

Türkiye'deki $M \geq 4.0$ Depremler İçin 2007 ve 2008 Yıllarını Kapsayan Sismik Moment Tensör Katalogu

A Seismic Moment Tensor Catalogue Comprising Years 2007 and 2008 for $M \geq 4.0$ Earthquakes in Turkey

TUĞBAY KILIÇ^{1*}, MURAT UTKUCU²

¹Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi, Ulusal Sismolojik Gözlem Ağları Çalışma Grubu, Ankara

²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sakarya

Geliş (received) : 27 Şubat (February) 2012

Kabul (accepted) : 26 Kasım (November) 2012

ÖZ

Bu çalışmada 2007 ve 2008 yıllarında Türkiye'de meydana gelmiş büyüklüğü $M \geq 4.0$ olan 100 depremin kaynak parametreleri, sismik moment tensör dalga şekli ters çözüm yöntemiyle yakın-alan ve bölgesel dalga şekilleri kullanılarak bulunmuştur. Çalışılan depremlerin kaynak parametreleri, bu depremlerin oluştuğu bölgelerdeki hakim tektonik rejime uyum göstermekte ve bulunan sentroid derinlikleri Türkiye'de batıdan doğuya kabuksal kalınlaşmayı desteklemektedir. Çalışmanın, Türkiye için bir sismik moment tensör katalogu oluşturulmasında ve gelecekteki sismotektonik çalışmalar için yararlı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sismik moment tensörü, Türkiye, deprem kaynak mekanizmaları, deprem kaynak parametreleri.

ABSTRACT

In this study, the source parameters of the 100 earthquakes with magnitude $M \geq 4.0$ occurred in Turkey for years 2007 and 2008 have been determined by seismic moment tensor waveform inversion method using the near-field and regional waveforms. The source parameters of the earthquakes studied are consistent with the prevailing tectonic regime of the regions they occurred and their obtained centroid depths support crustal thickening in Turkey from west to east. The study is considered to be making of a seismic moment tensor catalogue for Turkey and helpful for the future seismotectonic studies.

Keywords: Seismic moment tensor, Turkey, earthquake source mechanisms, earthquake source parameters.

* T.Kılıç

E-posta: tugbay@deprem.gov.tr

GİRİŞ

Depremler, sebep olduğu can ve ekonomik kayıplar açısından yüzyıllardır gerek kişisel gerekse kurduğu medeniyetler açısından insanoğlunu etkileyen en önemli doğal afetlerden biridir (Nur ve Cline, 2000; Ambraseys, 2009). Yakın sayılabilecek bir geçmişte meydana gelmiş ve bazıları küresel ölçekte sosyoekonomik etkilere neden olmuş depremler bu durumun güncel sayılabilecek kanıtlarıdır. Dünya’da, ABD’nin Kaliforniya eyaletinde meydana gelen 1994 Northridge ($M_w=6.8$), Japonya’da meydana gelen 1995 Kobe ($M_w=6.7$) ve 2011 Tohoku ($M_w=9.0$), Tayland’da meydana gelen Chi-Chi ($M_w=7.6$) ve Endonezya’da meydana gelen 2004 Sumatra ($M_w=9.3$) depremleri ile örneklendirilebilecek bu gerçek, Türkiye’de 17 Ağustos 1999 İzmit ($M_w=7.4$), 12 Kasım 1999 Düzce ($M_w=7.1$) ve 23 Ekim 2011 Van ($M_w=7.0$) depremleri ile örneklendirilebilir. Bundan dolayı deprem tehlikesinin belirlenmesi ve bu tehlikenin gerçekleşmesi durumunda olabilecek olası kayıpların azaltılması sismoloji biliminin önemli amaçlarından biridir.

Bu amaca ulaşmanın en kestirme yolu, depremlerin olabilecekleri yerleri, büyüklüklerini ve zamanlarını önceden tahmin etmek ve buna bağlı olarak gerekli önlemleri almak olacaktır. Bu konuda özellikle 1960’lı ve 70’li yıllarda dünyanın çeşitli yerlerinde depremlerin işaretçisi olabilecek çok sayıda karmaşık olayın incelenmesiyle depremlerin oluş zamanının önceden tahmin edilmesine çalışılmıştır (Vogel ve diğ., 1998). Ancak depremler heterojen bir yapısı olan yer kabuğu içinde uzun bir zaman döneminde karmaşık bir mekanizma ile oluşan enerji birikim ve boşalım süreci olduğundan anlaşılması güç doğal olaylardır. Her bir deprem kendine özgü zamanla değişebilen öncü işaretçilere (precursors) sahip olabilirken bazen de depremler hiçbir işaret vermeden meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı depremlerin önceden tahmin edilmesi sismoloji biliminin günümüzde geldiği seviye açısından ele alındığında genel olarak olası değildir (Roeloffs ve Langbein 1994; Toda ve Stein 2002; Haris and Arrowsmith 2004) Bu nedenle günümüzde deprem tahmininden ziyade gelecekte bir yerde bir depremin olmasının beklendiği uzay ve zaman ortamının daraltılması

çalışmaları önem kazanmıştır (Oppenheimer ve diğ., 1990; Arrowsmith ve diğ., 1997; Utkucu ve diğ., 2011a).

Bununla birlikte, depremlerin oluşumu ardında yatan süreçler (levha hareketleri, kabuktaki gerilme durumu, fay segmentlerinin etkileşimleri vb.) ve oluşumu esnasındaki kırılma özellikleri (kırılma çekirdeklenmesi, ilerlemesi ve durması, faylanma türü ve fay zonu süreksizliklerinin etkileri vb.) yapılacak çalışmalarla daha da iyi anlaşılabilirse depremleri önceden tahmin etmek gelecekte belki de olası olabilecektir. (Sykes ve diğ., 1999; Haris and Arrowsmith 2004 Deprem odak mekanizmalarının ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi günümüzde bu türden önemli çalışmalar arasında yer almakta ve deprem kaynağının sismik moment tensör ile temsil edilmesiyle rutin bir uygulama haline gelerek $M_w=4.0$ büyüklüğüne kadar küçük depremlerin odak mekanizma kataloglarının oluşturulmasına olanak sağlamıştır (Kalafat ve diğ., 2009, Ekström ve diğ., 2003, 2005; Pondrelli ve diğ., 2002, 2007, 2011; Nakano ve diğ. 2010).

Deprem odak mekanizmaları depremlerin ve diri tektoniğin anlaşılması için önemli bir veri tabanı sağlamakta ve kabuktaki gerilme tür ve yöneliminin belirlenmesinin en önemli yollarından birini oluşturmaktadır (Engelder, 1993; Pondrelli ve diğ., 2002; Van der Pluijm and Marshak, 2004). Ancak, aynı bölge içinde farklı depremlerin odak mekanizmalarından belirlenen asal gerilme eksenlerinin yönleri arasında önemli sayılabilecek uyumsuzluklar olduğu gibi arazide fay kinematiği çalışmalarıyla (ör: Kaymakçı ve diğ., 2006) belirlenen asal gerilme eksenleri arasında da uyumsuzluklar olabilmektedir. Bu zorluk, bir bölge içinde meydana gelmiş çok sayıda depremin odak mekanizma çözümlerinden bulunmuş asal gerilme eksenlerinin dağılımına en iyi uyumu veren asal gerilme eksenlerinin gerilme tensör analizi adı verilen bir yöntemle bulunmasıyla aşılma ve sonuçlar gerektiğinde arazideki fay kinematiği çalışmalarıyla doğrulanmaktadır (Gephart, 1985, 1990; Endelger, 1993; Pınar ve diğ. 2003, 2007; Gök ve Polat, 2012).

Deprem odak mekanizma çözümleri ve bu çözümlerden belirlenen asal gerilme yönleri gerilme haritalarının oluşturulmasında (Zoback, 1992), yaygın deprenselliği ile öne çıkan Alp-

Himalaya kuşağı gibi geniş levha sınırlarıyla ilişkili yayılmış deprenselliğin ve blok hareketlerin geri planında duran kabuksal kinematiğin anlaşılmasında (Pondrelli ve diğ., 2002; 2011; Jimenez-Munt ve diğ., 2006; D'Agostino ve diğ., 2008; Reilinger ve McClusky, 2011), gerilmelerin tür ve yönelimlerinde yerel ölçeklerdeki değişimlerin (Pınar ve diğ., 2003; Örgülü, 2011; Gök ve Polat, 2012) ve faylar boyunca yerel gerilme değişimlerinin, fay segmentasyonuna ve deprensellik davranışına etkisinin belirlenmesinde (Bohnhoff ve diğ., 2006) ve deprem gerilme etkileşimlerinin modellenmesinde (Stein ve diğ., 1997; Nalbant ve diğ., 1998) kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye'de 2007 ve 2008 yılları içinde meydana gelmiş ve büyüklükleri $M \geq 4,0$ olan depremlerin sismik moment tensör yöntemi kullanılarak yapılan odak mekanizma çözümlerini ve belirlenen kaynak parametrelerini içeren bir katalog sunulacaktır. Sunulan bu katalogun diri tektoniğin anlaşılmasına ve gerilme tür ve yönelimlerdeki yerel değişimlerin belirlenmesine yönelik gelecekteki çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

