

23 Ekim 2011 Van (Doğu Anadolu) Depremi'nin (Mw=7.1) Sismotektonik Özellikleri

Seismotectonic Characteristics of the 23 October 2011 Van (Eastern Anatolia) Earthquake (Mw=7.1)

**MURAT UTKUCU¹, EMRAH BUDAKOĞLU¹, HİLAL YALÇIN¹, HATİCE DURMUŞ¹,
LEVENT GÜLEN¹, ERCAN IŞIK²**

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 54187, Serdivan-
SAKARYA

¹Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 13000, Merkez-
BİTLİS

Geliş (received) : 05 Ocak (January) 2014

Kabul (accepted) : 07 Temmuz (July) 2014

ÖZ

23 Ekim 2011 Van depreminin geniş bant uzak-alan cisim dalga şekillerinin sonlu-fay modellemesi deprem kırılmasının ters faylanma olduğunu ve tek taraflı olarak GB'ya yayıldığını göstermiştir. Kırılma 5 km altında kısıtlı kalmış, yaklaşık 5.5 m en büyük kayma ile 25 x 16 km'lik bir fay alanını örtmüş ve yaklaşık 11 sn sürmüştür. Sonlu-fay modeli için hesaplanan sismik moment 4.6×10^{19} Nm (Mw=7.1) olup çoğunluğu kırılma başlangıcından sonraki 5-9 sn zaman aralığında serbestlenmiştir. Sonlu-fay analizi en büyük kayma alanı için 3 sn'lik bir yükselim zamanı önermektedir.

2011 Van depreminin 3 büyük artçı depreminin uzak-alan nokta kaynak modellemesi bu artçı depremlerin hem ters hem de doğrultu atımlı faylanma mekanizmalarına sahip olduğunu göstermiş, 9 Kasım 2011 artçı depreminin ana şoktan farklı bir fay üzerinde meydana geldiğini doğrulamıştır. 2011 Van depremi artçı depremlerini içererek ve içermeden yapılan Van Gölü bölgesindeki deprem odak mekanizmalarının gerilme tensör analizleri bölgede gerilme rejiminin doğrultu-atımlı olduğunu ve sıkışma gerilmesi ekseninin yaklaşık K-G doğrultusunda uzandığını belirtmiştir.

2011 Van depremi Doğu Anadolu'da aletsel dönemde hemen hemen tamamıyla ters faylanmalı olarak meydana gelmiş ilk büyük deprem olup bölgede yaygın olarak gözlenen doğrultu atımlı faylanmaların yanısıra ters faylanmalarında meydana gelebileceğini kanıtlamıştır.

Anahtar Kelimeler: 23 Ekim 2011 Van depremi, Doğu Anadolu, Telesismik ters çözüm, Sonlu-fay modellemesi

ABSTRACT

The finite-fault modelling of the 23 October 2011 Van earthquake using teleseismic broadband body waveforms has shown that the earthquake occurred as a result of reverse faulting and its rupture propagated unilaterally toward SW. The rupture confined to below the depth of 5 km, covering a fault area of 25 km by 16 km with a peak slip of about 5.5 m and it lasted for about 11 s. The total seismic moment calculated for the finite-fault model is 4.6×10^{19} Nm (Mw=7.1), most of which was released in between 5-9 s after the rupture initiation. The finite-fault analysis suggests a rise-time of 3 s for the largest slip area.

Teleseismic point source modelling of the three large aftershocks suggests that these aftershocks have both reverse and strike-slip source mechanisms and it also confirmed that the 9 November 2011 aftershock occurred on a different fault. Stress tensor inversion analysis using earthquake focal mechanisms in the Lake Van area with and without the 2011 Van earthquake aftershocks suggested that the stress regime in the area is mainly strike-slip with compression stress axis extending nearly in NS direction. The 2011 Van earthquake is the first large earthquake

with almost pure reverse faulting to occur in Eastern Anatolia during the instrumental period suggesting that reverse faulting can also occur along with dominantly observed strike-slip faulting in the region.

Keywords: *The 23 October 2011 Van earthquake, Eastern Anatolia, Teleseismic inversion, Finite-fault modelling*

GİRİŞ

23 Ekim 2011 Van depremi Doğu Anadolu Bloğu'nda (DAB), Van Gölü Havzası içinde meydana gelmiştir (Şekil 1 ve 2). DAB'nun ana sismotektonik özellikleri güneydeki Arap Levhasının kuzeybatı yönündeki göreceli hareketi ile Bitlis Bindirme Zonu (BBZ) boyunca Anadolu levhasına çarpması sonucu gelişmiştir (Şekil 1). Batıda, Anadolu Levhası Kuzey ve Doğu Anadolu Fay Zonları boyunca batıya hareket etmektedir. Yakın geçmişteki araştırmalar günümüzde DAB içinde esas tektonik rejimin kıtasal çarpışma kaynaklı sıkışma olduğunu ve bu deformeasyonun genel olarak doğrultu atımlı faylarla KD'da Kafkasya'ya kadar iletiildiğini göstermiştir (Sandvol vd., 2003; Şengör vd., 2003; Dhont ve Chorowicz, 2006; Djamour vd., 2011). GPS çalışmalarından elde edilen kabuksal hız alanı bu görüşü doğrulamaktadır (McClusky vd., 2000; Vernant vd., 2004; Reilinger vd., 2006; Dhont ve Chorowicz 2006). GPS çalışmaları, BBZ güneyinde Arap levhasının hız ve hareket doğrultusunun sırasıyla 18 ± 2 mm/yr ve $K24^\circ \pm 5^\circ D$ olduğunu ve bu hareketin çoğunlukla DAB'na iletiildiğini göstermektedir. Bu tektonik özellikleri deprem kaynak mekanizmaları destekler niteliktedir (Şekil 1) (Toksöz vd., 1978; Stewart ve Kanamori, 1982; Jackson ve McKenzie 1984; Pınar 1995; Eyidoğan vd., 1991).

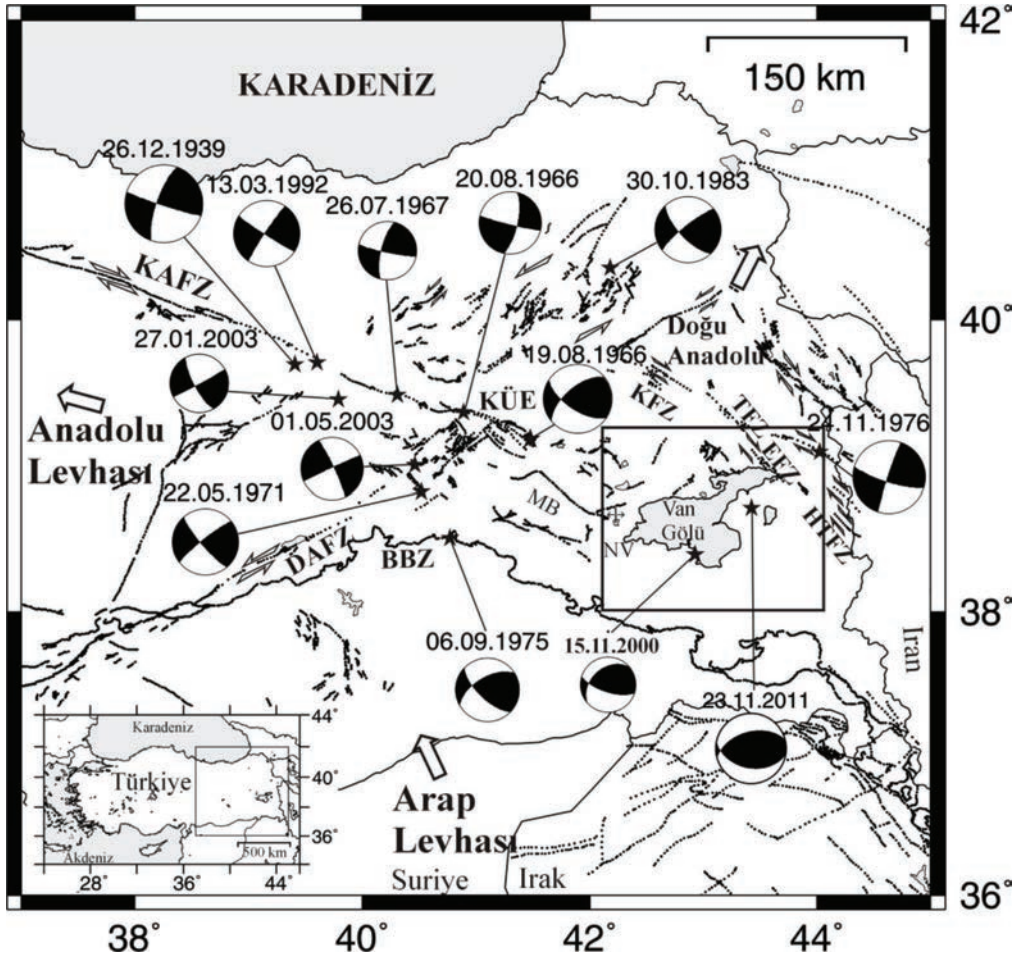
DAB içinde uzanan bir çok KB-GD doğrultulu sağ yanal ve KD-GB doğrultulu sol yanal doğrultu atımlı faylar Kafkasya bindirmelerine deformeasyon iletimini sağlamaktadırlar (Barka ve Kadinsky-Cade 1988; Jackson 1992; McClusky vd., 2000; Koçyiğit vd., 2001). Bu faylardan bir kaç BBZ'nin hemen kuzeyinde yer alan Van Gölü havzası içinde uzanmaktadır (Şekil 2). Bunlar, sağ yanal Tutak, Çaldıran, Erciş, Karayazı, Hasan Timur, Bitlis, Bahçesaray fay zonları ve sol-yanal Malazgirt, Ahlat ve Süphan fay zonlarıdır. Bu faylara ilave olarak Van Gölü'nün

