İstanbul Yerbilimleri Dergisi, C.25, S.1, SS. 25-40, Y. 2012

19 MAYIS 2011 KÜTAHYA-SİMAV DEPREMİNİN (Mw=5.8) DALGA ŞEKLİ TERS ÇÖZÜM YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE 19 MAY 2011 KUTAHYA-SIMAV EARTHQUAKE (Mw=5.8) BY WAVEFORM INVERSION METHOD

Özlem Karagöz[1*], Ali Pınar[2], Serkan Irmak[3], Oğuz Özel[4]

[1]Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fak. Jeofizik Müh. Böl.,17100, Terzioğlu Yerleşkesi-Çanakkale

[2]Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsüi, Çengelköy- İstanbul

[3]Kocaeli Üniversitesi Müh. Fak. Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

[4]İstanbul Üniversitesi Müh. Fak. Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34850, Avcılar- İstanbul

Yayına Geliş (Received): 23.02.12, Yayına Kabul (Accepted): 27.02.13

ÖZ: 19 Mayıs 2011 tarihinde Türkiye'nin batısında yer alan Ege Bölgesindeki Kütahya il sınırları içinde kalan Simav Fay Zonunda (SFZ) büyüklüğü ve derinliği farklı sismoloji merkezleri (KRDAE: Mw=5.7, Ml=5.9 h=8 km; AFAD: Mw=5.8, Ml=5.7 h=25 km; USGS Mw=5.8 h=7 km; IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) Mw=6.0 h=4.6 km) tarafından farklı açıklanmış olan bir deprem meydana gelmiştir. Depremin dış merkez üssü ülkemizin önemli deprem kuşaklarından biri olan Batı Anadolu'nun açılma rejimi içerisindeki en büyük çöküntü alanlarından Gediz grabeninin kuzeybatısındaki SFZ üzerinde yer almaktadır. SFZ, depremsellik açısından aktif, diri listrik fayların bulunduğu, Batı Kuzeybatı-Doğu Güneydoğu doğrultulu yaklaşık 15-20 km. uzunlukta ve 2-3 km genişliğinde bir zondur (JMO, 2011). Bu çalışmada, uzak alan cisim dalgalarından faydalanılarak, Kikuchi ve Kanamori (1991) tarafından geliştirilen dalga şekli ters çözüm yöntemi kullanılmış ve açılma bölgesindeki sığ bir depremin oluşum mekanizması hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Faylanmanın doğrultusu, eğim ve kayma açıları sırasıyla 271°, 51° -100° olarak belirlenmiştir. Depremin kırılma süreci yaklaşık 3 sn olarak belirlenmiştir. Kırılma hızı 2.5 km/sn ve iki yönlü olarak düşünülecek olursa toplam kırılma boyu yaklaşık 15 km olduğu tahmin edilebilir. Telesismik cisim dalgalarının sonlu fay modellemesi sonucunda Kütahya-Simav depreminin fay düzlemi boyutlarının 15 x 10 km olduğu tespit edilmiştir. Ancak, fay düzlemi boyunca sismik moment serbestlenmesinin oldukça heterojen olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, faylanmanın biri normal diğeri oblik (sağ yönlü doğrultu atım bileşeni içeren normal) iki fay segmenti üzerinde meydana geldiğini göstermektedir. Ana şoktan sonra bölgede büyüklükleri $1 \leq Ml \leq 5$ arasında değişen yoğun bir artçı şok etkinliği gözlenmiştir. Depremin nokta kaynak çözümü sonucunda 2011 Kütahya-Simav (Mw=5.8) depreminin tek bir şoktan meydana geldiği ve farklı sismoloji merkezlerinin faylanma çözümü ile uyumlu olduğu ancak büyüklük ve derinlik hesaplamalarında farklılıklar olduğu görülmüştür. Bölgede ana şok sonrası bozulan gerilme dengesi, devam eden artçı şok etkinliği ile tekrar eski haline gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dalga şekli ters çözüm, kaynak mekanizması çözümü, Simav (Kütahya) fay zonu.

ABSTRACT: The May 19, 2011 earthquake of which parameters are determined by different seismological centers with different size and depth (B.U.K.O.E.R.I. National Earthquake Observatory Centre Mw=5.7 (Ml=5.9) h=8 km; AFAD/ Earthquake Department Presidency Mw=5.8 (Ml=5.7) h=25 km; USGS Mw=5.8 h=7 km; IRIS Mw=6 h=4.6 km) occurred on the Simav Fault Zone (SFZ) located in the province of Kutahya, western Aegean Region of Turkey. The epicentre of the earthquake located on the SFZ is within the major seismic belt of Western Anatolian extensional regime, which is the largest area of subsidence to the northwest of the Gediz Graben. West Northwest-East Southeast trending approximately 15-20 km long active listric faults exist in the SFZ, which is 2-3 km-wide zone as revealed by the seismicity (JMO, 2011). In this study, we have investigated the source process of a shallow earthquake in an extensional region using the teleseismic body waveforms data, and the waveform inversion method developed by Kikutchi&Kanamori (1991). The strike, dip and rake of the faulting were determined as 271°, 51° and -100°, respectively. We derive 3 s rupture process time for the earthquake. Assuming bilateral rupture propagation of 2.5 km/s rupture velocity yields approximately 15 km rupture length. The finite source modelling of the teleseismic waveforms yields a fault plane of 15 x 10 km size for the Kutahya-Simav earthquake. We obtained inhomogeneous

moment release on the fault plane. The results show that the faulting occurred on a normal and oblique (normal with right-lateral strike-slip component) fault segments. After the main shock, an intensive aftershock activity with magnitudes ranging between $1 \leq Ml \leq 5$ took place in the region. The point source modelling of the 2011 Kütahya-Simav earthquake (Mw=5.8) suggests a single shock earthquake that is compatible with the determinations of several other seismological centres, but the size and the depth of the faulting show some differences. The aftershock activity in the region following the main shock continued until the stabilization of the disturbed background stresses around the ruptured fault zone.

Key words: Simav (Kütahya) fault zone, source mechanism solution, waveform inversion.

GİRİŞ

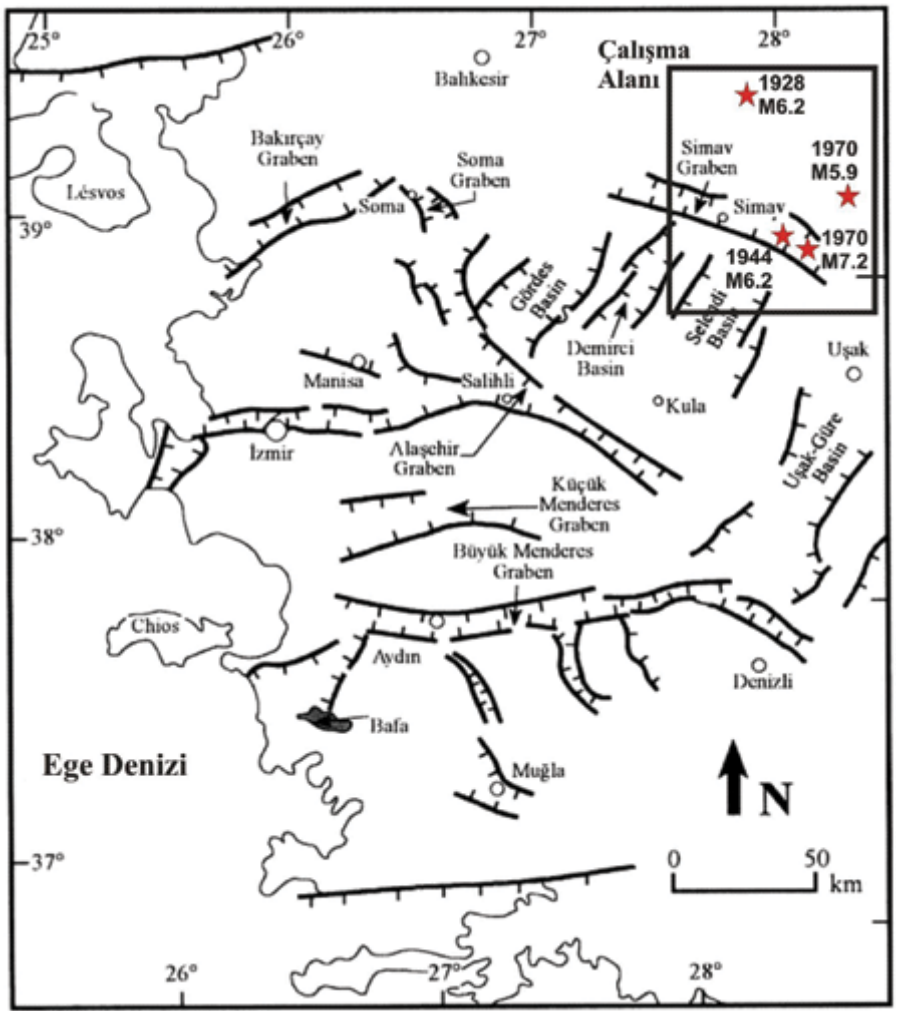
Batı Anadoluda Simav Fay Zonu (SFZ) üzerinde 19 Mayıs 2011 saat 20:15:22 (UTC) de 39.15°K enlem ve 29.10°D boylamında orta büyüklükte Mw=5.8 (USGS) derinliği h=7 km (USGS) olan bir deprem meydana gelmiştir. Deprem Kütahya çevresini etkilemiş, merkez üssü olan Simav ilçesinde birçok yapı zarar görmüş, 70 kişinin yaralanmasına ve 3 kişinin de ölümüne sebep olmuştur.

