatay düzlemde meydana gelen parçacık hareketinin eliptikten doğrusal olana geçmesinin sağlandığı örneklerin gözle denetime tabii tutulması safhasını da içerir (Şekil 4). Bu tip bir kalite kontrol işleminin ardından, 620 adet yüksek kalitede SKS fazını içeren dalga formu verisinden 572 adet güvenilir SKS ayrışma parametresi elde edilmiştir. Bu çalışmada ölçülen ayrışma parametrelerinin hata analizleri, Silver and Chan (1991) tarafından tanımlanan F-test yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır.

Bu tip bir analiz, bize uyumsuzluk yüzeyinin (misfit surface) istatistiksel olarak ne derece belirgin bir şekilde uyumsuzluk yüzeyinin minimumu ile temsil edilen en iyi ayrışma parametrelerinden saptığını göstermektedir (Şekil 4).

4. SKS Ayrışma Bulguları

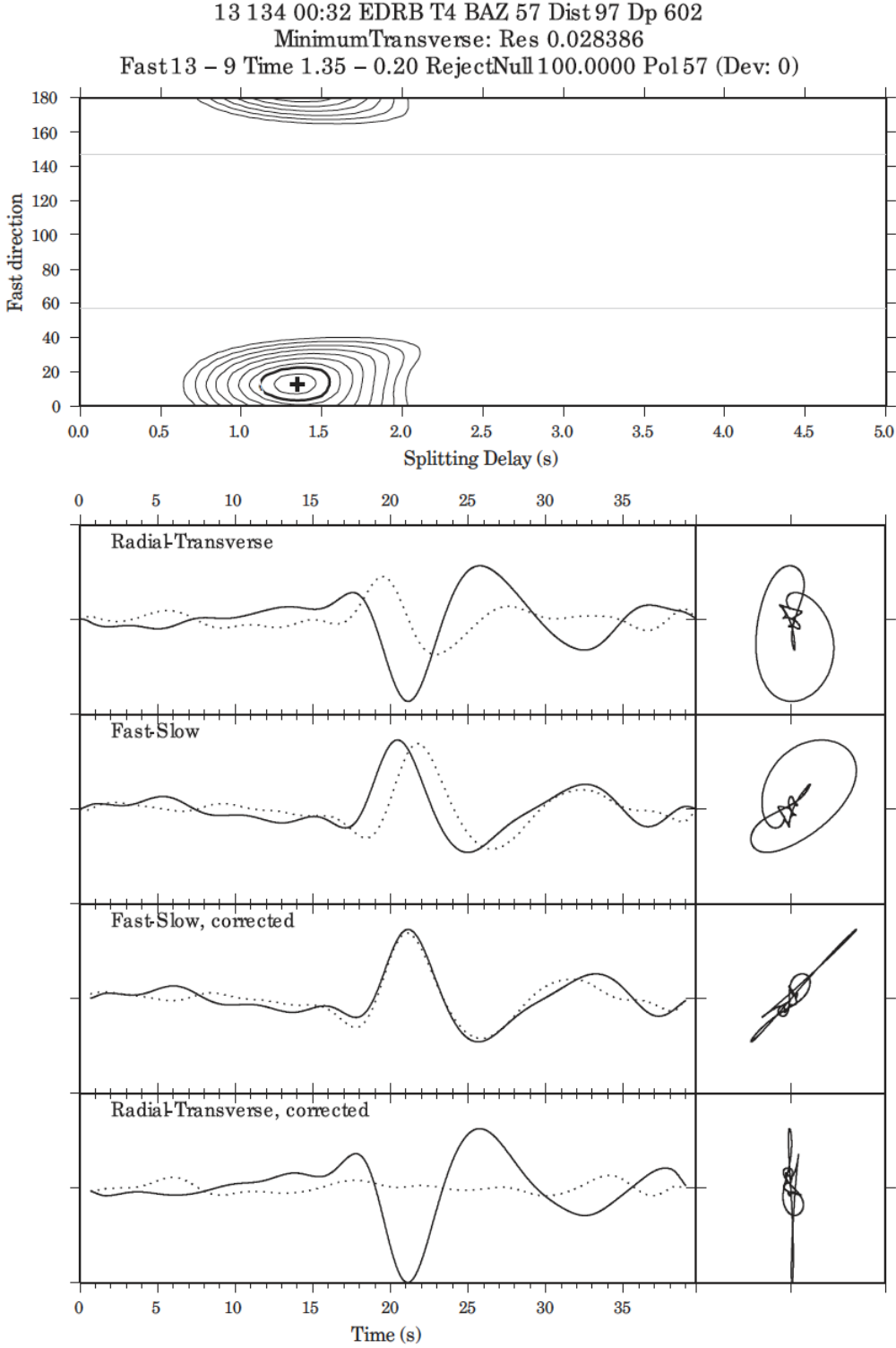
Şekil 5, bu çalışma sonucunda telesismik deprem için bulunan zaman gecikmesi ve hızlanma yönlerinin her bir istasyon için Von Mises (Cochran *et al.* 2003) yaklaşımı kullanılarak dairesel ortalama alınmış değerlerini temsil etmektedir. Von Mises ortalaması aritmetik ortalamaya benzemekle beraber açı/yön değerleri ortalamaları için idealdir ve hızlanma yönlerinin 180° simetri özelliğini de hesaba katmaktadır. Burada gösterilen istasyonlardan her bir tanesi sahip oldukları iyi kalitede SKS ölçümü sayısına göre renklendirilmişlerdir. Bu şekilde analiz edilen istasyonlar üzerindeki kırmızı çubukların, kuzeyden yaptığı açı hızlanma yönünü işaret ederken boyu ise zaman gecikmeleri, dolayısıyla da anizotropinin şiddeti ile doğru orantılıdır. Seçilen her bir deprem-istasyon SKS ayrışma analizlerine ayrıca uygulanan gözle değerlendirme işlemlerinden sonra geriye kalan ve istasyon başına 2 ile 30 adet arasında değişen yüksek kaliteli çözümlerin ortalaması, hızlanma yönleri için K10°D ile K63°D ve zaman gecikmeleri için 0.97 sn ile 2.17 sn arasında değişen anizotropik parametreler ile temsil edilmektedir. Çalışma bölgesi için hesaplanan ortalama 36.78 ± 3.4 derecelik anizotropik hız yönelimi ve 1.55 ± 0.14 sn zaman gecikmesi bölgesel ve küresel SKS verileriyle son derece uyumludur (Sandvol *et al.*, 2003; Becker *et al.* 2013).

