

ANADOLU'DAKİ SON PASİFİSİM KALINLIKLAR; DANA ve CSNET'İN VERİLERİNİN ANALİZLERİ, BİRİNCİ SONUÇLAR

N. Türkelli¹, M. Kahraman¹, U.M. Teoman¹, S. Poyraz Altuncu², R. Polat², D. Kalafat², A.K. Mutlu¹, M.D.Cambaz²

¹ Profesör, Araştırmacı, Doktora öğrencisi, Jeofizik Anabilim Dalı, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bozüyük Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Dr. Mühendis, Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bozüyük Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Email: turkelli@boun.edu.tr

ÖZET:

2011-2013 yılları arasında Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (NAFZ) batı bölümünde DANA (Dense Array on North Anatolia) isimli bir sismik dizinim, 2013-2015 yılları arasında ise orta ve güney Anadolu'da CASE (Central Anatolian Seismic Experiment) isimli bir sismik ağı, uluslararası iki ayrı araştırma projesi kapsamında çalışılarak veri toplanmıştır. Bu çalışmada, her iki proje hakkında bilgi verilmekte, toplanan verilerin analizlerinden elde edilen sonuçların bir bölümü sunulmaktadır. Her iki çalışma bölgesinin mikro sismik etkinliği haritalandırılmakta, yine her iki bölge için yol-zaman eğrileri ve hesaplanan kabuk hızları verilmektedir. DANA sismik dizinimi NAFZ'in kuzey ve güney kollarındaki sismik etkinliğin yanında bölgede aynı sistemin ikinci derecedeki kollarındaki, özellikle Geyve Fayında, yüksek sismik etkinliği açığa çıkarmıştır. CASE sismik ağı ise Orta Anadolu Fay Zonundaki (CAFZ, Central Anatolian Fault Zone) sismik etkinliğin sanıldan daha yoğun olduğunu göstermektedir. Her iki çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, NAFZ'in batı bölgesi için hesaplanan P_g ve S_g hızları, Orta Anadolu için hesaplanan P_g ve S_g hızlarından daha düşük olduğunu ortaya çıkarmıştır.

ANAHTAR KELİMELER : NAFZ, Orta Anadolu, mikro deprem, sismik dizinim, sismik ağı.

1. YERBİLİMCİLERİN DOĞAL LABORATUVARI: ANADOLU PLAKASI

Genel olarak Anadolu Plakasının güncel tektonik yapısına baktığımızda: Doğu Anadolu'daki kıta-kıta çarpışması sonucu bölgede kalınlaşan, kısalan ve yükselen bir kabuk yapısının volkanizmayla sonuçlandırılması; Helen yayının geri çekilmesinin sonucu batıda bir açılma rejimi ve incelenen bir kabuk yapısını; Helen ve Kıbrıs Yayları boyunca Anadolu'nun altına dalan Akdeniz'in, Tetis Okyanus baseninin bir kalıntısı olarak kabul edildiğini; Isparta Açığı'nın ise Helen ve Kıbrıs Yaylarının konveks arakesimi olarak görmekteyiz. Bu tektonik yapı, Anadolu Plakası'nı yüksek oranda deformasyona uğratmakta, bölgedeki fay zonlarıyla ilişkili olarak sık sık yıkıcı depremler açığa çıkmaktadır.

Anadolu Plakasının karmaşık tektonik yapısı, yer bilimciler için mükemmel doğal bir laboratuvar olmaktadır. Deprebilimciler, topladıkları sinyallerin analizleriyle, bölgedeki etkin depremselliği izlemekle beraber, sismik dalgaların hızlarının, genliklerinin ve anizotropik özelliklerinin değişimini gösterdiklerini, karmaşık bir üst manto-kabuk yapısının var olduğunu ortaya koymaktadırlar.