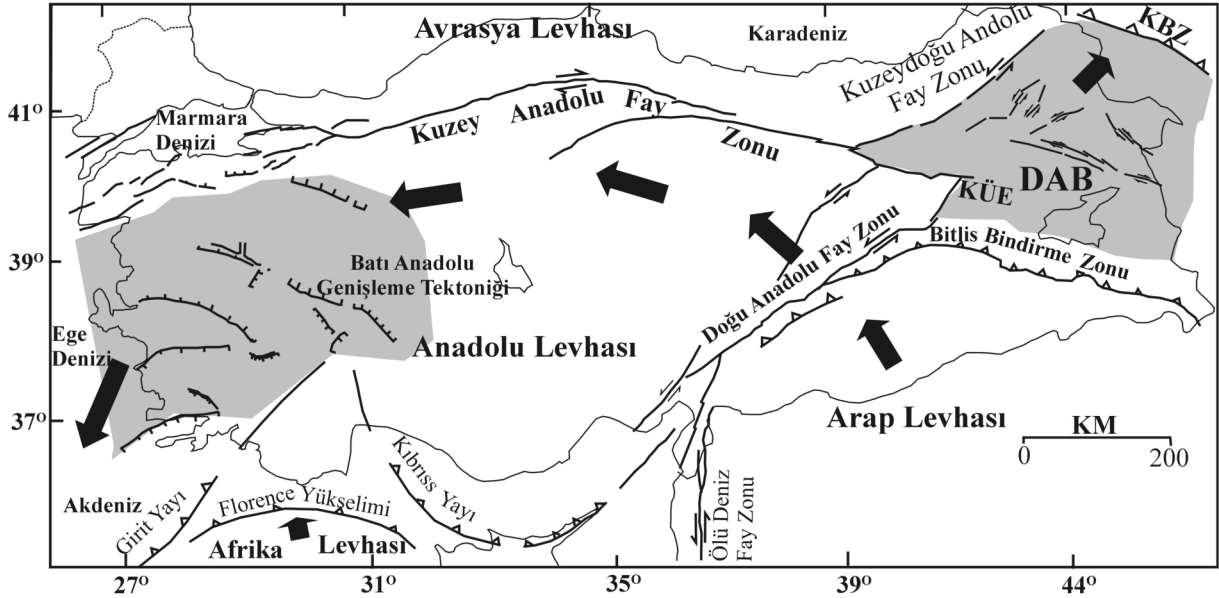
TÜRKİYE'NİN TEKTONİĞİ

Türkiye'nin diri tektoniği esas itibarı ile Arap ve Afrika levhalarının hareketsiz olduğu varsayılan Avrasya levhasına göre kuzeye doğru hareketleriyle kontrol edilmektedir (Şekil 1) (Şengör ve diğ., 1985; McClusky ve diğ., 2000; Reilinger ve diğ., 2006). Arap levhasının kuzeye doğru hareketi sonucu Avrasya ve Arap levhaları arasında sıkışan Anadolu levhası batıya doğru hareket etmektedir. Anadolu levhasının bu hareketi Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu fay zonları olarak adlandırılan sırasıyla sağ ve sol yanal iki doğrultu atımlı fay sistemi boyunca gerçekleşmektedir (McClusky ve diğ., 2000; Reilinger ve diğ., 2006). Bu iki fay zonu Doğu Anadolu'da Karlıova Üçlü Ekleme (KÜE) olarak bilinen yerde birleşmektedir.

Anadolu levhasının batıya doğru olan tektonik kaçış hareketi batıya doğru hızlanmakta ve levha saat yönünün tersi istikametinde dönmektedir (McClusky ve diğ., 2000; Reilinger ve diğ., 2006). Arap levhasının en kuzeyinde 18 mm/yıl

olan kabuksal hız, Anadolu levhasının en doğusunda ve orta kesiminde yaklaşık 21 mm/yıl'a, Orta Ege Denizi üzerinde ve Girit yayı civarında 31 mm/yıla yükselmektedir (Reilinger ve diğ., 2006). Bu gözlem Anadolu levhasını sürükleyen esas kuvvetin Girit ve Kıbrıs yayları boyunca Afrika levhasının diri dalımı olduğunu ve Anadolu levhasının doğuda itilmekten çok batıdan çekildiğine işaret etmektedir. Bunun sonucu olarak Batı Anadolu'da çeşitli doğrultularda gelişmiş normal faylarla çalیشان genişleme şeklinde bir tektonik rejim hakimdir (Şengör ve diğ., 1985).

Doğu Anadolu'da Arap levhası, Bitlis-Zagros Bitlis Bindirme Zonu (BBZ) olarak adlandırılan bir deformasyon zonu boyunca Anadolu levhası ile çarpışmaktadır (Dewey ve diğ., 1986). BBZ ile Kafkasya bindirme/sıkışma (KBZ) zonları arasında kalan bölge Doğu Anadolu Bloğu (DAB) olarak adlandırılmaktadır. Önceleri Arap levhasının KB yönündeki hareketinin BBZ boyunca bindirme ve sıkışma hareketleri ve Himalayalar sistemindeki gibi DAB içindeki kabuksal kalınlaşma/kısalma ile karşılandığı öne sürülmüştür (Şengör ve diğ., 1985; Dewey ve diğ., 1986). DAB içinde ortalama ~2000 m olan topografik yükseltinin de bu kabuksal kalınlaşmanın sonucu olduğu belirtilmiştir (Dewey ve diğ., 1986). Yakın geçmişteki GPS (McClusky ve diğ., 2000; Vernant ve diğ., 2004; Reilinger ve diğ., 2006) ve diğer jeodinamik çalışmalar (Sandvol ve diğ., 2003; Dhont and Chorowicz, 2006) DAB'nda esas olarak sıkışma ve kabuksal kalınlaşma şeklinde bir tektonik rejimin hakim tektonik rejim olmadığını, Arap levhasının kabaca kuzey yönünde hareketinden kaynaklanan deformasyonun DAB içindeki yaygın doğrultu atımlı faylarla (Barka ve Kadinsky-Cade 1988; Koçyiğit ve diğ. 2001) yanal olarak KBZ'ye iletildiğini göstermiştir. Ancak, nerdeyse tamamen ters faylanma mekanizmasına sahip 23 Ekim 2011 Van depreminin (Utkucu ve diğ. 2011b; Emre ve diğ. 2011) DAB içinde sıkışma ve kabuksal kalınlaşmanın söz konusu jeodinamik çalışmalarda öne sürüldüğünden daha da önemli olabileceğini gündeme getirebileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 1. Türkiye'nin belli başlı tektonik unsurları (Barka ve Kadinsky-Cade (1988)'den değiştirilmiştir). DAB:Doğu Anadolu Bloğu, KÜE: Karlova Üçlü Eklemleri, KBZ: Kafkas Bindirme Zonu.

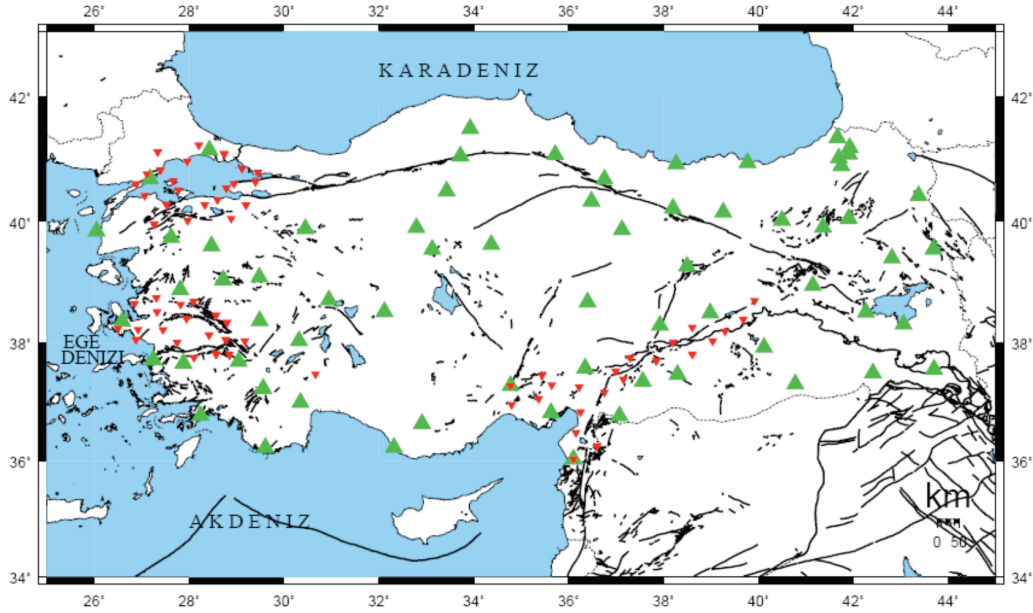
Figure 1. Major tectonic elements of Turkey (modified from Barka ve Kadinsky-Cade (1988)). DAB:Eastern Anatolian Block, KÜE: Karlova Triple Junction, KBZ: Kafkas Thrust Zone.

KULLANILAN VERİ

Çalışmada kullanılan verinin tamamı eski adıyla Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi (AİGM-DAD), yeni adıyla Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi tarafından 2005 yılında başlatılan Ulusal Sismik Ağın Geliştirilmesi (USAG) projesinden sağlanmıştır. Bu projede, mevcut Ulusal Sismik Ağ'da kurulu bulunan istasyonların büyük bir kısmı elden geçirilerek genişbant sismometreli, uydu ile iletişim yapan istasyonlara dönüştürülmüş ve yeni istasyonlar kurularak mevcut istasyon sayısı artırılmıştır. USAG projesinde 2008 yılı itibari ile 65 adet uydu iletişimli genişbant istasyon bulunmaktadır (Şekil 2). Bunlara ilave olarak Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, TÜBİTAK - MAM Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Enstitüsü (YDBE) ile birlikte başlattığı ve 14 üniversitenin de içinde bulunduğu, TÜRDEP (Türkiye'nin Deprem Riski Yüksek Jeo-Stratejik "ancak tektonik rejimleri farklı" Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yaklaşımlarla Araştırılması Projesi) projesi kapsamında kurulan Mikro Sismik Ağlar ile toplam genişbant istasyon sayısı 2008 yılı

itibari ile 135'e çıkarılmıştır. Bu genişbant istasyonların dağılımı da Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu istasyonların verileri 24 saat kesintisiz olarak uydu iletişimi ile AFAD-DD'de bulunan veri işlem merkezine gelmektedir. Kullanılan veriler, bu istasyonlarda yerleştirilen düşük çok düşük gürültü seviyeli, 3 bileşenli, 120 sn periyotlu, 24 bit çözünürlüğe sahip Guralp CMG-3TD modeli Genişbant sismograflarla kaydedilen sismogramlardır.

Çalışmada, AİGM-DAD Sismoloji Şubesi deprem katalogunda, Türkiye kara sınırları içinde yer alan, 2007-2008 yılları içinde meydana gelmiş büyüklüğü M_L veya $M_D \geq 4.0$ olan toplam 100 deprem yer almaktadır. Çalışmada, en büyüğü $M=5.6$ olan bu 100 depremin sismik moment tensör analizi yapılarak kaynak parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır (<http://www.deprem.gov.tr>). Bu depremler ve parametreleri Çizelge 1'de verilmiş ve dış merkez dağılımları Şekil 3'de verilmiştir. Her bir deprem için iki magnitüd değerinden büyük olanı depremin magnitüdü olarak dikkate alınmış ve magnitüd-deprem sayısı histogramı Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan genişband dalga şekli verilerin sağlandığı deprem istasyonlarını ve aktif fayları gösteren harita. Büyük üçgenler Ulusal Genişband Sismik Ağ'a ait istasyonları ve küçük ters üçgenler TÜRDEP projesi kapsamında kurulmuş olan deprem istasyonlarını temsil etmektedirler.

Figure 2. The map showing seismic stations, from which broadband waveform data have been retrieved, along with the active faults. Large triangles represent seismic stations of National Broadband Seismic Network while small reverse triangles show the seismic stations deployed under the TÜRDEP project.

Sismik moment tensör analizlerinde her bir deprem için en az 3 istasyondan elde edilmiş olan 3 bileşen genişband kayıtlar kullanılmıştır. 0.05-10Hz frekans aralığında bant geçişli filtre uygulanan kayıtlar yerdeğiştirme kayıtlarına dönüştürülmüştür. Kayıtlarda 247 sn uzunluğunda bir zaman penceresi seçilerek bir saniyede 100 kez örneklenmiş (örnekleme frekansı 100 Hz) veri kullanılmıştır.