5. Tartışma ve Sonuç

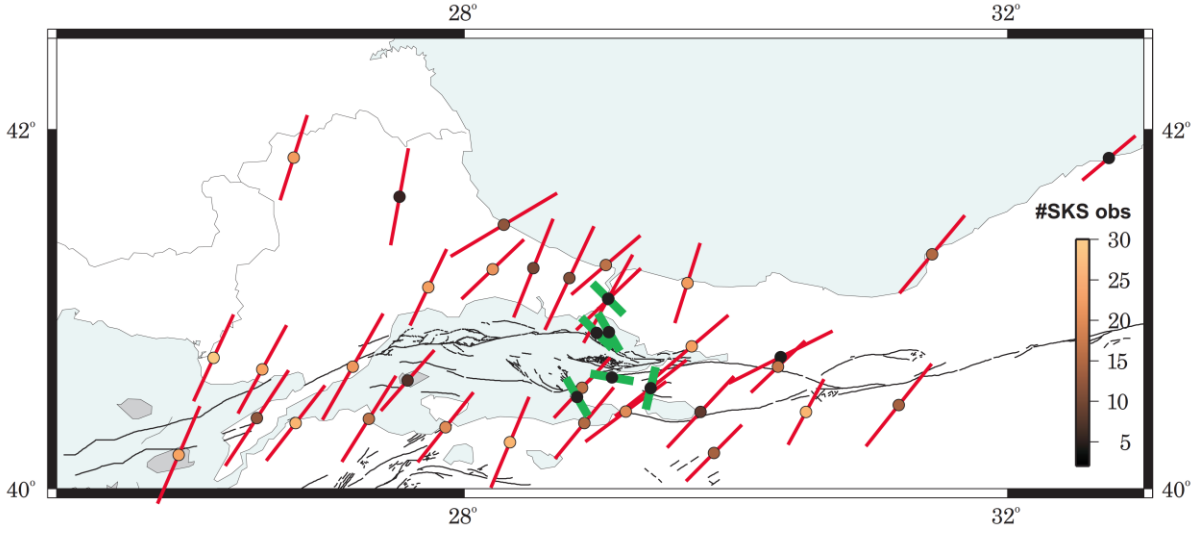
Şekil 5'ten de anlaşılacağı üzere sismik hızlanma yönleri baskın bir şekilde KD-GB doğrultulu anizotropik hızlanma yönleri ile temsil edilmektedirler. Bu genel yönelim, Biryol *et al.* (2010) tarafından KAFZ'nin orta kesiminde elde edilen ve Türkiye'nin diğer bölgelerinde bulunan sonuçlarla (Sandvol *et al.* 2003; Evangelidis *et al.* 2011; Paul *et al.* 2014; Yolsal-Çevikbilen