Sismik ağlardan toplanan sinyallerin analizlerindeki temel amaç, Anadolu plakasının tektonik yapısının dinamiklerini, sismik tehlikenin belirlenmesi için gereklidir, kabuk-üst manto ilişkisini ve sonuç olarak da evrimini anlayabilmek için son yıllarda Anadolu Plakası üzerinde uluslararası projeler yapılmakta, farklı bölgelerde farklı amaçlar için sismik ağlar kurulmaktadır. 1999 Yılında Bozüyük Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) Jeofizik Anabilim Dalı ve Cornell Üniversitesi

araştırmacılarının başlattığı Doğu Anadolu Deprem Projesi (Eastern Turkey Sismic Experiment, ETSE) ile başlayan çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Bu alanda kurulan son iki aşamada, FaultLab projesi kapsamında kurulan DANA (Dense Array on North Anatolia) sismik dizini ve CD-CAT (Continental Dynamics-Central Anatolian Tectonics) Projesi kapsamında kurulan CASE (Central Anatolian Seismic Experiment) sismik ağıdır.

2. PASİF SİSMİK AĞLAR

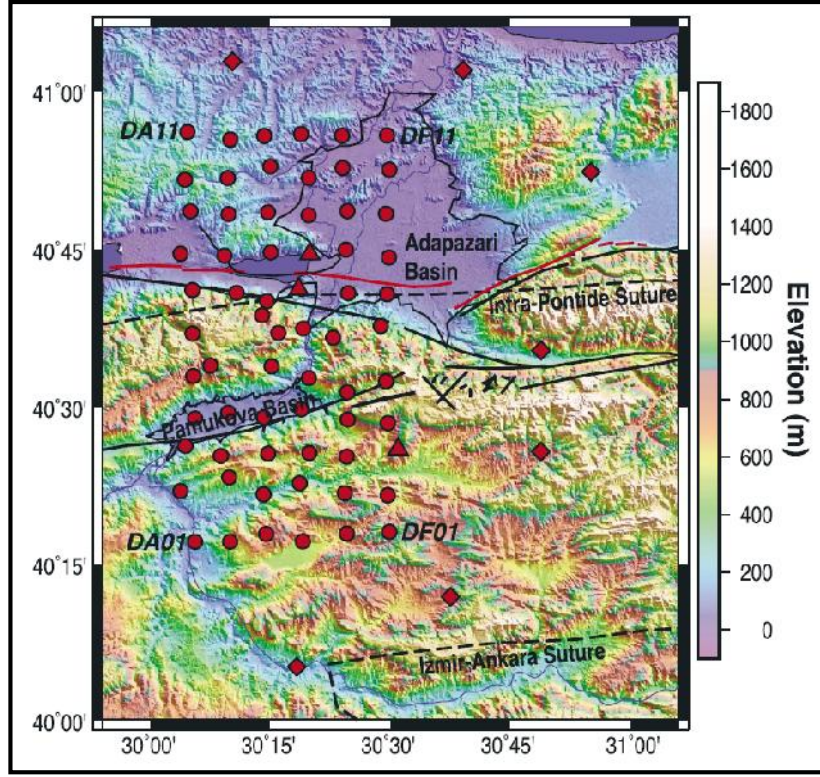
Yerkürenin dinamik yapısının incelenmesi amacıyla yapılan sismolojik araştırmalarda gerçek zamanlı zayıf ve kuvvetli yer hareketleri ağlarının ek olarak çevrimdışı (offline) pasif sismik ağlarla da veri toplanmaktadır. **FaultLab Projesi** kapsamında çalıştırılan **DANA Sismik Ağı** ve **CD-CAT** Projesi kapsamında çalıştırılan **CASE Sismik Ağı** ülkemizde bu amaçla bölgesel olarak çalıştırılan son iki pasif sismik ağıdır. Bilindiği gibi bu ağlarla toplanan veriler gerçek zamanlı olmayıp, veriler kurulan istasyonlarda diskler üzerine kaydedilmekte, belirli zaman aralıklarıyla istasyonlar ziyaret edilerek veriler bilgisayar disklerine kopyalanmaktadır.