YÖNTEM

Depremlerde yakın ya da, uzak alan dalga alanı faylanmanın ya da, deprem kaynağının nokta ya da sonlu kaynak modelleri ile temsil edilmesi ile yapay olarak üretilebilmekte ve böylece doğrudan düz modelleme yolu ile üretilmiş yapay dalgaların gözlenmiş dalgalarla karşılaştırılması ile deprem kaynak parametreleri hesaplanabilmektedir (Udias ve Buforn, 1996; Stein ve Wyession, 2003). Deprem kaynağı olan faylanma, benzer dalga yayılım örüntüsünü verecek denk cisim kuvvetleri ile de temsil edilebilir. Değişik geometride sismik kaynaklar, sismik

moment tensör olarak adlandırılan ve bileşenleri 9 kuvvet çiftinden oluşan bir tensör ile temsil edilebilir (Udias and Buforn, 1996; Jost and Hermann, 1989; Stein and Wyession, 2003). Böyle bir temsil her şeyden önce gözlenmiş dalga şekillerinin ters modellenmesi yoluyla faylanma parametrelerinin kolaylıkla hesaplanmasına olanak tanıdığı gibi faylanma dışındaki patlamaya da çökme türü veya bunların bileşimi sismik kaynakların temsiline ve kaynak parametrelerinin hesaplanmasına da olanak tanımaktadır. Böylelikle, tektonik çalışmalar açısından önemli küresel ölçekte deprem kaynak mekanizma ve kaynak parametre katalog veya veri tabanlarının oluşturulması basitleşmektedir.

Çalışmada kullanılan sismik moment tensör analiz yöntemi, Kikuchi ve Kanamori (1991) tarafından Telesismik (uzak alan) dalga şekillerinin modellenmesi amacıyla geliştirilmiş, çok nokta-kaynaklı ve yinelemeli dekonvolüsyon yöntemine benzerdir. Ancak, bu yöntemden farklı olarak tüm dalga alanı içerilmekte ve Green fonksiyonları, Bouchon (1981) tarafından tanımlanmış

Çizelge 1. Çalışmada sismik moment tensör yöntemi uygulanan depremler.
Table 1. The list of the earthquakes, to which the seismic moment tensor method has been applied.

| Tarih (YY/AA/GG) | Oluş Zamanı | Enlem (K) | Boylam (D) | Derinlik (Km) | Mw | Doğrultu | Eğim | Atım | Mo (Nm) | Kaynak Derinliği (Km) | Yeri |
|---------------------|-------------|-----------|---------------|------------------|-----|----------|------|------|------------|-----------------------------|-----------------------|
| 1 | 2007/01/21 | 39.6133 | 42.8000 | 10.3 | 4.7 | 79 | 37 | -28 | 1.24E+16 | 8 | Tutak_AGRI |
| 2 | 2007/02/09 | 38.3415 | 39.1698 | 22.9 | 5.2 | 345 | 84 | -177 | 8.06E+16 | 8 | Sivrice_ELAZIG |
| 3 | 2007/02/11 | 38.3538 | 39.119 | 26.8 | 3.9 | 77 | 78 | 38 | 9.22E+14 | 13.2 | Sivrice_ELAZIG |
| 4 | 2007/02/21 | 38.3957 | 39.2977 | 22.6 | 5.9 | 344 | 82 | -166 | 7.69E+17 | 6.2 | Sivrice_ELAZIG |
| 5 | 2007/02/28 | 38.2789 | 39.2638 | 17.1 | 5.0 | 265 | 56 | 4 | 3.15E+16 | 30 | Cungus, DIYARBAKIR |
| 6 | 2007/02/28 | 38.2923 | 39.2164 | 7.9 | 3.9 | 160 | 85 | 135 | 9.39E+14 | 11 | Cungus, DIYARBAKIR |
| 7 | 2007/02/28 | 38.3400 | 39.2518 | 15.4 | 4.5 | 249 | 64 | -5 | 5.69E+15 | 18 | Sivrice_ELAZIG |
| 8 | 2007/03/08 | 39.0433 | 40.4592 | 5 | 4.7 | 149 | 69 | 168 | 1.10E+16 | 26 | Merkez_BINBOL |
| 9 | 2007/03/09 | 39.063 | 40.4702 | 5 | 4.2 | 14 | 75 | 132 | 2.26E+15 | 30 | Merkez_BINBOL |
| 10 | 2007/03/30 | 38.0437 | 30.9482 | 7.1 | 4.2 | 127 | 86 | 127 | 2.48E+15 | 13 | Gelendost_ISPARTA |
| 11 | 2007/03/30 | 38.0025 | 30.9236 | 6.9 | 4.4 | 350 | 75 | -127 | 4.89E+15 | 2 | Gelendost_ISPARTA |
| 12 | 2007/03/30 | 37.9987 | 31.0063 | 7.7 | 3.8 | 149 | 81 | 125 | 3.93E+14 | 17 | Gelendost_ISPARTA |
| 13 | 2007/03/30 | 38.0143 | 30.9772 | 3.9 | 4 | 239 | 63 | 2 | 1.35E+15 | 19 | Gelendost_ISPARTA |
| 14 | 2007/03/31 | 38.0215 | 30.9556 | 6.6 | 4 | 233 | 58 | 10 | 1.20E+15 | 18 | Gelendost_ISPARTA |
| 15 | 2007/04/10 | 38.0671 | 30.9225 | 17.8 | 4.2 | 336 | 60 | -82 | 2.18E+15 | 12 | Gelendost_ISPARTA |
| 16 | 2007/04/10 | 38.0473 | 30.9532 | 13.7 | 4.7 | 15 | 42 | -87 | 1.48E+16 | 6 | Gelendost_ISPARTA |
| 17 | 2007/04/11 | 38.052 | 30.9519 | 10.2 | 3.7 | 220 | 59 | -1 | 3.55E+14 | 13 | Gelendost_ISPARTA |
| 18 | 2007/04/11 | 38.0145 | 30.9571 | 7.8 | 4 | 19 | 58 | -55 | 9.70E+14 | 7.8 | Gelendost_ISPARTA |
| 19 | 2007/04/14 | 38.3528 | 39.2848 | 4.9 | 4.4 | 262 | 47 | 3 | 5.27E+15 | 8 | Sivrice_ELAZIG |
| 20 | 2007/04/19 | 38.3048 | 39.1888 | 7.9 | 4.5 | 75 | 89 | -28 | 7.29E+15 | 15 | Cungus, DIYARBAKIR |
| 21 | 2007/05/05 | 38.7367 | 42.218 | 5 | 4.2 | 281 | 70 | -179 | 2.24E+15 | 16 | Ahlat_BITLIS |
| 22 | 2007/05/07 | 39.9008 | 41.6433 | 3 | 4.2 | 199 | 80 | -170 | 2.36E+15 | 35 | Pasinler_ERZURUM |
| 23 | 2007/05/18 | 37.2795 | 33.2983 | 19 | 4 | 29 | 67 | 14 | 1.09E+15 | 28 | Merkez_KARAMAN |
| 24 | 2007/08/06 | 39.538 | 38.5208 | 7 | 4.1 | 291 | 83 | -169 | 1.01E+15 | 7 | Ilıc_ERZINCAN |

| Tarih (YY/AA/GG) | Oluş Zamanı | Enlem (K) | Boylam (D) | Derinlik (Km) | Mw | Doğrultu | Eğim | Atım | Mo (Nm) | Kaynak Derinliği (Km) | Yeri |
|---------------------|-------------|-------------|---------------|------------------|------|----------|------|------|------------|-----------------------------|---------------------|
| 25 | 2007/08/24 | 02:53:10.68 | 38.155 | 37.4623 | 15 | 4.2 | 337 | -175 | 1.87E+15 | 15 | Elbistan_K_MARAS |
| 26 | 2007/08/25 | 22:05:48.01 | 39.2517 | 41.0935 | 23.9 | 5.2 | 95 | 29 | 7.67E+19 | 29 | Karlıova_BINGOL |
| 27 | 2007/09/15 | 05:26:52.32 | 37.8165 | 36.9262 | 23.8 | 4.4 | 249 | -108 | 3.83E+15 | 16 | Merkez_K_MARAS |
| 28 | 2007/09/15 | 23:28:47.99 | 37.8413 | 36.8843 | 15.4 | 4.1 | 246 | 27 | 1.61E+15 | 16 | Merkez_K_MARAS |
| 29 | 2007/09/20 | 06:18:51.69 | 39.2147 | 29.3885 | 16.9 | 4.5 | 253 | -173 | 6.39E+15 | 12 | Emet_KUTAHA |
| 30 | 2007/09/21 | 09:49:26.48 | 37.3240 | 44.1319 | 6.7 | 3.9 | 95 | 47 | 9.51E+14 | 36 | Yuksekova_HAKKARI |
| 31 | 2007/09/21 | 10:21:20.73 | 37.3941 | 44.1509 | 2.5 | 4.2 | 326 | -47 | 2.02E+15 | 36 | Yuksekova_HAKKARI |
| 32 | 2007/09/24 | 22:50:54.05 | 37.7146 | 43.7771 | 6.3 | 3.6 | 243 | 126 | 2.92E+14 | 6 | Merkez_HAKKARI |
| 33 | 2007/09/29 | 22:35:09.49 | 39.7487 | 27.7768 | 6.3 | 3.8 | 324 | -21 | 6.14E+14 | 7 | Merkez_BALIKESIR |
| 34 | 2007/10/10 | 21:27:55.77 | 36.9228 | 28.0953 | 7 | 3.8 | 109 | 34 | 6.48E+14 | 22 | Marmaris_MUGLA |
| 35 | 2007/10/25 | 05:02:04.05 | 39.3668 | 27.6859 | 5 | 3.9 | 87 | 171 | 7.82E+14 | 11 | Savastepe_BALIKESIR |
| 36 | 2007/10/27 | 04:02:23.58 | 39.3656 | 40.757 | 27.3 | 4.4 | 229 | 3 | 5.17E+15 | 25 | Yedisu_BINGOL |
| 37 | 2007/10/28 | 22:00:46.20 | 39.0118 | 41.1040 | 18 | 3.9 | 221 | 20 | 6.92E+14 | 20 | Solhan_BINGOL |
| 38 | 2007/10/29 | 09:23:13.92 | 36.9142 | 29.2995 | 23.4 | 5 | 89 | -93 | 3.37E+16 | 5 | Cameli_DENIZLI |
| 39 | 2007/10/31 | 17:58:01.41 | 36.9512 | 29.3218 | 21.6 | 4.2 | 81 | -113 | 2.39E+15 | 7 | Cameli_DENIZLI |
| 40 | 2007/11/09 | 09:09:01.59 | 37.3432 | 44.331 | 5 | 4.2 | 279 | -46 | 1.92E+15 | 20 | Semdlili_HAKKARI |
| 41 | 2007/11/15 | 04:11:11.29 | 39.054 | 41.978 | 4 | 3.9 | 66 | -36 | 8.76E+14 | 14 | Bulanık_MUS |
| 42 | 2007/11/16 | 09:08:22.74 | 36.941 | 29.2962 | 22 | 4.8 | 253 | -107 | 1.96E+16 | 4 | Cameli_DENIZLI |
| 43 | 2007/12/02 | 20:21:49.58 | 37.0262 | 29.3162 | 37.6 | 4.1 | 318 | -45 | 1.83E+15 | 8 | Cameli_DENIZLI |
| 44 | 2007/12/10 | 21:50:06.16 | 38.7812 | 27.742 | 21.4 | 4.1 | 261 | 180 | 1.42E+15 | 18 | Soruhanlı_MANISA |
| 45 | 2007/12/13 | 18:06:19.25 | 37.8505 | 33.0420 | 16.9 | 4 | 2 | -30 | 1.14E+15 | 18 | Kulu_KONYA |
| 46 | 2007/12/20 | 09:48:27.21 | 39.4173 | 33.0453 | 2.8 | 5.3 | 125 | -177 | 9.70E+16 | 7 | Bala_ANKARA |
| 47 | 2007/12/20 | 10:10:38.84 | 39.3352 | 33.1325 | 7 | 4.2 | 303 | -17 | 2.04E+15 | 17 | Bala_ANKARA |
| 48 | 2007/12/23 | 23:55:08.13 | 37.5168 | 35.7015 | 23.7 | 4.1 | 268 | -5 | 1.70E+15 | 32 | Kozan_ADANA |