2014;Confal *et al.* 2016) oldukça tutarlılık göstererek sismik anizotropinin kaynağının, Helenik yayı boyunca Anadolu levhasının altına dalım yapan Afrika levhasının G-GB doğrultulu geri çekilmesine

(slab roll-back) bağlı olarak gelişen astenosfer içindeki manto konveksiyon akımları ile ilişkili olduğunu doğrular niteliktedir.



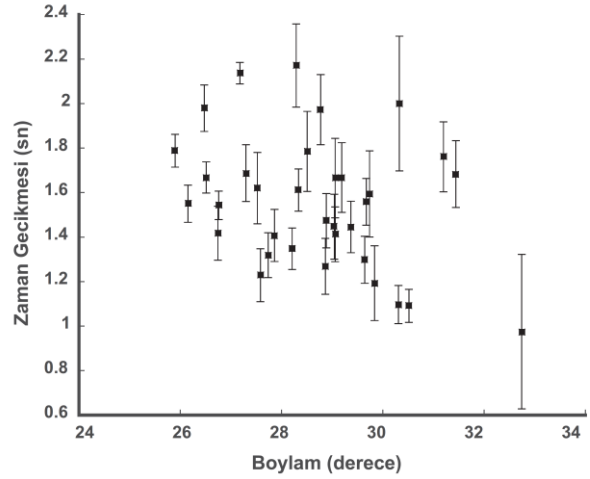
Şekil 4.Veri işlem kısmından bir örnek. Burada en üst panelde EDRB istasyonu için hesaplanan bir uyumsuzluk yüzeyi görülmektedir. Onun altında kalan panelde ise 40 sn'lik bir veri için uygulanan anizotropik düzeltme işlemi özetlenmektedir. Burada analiz sırasında düzeltme yapılan radyal ve transversal bileşenli dalga formlarına ait zaman serileri ile yine bu iki bileşenden elde edilen parçacık hareketlerinin eliptikten doğrusala geçişi görülebilir.



Şekil 5. SKS ayrışma analizinden elde edilen istasyon ortalaması alınan hızlanma yönleri (ince kırmızı çubuk). Eken *et al.* (2013) tarafından üst-kabuk için lokal S-dalgalarından elde edilen hızlanma yönleri (kalın yeşil çubuk). Kırmızı çubukların boyu istasyon ortalaması hesaplanan zaman gecikmesi değerleri ile orantılıdır. SKS ayrışma analizleri için kullanılan ve daire sembolü ile gösterilen her bir istasyon, sahip oldukları iyi kalitede SKS ayrışma ölçümü adedine göre renklendirilmiştir.