2.1. FaultLab Projesi ve DANA Sismik Ağı:

17 Ağustos 1999 ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri sırasında kırılan KAFZ'nin batı-batı kesiminin sismik etkinliği ve güncel tektonik gelişimi göz önüne alındığında, sismolojik olarak, bölgedeki kabuk ve manto yapısının yüksek çözünürlükte görüntülenmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, alt kabuk hız yapısının belirlenmesi deprem döngüsü ve sismik risk çalışmalarına önemli bir altyapı olmaktadır. Bu amaçlara yönelik olarak; KRDAE Jeofizik Anabilim Dalı ve Leeds Üniversitesi araştırmacıları ortak yürütülen FaultLab projesi kapsamında Sakarya ili ve çevresine Mayıs 2012'de 71 adet sismik istasyondan oluşan DANA sismik ağını kurmuşlar ve Ekim 2013 tarihine kadar veri toplamışlardır. (ekil 1). Her bir istasyonun arasındaki uzaklık yaklaşık 7 km civarındadır. Dar bir alanda çok yoğun bir sismik ağına kurulması açısından ülkemizde ilk örnektir. İngiltere Doğu Çevre Araştırma Konseyi (The Natural Environment Research Council-NERC) ve Bozaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından desteklenen FaultLab projesi çok disiplinli uluslararası bir çalışmadır (www.see.leeds.ac.uk/faultlab), projenin bilimsel amaçları:

- (i) alt kabuğun, saçılmış (scattered) telesismik kaynaklı sismik dalgalar kullanılarak görüntülenmesi,
- (ii) Bölgesel sabit istasyon ve DANA verileriyle bölgenin mikro deprem etkinliğinin incelenmesi,
- (iii) Kabuktaki üç boyutlu (3D) hız yapısının hesaplanması,
- (iv) Deprem döngüsünde viskoelastik (zamana bağlı plastik davranış ekli) gerilmenin jeodinamik modellenmesi;
- (v) (iii) InSAR ve yayınlanmış GPS verileriyle türetilen jeodezik kısıtlar,
- (vi) Uludağ Masifinin yapısal ve dokusal analizi

başlıkları altında verilmiştir.



ekil 1. FaultLab Projesi çalışma alanı ve DANA Sismik Diziniminin istasyon dağılımı (DA01-DA11; DF01-DF11 karelerindeki kırmızı noktalar FaultLab projesi için NERC’ın desteğiyle gönderilen istasyonlardır. K01-K07 no.lu istasyonlar KRDAE tarafından kurulan geçici istasyonlar olup baklava eklemindeki kırmızı noktalarla gösterilmektedir. Kırmızı üçgenler ise bölgedeki KRDAE’ye ait sabit istasyonlardır. Kırmızı hat 1999 Kocaeli depreminin kırığıdır. Topo rafa NASA verileri kullanılarak renklendirilmiştir (Fredericksen ve diğeri, 2015).

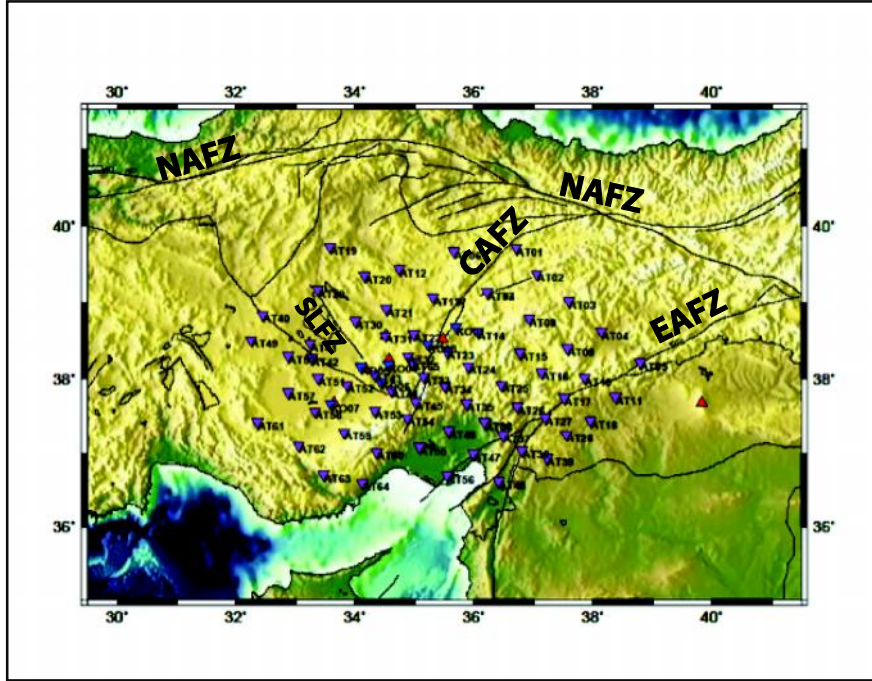
2.2. CD-CAT Projesi ve CASE Sismik Ağı:

CD-CAT, ABD Ulusal Bilim Vakfı (National Science Foundation-NSF) tarafından 2011-2016 yılları için desteklenen beş yıllık bir araştırma projesidir. Amacı; Anadolu Plakasının jeodinamik yapısını, yüzeyden mantoya kadar; pasif sismik ağlar, manyetotellürik, jeomorfoloji, yapısal jeoloji, sedimentoloji, gibi yerbilimlerinin farklı çalışma alanlarını entegre ederek araştırmaktır (Whitney, D. 2011). Bu projenin Orta Anadolu Sismik Ağı-CASE olarak adlandırılan bileşeni ise Orta ve güney Anadolu’da 71 geniş bantlı istasyondan oluşan 2 yıllık pasif bir sismik ağ çalışmasıdır. Çalıştırılan sismik ağı, KRDAE’nin Ulusal Deprem Ağına entegre edilerek Orta Anadolu Fay Zonu, Kuzey Anadolu Fay Zonu, Doğu Anadolu Fay Zonu, Toroslar bölgesini içermektedir (ekil. 2). CASE verilerinin analizleriyle:

- (i) Bölgedeki aktif fayların varlığı,
- (ii) Sismojenik zonun derinliği,

- (iii) Kabukta oluşan depremlerin mevcut faylarla uyumluluğu,
- (iv) Üst-kabuktaki akıkan/kısmi erimenin varlığı,
- (v) Bölgedeki yanardağların sismik olarak aktivitesi,
- (vi) Kabuk kalınlığı ve reolojisi,
- (vii) Litosfer-Astenofer sınırı,
- (viii) 410 ve 670 km süreksizlik sınırlarının tanımı ve dalgan levhaların etkileşim

konularının araştırılması planlanmıştır.



Şekil 2. CD-CAT projesi kapsamında kurulan geniş bantlı geçici deprem istasyonlarının dağılımı. NAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu (North Anatolian Fault Zone), EAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu (East Anatolian Fault Zone), CAFZ: Orta Anadolu Fay Zonu (Central Anatolian Fault Zone), SLFZ: Tuz Gölü Fay Zonu (Salt Lake Fault Zone).

Proje kapsamında toplanan sinyallerin henüz 17 aylık bölümü mikrodeprem lokasyonları, bir yıllık bölümü ise üst manto anizotropisinin incelenmesi için analiz edilmiştir.