| Tarih (YY/AA/GG) | Oluş Zamanı | Enlem (K) | Boylam (D) | Derinlik (Km) | Mw | Doğrultu | Eğim | Atım | Mo (Nm) | Kaynak Derinliği (Km) | Yeri | |
|---------------------|-------------|-------------|---------------|------------------|------|----------|------|------|------------|-----------------------------|------|-------------------|
| 49 | 2007/12/26 | 23:47:09.51 | 39.396 | 33.1073 | 16.8 | 5.3 | 41 | 89 | -27 | 1.15E+17 | 11 | Bala_ANKARA |
| 50 | 2007/12/27 | 07:47:00.82 | 39.4485 | 33.0695 | 11.9 | 4.9 | 58 | 87 | -28 | 2.87E+16 | 4 | Bala_ANKARA |
| 51 | 2007/12/27 | 13:47:58.73 | 39.4273 | 33.0928 | 8.2 | 4.3 | 129 | 69 | -164 | 3.28E+15 | 16 | Bala_ANKARA |
| 52 | 2007/12/27 | 17:56:12.54 | 39.3948 | 33.1368 | 6.2 | 3.7 | 122 | 75 | 176 | 4.28E+14 | 6 | Bala_ANKARA |
| 53 | 2008/01/01 | 00:21:41.62 | 37.5265 | 35.7363 | 18.8 | 3.8 | 148 | 70 | -165 | 4.94E+14 | 14 | Kozan_ADANA |
| 54 | 2008/01/05 | 05:11:00.92 | 38.5945 | 26.985 | 7 | 3.6 | 270 | 55 | -105 | 2.42E+14 | 3 | Menemen_IZMIR |
| 55 | 2008/01/07 | 18:26:35.34 | 39.4255 | 33.1098 | 7.7 | 3.6 | 136 | 74 | -180 | 3.00E+14 | 15 | Bala_ANKARA |
| 56 | 2008/01/10 | 17:52:28.61 | 39.9238 | 28.7901 | 17.3 | 4.3 | 337 | 17 | -31 | 3.37E+15 | 5 | Saraykoy_DENIZLI |
| 57 | 2008/01/14 | 02:06:28.79 | 40.5521 | 34.7685 | 8.9 | 3.7 | 263 | 80 | -172 | 4.00E+14 | 6 | Merkez_CORUM |
| 58 | 2008/01/17 | 08:39:10.64 | 36.4392 | 29.175 | 56 | 3.5 | 108 | 69 | 86 | 1.99E+14 | 3 | Fethiye_MUGLA |
| 59 | 2008/01/22 | 16:31:55.87 | 39.5453 | 38.622 | 18.1 | 4.2 | 146 | 78 | -160 | 2.47E+15 | 12 | Ilic_ERZINCAN |
| 60 | 2008/01/31 | 00:01:20.7 | 40.2824 | 33.1556 | 7.4 | 4.4 | 107 | 82 | -117 | 4.88E+15 | 20 | Cubuk_ANKARA |
| 61 | 2008/01/31 | 05:36:58.89 | 39.9337 | 40.7482 | 23 | 3.6 | 295 | 87 | -169 | 2.47E+14 | 24 | Askale_ERZURUM |
| 62 | 2008/02/01 | 09:11:02.98 | 39.448 | 33.0653 | 16.8 | 4 | 295 | 84 | 179 | 1.13E+15 | 20 | Bala_ANKARA |
| 63 | 2008/03/12 | 18:53:30.71 | 40.6318 | 29.0057 | 24 | 4.7 | 355 | 35 | -47 | 1.13E+16 | 8 | Cinarcik_YALOVA |
| 64 | 2008/03/15 | 10:15:37.2 | 39.425 | 33.0615 | 12.9 | 4.8 | 15 | 83 | 25 | 1.74E+16 | 19 | Bala_ANKARA |
| 65 | 2008/03/15 | 11:52:12.26 | 39.0373 | 27.882 | 24.9 | 4 | 174 | 88 | -2 | 1.09E+15 | 12 | Akhisar_MANISA |
| 66 | 2008/03/29 | 03:12:30.11 | 40.553 | 34.7933 | 15.5 | 4.5 | 359 | 68 | -3 | 6.78E+15 | 6 | Merkez_CORUM |
| 67 | 2008/04/01 | 00:41:39.36 | 40.3713 | 34.4832 | 7 | 3.8 | 282 | 83 | 168 | 5.62E+14 | 4 | Ugurludag_CORUM |
| 68 | 2008/04/02 | 10:14:08.77 | 40.5672 | 34.8077 | 15 | 3.8 | 203 | 73 | -135 | 6.73E+14 | 6 | Merkez_CORUM |
| 69 | 2008/04/25 | 04:48:55.59 | 37.8268 | 29.258 | 18.8 | 4.4 | 307 | 41 | -49 | 4.45E+15 | 3 | Honaz_DENIZLI |
| 70 | 2008/05/11 | 23:20:06.74 | 37.58.81 | 43.068 | 1.8 | 4.1 | 191 | 88 | 2 | 1.24E+16 | 8 | Beytusebap_SIRNAK |
| 71 | 2008/05/30 | 05:34:22.08 | 37.009 | 29.191 | 7 | 4 | 318 | 53 | -53 | 8.06E+16 | 4 | Cameli_DENIZLI |
| 72 | 2008/06/01 | 03:35:23.60 | 40.1547 | 26.921 | 7 | 4.2 | 159 | 43 | 46 | 9.22E+14 | 13 | Biga_CANAKKALE |
| 73 | 2008/06/03 | 06:59:22.21 | 40.164 | 26.928 | 7 | 3.8 | 0 | 63 | 150 | 7.69E+17 | 3 | Biga_CANAKKALE |

| Tarih (YY/AA/GG) | Oluş Zamanı | Enlem (K) | Boylam (D) | Derinlik (Km) | Mw | Doğrultu | Eğim | Atım | Mo (Nm) | Kaynak Derinliği (Km) | Yeri |
|---------------------|-------------|-------------|------------|------------------|-----|----------|------|------|------------|-----------------------------|---------------------|
| 74 | 2008/06/04 | 09:48:18.77 | 39.0298 | 18 | 4.1 | 229 | 79 | 158 | 3.15E+16 | 33 | Kemah_ERZINCAN |
| 75 | 2008/06/16 | 15:49:24.98 | 28.5977 | 22.5 | 3.5 | 232 | 40 | -80 | 9.39E+14 | 12 | Dursunbey_BALIKESİR |
| 76 | 2008/06/21 | 03:58:34.78 | 41.2473 | 14.4 | 4.5 | 304 | 73 | 159 | 5.69E+15 | 27 | Merkez_MUS |
| 77 | 2008/06/25 | 21:12:17.75 | 37.554 | 4.7 | 4.2 | 1 | 82 | -175 | 1.10E+16 | 6 | Zara_SIVAS |
| 78 | 2008/06/27 | 10:50:06.54 | 41.80.17 | 16.7 | 3.9 | 31 | 70 | -48 | 2.26E+15 | 24 | Pasinler_ERZURUM |
| 79 | 2008/07/03 | 17:37:02.54 | 29.169 | 22.2 | 4.1 | 117 | 72 | 156 | 2.48E+15 | 15 | Cameli_DENİZLİ |
| 80 | 2008/07/10 | 07:49:53.52 | 27.732 | 26.6 | 4.3 | 354 | 59 | 3 | 4.89E+15 | 6 | Gonen_BALIKESİR |
| 81 | 2008/07/12 | 05:54:03.75 | 41.6732 | 24.2 | 4.2 | 76 | 41 | 179 | 3.93E+14 | 32 | Hımas_ERZURUM |
| 82 | 2008/07/26 | 22:16:48.33 | 43.1002 | 5 | 4.4 | 24 | 88 | 37 | 1.35E+15 | 5 | VanGolu_VAN |
| 83 | 2008/08/20 | 11:01:38.42 | 37.4608 | 15 | 4.1 | 6 | 41 | 159 | 1.20E+15 | 27 | Golbasi_ADİYAMAN |
| 84 | 2008/09/02 | 02:22:48.2 | 37.4980 | 24 | 4.2 | 311 | 78 | -175 | 2.18E+15 | 5 | Bozova_URFA |
| 85 | 2008/09/04 | 22:54:31.61 | 37.4605 | 23.8 | 4.4 | 226 | 88 | -30 | 1.48E+16 | 7 | Bozova_URFA |
| 86 | 2008/09/07 | 12:47:37.22 | 39.4797 | 17.6 | 4.1 | 211 | 60 | 17 | 3.55E+14 | 21 | Haymana_ANKARA |
| 87 | 2008/09/11 | 08:33:58.18 | 39.4248 | 14.1 | 3.8 | 127 | 72 | -171 | 9.70E+14 | 6 | Bala_ANKARA |
| 88 | 2008/09/17 | 12:08:11.56 | 39.9993 | 20.5 | 4.5 | 117 | 87 | -33 | 5.27E+15 | 31 | Otlukbeli_ERZINCAN |
| 89 | 2008/09/23 | 09:09:42.43 | 39.4243 | 14 | 4.2 | 115 | 74 | -176 | 7.29E+15 | 8 | Bala_ANKARA |
| 90 | 2008/09/28 | 11:32:11.82 | 36.5538 | 50.7 | 3.6 | 3 | 39 | 175 | 2.24E+15 | 7 | Kumluca_ANTALYA |
| 91 | 2008/09/29 | 20:54:55.82 | 37.4740 | 24 | 4.5 | 224 | 79 | -26 | 2.36E+15 | 19 | Bozova_URFA |
| 92 | 2008/09/30 | 07:30:00.20 | 39.0057 | 13.3 | 4.3 | 292 | 56 | -76 | 1.09E+15 | 9 | Altinkaya_KUTAHYA |
| 93 | 2008/10/05 | 05:33:47.20 | 38.3063 | 11.1 | 3.9 | 123 | 79 | 119 | 6.85E+14 | 4 | Poturge_MALATYA |
| 94 | 2008/10/05 | 06:04:04.44 | 40.6103 | 23.7 | 3.8 | 357 | 43 | -43 | 5.76E+14 | 4 | Cinarcik_YALOVA |
| 95 | 2008/10/10 | 06:36:54.40 | 39.3872 | 1.8 | 4 | 222 | 89 | 23 | 1.19E+15 | 18 | Bala_ANKARA |
| 96 | 2008/10/19 | 22:20:52.58 | 37.097 | 44.8 | 4.3 | 157 | 86 | -177 | 2.98E+15 | 18 | Korkutei_ANTALYA |
| 97 | 2008/11/09 | 13:20:25.85 | 28.170 | 50.7 | 3.6 | 278 | 53 | -99 | 2.58E+14 | 15 | Marmaris_MUGLA |