Bununla birlikte, çalışma alanının batı kısımlarında (örn. EDRB ve PHSR için) sismik hızlanma yönleri KD-GB yönelimden K-G doğrultusuna doğru hafifçe değişim göstermektedir. Birbirine komşu olan ve toplam 5 adet ölçümün ortalaması ile temsil edilen PHSR istasyonu ile 23 adet ölçümün ortalaması ile temsil edilen EDRB istasyonları arasında çok büyük anizotropik yönelim farklarının olmaması, bu tip bir değişimin gözlem sayısından bağımsız olduğuna işaret eder. Analiz edilen istasyonların bulunduğu noktaların boylam değerleri ve gecikme zamanları karşılaştırıldığında, bölgenin batısına doğru gidildikçe zaman gecikmelerinin ~ 1 sn'lere düştüğü gözlenmiştir (Şekil 6). Bu tip bir zaman gecikmesi, örneğin %4'lük bir anizotropik büyüklüğün baskın olduğu bir manto katmanı için ~ 150 km kalınlığında nispeten ince bir anizotropik tabakaya karşılık gelir. Öte taraftan, anizotropik yönlerin doğudan batıya doğru KD-GB yöneliminde tutarlılığının bozulmaması, manto içerisinde iki-tabaka anizotropisi (Silver and Savage 1994) gibi karmaşık yapılar yerine, olivin mineralinin kristallenmesinde etkili olan konveksiyon akımlarını ve devamında gelişen gerinim deformasyonunu desteklerken, zaman gecikmelerinde gözlenen düşüş oluşan

deformasyonun miktarının azalması ile açıklanabilir.