Bölgede depremin merkez üssü Simav ilçesindeki, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi Başkanlığına ait ivmeölçer elektrik kesintisi nedeni ile tam kayıt alamamıştır (AFAD,2011). Depremin merkez üssüne en yakın (yaklaşık 40 km uzakta) Gediz'de bulunan kuvvetli yer hareketi ivmeölçeri tarafından kaydedilmiş ivmeler doğu-batı yönünde 0.103 g, kuzey-güney yönünde 0.092 g ve düşey yönde 0.068 g düzeyindedir. Depremin Simav'daki hareketin kuvvetli olduğu (5-6 sn) aralıktaki yaklaşık en büyük ivmenin Gediz'de ölçülen değerin 2-3 katı olabileceği belirtilmiştir (İMO, 2011). Bu yaklaşıma göre Simav'daki en büyük ivme değeri 0.30 g kadar ve depremin şiddetli olduğu zaman aralığında yapıları etkileyen ortalama ivmenin 0.15 g olduğu öngörülerek, Simav'daki yapıların ağırlıklarının %15'i kadarının yatay bir deprem yükü ile zorlandıkları tahmin edilmektedir (İMO, 2011; Şekil 1).



Şekil 1. 19 Mayıs 2011 Kütahya-Simav depreminde hasar gören yapılardan birkaç fotoğrafı.
Figure 1. A few photographs of damaged structures after the 19 May 2011 Kütahya-Simav Earthquake.

Bölgede yapılan ilk çalışmalar (örn. Zeschke, 1954; Akdeniz ve Konak, 1979) Simav fayının erken Miyosenden beri aktif olduğunu göstermektedir. Simav grabeninin kuzeyinden ve güneyinden geçen faylarla sınırlı olduğu (Arpat ve Bingöl 1969; McKenzie 1978) ve kuzeydeki fayın aktif olduğu (Eyidoğan ve Jackson, 1985) belirtilmiştir. Bozkurt (2001), bölgenin Ege açılma rejiminin bir parçası olduğunu ve en çok göze çarpan neotektonik özelliklerinin yaklaşık olarak D-B yönelimli grabenler (Edremit, Bakırçay, Gediz, Simav, Küçük Menderes, Büyük Menderes, Gökova) ve onların normal faylarla sınırlandırılmış olan basenleri olduğunu rapor etmiştir. Ayrıca, daha az baskın olan yapısal birimlerin ise KKD yönelimli basenler ve onları çevreleyen horstlar olduğunu söylemiştir (Şekil 2). Bakırçay, Gediz, Küçükmenderes horstları ve Gökova grabeni üzerinde D-B, KB-GD ve KD-GB uzanımlı çeşitli faylar bulunmaktadır (McKenzie, 1978; Dewey ve Şengör 1979; Jackson ve McKenzie 1984; Şengör 1982, 1987; Şengör ve diğ., 1984). Simav grabeni KD-GB doğrultulu Demirci ve Selendi Basenlerinin kuzeyinde ve Söğütçük ile Simav kasabalarının arasında BKB-DGD doğrultuludur (Şekil-2-3).

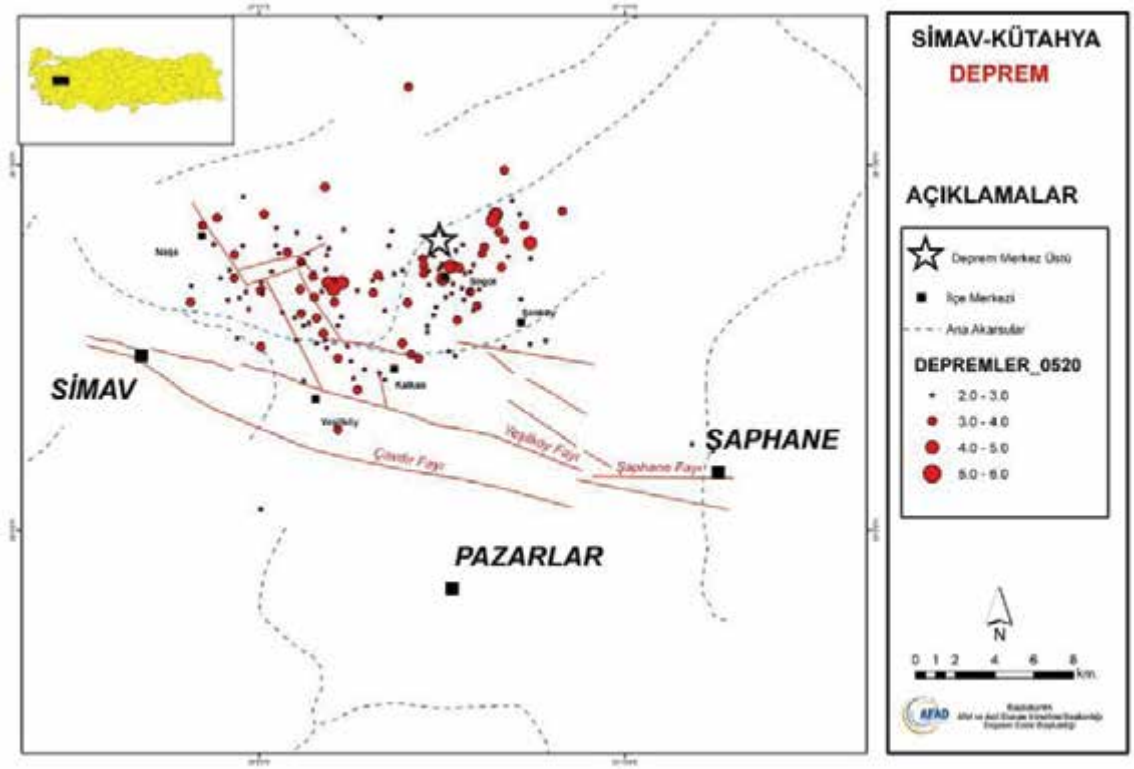


Şekil 2. Batı Anadolu'nun D-B yönelimli grabenlerini ve bölgede egemen olan yapısal birimlerini gösteren basitleştirilmiş harita (Bozkurt,2001; Karagöz, 2007). Kırmızı yıldızlar çalışma alanına yakın önceki depremleri göstermektedir.

Figure 2. A simplified map of the western Anatolian E-W trending grabens, and the most recently dominant structural units in the region (Bozkurt 2001, Karagöz 2007). Red stars show previous earthquakes close to the study area.