| Tarih (YY/AA/GG) | Oluş Zamanı | Enlem (K) | Boylam (D) | Derinlik (Km) | Mw | Doğrultu | Eğim | Atım | Mo (Nm) | Kaynak Derinliği (Km) | Yeri | |
|---------------------|-------------|-------------|---------------|------------------|-----|----------|------|------|------------|-----------------------------|------|-------------------|
| 98 | 2008/11/12 | 14:03:16.68 | 38.8607 | 35.5435 | 9.5 | 4.8 | 140 | 87 | 170 | 1.77E+16 | 7 | Kocasinan_KAYSERI |
| 99 | 2008/11/24 | 11:34:09.81 | 37.149 | 28.324 | 7.2 | 3.5 | 306 | 38 | -121 | 2.39E+14 | 4 | Merkez_MUGLA |
| 100 | 2008/12/24 | 05:54:59.93 | 37.8927 | 29.2273 | 4 | 4.1 | 118 | 60 | -91 | 1.37E+15 | 4 | Cameli_DENIZLI |

“ayrık dalga sayısı yöntemi” (discrete wave-number method) kullanılarak hesaplanmaktadır. Böylelikle, Kikuchi ve Kanamori (1991)’nin geliştirdiği yöntem telesismik olayların yanı sıra, bölgesel ve yerel olaylara da uygulanabilmektedir. Çalışmada bu amaç için geliştirilmiş ISOLA adlı bilgisayar yazılımı kullanılmıştır (Sokos ve Zahradnik, 2006).

Herhangi bir istasyon tanımlanan yapay sismogram $s(t)$ 'ye, 6 temel odak mekanizmasına (Çizelge 2) karşılık gelen, elementer sismogramların ($e_i(t)$) bir kombinasyonu olarak yaklaşımda bulunulur. Yani

$$s(t) = \sum_{i=1}^6 a_i e_i(t) \quad (1)$$

Böylelikle, çeşitli istasyonlarda gözlenmiş ve hesaplanmış yapay sismogramlar

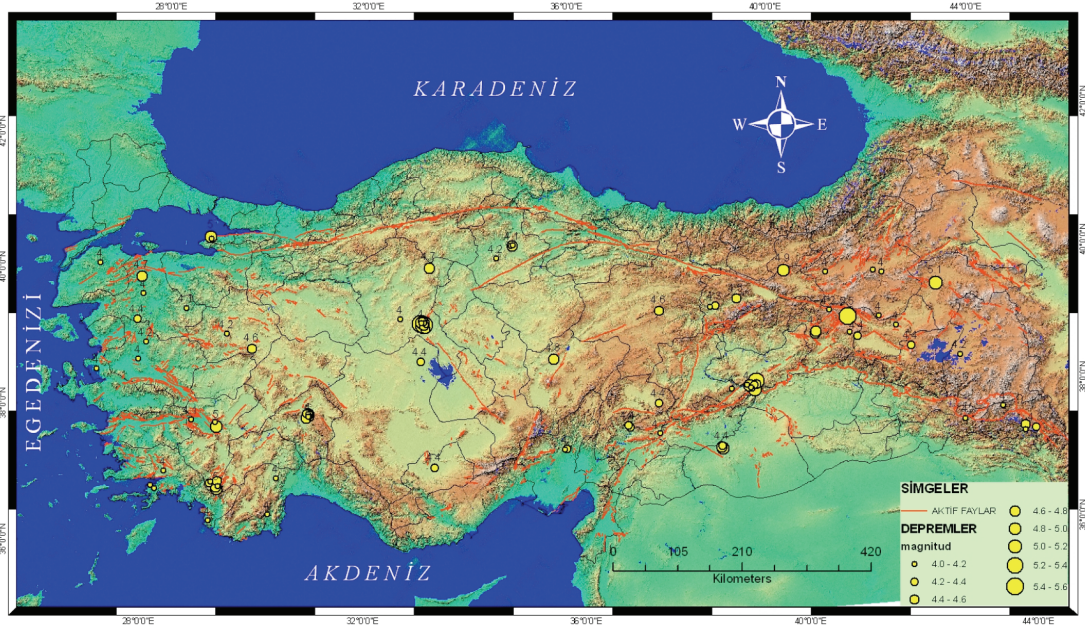
$$\mathbf{G} \mathbf{m} = \mathbf{d} \quad (2)$$

şeklinde bir denklemlerle belirlenir. Burada \mathbf{d} , deprem istasyonlarındaki 3-bileşen gözlenmiş yerdeğiştirme sismogramlarını, \mathbf{m} ise ters çözümleme sonucu bulunması gereken a_i katsayılarını yani çözüm vektörünü temsil eder. Gözlemlerin yapıldığı istasyonlar için hesaplanan yapay yerdeğiştirme sismogramları da \mathbf{G} matrisini oluşturur. (2) ile verilen doğrusal denklemi en küçük kareler yöntemi ile çözümlenir (Menke, 1989). Yani \mathbf{G}^T , \mathbf{G} matrisinin transpozesi olmak üzere, (2) denkleminin en küçük kareler yöntemi ile çözümü

$$\mathbf{m} = [\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (3)$$

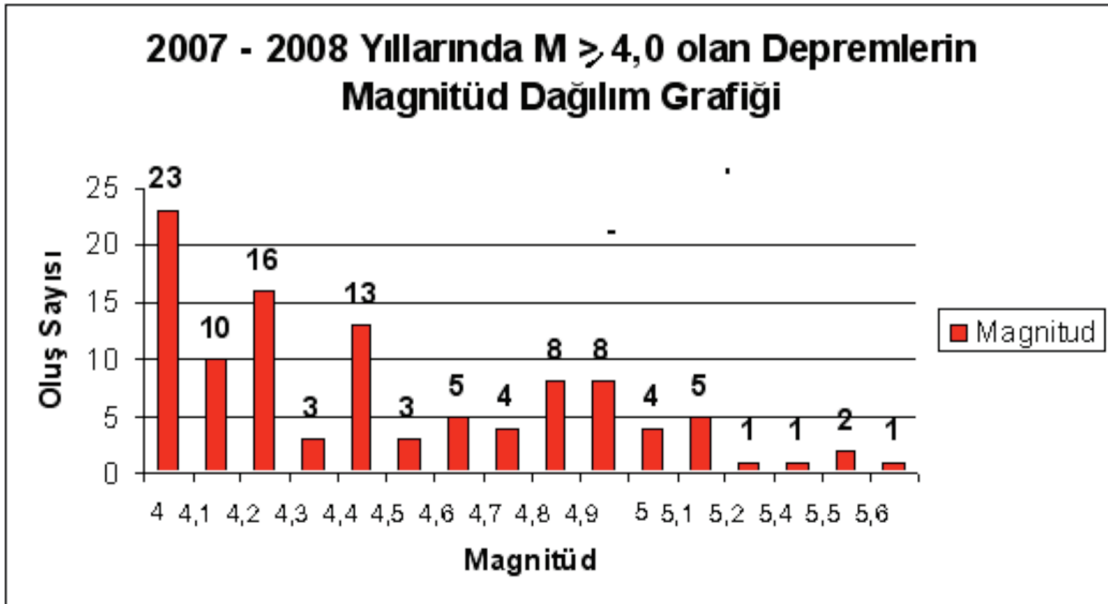
şeklinde dir. Sismik moment tensörün özvektörleri doğrultu, eğim ve kayma (rake) açısını verir. Ayrıca, özdeğerler skaler momenti (M_0) ve moment tensörün ikili kuvvet çifti (Double Couple-DC), dengelenmiş lineer vektör dipolü (compensated linear vector dipole-CLVD) ve hacim değişimi (voluminal- VOL) bileşenleri olarak 3 kısma ayrışmasını da verir. Buna göre olası moment tensör (MT) ters çözüm modları şöyledir (Sokos ve Zahradnik, 2006; Kılıç, 2009):

- Tam MT ters çözümü: 6 temel odak mekanizmasını da içerir; DC+CLVD+VOL
- Deviatorik MT ters çözümü: VOL bileşeninin oranı %0 kabul edilir ve 5 ana odak mekanizmasını içerir; DC+CLVD



Şekil 3. Çalışmada sismik moment tensör analizi uygulanan, Türkiye’de 2007 ve 2008 yılları içinde meydana gelmiş büyüklüğü (ML veya MD) 4.0 ile 5.6 arasında değişen 100 adet depremin dış merkez dağılımı. Depremlerin odak ve kaynak parametreleri için Çizelge 1’e bakınız.

Figure 3. The epicentral distribution of the 100 earthquakes, to which seismic moment tensor analysis has been applied in the study and which took place in 2007 and 2008 in Turkey with magnitude (ML or MD) varying between 4.0 and 5.6 See Table 1 for the hypocentral and source parameters.









Şekil 4. Çalışmada sismik moment tensör analizi uygulanan depremlerin magnitüd-oluş sayısı histogramı.

Figure 4. Magnitude-frequency histogram of the earthquakes, to which seismic moment tensor analysis has been applied in the study.

Çizelge 2. Elemanter yapay sismogramların hesaplandığı temel odak mekanizmaları.