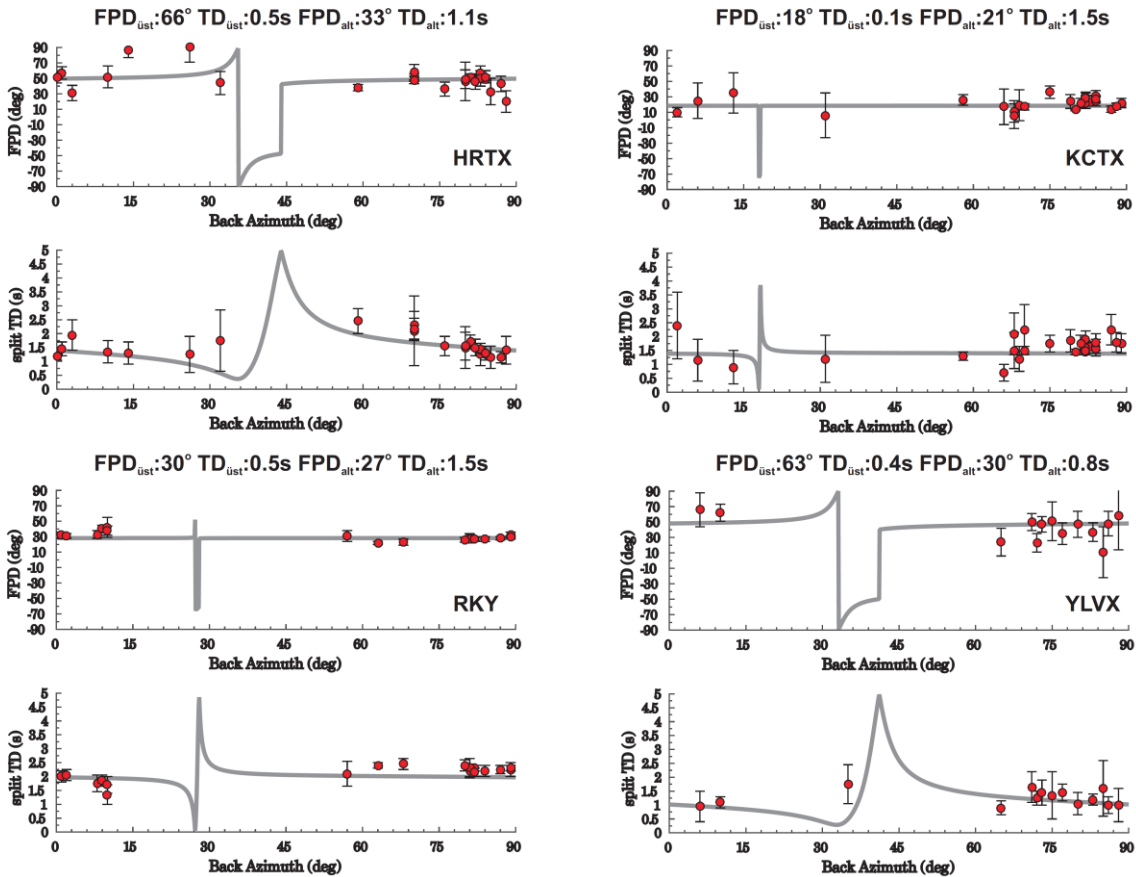


Şekil 6. Ayrışma analizi zaman gecikmelerinin batıdan doğuya doğru boylamsal değişimi (siyah kare). Standart hata değerleri F-test analizi (Silver and Chan, 1991) ile elde edilmiştir.

Burada kullanılan SKS ayrışma ölçüm tekniği, manto içerisinde bir tabakalı ve yatay simetri eksenli bir yapı olduğunu varsaymaktadır. Bununla beraber, çalışma bölgesi altında kalan manto tabakasının daha karmaşık (iki-tabakalı) bir anizotropik yapıya sahip olup olmadığını anlamak için, farklı yönlerden

gelen depremler için elde edilen görünür ayrışma parametrelerinin yön bağımlılığı incelendi. Bu tip bir modelleme için mevcut SKS ayrışma parametreleri veri setine bakılarak, farklı yönlerden gelen depremler için en fazla ölçüme sahip, HRTX, KCTX, RKY ve YLVX istasyonları seçildi. İki-tabaka anizotropi modellemesi sırasında, manto içerisinde litosferik (üst) ve astenosferik (alt) katmanlara ait hızlanma yönü ve zaman gecikmesini temsil edecek 4 adet parametre arandı. Bu arama işleminin amacı, Silver and Savage (1994) tarafından verilen teorik bağıntılar kullanılarak, her bir deprem için hesaplanan görünür ayrışma parametreleri ile önceden ölçülen SKS ayrışma parametreleri arasındaki toplam farkların minimumunu veren optimum iki-tabaka parametrelerini bulmaktır. Seçilen 4 istasyon için elde edilen en iyi iki-tabaka

anizotropisi model sonuçları Şekil 7'de gösterilmektedir. Sonuçlara göre, bu 4 istasyonda, üst-tabaka ve alt-tabakada hızlanma yönleri birbirinden çok fazla değişim göstermeyerek, ortalama bölgesel olarak hâkim olan KD-GB yönelimi ile tutarlı bir davranış sergiler. Hatta KCTX ve RKY istasyonlarında görünür ayrışma parametrelerinin deprem geliş yönüne göre dağılımı tek-tabaka anizotropisi ile açıklanabilecek biçimdedir. Bütün istasyonlar için alt-tabaka anizotropisine ait modellenen gecikme zamanları daha baskındır. Tüm bu sonuçlar, bölge için astenosferik manto konveksiyon akımlarının mantoda gözlemlenen sismik anizotropinin esas kaynağı olduğu fikrini daha da destekler niteliktedir.



Şekil 7. Silver and Savage (1994) tarafından tanımlanan iki-tabaka anizotropik modellemesinin HRTX, KCTX, RKY ve YLVX istasyonlarına uygulanmasından elde edilen sonuçlar. Burada gri eğri, optimum iki-tabaka modelini, kırmızı daireler ise görünür SKS ayrışması parametrelerinin yönsel değişimini temsil eder. Standart hata değerleri F-test analizi (Silver ve Chan 1991) ile elde edilmiştir.

Burada not etmek gerekir ki, SKS ölçümleri için yapılan iki tabaka anizotropi modellemelerinde, iyi kalitede bir SKS fazının, çok farklı yönlerden sınırlı sayıda bilgi getirmesi (Şekil 7), bu tip modellemeler için ileride direk S-dalgaları gibi yön bağımlılığı daha güçlü dalga türlerinin kullanılmasını düşündürmektedir. Ancak unutmamak gerekir ki, direk S-dalgalarının kullanılabilmesi için, içerdikleri kaynak-bölgesi etkilerinin giderilmesi zorunludur (Eken and Tilmann 2014).