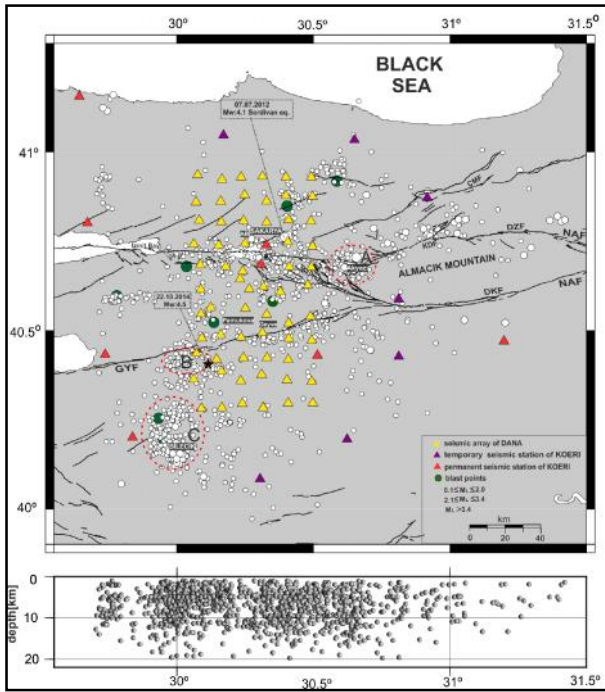
3. PROJELERİN ÜRÜNLERİ

Her iki projeden elde edilen ilk sonuçlar ulusal (ATAG, TDMSK, Jeofizik Mühendisleri Odası vb) ve uluslararası konferanslarda (AGU, EGU, 8. Balkan Congress, vb) yaklaşık otuz kezden fazla sunulmuştur, FaultLab projesinden ise SCI kapsamındaki dergilerde üç adet makale yayınlanmıştır. Çalışmalar devam etmekte olup yakın gelecekte yayınlanan makale sayısı hızla artacaktır.

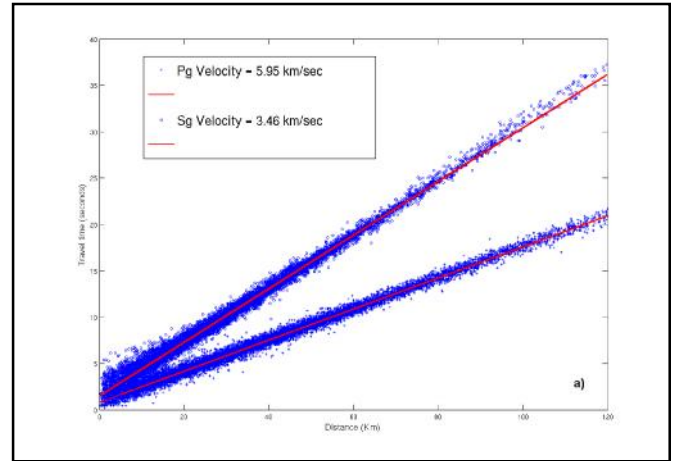
Bundan sonraki paragraflarda, konferanstaki sunum süresi ve yazım sınırlamaları dikkate alınarak elde edilen sonuçlardan bazıları kısmen verilecektir.

3.1 FaultLab Projesinden üretilen ilk Yayınlar:

i) DANA diziliminden elde edilen sinyallerin mikrodprem etkinliğini saptamak için yapılan analizlerinde ZSacWin lokasyon programı (Yılmaz, 2012) kullanılmıştır. Analizler sırasında bölgedeki tektonik yapıları filtre edilmiş ve büyüklüğü 0.1 üzerinde ara titreşim kriterlerine uyan 1344 depremin lokasyonu yapılmıştır (ekil 3). Lokasyonlardaki yatay hata miktarı 0.6 km, dikey hata miktarı ise 0.9 km'den daha azdır. Sismojenik zonun derinliği 15 km'le sınırlıdır (S.A. Poyraz ve diğerleri, 2015). Analizler, Kuzey Anadolu Fayı'nın batı ucunda ve Geyve Fayında oldukça yoğun bir depremsellik aktivitesini göstermektedir.



ekil 3. DANA Sismik Ağından ve bölgedeki KRDAE sabit istasyonlarından toplanan sinyallerin analizi KAF'nın batı ucu ve kollarındaki mikrodprem aktivitesinin yoğunluğunu göstermektedir (S.A. Poyraz ve diğerleri, 2015).



ekil 4. Pg ve Sg dalgalarının yol-zaman ilişkileri ve bu ilişkilerden bölge için hesaplanan Pg ve Sg hızları (S.A. Poyraz ve diğerleri, 2015).