doğusunda ikincil önemde doğrultu atımlı faylar da yer almaktadır (Şekil 2) (Lahn 1946; Taşman 1946; Özkaymak 2003; Koçyiğit vd., 2011). Bunlar sağ yanal Edremit, Kalecik ve Alabayır fayları ile sol yanal Çakırbey fayı şeklinde sıralanabilir. Bunların yanı sıra 2011 Van depremi ile dirilikleri ve büyük deprem üretme potansiyelleri kanıtlanan ters faylar Van Gölü havzası içinde uzanmaktadır. Bunlar Muş bindirmesi, Van fayı, Gürpınar fayı, ve Van Gölü havzasını sınırlayan Kuzey (KSF) ve Güney (GSF) Sınır faylarıdır (Şengör vd., 1985; Wong ve Degens, 1978; Degens vd., 1978; Litt vd., 2009; Akyüz vd., 2011; JMO. 2011; Emre vd., 2011; Koçyiğit vd., 2011).

Bu çalışmada 2011 Van depreminin sismotektonik özellikleri irdelenecektir. Bölgenin depremselliğinden kısaca bahsedildikten ve 2011 Van depremi tanıtıldıktan sonra öncelikle 2011 Van depremi için daha önceki bir çalışmada verilen sonlu-fay telesismik (uzak-alan) kırılma modeli, kırılmanın uzay-zaman evrimi bağlamında analiz edilecek ve $M_w \geq 5.6$ olan 3 artçı depremin uzak-alan nokta kaynak modellemesi yapılacaktır. Daha sonra Van Gölü havzası içindeki bölgesel gerilme rejimi mevcut deprem odak mekanizmalarından belirlenmeye çalışılarak elde edilen tüm sonuçlar sismotektonik açıdan irdelenecektir.

VAN GÖLÜ HAVZASININ DEPREMSELLİĞİ

Türkiye'nin ana tektonik unsurlarını belirleyen ilk çalışmalarda bile Van Gölü Havzası birinci derece deprem bölgesi olarak sınıflandırılmıştır (Lahn, 1949). Aletsel dönemde (1900 sonrası), 2011 Van depremi dışında bölgeyi önemli ölçüde etkileyen büyüklüğü $M_s \geq 7.0$ olan iki depremin (1903 Malazgirt ($M_s=7.0$), ve 1976 Çaldıran ($M_s=7.3$) depremleri) meydana gelmesi ve 1900 öncesi meydana gelen ve büyüklüğü $M_s \approx 7.0$ olan beş depremin (1646 ve 1715 Van,

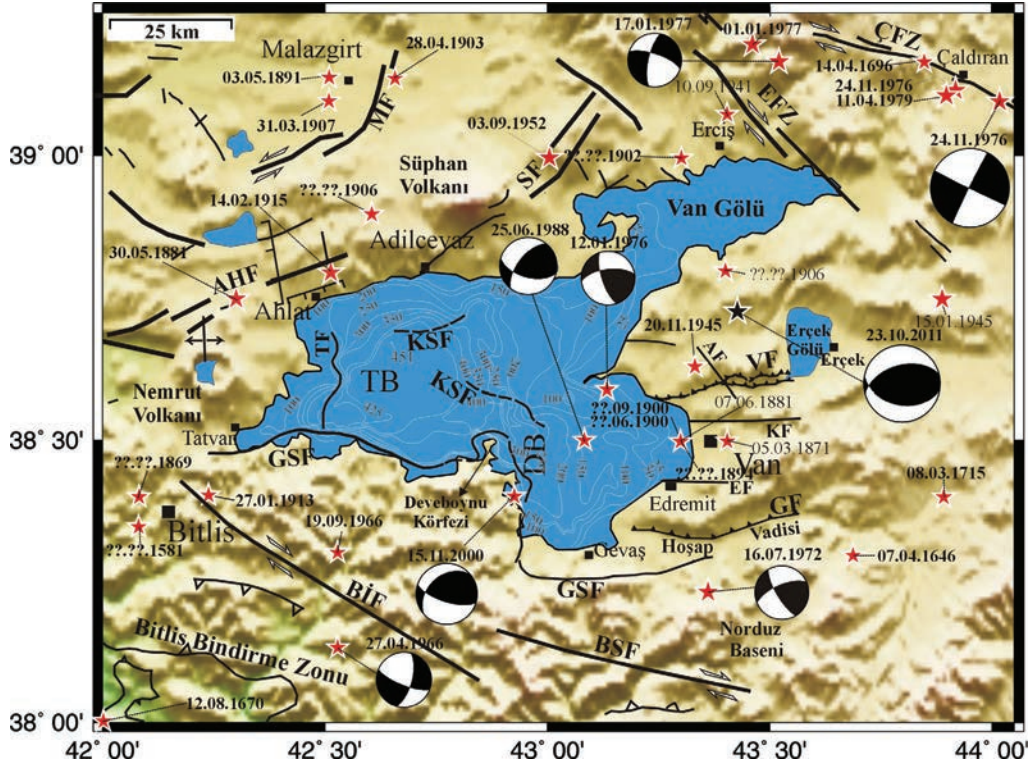


Şekil 1. Doğu Anadolu'nun belli başlı tektonik unsurları, aletsel dönemdeki odak mekanizmaları bilinen $M_S \geq 6.0$ depremler (siyah yıldızlar) (McKenzie (1972), Toksöz vd., (1978), Taymaz vd., (1991), Şaroğlu vd., (1992) ve Pınar (1995)'den derlenmiştir. KAFZ Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ Doğu Anadolu Fay Zonu, BBZ Bitlis Bindirme Zonu, MB Muş Bindirmesi, KÜE Karlıova Üçlü Eklemi, KFZ Karayazı Anadolu Fay Zonu, TFZ Tutak Anadolu Fay Zonu, EFZ Erciş Anadolu Fay Zonu, HTFZ Hasan Timur Anadolu Fay Zonu. Büyük dikdörtgen Şekil 2 ve 3'te gösterilen harita alanlarını çevrelemektedir.