Çalışma bölgesinde, kabuk içerisinde aktif deformasyon sağ yanal atımlı KAFZ'nin batı ucunda ve çoğunlukla Marmara Denizi içerisinde kalan kısmında meydana gelir. SKS ayrışma ölçümlerinden elde edilen anizotropik yönler KAFZ'nin ana yönelimine paralel değil buna karşın genelde KD-GB doğrultusunda olacak şekilde dağılım gösterirler (Şekil 5). Biryol *et al.* (2010) KAFZ'nin orta kesimi için yine benzer bir dağılım gözlemlemiştir. Fayın yapısı ile SKS fazından hesaplanan anizotropik yönlerin uyumsuzluğu, deformasyonun düşey yönde eşit ve istikrarlı bir şekilde iletilmediğine işaret ederek söz konusu fayın litosferik derinliklerde bir etkisinin olmadığını ima eder (Eken and Tilmann 2014).

Lokal S-dalgalarına uygulanan S-dalgası ayrışması analizleri (örn. Tadokoro *et al.* 2002; Peng and Ben-Zion 2004; Hurd and Bohnhoff 2012; Eken *et al.* 2013), KAFZ'nin farklı bölümlerinde sismik anizotropinin kabuk içinde en fazla 8-10 km'lik üst kabukta etkili olduğunu göstermiştir. Licciardi *et al.* (2018), KAFZ'nin orta kesimlerinde farklı bir frekans içeriğine sahip telesmik alıcı fonksiyon analizleri sayesinde elde edilen güçlü anizotropik sinyallerin derinliklerini (0-15 km) incelediğinde sonuçların lokal depremlerin polarizasyon analizlerinden elde edilenlerle tutarlı olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar KAFZ boyunca üst kabukta etkili sismik anizotropinin, hem fayın varlığına bağlı olarak yapısal, hem de stres rejimi ile ilişkili olarak gelişebileceği sonucunu akla getirmektedir. Kabuk anizotropisini incelemeye yönelik geçmişte ve yakın zamanda yapılan çalışmalar, karmaşık jeolojik ve tektonik etkenlerin, KAFZ'nin orta ve batı kısımlarında anizotropik parametrelerin değişimlerinde bir kontrolü olduğunu göstermektedir. Ancak benzer bir yorum, daha derin manto anizotropisi ile ilgili olan SKS ayrışma parametrelerinin dağılımı için söylenemez. Son olarak, elde edilen kabuk ve üst

manto anizotropik yönleri arasındaki 90 dereceye kadar varabilen uyumsuzluklar, üst kabukta KAFZ'ye bağlı olarak gelişen anizotropinin daha derinlerde devammediğini göstermektedir. Bu anlamda kabuk ve manto içerisinde düşey yönde birleşik bir mekanizmadan bahsetmek mümkün değildir. Üst kabuk ve manto arasındaki bağın kesilmesine neden olabilecek düşük vizkoziteli orta veya alt kabuk modelininin olarak varlığı, çalışma bölgesinde mevcut diğer jeofiziksel model ve gözlemler, (örneğin sismik tomografi, elektiriksel tomografi) tarafından henüz kesin olarak belirlenememiştir.