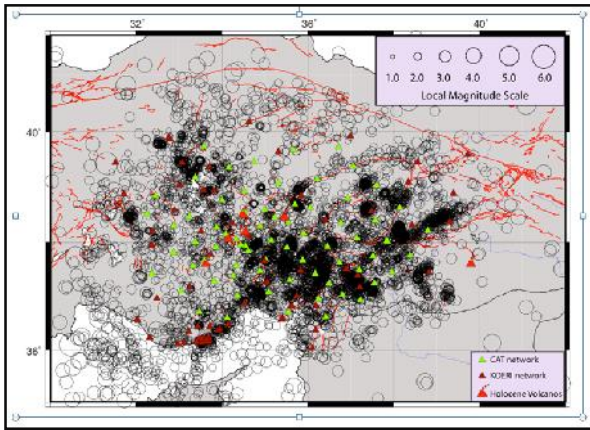
ii) Lokasyonu yapılan depremlerden elde edilen Yol-Zaman ilişkileri ekil 4'de verilmektedir. Yol-Zaman ilişkileri kullanılarak hesaplanan üst kabuk sismik hızları Pg için 5.95 km/s, Sg için 3.46 km/s olarak bulunmuştur. Wadati diyagramından hesaplanan V_p/V_s oranı ise 1.713'dür.

iii) Fredericksen ve diğerleri, (2015) telesismik kayıtlar kullanarak bölge için kabuk kalınlığını, sediman kalınlığını ve P/S sismik dalgalarının hız oranını hesaplamışlardır. Çalışmalar, KAF'nın kuzey ve güney kollarında kabukun fiziksel parametrelerinin değiştiğini göstermektedir. Kuzey kolun kuzeyinde kabuk kalınlığı artmakta, güney kolun güneyinde ise sismik hızların (P/S) oranı artmaktadır. İsostatik dengenin karmaşık olduğu ve mantodaki yoğunluk değişimlerinden önemli derecede etkilendiği ileri sürülmektedir.

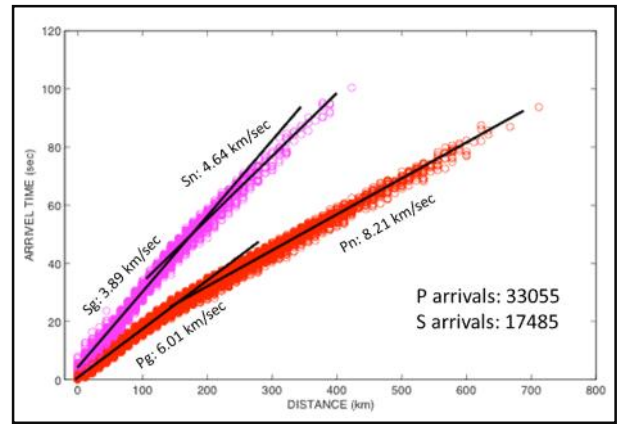
iv) Kahraman ve di erleri (2015), KAFZ'ın batı kesimi için kabuk kalınlığını ~35 km ve kabuk yapısının Graben formasyonu boyunca doğudan batıya ~30 km den ~24 km incelmesini hesaplamışlardır.

3.2 CD-CAT Projesinden Elde Edilen İlk Sonuçlar:

i) CASE sismik ağı ve KRDAE sabit deprem istasyonlarından elde edilen sinyallerinin ilk 17 aylık kısmının analizleriyle bölge için elde edilen mikrodeprem etkinliği ekil 5'de verilmiştir. Depremlerin lokasyonu için SeisComp3 (Hanka et al., 2010), programı kullanılmıştır. 17 aylık süre için bölgede $0.5 < M_L < 4.7$ aralığında yaklaşık 7500 deprem lokasyonu yapılmıştır. Ekilde, yoğun deprem etkinliği nedeniyle, büyüklüğü gösteren daireler yeterince seçilemese de, etkinliğin ana faylar ve bu fayların kollarıyla örtüştüğü bariz olarak görülmektedir. Orta Anadolu'daki deprem etkinliğinin bu denli yoğun



ekil 5. Harita 1 Haziran 2013-31 Ekim 2014 tarihleri arasında bölgedeki mikrodeprem etkinliğini göstermektedir.