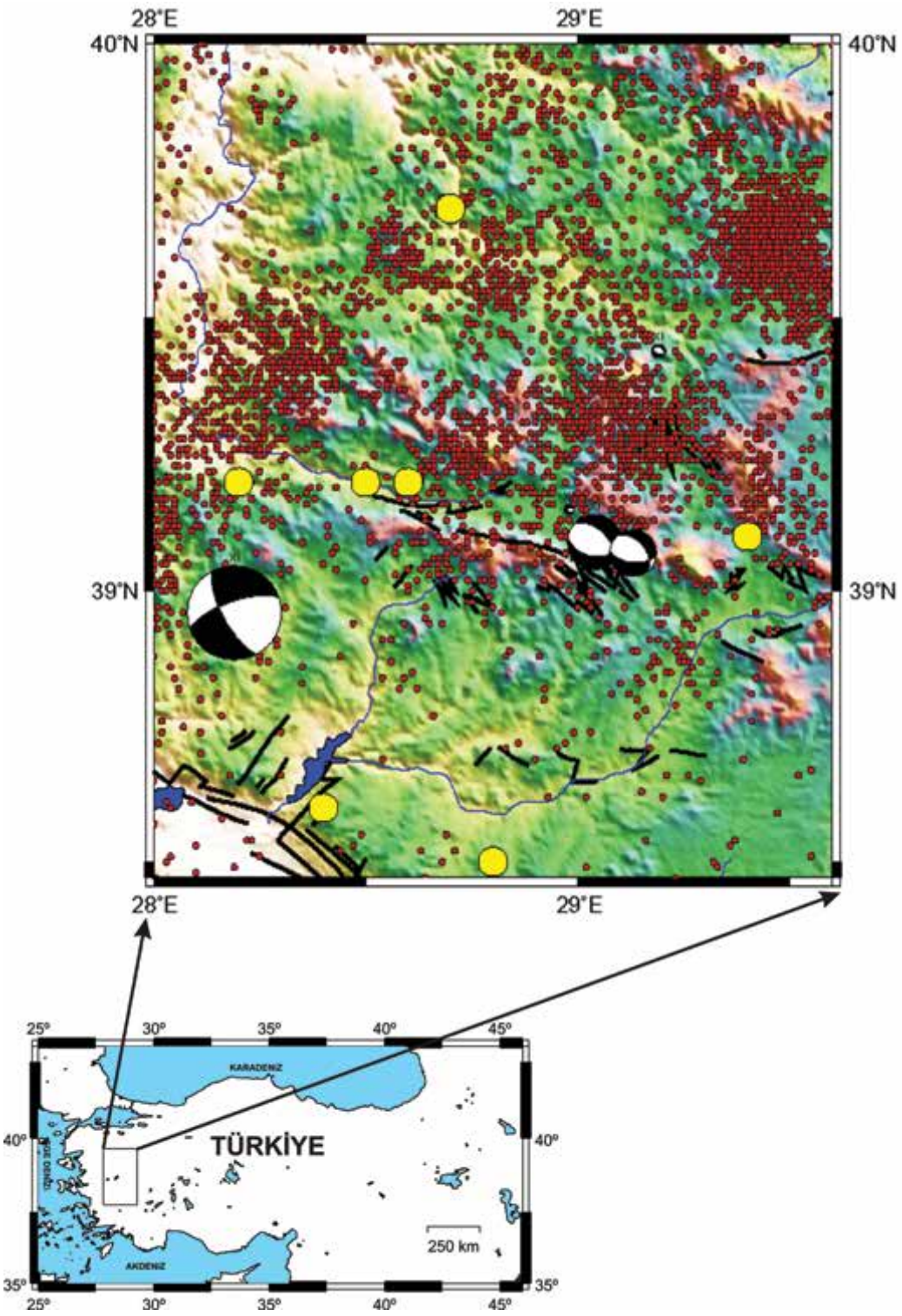
Çalışma bölgesine tektonik açıdan baktığımızda, Batı Anadolu'nun açılma rejimi içerisinde yer alan en büyük çöküntü alanlarından Gediz grabeninin kuzeybatısında yer almaktadır (Bozkurt, 2001; Taymaz vd., 1991). Depremin dış merkezi Sındırgı (Balıkesir) ve Sincanlı (Afyonkarahisar) ilçeleri arasında uzanır. Bu zonun genel doğrultusu BKB-DGD gidişli aktif diri ve listirik faylarla çevrili, sağ yönlü doğrultu atımlı bileşeni olan bir fay sistemidir. Fay zonu batıdan doğuya doğru Sındırgı, Simav, Şaphane, Banaz ve Sincanlı olarak adlandırdığımız beş alt fay segmentinden oluşur (Ekincioğlu, 2011).

Bölge, tarihsel dönemde büyük depremlerin etkisinde kalmış ve büyük ölçekte zarar görerek kayıplar vermiştir. Son yüzyılda bölgede meydana gelmiş 1928 Emet (M=6.2), 1944 Şaphane (M=6.2), 1970 Gediz (M=7.2) ve 1970 Çavdarhisar (M=5.9) depremleri ağır hasar yapan ve kayıplara neden olan depremlerdir (Şekil 2). Bu bölgede en son hasar yapan depremler 17 Şubat 2009 (Ml=4.8) ve 19 Mayıs 2011 (Mw=5.8) olan depremlerdir. Tarihsel ve aletsel dönem deprem etkinliği ile beraber Global-CMT odak mekanizması çözümleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 19 Mayıs 2011 Kütahya-Simav Depreminin meydana geldiği bölgeye ait tektonik hatlar. (AFAD, 2011).

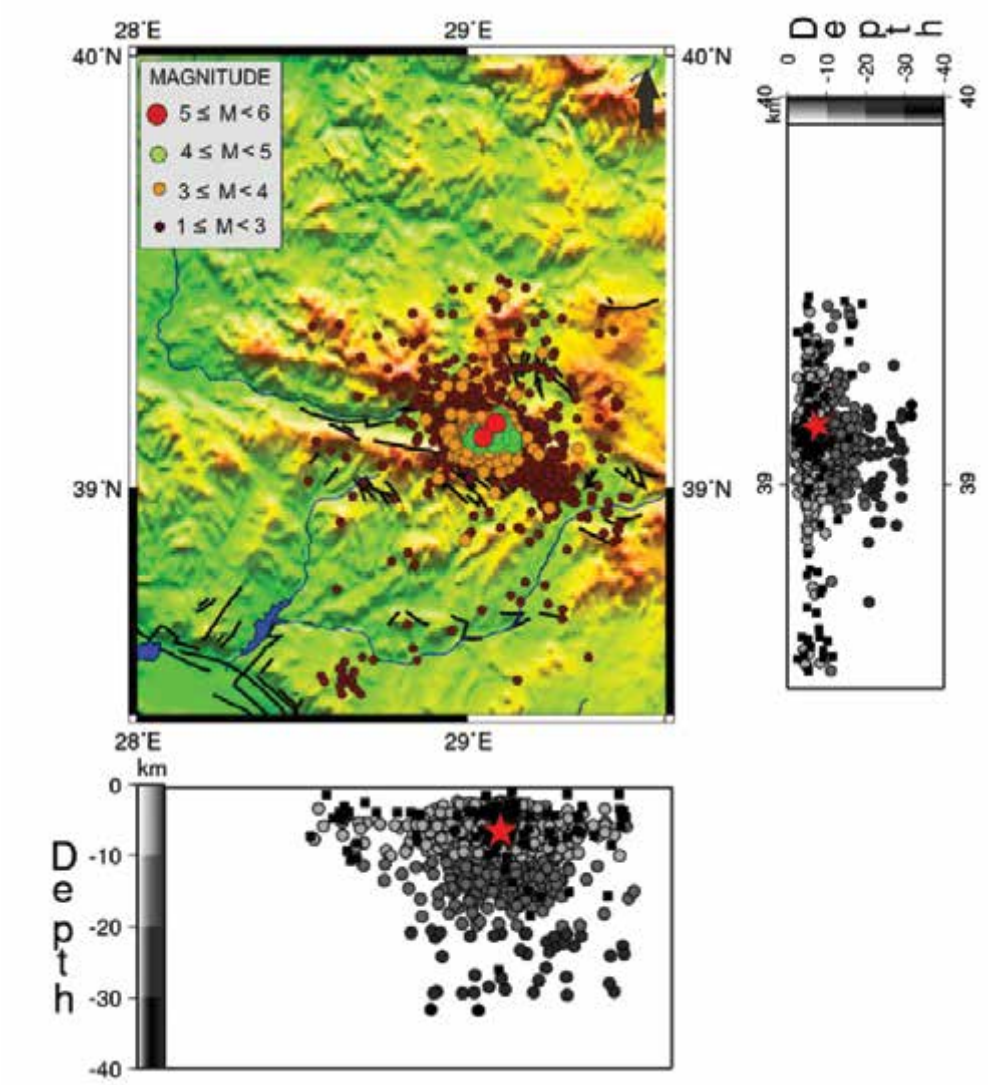
Figure 3. Tectonic structures of the 19 May, 2011 Kutahya-Simav earthquake area (AFAD, 2011).



Şekil 4. 19 Mayıs 2011 Kütahya-Simav depremi kaynak bölgesi ve yakın çevresinin sismisite haritası. Kırmızı ve sarı daireler sırası ile aletsel dönem (1900-2012.01.17) ve tarihsel dönem (2150 B.C.-1900 A.D., USGS-NEIC) deprem etkinliğini göstermektedir. Odak mekanizması çözümleri Global-CMT'den alınmıştır.

Figure 4. Seismicity map of the 19 May 2011 Kütahya-Simav earthquake source region and surroundings. Red and yellow circles represent instrumental (1900-2012.01.17) and historical (2150 B.C.-1900 A.D., USGS-NEIC) earthquakes, respectively. Focal mechanism solutions are from Global-CMT.