5. Kaynaklar

- Armijo, R., N. Pondard, B. Meyer, G. Uçarkus, B. M. de Lepinay, J. Maleville, S. Dominguez, M.-A. Gustcher, S. Schmidt, C. Beck, N. Cagatay, Z. Cakir, C. Imren, K. Eris, B. Natalin, S. Ozalaybey, L. Tolun, I. Lefevre, L. Seeber, L. Gasperini, C. Rangin, O. Emre, and K. Sarikavak (2005). Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian fault): Implications for seismic hazard in Istanbul, *Geochem. Geophys. Geosyst.* **6**, no. Q06009, 1–29, doi:10.1029/2004GC000896.
- Barka, A., 1999. The 17 August Izmit earthquake, *Science* **285**, 1858–1859.
- Becker, T. W., Lebedev, S., and Long, M. D., 2012. On the relationship between azimuthal anisotropy from shear wave splitting and surface wave tomography. *Journal of Geophysical Research*, **117**, B01306, doi:10.1029/2011JB008705.
- Bird, P., 1991. Lateral extrusion of lower crust from under high topography, in the isostatic limit: *Journal of Geophysical Research*, **96**, pp. 10275–10286.
- Bird, P., 2003. An updated digital model of plate boundaries, *Geochemistry Geophysics Geosystems (G-cubed)*, **4**, 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- Biryol, C.B., Zandt, G., Beck, S.L., Özacar, A.A., Adıyaman, H.E., & Gans, R.C., 2010. Shear wave splitting along a nascent plate boundary: The North Anatolian Fault Zone, *Geophysical Journal International.*, **181**, 1201–1213.
- Bohnhoff, M., Bulut, F., Dresen, G., Malin, P., Eken, T. and Aktar, M., 2013. An earthquake gap south of Istanbul. *Nature Communications*, **4**, 1999.
- Boness, N.L., & Zoback, M.D., 2006. A multiscale study of the mechanism controlling shear velocity anisotropy in the San Andreas Fault Observatory at depth, *Geophysics*, **71(5)**, F131–F146.
- Cochran, E., Vidale, J., and Li, Y. G., 2003. Near-fault anisotropy following the Hector Mine earthquake, *Journal of Geophysical Research*, **10**, 2436.