Fig. 1. Major tectonic elements of Eastern Anatolia along with the instrumental period $M_S \geq 6.0$ earthquakes (black stars) and known focal mechanisms (compiled from McKenzie (1972), Toksöz vd., (1978), Taymaz vd., (1991), Şaroğlu vd., (1992) and Pınar (1995)). KAFZ North Anatolian Fault Zone, DAFZ East Anatolian Fault Zone, BBZ Bitlis Thrust Zone, MB Muş Thrust, KÜE Karlıova Triple Junction, KFZ Karayazı Fault Zone, TFZ Tutak Fault Zone, EFZ Erciş Fault Zone, HTFZ Hasan Timur Fault Zone. Large rectangle encloses the map areas shown in Figs. 2 and 3.

1670 ve 1705 Bitlis ve 1696 Çaldıran depremleri), tarihsel dönem deprem kayıtlarında yer alması bölge içindeki deprem tehlikesinin en önemli kanıtlardır (Tablo 1; Şekil 2) (Ambraseys 1988, 1989, 2011; Ambraseys ve Finkel 1995; Sinclair 1999; Kalafat vd., 2007; Albini vd., 2012). Van Gölü havzasında 1500 ile 1860 yılları arasında sadece zarar verici depremlerin, 1860 yılı sonrasında da büyüklüğü $M \geq 5.0$ olan bilinen tüm depremler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'den görüleceği üzere Van Gölü ve yakın civarında aletsel dönemde büyüklükleri $5.0 \leq M \leq 6.0$ olan çok sayıda, can ve mal kaybına neden olan deprem meydana gelmiştir. Bunlar arasında en kayda değerleri 1900 ($M \approx 5.0$) ve 1945 ($M = 5.8$) Van depremleri ile 1941 ($M_S = 6.0$) Erciş depremleridir (Şekil 1 ve 2) (Lahn, 1946; Taşman 1946; Ambraseys 1988). Bunlara yakın geçmişte meydana gelen 1988 ($m_b = 5.3$) ve 2000 ($M_W = 5.7$) Van depremleri eklenebilir



Şekil 2. Van Gölü bölgesinde yerel tektonik unsurlar (Koçyiğit, 2002; MTA, 2012) büyük depremlerin dış merkez dağılımları, Van Gölü batimetrisi ve mevcut odak mekanizmaları. Depremlerin odak ve kaynak parametreleri için sırasıyla Tablo 1 ve 2'ye bakınız. KSF Northern Boundary Fault, GSF Southern Boundary fault, EFZ Erciş Fault Zone, ÇFZ Çaldıran Fault Zone, MT Muş Thrust, MF Malazgirt Fault, EF Edremit Fault, KF Kalecik Fault AF Alabayır Fault, DB Deveboynu Basin, TB Tatvan Basin, VF Van Fault, GF Gürpınar Fault.

Fig. 2. Local tectonic features (Koçyiğit, 2002; MTA, 2012), epicentral distribution of the large earthquakes (red and green stars), the bathymetry of Lake Van (Wong and Degens 1978) and available focal mechanisms for Lake Van area. See Table 1 and 2 for the hypocentral and the source parameters of the earthquakes, respectively. KSF Northern Boundary Fault, GSF Southern Boundary fault, EFZ Erciş Fault Zone, ÇFZ Çaldıran Fault Zone, MT Muş Thrust, MF Malazgirt Fault, EF Edremit Fault, KF Kalecik Fault AF Alabayır Fault, DB Deveboynu Basin, TB Tatvan Basin, VF Van Fault, GF Gürpınar Fault.

(Kalafat 1995; Pınar vd., 2007). 1988 ve 2000 Van depremleri göl havzasını sınırlayan sırasıyla KSF ve GSF üzerinde oluşmuştur (Şekil 2). Bu depremler göl havzası içinde deprem etkinliğinin devam ettiğinin de önemli göstergeleridir.

23 EKİM 2011 VAN DEPREMİ (M_w 7.1)

Bu deprem, 23 Ekim 2011 tarihinde Van Fayı üzerinde uluslararası zamana göre 10:41:21'de (yerel zamanla 13:41:21'de) ve 38:73°K-43:43°D dış merkezli olarak meydana gelmiştir (AFAD 2011; KRDAE 2011; USGS-NEIC; Erdik vd., 2011) (Tablo 2; Şekil 1 ve 2). Dış merkez Van şehir merkezinin yaklaşık 25 km KD'suna

düşmektedir. Can kayıpları ve yıkım Van şehir merkezi ile Erciş ilçe merkezleri ile bu merkezler arasındaki kırsal yerleşimlerde meydana gelmiş olup en büyük can kaybı ve yıkım Erciş ilçe merkezinde gerçekleşmiştir (AFAD 2011; Çelebi vd., 2011; CEDIM 2011; METU\EERC, 2011; Erdik vd., 2012). Deprem, 604 kişinin ölümüne, 2608 kişinin yaralanmasına ve binlerce kişinin de evsiz kalmasına neden olmuştur. Bu kayıplar, 9 Kasım 2011 tarihinde meydana gelen M_w 5.7 büyüklüğündeki bir artçı depremle daha da artmıştır. Edremit ilçe merkezi yakınında bir dış merkeze sahip olan bu artçı 40 ölüme daha yol açmıştır. Toplamda, 2011 Van depremi ve büyük arçları 17000 civarında binanın ya

Tablo 1. Van Gölü havzasında 1500 yılı sonrasında meydana gelen depremler. 1860 yılı öncesinde sadece zarar verici depremler dikkate alınırken 1860 yılı sonrasında büyüklüğü $M \geq 5.0$ olan tüm depremler dikkate alınmıştır. Episantral dağılım için Şekil 2'ye bakınız (Ambraseys, 1988, 1989, 2009), Ambraseys ve Finkel (1995), Kalafat vd., (2007) ve Albini vd., (2012)'den derlenmiştir).

Table 1. The earthquakes of the Lake Van area after 1500 AD. Only damaging earthquakes are listed till 1860 and all earthquakes with $M \geq 5.0$ are listed after that date. See Fig. 2 for the epicentral distribution. (compiled from Ambraseys (1988, 1989a, 1989b, 2009), Ambraseys and Finkel (1995), Kalafat vd., (2007) and Albini vd., (2012)).

No.	Tarih	Makrosismik En.-Boy. (°)	Aletsel En.-Boy. (°)	Der. (km)	Şiddet	M_s	M_w	m_b	Açıklama
1	1581	38.35-42.10			VIII				Van-Bitlis
2	1626								Hizan
3	07.04.1646	38.30-43.70			X	6.7			Van
4	1669								Van
5	12.08.1670	38.00-42.00				6.7			Muş Bitlis
6	13.04.1692								Adilcevaz
7	27.10.1692								Van
8	14.04.1696					6.8			Çaldıran
9	10.06.1696								Bitlis
10	26.03.1701				VII				Van-Pertek
11	27.01.1705	38.70-41.70			IX	6.7			Bitlis
12	08.03.1715	38.40-43.90			IX	6.6			Van
13*	???.?.1869	38.40-42.10			VI	≈ 5.0			Bitlis
14*	05.03.1871	38.50-43.40				5.5			
	30.05.1881	38.75-42.30				6.3			Ahlat area
15*	07.06.1881	38.50-43.30				≈ 5.0			
16	10.02.1884	38.40-42.10				6.1			
17	03.05.1891	39.15-42.50				6.0			
18*	???.?.1894	38.50-43.30				≈ 5.0			
19*	???.06.1900	38.50-43.30				≈ 5.0			Van
20*	???.09.1900	38.50-43.30				≈ 5.0			Van
21	???.?.1902	39.00-43.30				≈ 5.0			Erciş
22	28.04.1903	39.14-42.65				7.0			Malazgirt
23	???.?.1906	38.90-42.60				≈ 5.0			Nemrut
24	???.?.1906	38.80-43.40				≈ 5.0			
25	31.03.1907	39.10-42.50				5.2			Malazgirt