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü (BÜ KRDAE) Ulusal Deprem İzleme Merkezi'nden alınan düzeltilmiş sekiz aylık süreçte bölgede meydana gelen ana şok, öncü ve artçı şokların büyüklüklerine göre dağılımını gösteren sismotektonik harita ve K-G, D-B doğrultulu derinlik kesitleri Şekil 5'te verilmektedir. Bu kesitler incelendiğinde depremlerin K-G ve D-B yönlü derinlik dağılımları birbirine yakındır. Bölgeye her iki doğrultudan; kuzeyden veya güneyden bakıldığında derinliklerin D-B doğrultusunda, doğudan veya batıdan bakıldığında ise K-G doğrultusunda 5-35 km. arasında saçılma gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5. 2011 Kütahya-Simav depreminin Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Ulusal Deprem İzleme Merkezi tarafından 05.01.2011 ile 10.08.2011 tarihleri arasında kaydedilen, büyüklükleri 1≤ Ml<6 arasında değişen, revize edilmiş öncü ve artçı deprem dağılımını gösteren sismisite haritası ve KG/DB doğrultulu derinlik kesitleri. Derinlik kesitlerinde siyah kareler ve derinliğe göre koyulaşan gri daireler sırasıyla öncü ve artçı depremlerin derinlik dağılımlarını göstermektedir. Ana şok depremi ise kırmızı yıldız ile gösterilmiştir. Faylar Şaroğlu vd. (1992)'den alınmıştır.

Figure 5. Seismicity map of the revised fore- and aftershocks of the 2011 Kutahya-Simav earthquake, with magnitudes 1≤ Ml < 6, recorded between 05.01.2011 and 10.08.2011 by Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute National Earthquake Observatory Centre and their NS/EW depth cross-sections. Black squares and darkened gray circles are the depth distribution of the fore- and aftershocks in the NS and EW cross-sections. The main shock is shown with red star. The faults are from Saraoglu et al. 1992.

Bu çalışmada, 2011 Kütahya-Simav depremi kaynak kırılma süreci Kikuchi ve Kanamori (1991) tarafından geliştirilen dalga şekli ters çözüm yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Kaynak mekanizması zaman ortamında modellenerek, kaynak parametreleri farklı sismoloji merkezlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonlu fay modellemesi ile fay düzlemi, kaynak parametreleri belirlenmiştir.

YÖNTEM ve UYGULAMA

Cisim dalgalarının zaman ortamında değerlendirilmesi, kaynak kırılma işlemi ile faylanma mekanizmasından ayrıntılı bir şekilde bilgi edinilmesini sağlamaktadır (Kikuchi ve Kanamori, 1982, 1991; Özçelik ve Pınar, 2005; Özçelik vd. 2006).

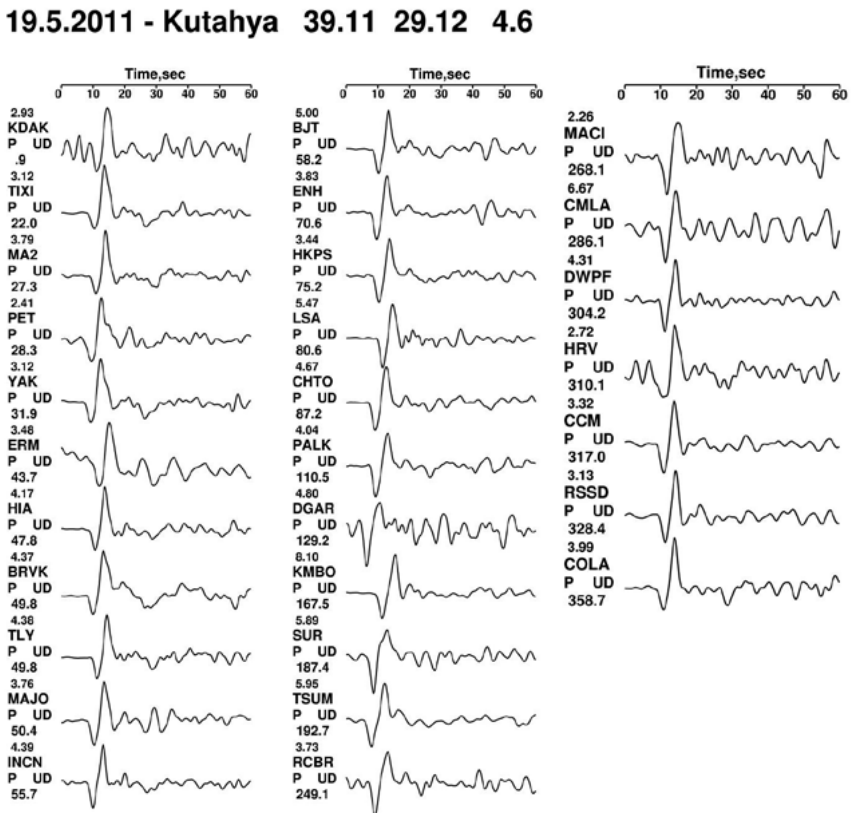
Karmaşık ya da tek şokla oluşan depremlerin kaynak parametreleri uzak alan kayıtları kullanılarak dalga şekli ters çözüm yöntemi ile elde edilmektedir (Pınar 1995, 1998; Özçelik ve Pınar, 2005; Pınar vd., 2007). Kikuchi ve Kanamori (1991) tarafından geliştirilen bu yöntem ile her bir nokta kaynağın bütün parametreleri (nokta kaynağın yeri ve derinliği, faylanma mekanizması, sismik moment, kırılma zamanı, kırılma süresi) belirlenebilmektedir. Yöntemin esası; belli bir azimut aralığında seçilen istasyonlar tarafından kaydedilen bir depremin dalga formalarına, farklı odak derinlikleri, kabuk modelleri ve farklı kaynak-zaman fonksiyonları için ters çözüm uygulayarak gözlemsel ve yapay sismogramlar arasındaki uyumun hangi derinlik, kabuk yapısı ve kaynak-zaman fonksiyonu için en az hata ile en iyi olduğunu belirlemeye dayanır.

2011 Kütahya-Simav depreminin IRIS veri merkezinden elde edilen 76 istasyondaki geniş-bant telesismik verisi incelenerek gürültülü olanlar çıkarılmış ve kalan 29 istasyondaki telesismik P dalgası kayıtlarına, dalga şekli ters çözüm yöntemi uygulanılarak modellenmiştir. S dalgası kayıtları algoritmadaki bazı sorunlar nedeniyle kaynak modellemesinde kullanılmamıştır. Ters çözümde kullanılan P dalgaları için kaynak merkezine telesismik uzaklıkları 30°-90° olan istasyonlar seçilmiştir. P dalgası kayıtları zaman penceresi 30 sn, örnekleme aralığı 0.2sn alınarak 0.01-0.5sn aralığında bant geçişli filtre uygulanarak ters çözüm işleminde kullanılmıştır (Çizelge 1). Bu istasyonlara ait gözlemsel sismogramlar Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu uzaklıklarda, kabuk yapısı etkileri ve yer içinden kaynaklanan etkiler en az düzeydedir (Özçelik ve Pınar, 2005; Özçelik vd. 2006).

Çizelge 1. 2011 Kütahya-Simav depremi dalga şekli modellemesinde kullanılan P dalga şekillerinin elde edildiği IRIS istasyonları (f_c: istasyon ağırlık faktörü).

Table 1. IRIS stations which recorded P-waveforms used in 2011 Kütahy-Simav earthquake waveform modelling (fc: weighting factor for stations).

İstasyon	Azimut (°)	Back Azimut (°)	Dış Merkez Uzaklığı (°)	f_c
KDAK	0.9	-1.3	83.1	1.7
TIXI	22	-67.1	56.1	1.6
MA2	27.3	-44.6	70.3	1.3
PET	28.3	-37.7	78.1	2.1
YAK	31.9	-61.1	60.6	1.6
ERM	43.7	-46.2	79.2	1.4
HIA	47.8	-61.7	61.8	1.2
BRVK	49.8	-99.8	31.2	1.1
TLY	49.8	-73	51.4	1.1
MAJO	50.4	-48.1	80.1	1.3
INCN	55.7	-53.8	72.3	1.1
BJT	58.2	-59.5	64.1	1
ENH	70.6	-57.9	64.5	1.3
HKPS	75.2	-54.2	72.5	1.5
LSA	80.6	-61.8	51	0.9
CHTO	87.2	-55	62.8	1.1
PALK	110.5	-47.1	56.1	1.2
DGAR	129.2	-37.3	61.4	1
KMBO	167.5	-9.6	40.9	0.6
SUR	187.4	6.8	71.9	0.8
TSUM	192.7	10.4	59.3	0.8
RCBR	249.1	46.8	74.8	1.3
MACI	268.1	61.7	39	2.2
CMLA	286.1	70.5	42.2	0.7
DWPF	304.2	46.7	86.7	1.1
HRV	310.1	53.6	71.3	1.8
CCM	317	42.2	85.4	1.5
RSSD	328.4	34.5	86.7	1.6
COLA	358.7	2.4	76	1.3



Şekil 6. 2011 Kütahya-Simav depremi dalga şekli ters çözümünde kullanılan 29 istasyondaki telesismik P dalga şekilleri.

Figure 6. Teleseismic P waveforms at 29 stations used in the 2011 Kutahya- Simav earthquake waveform inversion.