- Confal, J. M., Eken, T., Tilmann, F., Yolsal-Çevikbilen, S., Çubuk-Sabuncu, Y., Saygin, E., & Taymaz, T., 2016. Investigation of mantle kinematics beneath the hellenic-subduction zone with teleseismic direct shear waves, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **261**, 141–151.
- Çubuk-Sabuncu, Y., Taymaz T., and Fichtner, A., 2017. 3-D Crustal Velocity Structure of Western Turkey: constraints from full-waveform tomography, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **270**, 90-112, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.06.014>.
- Eken, T., Bohnhoff, M., Bulut, F., Can, B., and M. Aktar, 2013. Crustal anisotropy in the Eastern Sea of Marmara region in NW Turkey, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, **103**, 911-924, doi:10.1785/0120120156.
- Eken, T. and Tilmann, F., 2014. The Use of Direct Shear Waves in Quantifying Seismic Anisotropy: Exploiting Regional Arrays, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, **104**, 2644–2661, doi:10.1785/0120140020.
- England, P., & Houseman, G., 1986. Finite strain calculations of continental deformation 2. Comparison with the India–Asia collision zone, *Journal of Geophysical Research*, **91**, 3664–3676.
- Evangelidis, C., Liang, W.-T., Melis, N., & Konstantinou, K., 2011. Shear wave anisotropy beneath the Aegean inferred from SKS splitting observations, *Journal of Geophysical Research*, **116**, B04314, doi:10.1029/2010JB007884.
- Fichtner, A., Saygin, E., Taymaz, T., Cupillard, P., Capdeville, Y. and Trampert, J., 2013a. The deep structure of the North Anatolian fault zone, *Earth and Planetary Science Letters*, **373**, 109–117.
- Fichtner, A., Trampert, J., Cupillard, P., Saygin, E., Taymaz, T., Capdeville, Y. and Villaseñor, A., 2013b. Multiscale full waveform inversion. *Geophysical Journal International*, **194**, 534–556.
- Fouch, M.J., Rondenay, S., 2006. Seismic anisotropy beneath stable continental interiors. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **158(2)**, 292–320.
- Hurd, O. and Bohnhoff, M., 2012. Stress and structural-induced shear-wave anisotropy along the 1999 Izmit Rupture, Northwest Turkey, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, **102(5)**, 2177–2188, doi: 10.1785/0120110270.
- Katayama, I., Jung, H., & Karato S-I., 2004. New type of olivine fabric from deformation experiments at modest water content and low stress, *Geology*, **32(12)**, 1045-1048, doi:10.1130/G20805.1.
- Kennett, B. and Engdahl, E.R., 1991. Travel times for global earthquake location and phase identification, *Geophysical Journal International*, **105**, 429–465.
- Kind, R., Eken, T., Tilmann, F., Sodoudi, F., Taymaz, T., Bulut, F., Xuan, X., Can, B. and Schneider, F., 2015. Thickness of the lithosphere beneath Turkey and surroundings from S-receiver functions, *Solid Earth*, **6**, 971-984.
- Lassak, T.M., Fouch, M.J., Hall C.E., & Kaminski, E., 2006. Seismic characterization of mantle flow in subduction systems: Can we resolve a hydrated mantle wedge? *Earth and Planetary Science Letters*, **243**, 632–649.
- Liccardi, A., Eken, T., Agostnetti, N.P., Yolsal-Çevikbilen, S., Tilmann, F., and Taymaz, T., in press. Seismic anisotropy in central North Anatolian Fault Zone and its implications on crustal deformation, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **277**, 99-112, doi.org/10.1016/j.pepi.2018.01.012.
- Long, M. D. & Becker, T.W., 2010. Mantle dynamics and seismic anisotropy. *Earth and Planetary Science Letters*, **297**, Frontiers, 341-354.
- Paul, A., Karabulut, H., Mutlu, A. K., & Salaün, G., 2014. A comprehensive and densely sampled map of shear-wave azimuthal anisotropy in the Aegean–Anatolia region. *Earth and Planetary Science Letters*, **389**, 14–22.
- Peng, Z. and Ben-Zion, Y., 2004. Systematic analysis of crustal anisotropy along the Karadere-Duzce branch of the North Anatolian fault, *Geophysical Journal International*, **159**, 253–272.
- Royden, L.H., Birchfiel, B.C., King, R.W., Wang, E., Chen, Z., Shen F., & Liu Y., 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, **276**, 788–790.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., et al., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *Journal of Geophysical Research*, **111**, B05411, doi:10.1029/2005JB004051.
- Sandvol, E., Turkelli, N., Zor, E., Gok, R., Bekler, T., Gurbuz, C., Seber, D., & Barazangi, M., 2003. Shear wave splitting in a young continent-continent collision: An example from eastern Turkey, *Geophysical Research Letters*, **30**, 8041, doi:10.1029/2003GL017390, 24.
- Silver, P.G., & Chan, W.W., 1991. Shear wave splitting and sub-continental mantle deformation, *Journal of Geophysical Research*, **96(B10)**, 16429–16454.
- Silver, P.G., Savage, M.K., 1994. The interpretation of shear-wave splitting parameters in the presence of two anisotropic layers. *Geophysical Journal International*, **119(3)**, 949–963.
- Tadokoro, K., Ando, M., Baris, S., Nishigami, K., Nakamura, M., Ucer, S. B., Ito, A., Honkura, Y. and Isikara, A. M., 2002. Monitoring of fault healing after the 1999 Kocaeli, Turkey, earthquake, *Journal of Seismology*, **6**, 411–417.
- Taymaz, T., Kasahara, J., Hirn, A. & Sato, T., 2001. Investigations of micro-earthquake activity within the Sea of Marmara and surrounding regions by using ocean bottom seismometers (OBS) and land seismographs: initial results, *Scientific Activities 2001 Symposia -Extended Abstracts Book*, pp. 42-51. Istanbul Technical University, Faculty of Mines, May

8, 2001, ATLAS DBR-Offset Printing House, Istanbul-Turkey, 113 pages, ISBN 975-97518-0-1.

Yolsal-Çevikbilen, S., 2014. Seismic anisotropy along the Cyprean arc and northeast Mediterranean Sea inferred from shear wave splitting analysis. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **233**, 112–134.

Weiss, T., Siegesmund, S., Rabbel, W., & Bohlen, T., and Pohl, M., 1999. Seismic velocities and anisotropy of

the lower continental crust: A review, *Pure and Applied Geophysics*, **156**, 97–122.

İnternet kaynakları

1-<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-verileri/sayisal-veriler> (03.05.2017)