No.	Tarih	Makrosismik En.-Boy. (°)	Aletsel En.-Boy. (°)	Der. (km)	Şiddet	M _s	M _w	m _b	Açıklama
26*	27.01.1913		38.38-42.23	10		5.4			
27*	14.02.1915		38.80-42.50	?		5.6			
28*	15.01.1945	38.47-43.30	38.75-43.89	10		4.9-5.0			Van
29*	20.11.1945	38.44-43.49	38.63-43.33	10		5.5-5.8			Van
30	03.09.1952		39.00-43.00	12		5.5			
31	27.04.1966		38.13-42.52	40		5.6		5.1	
32	19.09.1966	39.16-41.53	38.30-42.52	35				5.2	
33*	16.07.1972		38.23-43.36	46				5.0	Van
34*	12.01.1976		38.59-43.13	36				5.0	Van
35	24.11.1976		39.10-44.02	10		7.3			Çaldıran
36	24.11.1976		39.12-43.92	33				5.0	
37	24.11.1976		39.02-44.18	40				5.0	Muradiye
38	01.01.1977		39.20-43.46	24				5.0	
39	17.01.1977		39.17-43.52	33				5.0	Çaldıran
40	11.04.1979		39.11-43.90	34				5.0	
41*	25.06.1988		38.50-43.08	50				5.3	Van
42*	15.11.2000		38.40-42.92	23			5.7		Van
	23.10.2011		38.73-43.43	5			7.1		Van

tamamen yıkılmasına ya da tamir edilemeyecek şekilde hasar görmesine yol açmıştır.

2011 Van depremi için çeşitli sismoloji enstitü ve kuruluşlarınca bulunan odak ve kaynak parametreleri Tablo 2'de verilmiş olup yapılan kaynak mekanizma çözümleri deprem için ters faylanma mekanizması önermektedir. Kaynak mekanizma çözümleri Van depreminin meydana geldiği Van fayının arazide gözlenen karakteri ile tam bir uyum sergilemektedir (Emre vd., 2011; Akyüz vd., 2011; AFAD, 2011; JMO, 2011) (Şekil 2). Erçek ve Van gölleri arasında yaklaşık 22 km bir uzaklık boyunca kabaca doğu-batı doğrultusunda uzanan Van Fayı doğuda kalan 12 km'lik bölümünde bir birinden birkaç km uzaklıkla ayrılan iki iz halinde haritalanmıştır.

Deprem Van Fayının doğudaki yarısı boyunca devamsız gözlenen ve yüzey kırığı olarak nitelendirilebilecek belirgin olmayan bazı yüzey deformasyonlarına neden olmuştur. Bu yüzey deformasyonları boyunca 10-30 cm arasında düşey yer değiştirmeler ölçülmüş olup bir iki noktada sol yanal yer değiştirmeler de rapor edilmiştir. (Emre vd., 2011)

Van fayı, K-KD eğimli olup kuzeydeki fay bloğu üste bindiren tavan bloğunu teşkil etmektedir. Sismolojik ve jeodezik verilerin modellenmeleri sonucu 4-7 m derinliğine kadar düşey kayma belirlenmesi ve belirgin yüzey kırıklarının gözlenmemesi faylanmanın dolayısıyla da Van Fayının kör bir fay olduğunu önermektedir (Hayes vd., 2011; Atzori vd., 2011; Utkucu 2013; Irmak

Tablo 2. Van Gölü bölgesinde kaynak parametreleri bilinen depremler. Odak parametreleri KRDAE ve USGS kataloglarından derlenmiştir.

Table 2 The earthquakes with known source parameters occurred in the Lake Van Area. Hypocentral parameters have been compiled from the KRDAE and USGS catalogues.

	Latitude (°)	Longitude (°)	Depth (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Mo ($\times 10^{16}$ Nm)	Magnitude
27.04.1966								
MK	38.20	42.50	40	112	74	-155		m_b 5.0
16.07.1972 Gevaş								
UT	38.23	43.36	46	247	66	18		m_b 5.0
12.01.1976 Van								
UT	38.59	43.13	36	262	63	21		m_b 5.0
24.11.1976 Çaldıran								
P				116	89	178	10*	M_w 7.3
17.01.1977								
KL	39.17	43.52	33	289	71	-160		m_b 5.0
25.06.1988 Van								
USGS								
GCMT	38.44	43.08	15	106	57	144		M_w 5.5
15.11.2000 Van								
P_RMT			20	102	68	120	16.2	M_w 5.4
02.12.2001								
ZUR_RMT	38.43	43.25	18	262	40	98	1.63	M_w 4.8
29.09.2004								
ZUR_RMT	38.61	43.31	15	263	49	87	0.72	M_w 4.5
05.05.2007 Ahlat								
K_RMT	38.73	42.21	16	281	70	-179	0.02	M_w 4.2
26.07.2008 Lake Van								
K_RMT	38.53	43.10	5	24	88	37	0.13	M_w 4.4
23.10.2011 Van								
KRDAE	38.73	43.43	5					M_L 6.6
USGS ¹	38.69	43.49	16	255	50	73	6.4*	M_w 7.2
USGS ²	38.69	43.49	16	241	51	58	5.6*	M_w 7.1
GCMT	38.67	43.42	12	246	38	60	6.4*	M_w 7.2

	Latitude (°)	Longitude (°)	Depth (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Mo ($\times 10^{16}$ Nm)	Magnitude
GFZ	38.72	43.55	10	268	36	85	4.7*	M_w 7.1
EMSC	38.86	43.48	10	248	53	64	6.8*	M_w 7.3

MK= McKenzie (1972); UT= Utkucu (2013); P= Pınar (1995)'in uzak-alan verilerinden toplam çözüm kaynak parametreleri; KL= Kalafat (1998); P_RMT= Pınar vd., (2007) RMT (Regional moment tensor) çözümü; K_RMT =Kılıç ve Utkucu (2012) RMT çözümü; KRDAE=Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü; ZUR_RMT=Zurich Regional Moment Tensor; GFZ= German Research Centre for Geoscience; GCMT= Global Centroid Moment Tensor Catalog; USGS1= United States Geological Survey body-wave moment tensor çözümü; USGS2= United States Geological Survey WPhase centroid moment tensor çözümü. * ($\times 10^{19}$ Nm)

vd., 2012). Deprem Van Gölü'nün Van Fayı ta-
van bloğu üzerinde kalan sahil şeridinde 10-
30 cm yükselmeye neden olmuştur (Emre vd.,
2011).

2011 Van depremi toplamda 51 $M_w \geq 4.6$ depre-
mi içeren önemli bir artçı deprem etkinliğine de
neden olmuştur. Kandilli Rasathanesi Deprem
Araştırma Enstitüsü (KRDAE) tarafından konum-
ları belirlenen ve Nisan 2012'ye kadar oluşmuş
artçı depremler Şekil 3'de gösterilmiştir. GCMT
tarafından kaynak mekanizma çözümü yapılan
16 $M_w \geq 4.6$ artçı depremin kaynak parametreleri
Tablo 3'de verilmiş olup bu kaynak mekanizma-
ları Şekil 3'de gösterilmiştir. Gerek artçı deprem
konumları gerekse kaynak mekanizma çözümleri
birçok artçı depremin anaşoku üreten Van fayı
üzerinde oluşmadığını, ana şok kırılması
yakın civarında uzanan özellikle doğrultu atımlı
faylanma mekanizmalı faylar üzerinde oluştuğunu
(off-fault aftershocks) önermektedir.