Table 2. The basic focal mechanisms for which the elementary synthetic seismograms are computed.

| i | Doğrultu (°) | Eğim Açısı (°) | Kayma Açısı (°) | Temel Odak Mekanizması |
|---|---------------|----------------|-----------------|---|
| 1 | 0 | 90 | 0 |  |
| 2 | 270 | 90 | -90 |  |
| 3 | 0 | 90 | 90 |  |
| 4 | 90 | 45 | 90 |  |
| 5 | 0 | 45 | 90 |  |
| 6 | İ Z O T R O P | | |  |

- DC-kısıtlı MT ters çözümü: VOL ve CLVD bileşenlerinin oranlarının %=0 olduğu ve sadece DC bileşeninin olduğu kabul edilir.
- Bilinen ve sabit DC MT durumu: sadece kaynak konum ve zaman araştırılır.

Bu çalışmada belirlenen depremlerin analizinde en çok önerilen “deviatorik MT ters çözümü” kullanılmıştır (nedenleri için bkz. Sokos ve Zahradnik 2006; Kılıç 2009). Hangi ters çözüm modu kullanılırsa kullanılsın, yapılan denemelerle en küçük kareler yöntemi artık (rezidüel) hatasının en küçük olduğu kaynak konum ve zamanı aranmaktadır. Bu nedenle, gözlenen ve yapay sismogram arasındaki farkın en küçüğe indirildiği ve korelasyonun en büyük olduğu çözümler tercih edilmelidir.

Kullanılan ISOLA yazılımı, gözlenmiş veriye en iyi uyumu veren nokta kaynak konum ve zamanının, önceden kullanıcı tarafından tanımlanmış konum ve zaman deneme değerleri için karelej araştırmasıyla (grid search) bulunmasına da olanak tanımaktadır. En iyi uyum, en küçük kareler çözümlenmesinde artık (rezidüel) hatanın en küçük olduğu ve gözlenmiş ve yapay sismogramlar arasındaki korelasyonun en iyi olduğu durumdur. Analizi yapılacak deprem tek nokta kaynak ile temsil ediliyorsa, bu durumda konum ve zaman için karelej araştırması sonucu bulunan en iyi uyumu veren çözüm sentroid’e, yani sentroid konum, zaman ve MT’üne karşılık gelmektedir. Bu çalışmada, analizi yapılan

depremler tek nokta kaynakla temsil edilmişlerdir. Yapay yerdeğiştirme sismogramlarının hesaplanmasında Herrin kabuk modeli (Herrin, 1968) kullanılmıştır (Çizelge 3).

Kullanılan MT ters çözüm modu çoklu kaynak tanımlamasına dayandığından her bir kaynak için ayrı bir çözüm bulunmaktadır. Bu çözümler içerisinde odak mekanizmasını temsil eden en doğru DC modelinin seçilmesinde, DC bileşen oranının yanısıra korelasyon ve varyans değerleri de (variance reduction) göz önüne alınmıştır. Başka bir deyişle en iyi DC modelinin belirlenmesinde yalnızca korelasyon katsayısının büyüklüğüne bakılmamış, aynı zamanda DC değerinin %100 yakın olması ve varyans değerinin küçük olduğu çözümler dikkate alınmıştır.

Kullanılan program her bir derinlik adımı (2,4,6,8 km gibi) ters çözüm yinelemesi yaparak moment tensör parametrelerini hesaplar. Her bir yineleme için hesaplanan varyans değerleri, yapılan bu yinelemelerden hangisinin daha az hataya sahip olduğunun seçilmesine yardımcı olan bir parametredir. Böylelikle, gözlenmiş veriye en iyi uyumu veren yineleme, ilgili depremin moment tensör ters çözümü olarak kabul edilir.

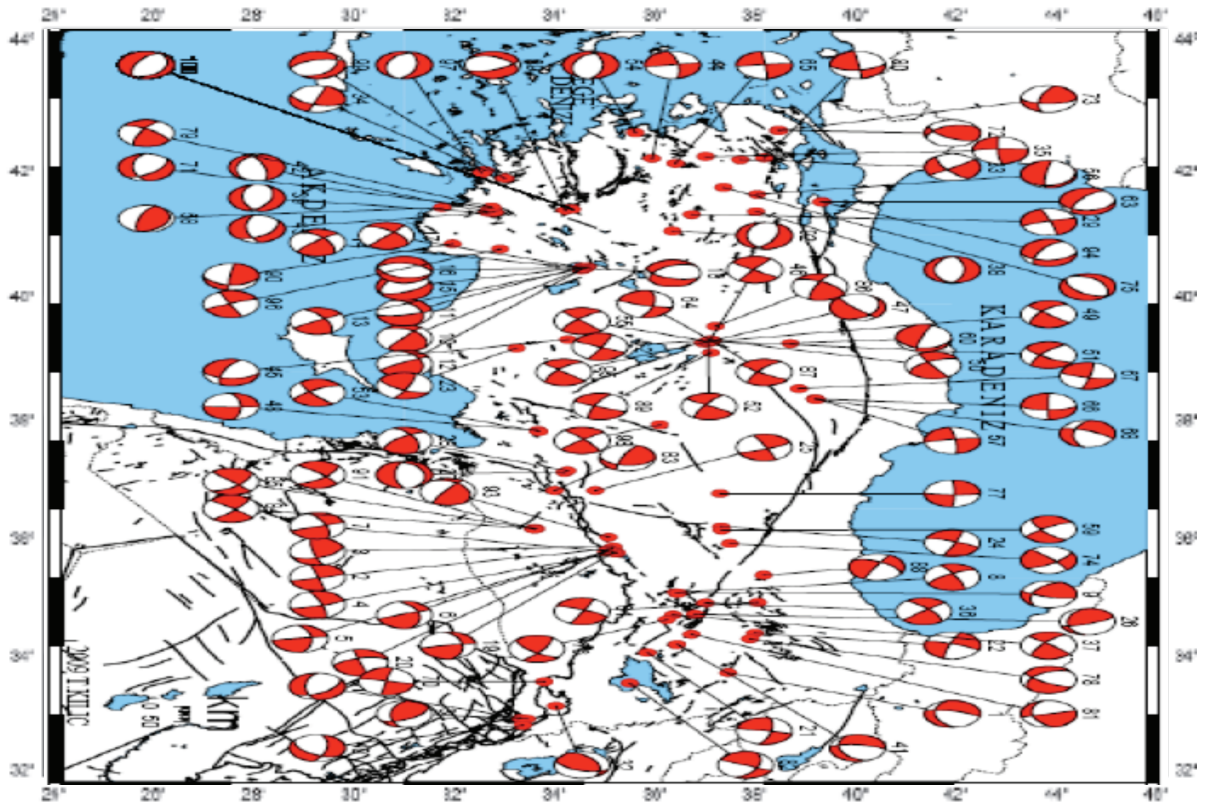
SONUÇLAR

Bu çalışmada sismik moment tensör analizi yapılan, 2007-2008 yılları içinde meydana gelmiş, büyüklüğü (M_L veya M_D) 4.0 ile 5.6 arasında değişen toplam 100 adet deprem için belirlenen

Çizelge 3. Yapay sismogramların hesaplanmasında kullanılan Herrin kabuksal hız modeli (Herrin 1968).

Table 3. Herrin (1968) crustal velocity model used for the calculations of the synthetic seismograms.

| Tabaka | H (km) | Vp (km/sn) |
|--------|--------|------------|
| 1 | 0.0 | 6.0 |
| 2 | 15.0 | 6.74 |
| 3 | 40.0 | 8.05 |
| 4 | 50.0 | 8.06 |
| 5 | 70.0 | 8.15 |

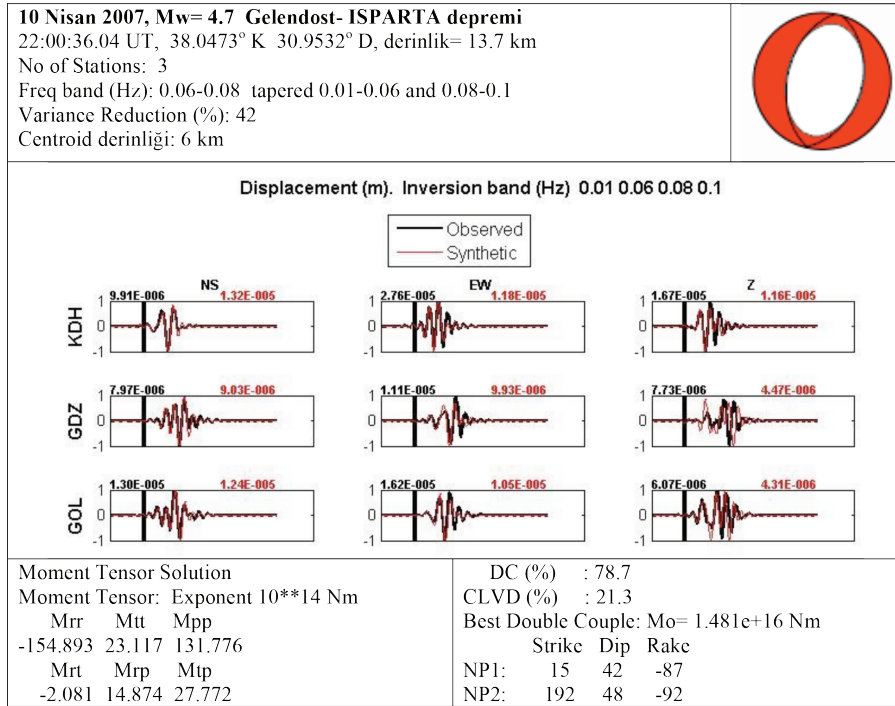


Şekil 5. Çalışmada, deviatorik moment tensör analizi ile kaynak parametreleri belirlenmiş olan tüm depremlerin kaynak mekanizması çözümlerinin dağılımlarını gösteren harita. Her çözüm ait olduğu depremin dış merkezi ile eşleştirilmiştir.