Deprem kayıtlarının istasyona varış zamanları Jeffreys ve Bullen (1958) zaman-uzaklık tabloları kullanılarak hesaplanmış ve gözlemsel sismogramlar çizdirilmiştir (Şekil 6). Ters çözümde daha iyi sonuç alabilmek için istasyonların bazılarında varış sürelerinde birkaç saniyelik düzeltmeler yapılmıştır. Böylece kabuk yapısının yanal heterojenitesi her bir istasyon için hesaba katılmıştır (Kikuchi ve diğ., 1993; Özçelik ve Pınar, 2005; Özçelik vd. 2006).

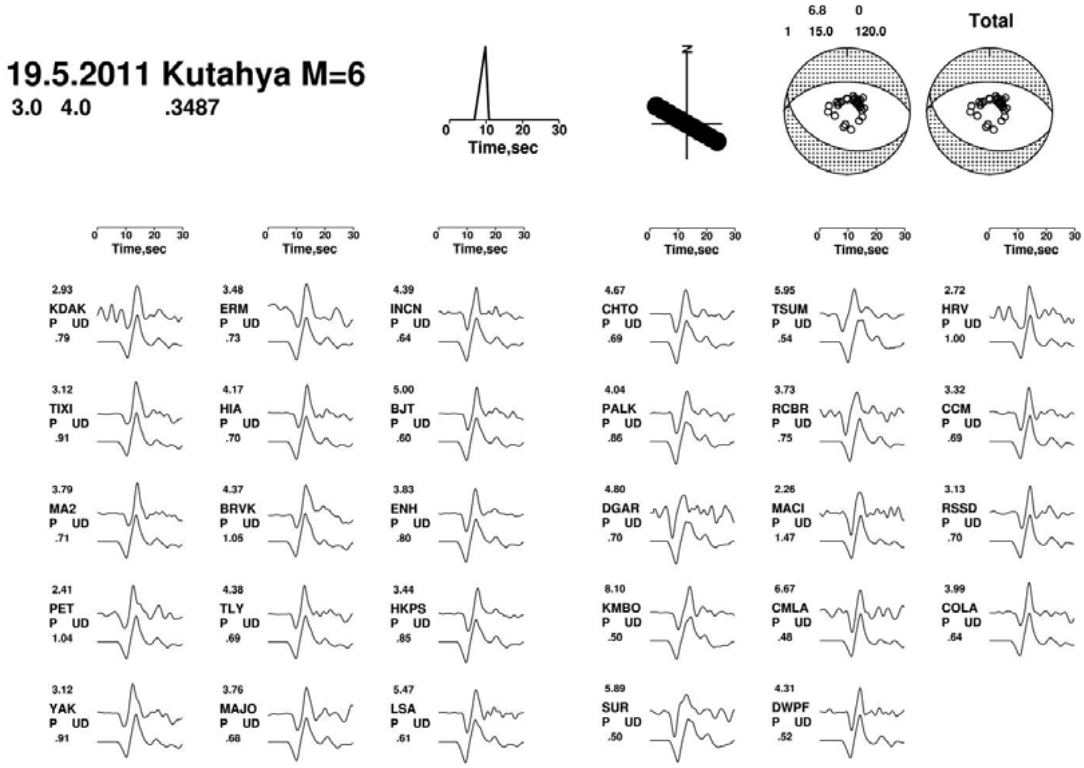
Ters çözümde nokta kaynağın yerini hesaplamak için kullanılan green fonksiyonları farklı derinlikler ve doğrultu boyunca farklı uzaklıklar için hesaplanmaktadır. Teorik sismogramları oluşturmak ve nokta kaynağın yerini belirlemek amacı ile doğrultu ve derinlik boyutlarında yerleşmiş 5x5'lik bir nokta kaynak grid şeması oluşturulmuştur. Grid şeması düzleminin SFZ ile uyumlu olması için doğrultusu 120° eğimi 45° alınmıştır. Grid düzlemi üzerinde belirlenen ve aralıkları 3km. olan her bir nokta kaynak moment tensoru temsil etmektedir. Green fonksiyonları farklı derinliklerdeki her bir odak noktasında hesaplanmaktadır. Diğer episantrlarda sadece başlangıç zamanlarının düzeltilmesi ile Green fonksiyonları elde edilmektedir (Pınar ve Honkura, 1994,1996). Green fonksiyonu için kullanılan ve en az hata veren kabuk-hız modeli Çizelge 2'de verilmiştir. Telesismik kayıtlarda yer içindeki heterojinitelerden kaynaklanan birkaç saniye erken veya geç geliş zamanları ortadan kaldırılmıştır. Telesismik çalışmalarda kullanılan sismik dalgalar çok uzun periyotlu olduğundan kabuk yapısının ayrıntılarından çok fazla etkilenmemektedir. Bu nedenle literatürdeki kabuk yapılarının yerine deneme-yanılma ile ters çözümde en az hata veren uygun kabuk modeli belirlenmeye çalışılmıştır. Çizelge 2'de kaynaktaki ve istasyon altındaki kabuk-hız modellerinin yapısı toplam 35 km olarak verilmektedir.

Çizelge 2. Green fonksiyonları hesaplanması için kullanılan kaynaktaki ve istasyon altındaki hız modeli.

Table 2. The velocity structure of the source and receiver sites used for the calculation of the Green's functions.

Kalınlık (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Yoğunluk (r) $x10^3$ gr/cm^3
Kaynaktaki Kabuk-Hız Modeli			
10	5.60	2.80	2.6
25	6.50	3.90	2.7
İstasyon Altı Kabuk-Hız Modeli			
15	5.5	2.75	2.6
20	6.75	4.00	2.7

Düşey düzlem üzerinde doğrultu ve eğim boyunca belirlenen 5 noktadan orta nokta referans odak noktası olacak şekilde ters çözüm yapılarak hesaplanan ve gözlenen sismogramların karşılaştırılması birkaç yinelemede yapılarak ana şok için Şekil 7' de verilen odak mekanizması çözümü elde edilmiştir. Ters çözüm sonucu elde edilen kaynak parametreleri ve elde edilen sonuçların BÜ KRDAE, AFAD, USGS ve GCMT tarafından bulunan sonuçlarla karşılaştırılması Çizelge-3'de verilmiştir.



Şekil 7. 19 Mayıs 2011 Kütahya-Simav depreminin kaynak-zaman fonksiyonu, kaynak mekanizması çözümü ve P dalga şekilleri karşılaştırması (üstte: gözlemsel, altta: hesaplanan).

Figure 7. The source-time function and source mechanism solution of the 19 May 2011 Kutahya-Simav earthquake and compression of the P waveforms (upper: observed and lower: calculated).

Çizelge 3. 2011 Kütahya-Simav depreminin farklı sismoloji merkezleri tarafından verilen ve bu çalışmada bulunan kaynak mekanizması çözümleri ile karşılaştırılması.

Table 3. Comparison of the 2011 Kutahya-Simav earthquake source mechanism solutions obtained by this study with those obtained by different seismological centres.

Kurum	Büyüklük (Mw)	CMT Derinlik (km)	M_o (Nm)	Fay Düzlemi	Doğrultu (°)	Eğim (°)	Atım (°)	Odak Küresi
B.Ü. K.R.D.A.E.	5.7	7.6	$3.8x10^{17}$	DD1	290	52	-74	
				DD2	89	41	-110	
AFAD DAD	5.8	24.5	$4.0x10^{17}$	DD1	315	56	-76	
				DD2	116	36	-105	
USGS-MT	5.8	9.1	$6.7x10^{17}$	DD1	275	37	-102	
				DD2	111	54	-80	
Harvard GCMT	5.9	12.2	$8.7x10^{17}$	DD1	98	44	-96	
				DD2	286	46	-85	
Bu Çalışma	5.8	10.0	$5.2x10^{17}$	DD1	271	51	-100	
				DD2	107	40	-78	