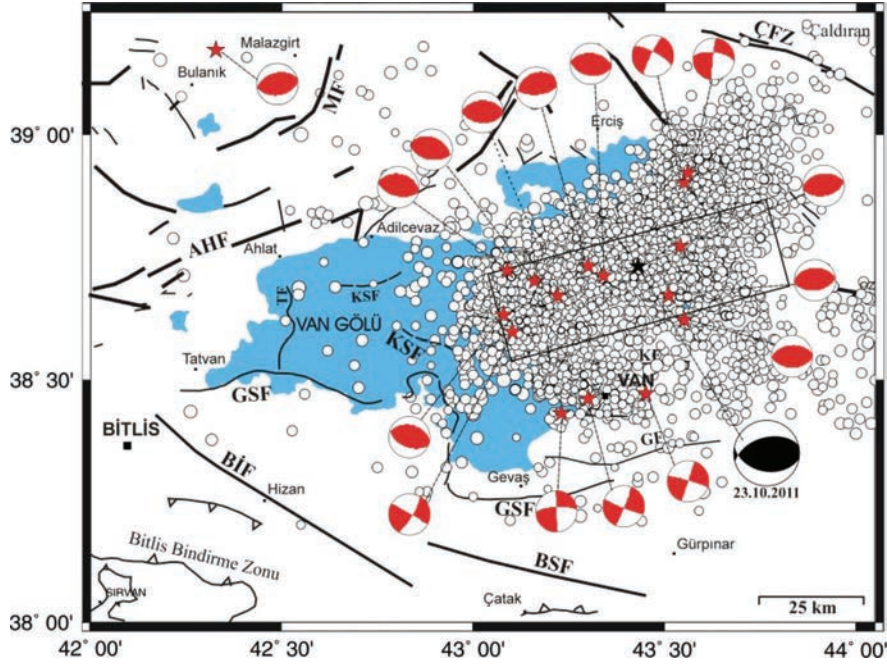
2011 VAN DEPREMİ KIRILMA EVRİMİ

Utkucu (2013), Hartzell ve Heaton (1983) tara-
findan geliştirilmiş bir sonlu-fay ters çözüm yön-
temini 2011 Van depremi uzak-alan cisim dal-
galarına uygulamış ve bu deprem için bir kayma
dağılımı elde edilmiştir. Bu çalışmada, deprem
için yapılan bu sonlu-fay analizi, zaman pence-
resi yaklaşımı (Hartzell ve Heaton 1983; Wald
ve Heaton 1994) bağlamında irdelenip daha da
ileri götürülerek kırılmanın sonlu-fay uzay-za-
man evrimi yorumlanmaya çalışılacaktır. Kulla-
nılan sonlu-fay ters çözüm analizinin ayrıntıları
Hartzell ve Heaton (1983) ve Wald ve Heaton
(1994)'de verilmiş olup burada kısaca model-

leme için kullanılan parametrizasyon hakkında
bilgi verilecektir.

Belirgin bir yüzey kırığı gözlenmediği için dep-
rem kırılma boyutları belirsiz olduğundan kırılma
düzlemini temsil için 70 km x 35 km boyutların-
da oldukça geniş bir düzlem seçilmiş ve KRDAE
dış merkezi doğrultu boyunca ortaya gelecek
şekilde kırılma düzlemi kaynak bölgesine yer-
leştirilmiştir. Depremin dış merkez izdüşümü
kırılma düzlemini 16 km derinlikte kesmektedir.
Kırılma düzlemi 98 kare şeklinde fay parçası-
na (doğrultu boyunca 14, eğim boyunca 7 fay
parçası) bölünerek kaymanın uzaysal dağılımı-
nın elde edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan birkaç
denemeden sonra kullanılan veriye (ilk P dalga
varışından itibaren 50 sn uzunluğunda bir za-
man penceresi ile seçilmiş 31 P ve 9 SH dalga
şekli) en iyi uyumu veren kaynak parametreleri-
nin USGS-Cisim dalgası moment tensor çözü-
münden belirlenen parametreler (doğrultu 255,
eğim 50, rake 73) olduğu belirlenmiştir (Tablo 2,
Şekil 2 ve 3).

Kırılmanın karmaşıklığı ve değişen kırılma hız-
ları durumları için 8 zaman penceresi kullanıla-
rak modellemede esneklik sağlanmıştır. Her bir
zaman penceresi içindeki kayma evrimi 0.5 sn
yükselim ve düşümlü, ikiz kenar üçgen şeklinde,
zamanca örtüşmeyen yükselim-zaman fonksi-
yonu ile temsil edilmiştir. Böylelikle kırılma düz-
lemi üzerinde her bir noktada gerek duyulduğu
takdirde toplamda 8 sn'lik uzun bir kayma süre-
sine ve tanımlanan en büyük kırılma hızına (3.3
km/sn) göre daha küçük kırılma hızlarına model-
lemede izin verilmiştir. Yapılan bu sonlu-fay pa-
rametrizasyonu ile her bir fay parçasına karşılık
gelen sentetik sismogramlar genelleştirilmiş ışın



Şekil 3. Van Gölü Bölgesi'nin yerel tektonik unsurları ve Nisan 2012 tarihine kadar oluşmuş KRDAE tarafından sağlanan 2011 Van depremi artçı depremlerinin (beyaz daireler) dış merkez dağılımları. GCMT kaynak mekanizmaları (kırmızı-beyaz plaj topları) mevcut olan $M \geq 4.6$ artçı depremler kırmızı yıldızlarla gösterilmiştir. Siyah yıldız ve dikdörtgen sırasıyla 2011 Van Depremi dış merkezini ve uzak-alan sonlu fay analizinde kullanılan kırılma düzleminin yüzey izdüşümünü temsil etmektedir. Aktif fay referansları ve kısaltmaları için Şekil 2'nin alt yazısına bakınız.

Figure 3. Local tectonic features of the Lake Van area and the epicentre distribution of the 2011 Van earthquake aftershocks (white filled circles) occurred until April 2012 and provided by Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute. The $M \geq 4.6$ aftershocks with available GCMT source mechanisms (red-white beach balls) are shown with red stars. The black star and the rectangle denote the epicentre of the 2011 Van earthquake and surface projection of the rupture plane used in the teleseismic finite-fault analysis, respectively. See caption of Figure 2 for the active fault references and abbreviations.

yöntemiyle (Langston ve Helmberger 1975) ve Pınar vd., (2007)'de verilen kabuksal hız yapısı (Tablo 4) kullanılarak ters çözümde kullanılan her bir istasyonda hesaplanmıştır. Hesaplanan yapay dalga şekilleri gözlenmiş dalga şekilleri ile en küçük kareler ters çözümü (Lawson ve Hanson 1974) bağlamında benzetilerek her bir fay parçasına karşılık gelen kayma değerleri hesaplanmıştır. 2011 Van depremi için yapılan bu sonlu-fay modellemesinin diğer ayrıntıları Utkucu (2013)'de verilmiştir.

Utkucu (2013)'nin bulduğu sonlu-fay kayma dağılım modeli Şekil 4'de verilmiştir. Sonlu-fay modeli kırılmanın odaktan itibaren 30 km boyunca tek taraflı olarak GB'ya ve eğim yukarı yayıldığını, 5 km'den sığ derinliklere ilerlemediğini ve en büyük kayma değerinin yaklaşık 5.5

m olduğunu önermektedir. Zaman penceresi yaklaşımında kullanılan her bir zaman penceresi içinde hesaplanan kayma dağılımları Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5'den görüldüğü üzere kayma en büyük değerine ilk zaman penceresinde sahiptir ve kaymanın önemli bir kısmı ilk 3 zaman penceresi içinde gerçekleşmiştir. Diğer (ilk 3 zaman penceresi sonrasında) zaman pencereleri içindeki kayma ihmal edilebilir değerlerdedir ve büyük olasılıkla modellemede yükselim zamanında sağlanan fazla esneklikten dolayı ters çözümleme sonucu bulunan yapay kaymalardır. Buna göre, yapılan sonlu-fay analizi sonucu kullanılan veriden 2011 Van depremi için yükselim zamanı 3 sn olarak bulunmuştur. Yani kırılma düzlemi üzerinde herhangi bir noktada kayma süresi 3 sn'i aşmamaktadır. Kayma odak bölgesinde 1 sn, en büyük kaymanın gözlemlendiği

Tablo 3. 23 Ekim 2011 Van depreminin GCMT katalogunda kaynak mekanizma çözümü verilen artçı depremleri ve odak parametreleri (Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü, GCMT ve USGS-NEIC kataloglarından derlenmiştir).

Table 3. The aftershocks with source mechanism solutions given in GCMT catalogue of the 23 October 2011 Van earthquake along with their hypocentral parameters (compiled from Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, GCMT and USGS-NEIC catalogues).