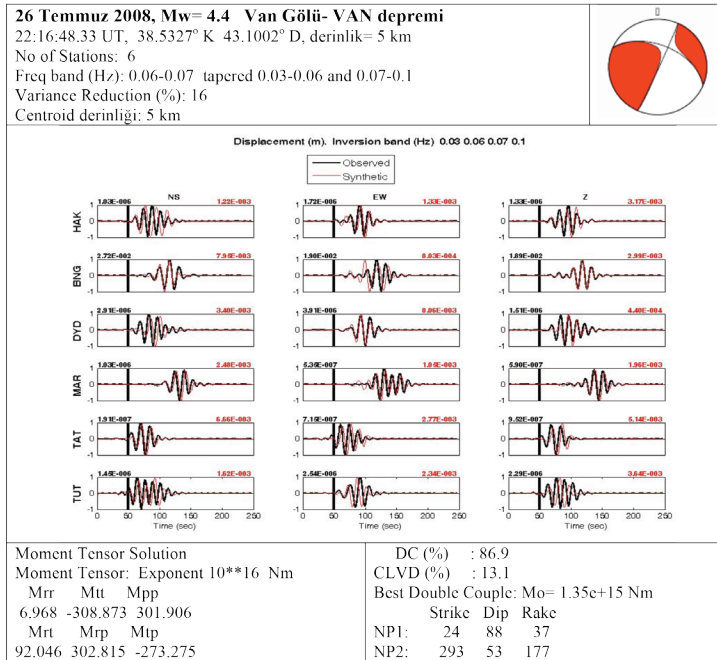
Figure 5. The map showing source mechanism distribution of the earthquakes, for which source parameters have been determined by deviatoric moment tensor analysis in the study. Each source mechanism is matched with the epicentre of the related earthquake.

kaynak mekanizma çözümleri DC temsilleri Şekil 5’de ve hesaplanan kaynak parametreleri de Çizelge 1’de verilmiştir. Yapılan çözümlere örnek teşkil etmesi açısından 2 depreme ait çözüm, yapay-gözlenmiş dalga şekli karşılaştırmalarıyla

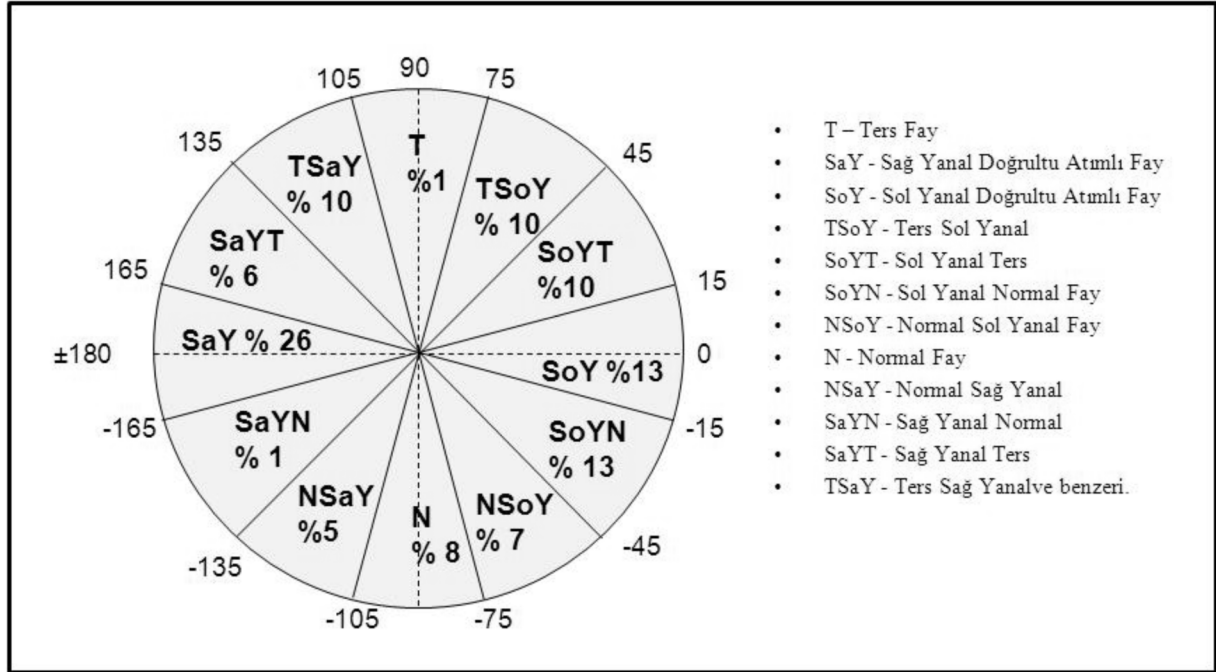
birlikte Şekil 6 ve 7’de gösterilmiştir. Çalışılan depremler arasında en büyük sismik moment (7.69×10^{17} Nm, $M_w=5.7$) 21 Şubat 2007 Sivrice-Elazığ depremi için hesaplanmıştır (Çizelge 1; Şekil 5). Dolayısıyla bu deprem Türkiye sınırları



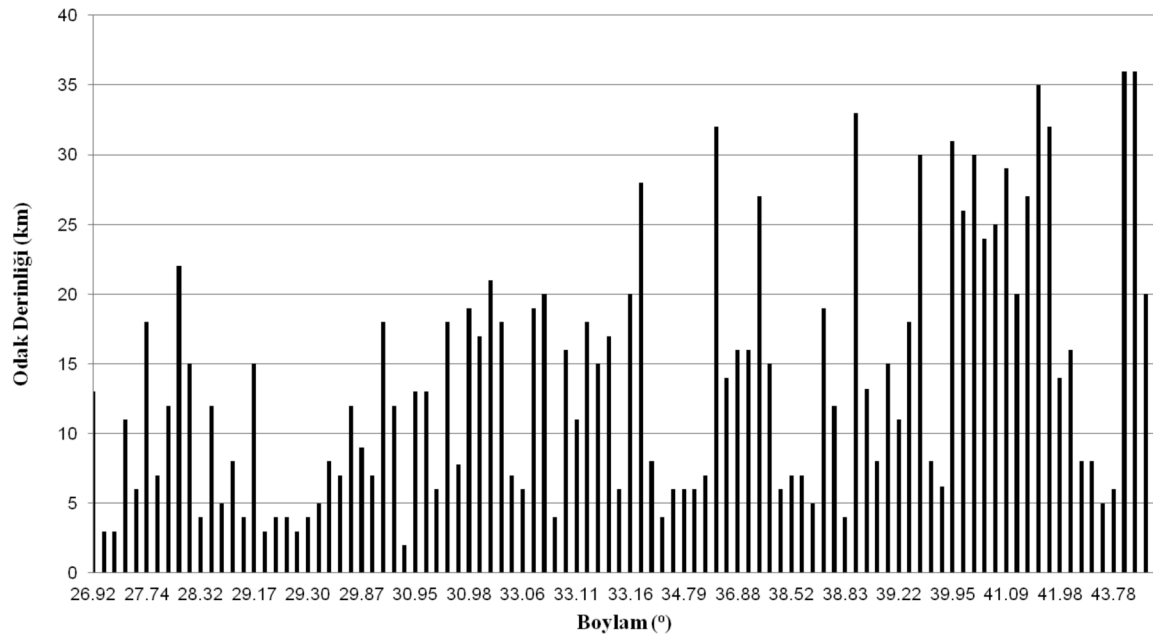
Şekil 6. 10 Nisan 2007 Gelendost-ISPARTA depremine (Mw= 4.7) ait deviatorik moment tensör analizi sonuçları ve bu çözüme karşılık gelen yapay (gri çizgi)- gözlenmiş (siyah çizgi) dalga şekli karşılaştırması.
 Figure 6. The results of the deviatoric moment tensor analysis for the 10 April 2007 Gelendost-ISPARTA (Mw= 4.7) earthquake along with the corresponding synthetic (grey line)-observed (black line) waveform comparison.



Şekil 7. 26 Temmuz 2008 Van Gölü-VAN depremine (MW= 4.4) ait deviatorik moment tensör analizi sonuçları ve bu çözüme karşılık gelen yapay (gri çizgi)- gözlenmiş (siyah çizgi) dalga şekli karşılaştırması.
 Figure 7. The results of the deviatoric moment tensor analysis for the 26 July 2008 Lake Van-VAN earthquake (MW= 4.4) along with the corresponding synthetic (grey line)-observed (black line) waveform comparison.



Şekil 8. Çalışmada moment tensör analizi uygulanan depremler için elde edilen faylanma türlerinin pasta grafiği. Pasta grafiği çevresindeki sayılar kayma (rake) açlarına karşılık gelmektedir.
 Figure 8. Pie graphic of the faulting types of the earthquakes, for which the moment tensor analysis has been applied. The numbers around the pie graphic correspond to the slip (rake) angles.



Şekil 9. Çalışmada moment tensör analizi uygulanan depremler için sentroid derinliklerinin boylamla değişimi.
 Figure 9. Centroid depth variation with longitude for the earthquakes, for which the moment tensor analysis has been applied.

içinde 2007 ve 2008 yılları içinde meydana gelen en büyük depremdir.

Hesaplanan kaynak parametreleri, çalışılan depremlerin %70'inin doğrultu atımlı faylanma, %22'sinin normal faylanma ve %8'inin de ters faylanma sonucunda oluştuğuna işaret etmektedir (Şekil 8). Ayrıca, bu depremler için sismik moment tensör analizi ile elde edilmiş odak mekanizma çözümleri depremlerin dış merkezlerinin yer aldığı bölgelerin genel tektonik rejimleri ile uyum sergilemektedir.

Analizi yapılan depremler için bulunan sentroid derinlikleri ortalaması 14.5 km'dir (Şekil 9). Bu sonuç meydana gelen depremlerin kabuksal depremler olduğunu ve gevrek kırılma sonucu üst kabukta oluştuklarını göstermektedir. Ortalama sentroid derinlikleri; 26°-31° Doğu boylamları arasında Batı Anadolu'da oluşmuş depremler için 3.7 km, 31°-39° Doğu boylamları arasında Orta Anadolu'da oluşmuş depremler için 13.1 km ve 39°-45° Doğu boylamları arasında Doğu Anadolu'da yani DAB içinde oluşmuş depremler için 19.6 km'dir. Elde edilen bu derinlik dağılımı Türkiye'de batıdan doğuya kabuk kalınlaşması bulgusuyla (Zor ve diğ., 2003; Tezel ve diğ., 2010; Grad ve Tiira, 2012) uyumluluk sergilemektedir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar değerli görüş ve katkılarından dolayı, ismi belli olmayan hakemlere teşekkür ederler. Bu çalışma, yazarlardan T.Kılıç'ın Yüksek Lisans tez çalışmasından yararlanılarak hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Ambraseys, N., 2009. Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: a multidisciplinary study of seismicity up to 1900. Cambridge University Press. 947pp. ISBN 978-0-521-87292-8.
- Arrowsmith, R., McNally, K. and Davis, J., 1997. Potential for earthquake rupture and M 7 earthquakes along the Parkfield, Cholame and Carrizo segments of the San Andreas Fault. *Seismological Research Letters*, 68, 902-916.
- Barka, A. and Kadinsky-Cade, K., 1988. Strike-slip fault geometry in Turkey and its

influence on earthquake activity. *Tectonics*, 7, 663-684.