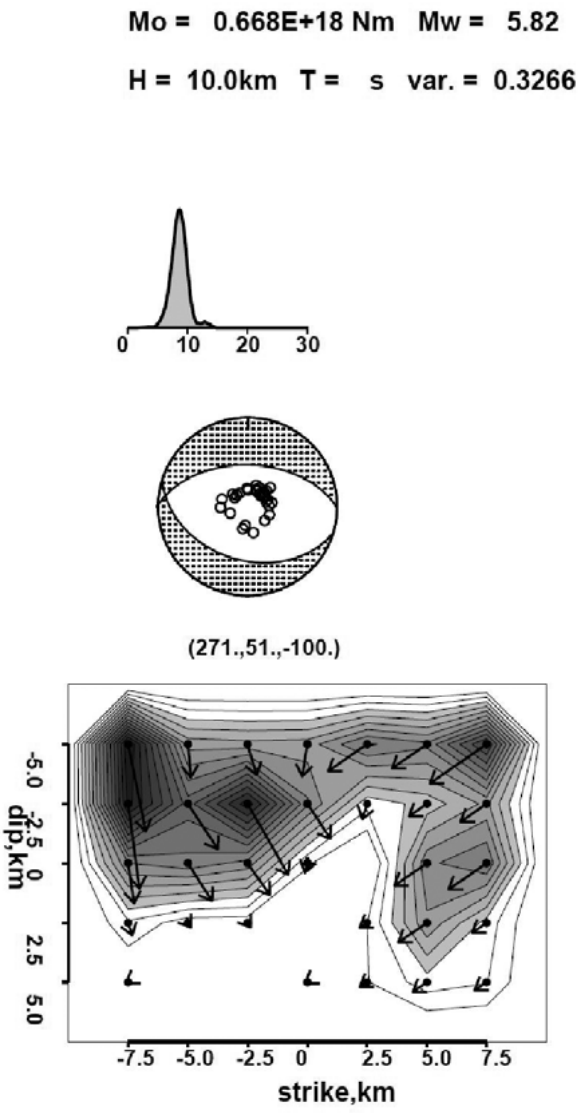
KIRILMA SÜRECİ VE SONLU FAY MODELLEMESİ

Kikuchi ve Kanamori (1991) ters çözüm algoritması ile telesismik cisim dalgalarının ters çözümü iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada depremi oluşturan şokların aynı kaynak zaman fonksiyonuna sahip olduğu varsayımıyla CMT konumları belirlenmektedir. Yani, şokların nerede, ne zaman ve ne tür bir faylanma mekanizmasıyla meydana geldiğini gösteren bir faylanma modeli oluşturulmaktadır. İkinci aşamada, bütün parametreler sabitlenerek şokların kaynak zaman fonksiyonu incelenmektedir. Burada, toplam kaynak zaman fonksiyonu birim kaynak zaman fonksiyonlarının toplamı şeklinde ifade edilerek her bir şokun kırılma süreci belirlenmektedir. Bu işlem 2011 Kütahya-Simav depremi verilerine uygulanarak kırılma sürecinin yaklaşık 3 saniye olduğu belirlenmiştir.

Nokta kaynak modellemesi ile elde edilen 2011 Kütahya-Simav depremi faylanma parametreleri (DD1: Doğrultu:271°, Eğim=51°, Kayma Açısı= -100°) sonlu fay modellemesinde giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber kabuk yapısı, derinlik ve kırılma hızı parametreleri de kullanılmaktadır. Sonlu fay modellemesi için fay düzlemi doğrultu boyunca 7 ve eğim boyunca 5 olmak üzere toplam 35 grid noktasına bölünmüştür. Burada her bir grid noktası arasındaki uzaklık 2.5 km olarak seçilmiştir. Her grid noktası küçük bir fay segmentine karşılık gelmektedir. Telesismik cisim dalgalarına ters çözüm tekniğini uygulayarak her bir grid noktasında açığa çıkan sismik moment belirlenmektedir. Grid noktalarında faylanma mekanizmasının doğrultusu ve eğimi sabitlenerek kayma açısının ±45 derece salınım yapmasına izin verilerek fay düzlemi boyunca meydana gelebilecek faylanma değişimleri incelenmektedir. Bu şekilde, her bir grid noktasında sismik moment ve kayma açısı belirlenmektedir. Bu işlem sonucunda toplam sismik moment $6.68x10^{17}$ olarak hesaplanmıştır.

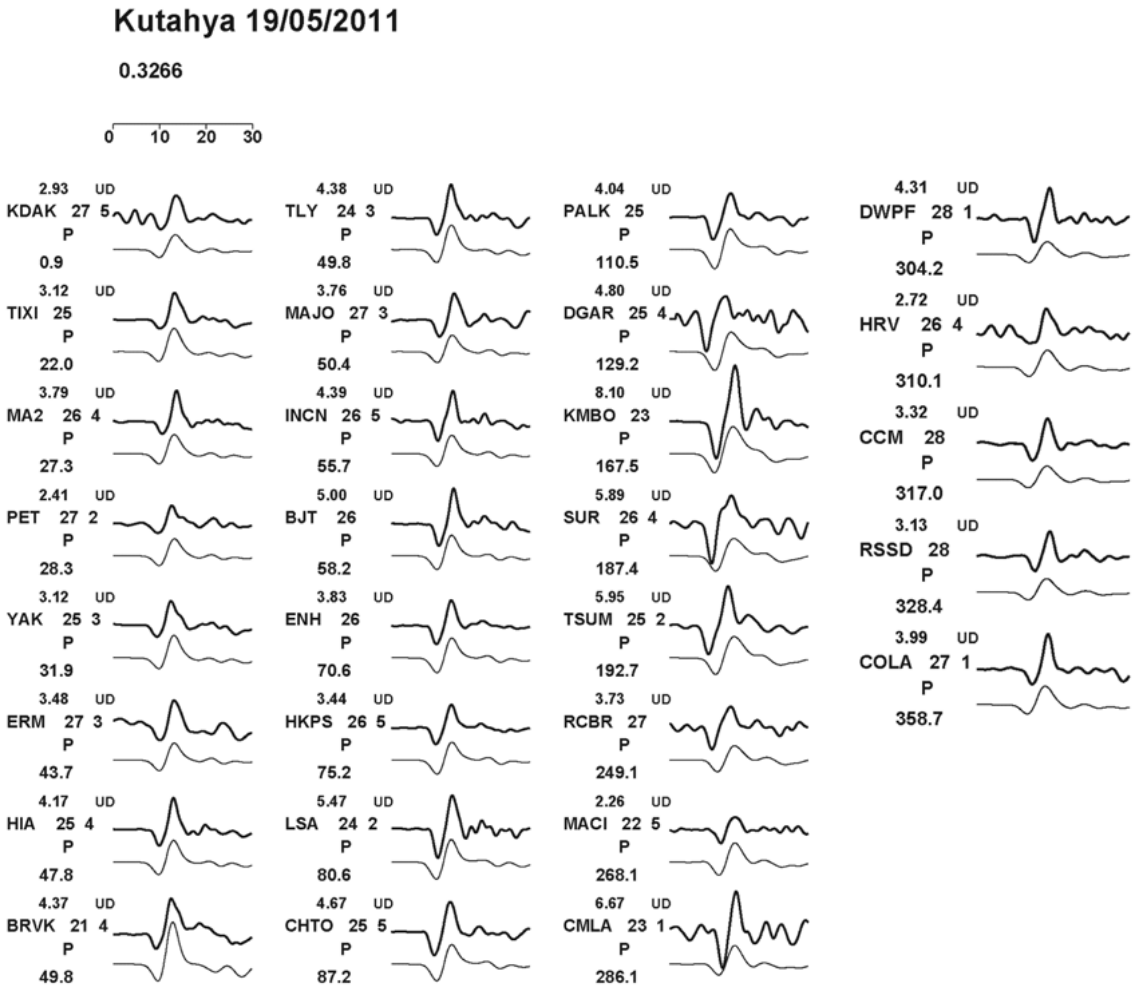
Makaslama modulu m=3.0x10^{10} MPa kabul edilerek grid noktalarındaki atım miktarı kolayca hesaplanarak sonuçta fay düzlemindeki grid noktalarında meydana gelen yer değiştirme miktarları bulunmuş olur (Şekil-8).

Şekil 8'de 2011 Kütahya-Simav depreminin telesismik cisim dalgaları kullanılarak elde edilen sonlu fay modeli gösterilmektedir. Burada, (0,0) noktası depremin meydana geldiği 10 km derinlikteki odak noktasına karşılık gelmektedir. Şeklin sol tarafı Batı, sağ tarafı ise Doğu'ya karşılık gelmektedir. Fay düzlemi üzerinde referans noktasının doğrultu boyunca doğu ve batıya 7.5 km, eğim boyunca ise 5 km yüzeye ve derinliğe doğru yer alması uygun bulunmuştur. Ters çözüm sonuçlarına göre, yaklaşık 15 grid noktasında hemen hemen sıfır veya çok küçük sismik moment değerleri elde edilmiştir. Elde edilen gözlemsel ve yapay dalga şekilleri Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. Sonlu fay modellemesi ile 2011 Kütahya-Simav depremi için elde edilen kaynak-zaman fonksiyonu ve yer değiştirme dağılımı. Yer değiştirme 2 cm kontur aralıklarıyla gösterilmiştir. Maksimum atım yaklaşık 40 cm'dir.