No	Date (GMT)	Origin time (GMT)	Latitude (°)	Longitude (°)	Depth	Mw	ML	mb	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	CMT depth (km)
1	23.10.2011	18.10.45	38.7102	43.3382	5		5.0	5.1	100/275	45/45	93/87	20.9
2	23.10.2011	20.45.34	38.6345	43.0775	5	6.0	5.7	6.0	281/111	40/50	82/96	12.0
3	24.10.2011	08.28.26	38.6200	43.5500	3			4.8	92/265	45/45	94/86	22.0
4	24.10.2012	08.49.21	38.6700	43.5100	7			4.9	268/82	41/49	94/86	20.2
5	24.10.2011	15.28.06	38.6737	43.2243	5		4.8	4.9	269/93	44/46	87/93	18.5
6	25.10.2011	14.55.08	38.7733	43.5468	5	5.6	5.4	5.7	264/79	43/47	94/86	14.4
7	26.10.2011	03.16.18	38.7300	43.300	5			4.7	102/239	36/32	127/66	30.6
8	29.10.2011	22.24.22	38.8985	43.5503	5		5.3	5.0	298/206	77/82	-172/-14	19.4
9	06.11.2011	02.43.12	38.9243	43.5650	5		4.9	4.7	277/186	64/87	-176/-26	15.8
10	08.11.2011	22.05.51	38.7242	43.0870	4.3	5.2	5.5	5.6	280/104	37/53	87/92	21.2
11	09.11.2011	19.23.33	38.4295	43.2342	5	5.6	5.6	5.6	267/358	72/89	179/18	13.5
12	14.11.2011	22.08.16	38.6973	43.1578	7.8		5.2	5.3	296/98	40/51	104/78	17.3
13	18.11.2011	17.39.43	38.6000	43.1000	10			5.0	31/300	77/88	2/167	16.7
14	30.11.2011	00.47.21	38.4740	43.4530	4.3		5.0	4.9	287/17	86/89	179/4	28.4
15	04.12.2011	22.15.02	38.4600	43.3000	4.7			4.7	112/22	84/87	-177/-6	24.3
16	26.03.2012	10.35.32	39.1700	42.3300	5	5.0		--	82/256	44/46	94/86	19.5

yerde 3 sn sürmüştür. Özellikle, fayın GB üst köşesindeki sığ kaymanın 8nci zaman penceresi içinde gerçekleşmesi, sığda gözlenen bu kaymanın kayma yükselim zamanında modellemede sağlanan aşırı esneklikten kaynaklandığını önermektedir. Nitekim Utkucu (2013), bulduğu Şekil 4'deki kayma modelinden yüzey dislokasyonlarını hesaplamış ve GB sığ kaymanın olması durumunda hesaplanan dislokasyonların Van Gölü sahil şeridindeki yükselme gözlemlerini daha iyi karşıladığını öne sürmüştür. Zaman penceresi yaklaşımı sonuçları faylanmanın kör faylanma olduğunu destekler niteliktedir.

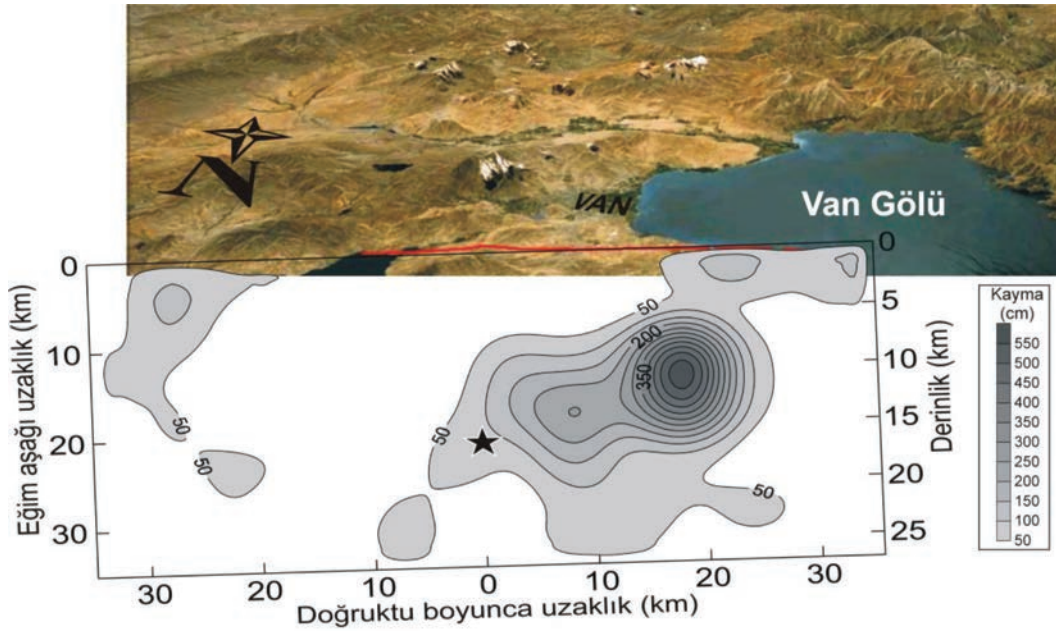
Şekil 5'de verilen her bir zaman-penceresi içindeki kayma dağılımları, tanımlanan en büyük kırılma hızına göre odaktan kırılmanın dairesel

yayılması göz önüne alınarak belirli zaman aralıkları içindeki kayma dağılımlarının bulunmasında yani kayma hızının uzay-zaman evriminin elde edilmesinde kullanılabilir. Birer saniye zaman aralıklarıyla yapılan ve kırılmanın uzay-zaman evriminin eldesi anlamını taşıyan bu işlemin sonucu olan kayma dağılımları Şekil 6'da gösterilmiştir. Kırılma ilk 3 saniyede 0.5 m'lik kayma değerini pek aşmamıştır. 4ncü saniyede kayma 1 m genişliğini aşmış ve 6ncı saniyede en büyük kayma (2.6 m) meydana gelmiştir. İlk 7 sn boyunca 3.3 km/sn hızla yayılan kırılmanın 8nci saniyeden itibaren yavaşlamaya başladığı, 9ncü saniyede önemli kaymalar için 2.3 km/sn hızına kadar yavaşladığı ve 2 sn sonrada durduğu anlaşılmaktadır. Toplam kırılma süresi yaklaşık 11 sn'dir ve göreceli olarak önemli sismik

Tablo 4. 23 Ekim 2011 Van depremi sonlu-fay kırılma evrimi analizi ve 3 artçı depreminin nokta kaynak ters çözümlerinde kullanılan kabuksal hız modeli (Pinar vd., 2007).

Table 4. Crustal velocity structure used in this study for the finite-fault rupture analysis of the 23 October 2011 Van earthquake and for the point-source inversion of its 3 aftershocks (Pinar et al., 2007).

Kalınlık (km)	V_p (km/sn)	V_s (km/sn)	ρ (kg/m ³)
2	4.50	2.60	2210
6	5.54	3.20	2540
10	6.23	3.60	2460
12	6.92	4.00	2980
-	7.78	4.50	3260



Şekil 4. 23 Ekim 2011 Van depreminin Utkucu (2013) tarafından bulunmuş kayma dağılım modeli. Kayma 0.5 m aralıkla 0.5 m'den büyük değerleri için konturlanmıştır. Siyah yıldız depremin odağını temsil etmektedir.