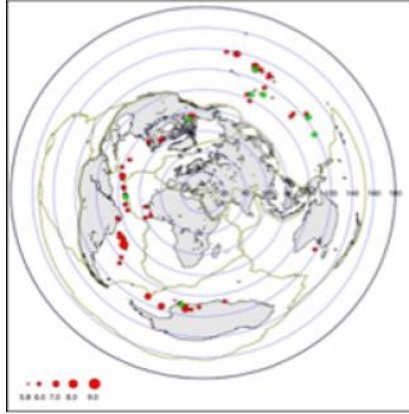


ekil 6. Pg, Sg ve Pn, Sn dalgalarının yol-zaman eğrileri ve bu eğrilerden bölge için hesaplanan Pg, Sg ve Pn, Sn hız değerleri

olduğunun ilk kez haritalanması bölge için altı çizilmesi gereken bir sonuçtur. Haritada Tuz Gölü Fay Zonunun güney batı kesiminin yoğunluğu ve Hatay'ın kuzeyindeki etkinlik dikkat çekmektedir. Bölgede sismojenik zonun derinliği 20 km lere kadar indiği saptanmıştır.

ii) Bölge için elde edilen Yol-Zaman eğrileri ekil 6'da görülmektedir. Yol-Zaman eğrileri kullanılarak hesaplanan kabuktaki sismik hızlar Pg için 6.01 km/s, Sg için 3.89 km/s; üst manto için ise Pn için 8.21 km/s, Sn için 4.64 km/s dir. Hız değerleri daha önceki çalışmalarla uyumluluk göstermektedir.

iii) Bilindiği üzere S dalgası ayrılma (Shear Wave Splitting) analizi üst mantodaki anizotropinin varlığı için önemli bir araçtır. Bölge için yapılan SKS and SKKS ayrılma analizlerinde Wüstefeld ve di erlerinin (2008) SplitLab programı kullanılmıştır. Ekildeki yeşil noktalar derinliği 100 km'den daha derin depremlerin dağılımını göstermektedir. Analiz için ilk aşamada Mayıs 2013-Mayıs 2014 zaman aralındaki kayıtlar kullanılmıştır. Ekil 8 ayrılma analizlerinden elde edilen sonuçları haritalamaktadır. Adana civarındaki ayrılma parametrelerindeki hızlı değişim dikkati çekmektedir. Hızlı değişimin derin kabukta kayaların dokusal yapılarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Doğu Anadolu Fay Zonu (KAFZ/EAFZ)'da ortalama hız polarizasyonu (averaged fast polarization directions) NE-SW doğrultusundadır ve KAFZ'ın doğrultusuyla uyumludur.



ekil 7. SKS ve SKKS analizlerinde kullanılan telesisimik depremlerin

KAYNAKLARları. Ye il noktalar 100

km'den daha derindepremlerin

Alkan, Frederikson, De A. Th

Poyraz, U.M. Teoman, N. Türkelli, and M. Utkucu, 2015. Crustal thickness variations and isostatic

disequilibrium across the North Anatolian Fault, western Turkey (2015). *Geophysical Research Letters* **42**: **11**,

751-757.

Natural Environment Research Council Grant for Deep crustal structure of the North Anatolian Fault Zone and the earthquake cycle. *Grant No:NE/I028017/1.*

Hanka, W., Saul, J., Weber, B., Becker, J., Harjadi, P., Fauzi, and GITEWS Seismology Group, 2010. Real-time earthquake monitoring for tsunami warning in the Indian Ocean and beyond. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **10**,

2611-2622.

Kahraman M., Cornwell GD., Thompson D., Rost S., Houseman G., Türkelli N., Teoman U., Poyraz Altuncu S., Utkucu M. and Gülen L., (2015). Crustal-scale shear zones and heterogeneous structure beneath the North Anatolian Fault Zone, Turkey, revealed by a high-density seismometer array. *Earth and Planetary Science Letters* (accepted).