- Bohnhoff, M., Grosser, H. and Dresen, G., 2006. Strain partitioning and stress rotation at the North Anatolian fault zone from aftershock focal mechanisms of the 1999 Izmit Mw=7.4 earthquake. *Geophysical Journal International*, 166, 373-385. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03027.x.
- Bouchon, M., 1981. A simple method to calculate Green's functions in elastic layered media. *Bulletin of Seismological Society of America*, 71, 959-971.
- D'Agostino, N., Avallone, A., Cheloni, D., D'Anastasio, E., Mantenuto S. and Selvaggi, G., 2008. Active tectonics of the Adriatic region from GPS and earthquake slip vectors. *Journal of Geophysical Research*, 113, B12413, doi:10.1029/2008JB005860.
- Dewey, J.F., Hempton, M.R., Kidd, W.S.F., Şaroğlu, F. and Şengör, A.M.C., 1986. Shortening of continental lithosphere: the neotectonics of Eastern Anatolia—a young collision. In *Collision Tectonics*, eds. Coward MP and Ries AC, Geological Society Special Publication, 19, 3-36.
- Dhont, D. and Chorowicz, J., 2006. Review of the neotectonics of the Eastern Turkish-Armenian Plateau by geomorphic analysis of digital elevation model imagery. *International Journal of Earth Science (Geol Rundsch)*, 95, 34-49. doi:10.1007/s00531-005-0020-3.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S. ve Elmacı, H., 2011. 23 Ekim 2011 Van depremi saha gözlemleri ve kaynak faya ilişkin ön değerlendirmeler. MTA Jeoloji Etütler Dairesi, Ankara, 22 sf.
- Endelger, T., 1993. Stress regime in the lithosphere. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, ISBN 0-691-08555-2, 457 pp.
- Ekström, G., Dziewonski, A.M., Maternovskaya, N.N. and Nettles, M., 2003. Global seismicity of 2001: Sentroid-moment-tensor solutions for 961 earthquakes.

- Physics of Earth Planetary Interior, 136, 165-185.
- Ekström, G., Dziewonski, A.M., Maternovskaya, N.N. and Nettles, M., 2005. Global seismicity of 2002: Centroid-moment-tensor solutions for 1034 earthquakes. *Physics of Earth Planetary Interior*, 148, 303-326.
- Gephart, J.W., 1985. Principal stress directions and the ambiguity in fault plane identification from focal mechanisms. *Bulletin of Seismological Society of America*, 75, 621-625.
- Gephart, J.W., 1990. FMSI: a Fortran program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the regional stress tensor. *Computational Geoscience* 16, 953-989.
- Gök, E. and Polat, O., 2012. An assessment of the seismicity of the Bursa region from a temporary seismic network. *Pure and Applied Geophysics*, 169(4), 659-675, DOI 10.1007/s00024-011-0347-6.
- Grad, M. and Tiira, T., 2012. Moho depth of the European Plate from teleseismic receiver functions. *Journal of Seismology*, 16(2), 95-105, DOI 10.1007/s10950-011-9251-x.
- Haris, RA and Arrowsmith, JA 2004. Introduction to the Special Issue on the 2004 Parkfield Earthquake and the Parkfield Earthquake Prediction Experiment, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 4B, pp. S1-S10, September 2006, doi: 10.1785/0120050831.
- Herrin, E., 1968. Seismological tables for P-phases. *Bulletin of Seismological Society of America*, 60, 461-489.
- Jime'nez-Munt, I., Sabadini, R., Gardi, A., and Bianco, G., 2006. Active deformation in the Mediterranean from Gibraltar to Anatolia inferred from numerical modeling and geodetic and seismological data. *Journal of Geophysical Research*, 108(B1), 2006, doi:10.1029/2001JB001544, 2003.
- Jost M.L. and Hermann, R.B., 1989. A student's guide to and review of moment tensors. *Seismological Research Letters*, 60(2), 37-57.
- Kalafat, D., Kekovalı, K., Güneş, Y., Yılmaz, M., Kara, M., Deniz, P. and Berberoğlu, M., 2009. Türkiye ve çevresi faylanma-kaynak parametreleri (MT) kataloğu (1938-2008). Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Ocak 2009, İstanbul.
- Kaymakçı, N., İnceöz, M. and Ertepinar, P., 2006. 3D-architecture and Neogene evolution of the Malatya Basin: Inferences for the kinematics of the Malatya and Ovacık Fault Zones. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 15, 123-154.
- Kılıç, T., 2009. Sismik moment tensör analizi ile 2007-2008 yıllarındaki $M \geq 4.0$ Türkiye depremlerinin kaynak parametrelerinin bulunması Yüksek Lisans tezi . Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya (yayımlanmamış), 66 sf.
- Kikuchi, M. and Kanamori, H., 1991. Inversion of complex body waves-III. *Bulletin of Seismological Society of America*, 81, 2335-2350.
- Koçyiğit, A., Yılmaz, A., Adamia, S. and Kuloshvili, S., 2001. Neotectonics of East Anatolia plateau (Turkey) and lesser Caucasus: implication for transition from thrusting to strike-slip faulting. *Geodinamica Acta* 14:177-195.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gürkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Nadariya, M., Ouzouni, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M.N. and Veis, G., 2000. GPS constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 105:5695-5719.
- Menke, W., 1989. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. International Geophysical Series, 45, Academic Press, San Diego (ISBN-0-12-490921-3).
- Nakano, M., Yamashina, T., Kumagai, H., Inoue, H. and Sunarjo, 2010. Centroid moment tensor catalogue for Indonesia. *Physics*

- of the Earth and Planetary Interiors, 183, 456–467.
- Nalbant, S.S., Hubert, A. and King, G.C.P., 1998. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and north Aegean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 103(10), 24469–24486.
- Nur, A. and Cline, E.H., 2000. Poseidon's Horses: Plate tectonics and earthquake storms in the Late Bronze Age Aegean and Eastern Mediterranean. *Journal of Archaeological Science*, 27, 43–63.
- Oppenheimer, D.H., Bakun, W.H. and Lindh, A.G., 1990. Slip partitioning of the Calaveras Fault, California, and prospects for future earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 95, 8483–8498.
- Örgülü, G., 2011. Seismicity and source parameters for small-scale earthquakes along the splays of the North Anatolian Fault (NAF) in the Marmara Sea. *Geophysical Journal International*, 184, 385–404, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04844.x
- Pınar, A., Honkura, Y., Kuge, K., Matsushima, M., Sezgin, N., Yılmaz, M. and Ögütçü, Z., 2007. Source mechanism of the 2000 November 15 Lake Van earthquake ($M_w = 5.6$) in eastern Turkey and its seismotectonic implications. *Geophysical Journal International*, 170(2):749–763, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03445.x
- Pınar, A., Kuge, K. and Honkura, Y., 2003. Moment inversion of recent small to moderate sized earthquakes: implications for seismic hazard and active tectonics beneath the Sea of Marmara. *Geophysical Journal International*, 153, 133–145.
- Roeloffs, E., and J. Langbein 1994. The earthquake prediction experiment at Parkfield, California, *Rev. Geophys.* 32, 315–336.
- Pondrelli, S., Morelli, A., Ekström, G., Mazzaa, S., Boschi, E. and Dziewonski, A.M., 2002. European–Mediterranean regional Sentroid-moment tensors: 1997–2000. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 130, 71–101.
- Pondrelli, S., Salimbeni, S., Morelli, A., Ekström, G. and Boschi, E., 2007. European–Mediterranean Regional Sentroid Moment Tensor catalog: solutions for years 2003 and 2004. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 164 (1–2), 90–112.
- Pondrelli, S., Salimbeni, S., Morelli, A., Ekström, G., Postpischla, L., Vannuccia, G. and Boschi, E., 2011. European–Mediterranean Regional Sentroid Moment Tensor catalog: Solutions for 2005–2008. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 185 (2011) 74–81.
- Reilinger, R. and McClusky, S., 2011. Nubia–Arabia–Eurasia plate motions and the Dynamics of Mediterranean and Middle East tectonics. *Geophysical Journal International*, 186, 971–979. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05133.x
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Çakmak, R., Özener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrova, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. and Karam, G., 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., Türkelli, N. and Barazangi, M., 2003. The Eastern Turkey Seismic Experiment: The study of a young continent–continent collision: An example from eastern Turkey. *Geophysical Research Letters*, 30(24), 8038, doi:10.1029/2003GL018912,2003.
- Sokos, E. and Zahradnik, J. 2006. A Matlab GUI for use with ISOLA Fortran codes (User's Guide), Ver. 2.5. June 2006, 34 pp.
- Stein, R., Barka, A. and Dietrich, J.H., 1997. Progressive failure on the North Anatolian Fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophysical Journal International*, 128, 594–604.

- Stein, S. and Wyession, M., 2003. An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure. Blackwell Publishing, Malden, Oxford. 489pp
- Sykes, L.R, Shaw, BE and Scholz, CH 1999. Rethinking Earthquake Prediction. *Pure appl. geophys.* 155 (1999) 207–232.
- Şengör, A.M.C., Görür, N. and Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In *Strike-slip faulting and basin formation*. Eds. Biddle KT and Christie-Blick N, Special Publication of Society of Economic Paleontologists and Mineralogists 37, 227-264.
- Tezel, T., Shibusani, T., Kaypak, B., 2010. Crustal structure variation in western Turkey inferred from the receiver function analysis. *Tectonophysics* 492(1-4), 240-252, doi:10.1016/j.tecto.2010.06.006.
- Toda, S., and R. S. Stein 2002. Response of the San Andreas fault to the 1983 Coalinga–Nuñez earthquakes: An application of interaction-based probabilities for Parkfield, J. *Geophys. Res.* 107, 2126, doi 10.1029/2001JB000172.
- Udias, A. and Buforn, E. 1996. Source mechanism of earthquakes from seismic waves. Third workshop on 3D modelling of seismic wave generation, propagation and their inversion. Trieste, Italy, p 1-58
- Utkucu, M., Budakoğlu, E. ve Durmuş, H., 2011a. Marmara Bölgesinde (KB Türkiye) depremsellik ve deprem tehlikesi üzerine bir tartışma. *Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Dergisi*, 32 (3), 187-212.
- Utkucu, M., Budakoğlu, E., Yalçın, H., Durmuş, H., Kalkan, H., Gülen, L., 2011b. 23 Ekim 2011 Van depremi (MW=7.2) hakkında ön rapor. Sakarya Üniversitesi, Sakarya (yayımlanmamış).
- Van der Pluijm B.A. and Marshak, S. 2004. *Earth structure : an introduction to structural geology and tectonics*. Ben A. van der Pluijm, Stephen Marshak ; with contributions by Richard W. Allmendinger [et al.], 2nd ed., W. W. Norton & Company, Inc., ISBN 0-393-92467-X, 656 pp.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbasi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martino, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chery, J. 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, 157, 381-398
- Vogel, A., Yueqing, Z. and Kahnemund, L., 1998. Earthquake dynamic control networks: Surveillance of earthquake generation, alert warning and rapid emergency control. *Earthquake Prognostic World Forum “Seismic Safety of Big Cities”*, İstanbul, September, 21-25, 1998.
- Zoback, M.L., 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project. *Journal of Geophysical Research*, 97, 11703–11728.
- Zor, E., Sandvol, E., Gürbüz, C. Türkeli, N., Seber, D. and Barazangi, M. 2003. The crustal structure of the East Anatolian plateau (Turkey) from receiver functions. *Geophysical Research Letters*, 30(24), 8044, doi:10.1029/2003GL018192.