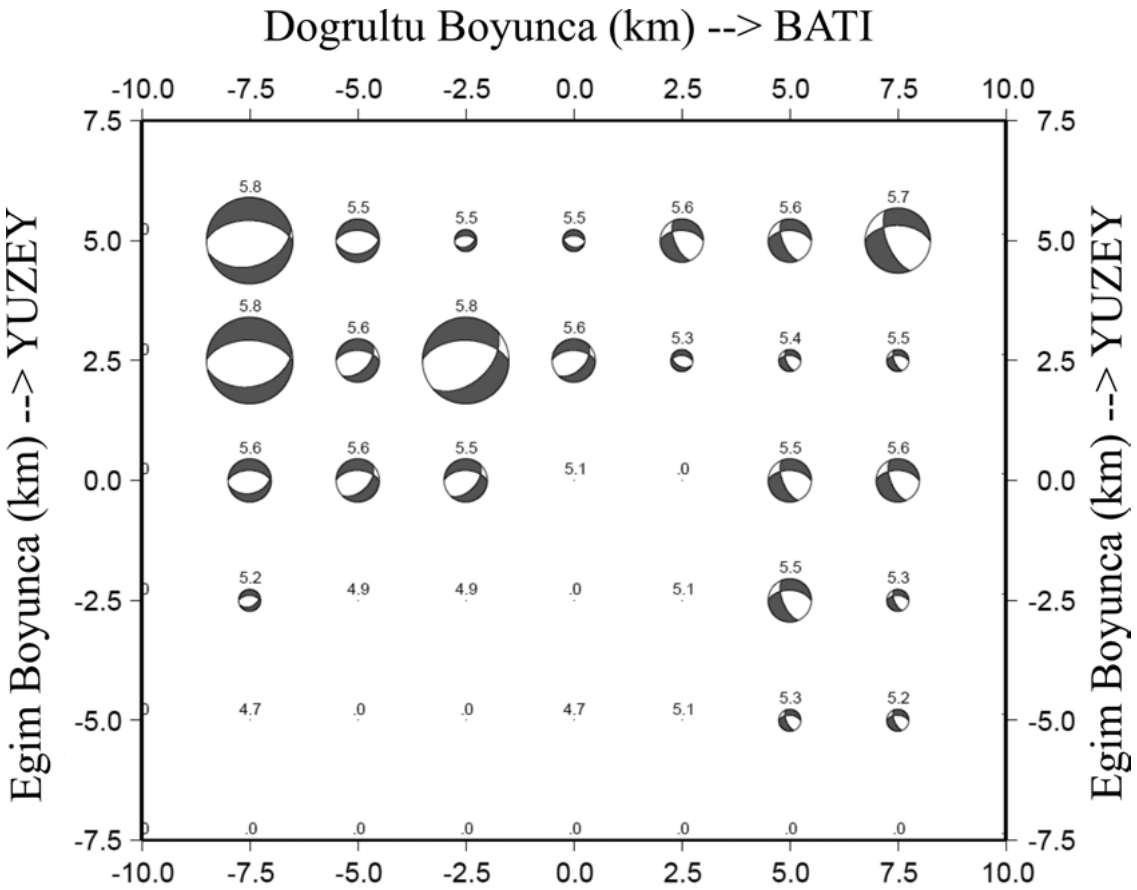
Figure 8. The source time function and slip distribution of the 2011 Kütahya-Simav earthquake obtained by finite fault modelling. Slip distribution counter intervals are shown by 2 cm and maximum displacement is about 40 cm.



Şekil 9. 2011 Kütahya-Simav depreminin sonlu fay modellemesi sonucunda elde edilen gözlemsel (üstte) ve hesaplanan (altta) P dalga şekilleri karşılaştırması.

Figure 9. Comparison of the observed (top) and calculated (bottom) P waveforms obtained as a result of the finite fault modelling of 2011 Kutahya-Simav earthquake.

Nokta kaynak modellemesinden elde edilen ve en düşük hatalı sonucu veren, doğrultusu 271°, eğimi 51° ve kayma açısı -100° belirlenen kuzeye eğimli düğüm düzlemi fay düzlemi olarak kabul edilmiş ve sonlu fay modellemesi ters çözümünde kullanılmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi sonlu fay modellemesinde kayma açısının serbest bırakılması her bir grid noktasında farklı mekanizma çözümlerinin belirlenmesine neden olmaktadır. Şekil 10'da ters çözüm sonrası fay düzlemi üzerindeki her bir grid noktasında belirlenen faylanma mekanizmaları gösterilmektedir. Buna göre faylanmanın doğu kısımlarında ideal bir normal faylanma hareketi gözlenirken, batıda sağ yanal bileşenin varlığı gözlenmektedir. Buradan deprem esnasında faylanmanın kırılma süresi içinde normal faylanmadan oblik faylanmaya geçtiği sonucuna ulaşılabilir. Tüm fay düzlemi üzerinde benzer davranış görülmektedir.



Şekil 10. Sonlu fay modellemesinde grid noktaları için elde edilen CMT çözümleri.
Figure 10. CMT solution retrieved for the grid points in the finite source modelling.

TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada Kütahya-Simav depreminin telesismik P dalga şekilleri kullanılarak depremin kaynak süreci araştırılmıştır. Gerek nokta-kaynak gerekse sonlu fay dalga şekli ters çözüm yöntemi kullanılarak nokta kaynak, kaynak parametreleri ve sonlu fay kırılma işlemi ile depremin odak mekanizması çözümleri elde edilmiş ve doğrultu, eğim, atım ve sismik moment (M_o) kaynak parametreleri hesaplanmıştır.

Farklı odak derinlikleri, kaynak-zaman fonksiyonları ve kabuk hız modelleri denenerek karesel hata miktarının en az olduğu MT (Moment Tensor) derinliği 6.8 km olarak bulunmuştur. Elde edilen MT sonuçları KB-GD doğrultulu sağ yanal normal bir faylanma özelliği göstermektedir. Bu çalışmada bulunan kaynak mekanizması çözümünün bölgede daha önce olan depremlerin kaynak mekanizması çözümleri Eyidoğan ve Jackson (1985); Pınar (1995) (Şekil 4) ve farklı sismoloji merkezleri tarafından verilen çözümlerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ana şokun kırılma süresi t_p =3 sn ve kırılma hızı 2.5 km/sn olarak belirlenmiştir. Depremin yırtılma hareketi iki yönlü olarak düşünülecek olursa toplam kırılma boyunun yaklaşık 15 km olduğu tahmin edilebilir. Telesismik cisim dalgalarının sonlu fay modellemesi sonucunda ana şokun fay düzlemi boyutlarının 15x10 km olduğu tespit edilmiştir. Kütahya-Simav depremi tek şokla yeterince modellenebilmiştir (Çizelge 4). SFZ' da biriken gerilme enerjisi, nokta kaynak modellemesi kullanılarak elde edilen ana şok kırılma sürecinde ve sonrasındaki artçı depremlerle boşalmaktadır.

Çizelge 4. Kütahya(Simav) ana şokunun kaynak parametreleri, t_p kırılma zamanı, [(a)] referans noktasından uzaklık (39.15 K, 29.10 D).

Table 4. Source parameters of the Kutahya (Simav) main-shock earthquake, t_p rupture process time, [(a)] relative distance to the reference point (39.15 N, 29.10 E).

Kırılma zamanı-t_p (sn)	[(a)] Referans uzaklığı (km)	Derinlik (km)	$M_o x10^{17}$(Nm)	Doğrultu(°)	Eğim (°)	Atım (°)
3	10	10	5.2	271	51	-100

Yaptığımız bu çalışmada Kütahya-Simav depremi tek şok ile modellenmiş ve beklenen hata sınırları içerisinde yapay ve gözlemsel sismogramlar arasındaki uyumun iyi olduğu gözlenmiştir. En iyi sonucu veren kabuk-hız yapısı deneme yanılma ile bulunmuştur. Bu sonuç Batı Anadolu bölgesi için Akyol vd. (2006) tarafından önerilen kabuk-hız yapısı ile uyumludur. Elde edilen kaynak mekanizması çözümü farklı sismoloji merkezleri çözümleri ile karşılaştırıldığında (Çizelge 3) deprem faylanma özelliklerinin benzer olduğu fakat büyüklük ve derinlik hesaplamalarında farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu farklılığın kullanılan istasyon ağı, kabuk modeli, kaynak-zaman fonksiyonu ve kabuk-hız modeli seçimlerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

Depremin sonlu fay modellemesinde kullanılan referans noktasının doğusunda ve batısında yer alan grid noktaları için elde edilen kayma açıları sistematik değişimler göstermektedir (Şekil 8). Bu değişimler, referans noktasının doğusunda ve batısında yer alan farklı faylanma mekanizmasına sahip iki fay segmentinin varlığına işaret etmektedir. Bu değişimleri daha iyi gözlemlemek ve daha iyi takip edebilmek için her bir grid noktası için elde edilen kayma açıları kullanılarak bunlara karşılık gelen faylanma mekanizmaları Şekil 10'da verilmiştir.