Selda Altuncu Poyraz, M. U ur Teoman, Niyazi Türkelli, Metin Kahraman, Didem Cambaz, Ahu Mutlu, Sebastian Rost, Gregory A. Houseman, David A. Thompson, David Cornwell, Murat Utkucu, Levent Gülen

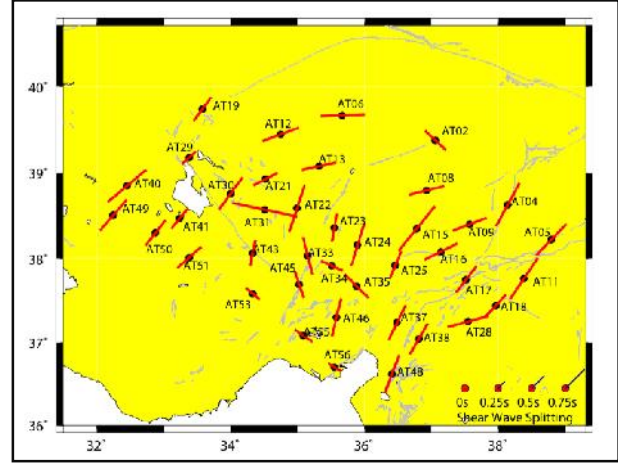
2015. New constraints on micro-seismicity and stress state in the western part of the North Anatolian Fault Zone: Observations from a dense seismic array. *Tectonophysics*, **656**, **190-201.**

Whitney, D., 2011. Continental Dynamics: Central Anatolian Tectonics (CD-CAT). <https://www.esci.umn.edu/orgs/whitney/CD-CAT-index.html>.

Wüstefeld, A., Bokelmann, G., Zaroli, C., Barruol, G. 2008. SplitLab: A shear-wave splitting environment in Matlab. *Computers & Geosciences* **34**: **515-528.**

Yilmazer M., 2012. zSacWin: A Rapid Earthquake Processing and Archiving System, User Guide v1.0.

Supported by the *Bo aziçi University Research Fund, Project Number: 5725P.*



ekil 8. SKS and SKKS analizlerinden elde edilen

ilk sGülen, G. A. Houseman, M. Kahraman, S. A.

Poyraz, U.M. Teoman, N. Türkelli, and M. Utkucu, 2015. Crustal thickness variations and isostatic

disequilibrium across the North Anatolian Fault, western Turkey (2015). *Geophysical Research Letters* **42**: **11**,

751-757.

Natural Environment Research Council Grant for Deep crustal structure of the North Anatolian Fault Zone and the earthquake cycle. *Grant No:NE/I028017/1.*

Hanka, W., Saul, J., Weber, B., Becker, J., Harjadi, P., Fauzi, and GITEWS Seismology Group, 2010. Real-time earthquake monitoring for tsunami warning in the Indian Ocean and beyond. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **10**,

2611-2622.

Kahraman M., Cornwell GD., Thompson D., Rost S., Houseman G., Türkelli N., Teoman U., Poyraz Altuncu S., Utkucu M. and Gülen L., (2015). Crustal-scale shear zones and heterogeneous structure beneath the North Anatolian Fault Zone, Turkey, revealed by a high-density seismometer array. *Earth and Planetary Science Letters* (accepted).

Selda Altuncu Poyraz, M. U ur Teoman, Niyazi Türkelli, Metin Kahraman, Didem Cambaz, Ahu Mutlu, Sebastian Rost, Gregory A. Houseman, David A. Thompson, David Cornwell, Murat Utkucu, Levent Gülen

2015. New constraints on micro-seismicity and stress state in the western part of the North Anatolian Fault Zone: Observations from a dense seismic array. *Tectonophysics*, **656**, **190-201.**

Whitney, D., 2011. Continental Dynamics: Central Anatolian Tectonics (CD-CAT). <https://www.esci.umn.edu/orgs/whitney/CD-CAT-index.html>.

Wüstefeld, A., Bokelmann, G., Zaroli, C., Barruol, G. 2008. SplitLab: A shear-wave splitting environment in Matlab. *Computers & Geosciences* **34**: **515-528.**

Yilmazer M., 2012. zSacWin: A Rapid Earthquake Processing and Archiving System, User Guide v1.0.

Supported by the *Bo aziçi University Research Fund, Project Number: 5725P.*