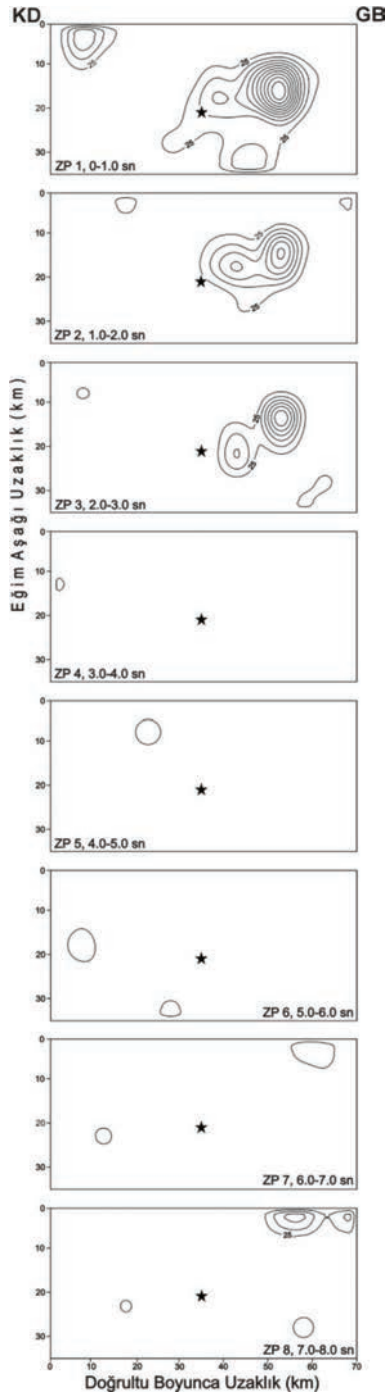
Fig. 4. Slip distribution model of the October 23, 2011 Van earthquake obtained by Utkucu (2013). The slip values are contoured at 0.5 m interval for the slip larger than 0.5 m. The solid star represents the hypocentre.

moment serbestlenmesi 5-9 sn zaman aralığında gerçekleşmiştir. Serbestlenen toplam sismik moment 4.6×10^{19} Nm'dir ($M_w=7.1$).

ARTÇI DEPREM NOKTA-KAYNAK TERS ÇÖZÜMLERİ

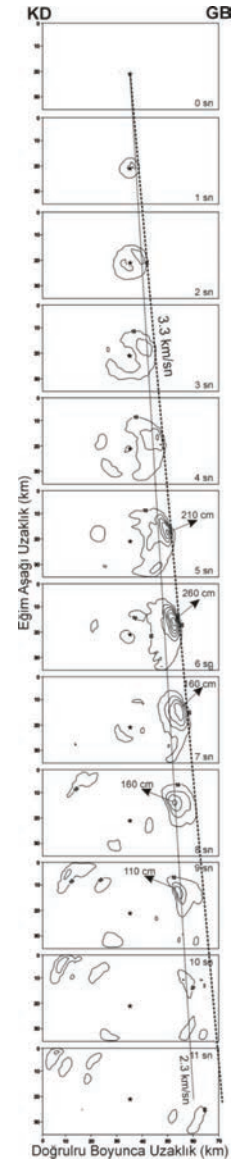
2011 Van depremi anaşokun oluşturduğu can ve mal kayıplarını arttıran önemli bir artçı deprem etkinliğine neden olmuştur. Özellikle 9 Kasım 2011 tarihinde Edremit ilçe merkezi yakınında bir dış merkeze sahip artçı deprem diğerlerine göre

gerek oluşturduğu can kaybı ve yıkım gerekse anaşoku oluşturan faydan farklı bir fay üzerinde ve farklı faylanma mekanizması ile oluşmasıyla ilgi çekmiştir. Bu nedenle artçı deprem kaynak mekanizmaları ve kaynak özellikleri önem kazanmaktadır. Burada büyüklüğü $M_w \geq 5.6$ olan 3 artçı depremin (Tablo 3'de 2, 6 ve 11 nolu depremler) nokta kaynak ters çözümü Kikuchi ve Kanamori (1991) tarafından geliştirilen bir yöntemle uzak-alan cisim dalgaları kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan verinin çözünürlüğü gözlemlenerek alt magnitüde eşiği $M_w=5.6$ alınmıştır.



Şekil 5. Her bir zaman-penceresinin Şekil 4'de verilen toplam kayma dağılımına katkılarının ayrı ayrı gösterildiği zaman-penceresi analizi sonuçları. Pencerelemlerin kapsadığı zaman aralıkları her bir pencerenin sol ve sağ altında verilmiştir.

Figure 5. Time-window analysis results by means of individual time-window contributions for the total slip model given in Fig. 4. The time interval represented by each window are given at the bottom left and right of the windows.



Şekil 6. 2011 Van depremi kırılmasının 1 sn zaman aralıkları ile verilen uzay-zaman evrimi. 10 cm'den büyük kaymalar 50 cm kontur aralıklarıyla çizilmiştir. Her bir zaman aralığında kırılmanın ilerleyiş hızı hakkında fikir edinilmesi için 3.3 ve 2.3 km/sn hızında ilerleyen dairesel kırılma cephelerine teğet geçen doğrular kırılma hızı referansı için çizilmiştir. Siyah yıldız deprem odağını göstermektedir.

Figure 6. Space-time evolution of the 2011 Van earthquake rupture given at time intervals of 1 second. The slips larger than 10 cm are contoured at intervals of 50 cm. To have an idea about the rupture velocity at each time interval, the lines that are tangent to the radially propagating rupture fronts at velocity of 3.3 and 2.3 km/sn are drawn for reference. The black star denotes the hypocentre.

Artçı depremlerin nokta kaynak ters çözümlemesinde kullanılan veriler Tablo 5’de verilmiştir. Kullanılan veri, 0.01-0.33 Hz frekans aralığında bant geçişli filtrelenmiş olup ters çözümlemede içerilen istasyonlar 30°-90° aralığında dış merkez uzaklıklarına sahiptirler. Verilerin başlangıç zamanları Jeffreys ve Bullen (1958) zaman çizelgeleri yardımıyla belirlenmiş ve gözle yapılan kontroller sonucunda gerek duyulduğu durumlarda Yer içinin heterojen yapısı dikkate alınarak bu başlangıç zamanları zamanca bir kaç sn ileri geri kaydırılmıştır.

Yöntemin uygulanması için deprem kaynağının bir nokta kaynak gridi ile temsili gerekmektedir. 3 deprem için kullanılan nokta kaynak gridleri Şekil 7’de gösterilmiştir. Bu düzlemsel gridler üzerindeki her bir nokta kaynak 5 bağımsız moment tensörle temsil edilmiştir. Şekil 7’den görüldüğü gibi Green’s fonksiyonları (yapay sismogramlar) 5 farklı derinlik için tayin edilen referans noktasına göre Tablo 4’de verilen hız yapısı kullanılarak hesaplanmıştır. Yineleyen ters çözümlerle yapay sismogramların gözlenmiş sismogramlara benzetimi yoluyla belirlenen bu bağımsız moment tensörlerin kombinasyonu incelenen depremin kaynak mekanizmasını vermektedir. Burada kısaca özetlenen yöntemin ayrıntıları Kikuchi ve Kanamori (1991) ve Pınar (1995)’de verilmiştir.

3 artçı deprem için de tek kaynakla gözlenmiş verilere tatmin edici bir uyum sağlanmıştır. Yineleyen ters çözümleme sonucu elde edilen kaynak mekanizmaları Şekil 8, 9 ve 10’da yapay-gözlenmiş dalga şekli karşılaştırmasıyla birlikte

gösterilmiş ve elde edilen kaynak mekanizmalarına ait kaynak parametreleri ise Tablo 5’de verilmiştir. Bulunan kaynak çözümler Tablo 3’de verilen GCMT çözümleriyle karşılaştırıldığında, farklı frekans bandındaki verilerden elde edilen çözümler olmasına rağmen gerek faylanma türü, gerekse faylanma parametreleri açısından genel benzerlik dikkat çekicidir. En önemlisi de yapılan nokta kaynak ters çözümünün 9 Kasım 2011 tarihli artçı deprem için GCMT gibi doğrultu atımlı faylanma mekanizması vermesi ve bu artçının başka bir fay üzerinde meydana geldiğini önermesidir. Ancak, bu artçı için bulunan çözümde D-B doğrultulu düğüm düzleminin eğiminin GCMT çözümündekinden daha düşük açılı olduğu da vurgulanmalıdır.