Sonuç olarak, her ne kadar nokta kaynak modellemesi 2011 Kütahya-Simav depreminin tek bir şokla meydana geldiğini gösterse de sonlu fay modellemesine göre deprem biri normal biri oblik (sağ yönlü doğrultu atımlı bileşeni içeren normal) iki farklı fay segmenti üzerinde meydana geldiği söylenebilir. Ana şokla birlikte fay düzlemi üzerinde yer değiştirmenin homojen olmadığı, bazı bölgelerde atımın çok büyük bazı bölgelerde ise çok küçük olduğu görülmektedir. Depremden sonra oluşan anormal derecedeki yüksek artçı deprem etkinliğinin muhtemelen heterojen atımın yarattığı gerilme değişimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

SUMMARY

We have investigated the source rupture process of a shallow earthquake in an extensional region. The May 2011 Kutahya-Simav main shock earthquake (Mw=5.8) was inverted to its source in order to obtain a rupture process. We used teleseismic P waveform data from IRIS at 29 stations and the waveform inversion method developed by Kikutchi&Kanamori (1991) was used. The strike, dip and rake of the faulting were found as 271°, 51°, -100°, respectively.

We also applied the second step of the waveform inversion finite- fault modelling method to investigate source-time function and rupture process. We used a single source time function. The total source time function is expressed as the sum of the unit source time functions can be determined for each of the shock rupture process. 2011 Kutahya-Simav main shock rupture process time is found as 3s. The total seismic moment of the earthquake is M_o= $5.2x10^{17}$ Nm. The amount of slip easily calculated for each grid point by assuming the shear module m=$3.0x10^{10}$ MPa. The maximum displacement on the fault plane was observed to be 40 cm.

The result of the inversion yields a good match between synthetic and observed seismograms. The crustal velocity model that gives the best result was found by trial and error manner. The finite source modelling of the waveforms suggests normal and

oblique faulting on two fault segments. The normal faulting was observed in eastern part, and normal faulting with right-lateral component was observed in the western segment.

TEŞEKKÜR

Bu makalenin ilk halinin düzeltilmesinde önemli katkıları geçen hakemlere teşekkür ederiz

DEĞİNİLEN BELGELER

AFAD, 2011, Türkiye Cumhuriyeti Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi Başkanlığı, Basın ve kamuoyu bilgilendirme raporu, Mayıs 2011.

Arpat, E. & Bingol, E., 1969, The rift system of western Turkey: thoughts on its development, Bull. Turkey Mineral Explor. Inst., 18, 33-39.

Akdeniz, N. ve Konak, N., 1979a, Menderes Masifi'nin Simav dolayındaki kaya birimleri ve metabazik, metaultrabazik kayaların konumu, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, v. 22, s. 175-184.

Akyol, N. & Karagoz, Ö., 2009, Empirical Attenuation Relationships for Western Anatolia, Turkey, Turkish Journal of Earth Sciences [Turkish J. Earth Sci.], 18, (3),351-382, doi:10.3906/yer-0705-2.

Akyol, N., Zhu, L., Mitchell, B.J., Sözbilir, H. & Kekovalık, 2006, Crustal structure and local seismicity in Western Anatolia, Geophysical Journal International 166, 1259−1269, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03053.x.

Bekler, T., Demirci, A., Özden, S., ve Kalafat, D., 2011, Simav ve Emet Fay Zonlarındaki Depremlerin Optimum Kaynak Parametrelerinin Analizi, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı Bildiri Özetleri Cdsi Fuat Şaroğlu Oturumu: Deprem Kaynak Modelleri,11-14 Ekim 2011, ODTÜ - ANKARA.

BÜ KRDAE, 2011, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü, May 19, 2011 Simav Earthquake Preliminary Report, Mayıs 2011.

Bozkurt, E., 2001, Neotectonics of Turkey–a synthesis, Geodinamica Acta 14, 3−30.

Demirci, A., Bekler, T., ve Özden, S., 2011, Simav Depremlerinin (Mayıs 2011) Kaynak Parametreleri, ATAG 15 Bildiri Özetleri Kitabı, S. 56, 19-22 Ekim 2011, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Dewey, J. F. and Şengör. A.M.C., 1979., Aegean and surrounding regions: complex multi-plate and continuum tectonics in a convergent zone, Geol. Soc. America Bull., Part 1. 90., 84-92 p.

Ekincioğlu, E. E., 2011, Kütahya Simav'da Deprem, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Jeofizik Bülteni, Sayı: 67, Ağustos 2011.

Eyidoğan, H., and Jackson, J., 1985, A seismological study of normal faulting in the Demirci,Alaqehir and Gediz earthquakes of 1969-70 in westernTurkey: implications for the nature and geometry of deformation in the continental crust, Geophys. J. R. astr. SOC. (1985) 81, 569-607.

Jackson, J.A., Mckenzie, D. (1984), Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistani, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 77, 185-264.

Jeffreys, H., Bullen, K.E., 1958, Seismological Tables,Office of the British Association, Burlington House, London.

JMO, 2011, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 19 Mayıs 2011 Simav(Kütahya) ön değerlendirme raporu, Mayıs 2011.

Karagöz, Ö., 2007, Modelling of the attenuation relationships from western Anatolia strong ground motion data, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, 2007, İzmir.

İMO, 2011, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Afet Müdahale Hazırlık Kurulu 19 Mayıs 2011 Simav depremi ve yapı hasarı raporu, Mayıs

2011.

İMO, 2011, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Denizli Şubesi, 19 Mayıs 2011 Kütahya Simav depremi ve artçı sarsıntıları inceleme raporu, Mayıs 2011.

Kikuchi, M., and Kanamori, 1982, Inversion of complex body waves, Bull. Seis. Soc. Am., 72, 491-506.

Kikuchi, M., and Kanamori, 1991, Inversion of complex body waves – III, Bull. Seis. Soc. Am., 81, 2335-2350.

Kikuchi, M., H. Kanamori and K. Satake, 1993, Source Complexity Of The 1988 Armenian Earthquake: Evidence For A Slow After-Slip Event, J. Geophys. Res., Vol. 98, Pp. 15,797 - 15,808.

McKenzie, D. P., 1978, Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions, Geophys. J. R. astr. Soc., 55**,** 217-254.

Özçelik, S., Pınar, A., 2005, Derin ve büyük depremlerin kaynak mekanizmalarının incelenmesi, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, C.18, S.1, SS. 53-62.

Özçelik, S., Alp, H., Pınar, A., 2006, Dalga şekli ters çözümünden 3 Kasım 2002 Denali depreminin kaynak mekanizması özelliklerinin belirlenmesi ve depreme ilişkin coulomb gerilme değişiminin incelenmesi, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, C.19, S.1, SS. 113-120.

Pınar, A., and Honkura, Y., 1994, Rupture process of the 1992 Erzincan earthquake and its implication for seismotectonics in eastern Turkey, Geophysical Research Letters, Vol. 21, No. 18, Pages 1971-1974.

Pınar, A., 1995, Rupture Process and Spectra of Some Major Turkish Earthquakes and Their Seismotectonic Implications, Bogazici University, Istanbul.

Pınar, A., and Honkura, Y., 1996, A rupture model for the 1967 Mudurnu Valley, Turkey earthquake and its implication for seismotectonics in the western part of the North Anatolian Fault Zone, Geophysical Research Letters, Vol. 23, No. 1, Pages 29-32.

Pınar, A., 1998, Source inversion of October 1, 1995, Dinar earthquake (M_s=6.1) : a rupture model with implications for seismotectonics in SW Turkey, Tectonophysics, 292, 255-266.

Pınar, A., Kalafat, D.,1999, Source process and seismotectonics implications of the 1995 and 1996 Cyprus, Eastern Mediterranean region, Tectonophysics, 301, 217-230.

Pınar, A., Honkura, Y., Kuge, K., Matsushima, M., Sezgin, N., Yılmazer, M., and Öğütçü, Z., 2007, Source mechanism of the 2000 November 15 Lake Van earthquake (Mw = 5.6) in eastern Turkey and its seismotectonic implications, Geophys. J. Int. (2007) 170, 749–763.

Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A. (1992), 1: 1 000000 Türkiye diri fay haritası. MTA, Ankara. Şengör, A.M.C., Satır, M.ğ Akkök, R. (1984), Timing of tectonic events in the Menderes massif, Western Turkey: Implications for tectonic evolution and evidencefor Pan-African basement in Turkey. Tectonics, 3, 693-707.

Şengör, A.M.C., 1987, Cross faults and differential stretching of hanging walls in regions of low-angle normal faulting: examples form western Turkey, in: Coward M.P., Dewey J.F. and Hancock P.L. eds. Continental extentional tectonics, Geological Society Special Publication, 28, 575-589 p.

Taymaz, T., Jackson, J., & McKenzie, D. (1991), Active tectonics of the North and central Aegean sea. Geophys. J. Int., 106, 433–490.

Zeschke, G., 1954, Der Simav-Graben und seine Gesteine: Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, v. 5. s. 179-189.