GERİLME TENSÖRÜ ANALİZİ

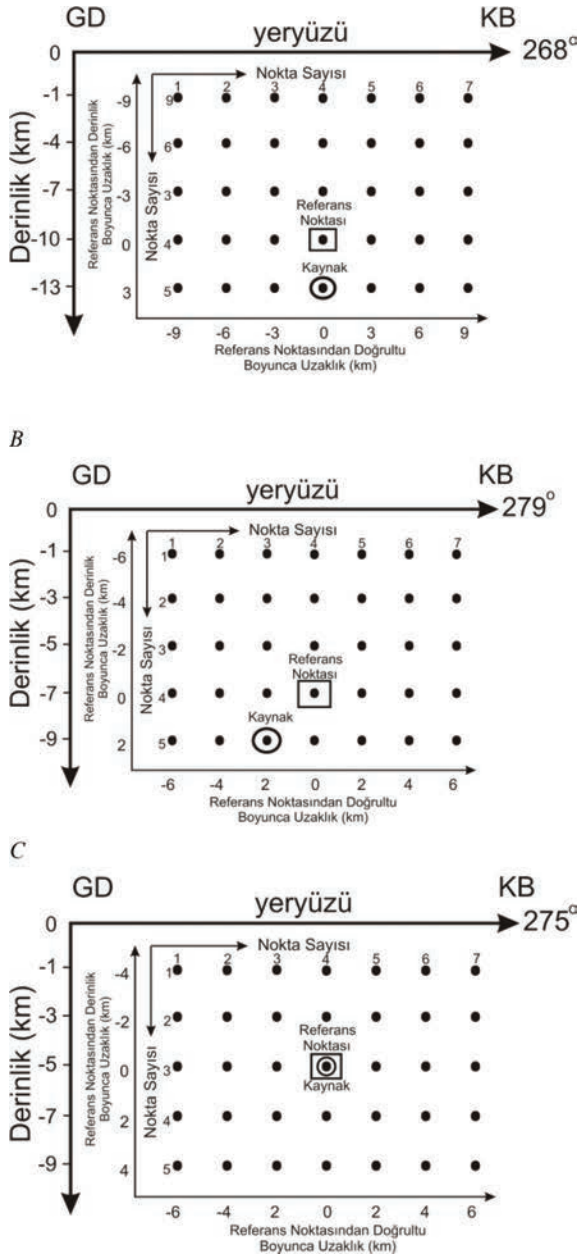
Pınar vd., (2007) Van Gölü bölgesi içinde gerilme rejiminin transpresif bir gerilme rejimi olduğunu ve bu yönüyle yerel olarak doğrultu-atımlı rejimin baskın olduğu Doğu Anadolu bölgesi genelinden farklılık gösterdiğini belirlemiştir. Bu çalışmada da benzer yöntemle bir gerilme tensör analizi veri olarak Tablo 2’de listelenmiş kaynak parametreleri bilinen depremler ve bu depremlere ilave olarak Tablo 3’de verilen 2011 Van depremi artçı depremleri mekanizma çözümleri içerilerek ayrı ayrı yapılmıştır.

Yöntemde kullanılan veriler deprem odak mekanizmalarından belirlenmiş P ve T gerilme eksenlerinin yönelimleridir yani azimut ve dalımlarıdır. Yöntem en büyük asal gerilme (σ_1),

Tablo 5. Tablo 3’de verilen 2, 6 ve 11 nolu artçı depremler için yapılan uzak-alan nokta-kaynak ters çözümünde kullanılan verinin özellikleri ve ters çözüm sonucunda elde edilen kaynak parametreleri.

Table 5. The features of the teleseismic data used in the point-source inversion of the aftershocks numbered 2, 6 and 11 in Table 3 along with the source parameters resulted from the inversion.

Artçı	Kullanılan uzak-alan verisi				Ters Çözüm Sonuçları						
	Oluş zamanı	P	SH	Veri boyu (sn)	Örnekleme Aralığı (sn)	Doğrultu (o)	Eğim (o)	Rake (o)	CMT derinliği	Sismik Moment X 10 ¹⁷ Nm	Mw
23/10/2011	36	14	20	0.5	268	50	74	13	0.8	5.9	
25/10/2011	31	5	20	0.5	279	41	78	9	0.38	5.7	
09/11/2011	23	11	20	0.5	275	36	-166	5	0.31	5.6	



Şekil 7. Nokta-kaynak ters çözümünde (a) 23 Ekim, (b) 25 Ekim ve (c) 9 Kasım 2011 artçı depremleri için kullanılan nokta kaynak gridleri.

Figure 7. Point source grid schemes used for (a) the 23 October, (b) the 25 October and (c) the 9 November 2011 aftershocks in the point source inversion.

orta asal gerilme (σ_2) ve en küçük asal gerilme (σ_3) eksenleri ile gerilme büyüklüğü oranı (R) olarak bilinen ve $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$ şeklinde tanımlanan 4 parametreyi belirlemektedir. Bu 4 parametrenin değişen değerleri farklı

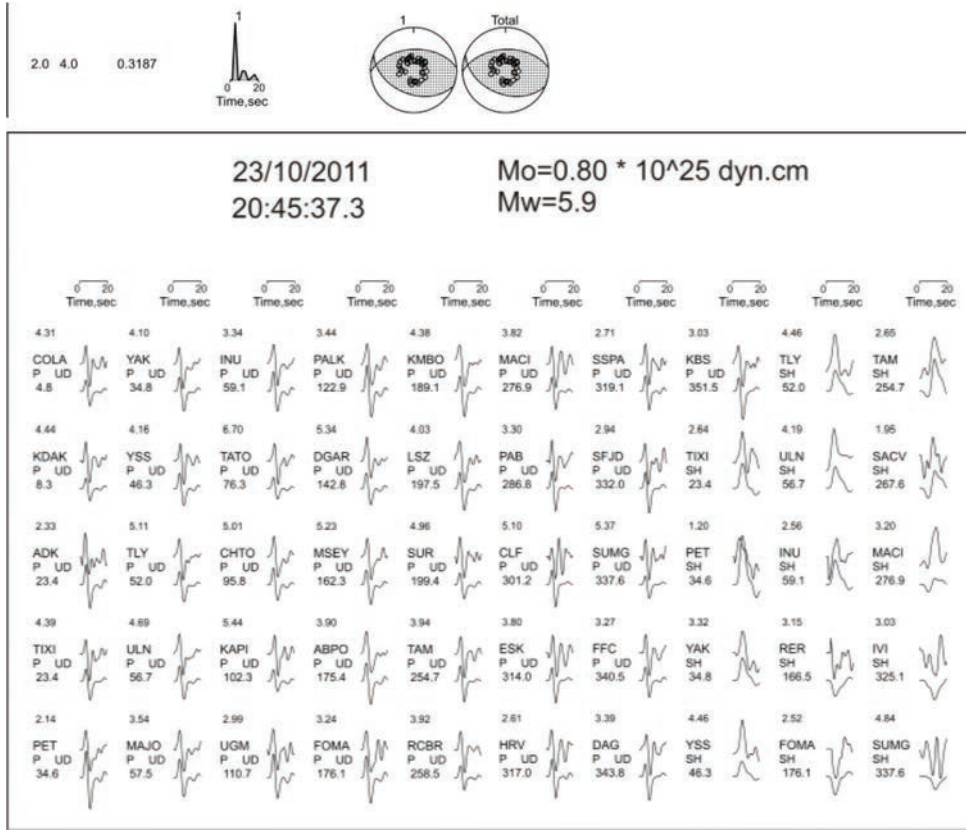
gerilme modellerini ifade etmekte olup kullanılan gözlenmiş veri setinin tümüne birden en iyi uyumu veren model gerilme tensör analizinin sonucu olarak çalışma alanının gerilme rejimini en iyi tanımlayan modeli olarak ele alınır. En iyi uyum veren model bu 4 model parametresinin sistematik olarak değerlerinin geniş bir olasılık aralığında her ters çözüm yinelemesinde bir kez değiştirilmesiyle yapılan grid noktası taraması yoluyla bulunur (Gephart 1990; Pınar vd., 2007). Her yineleme sonucunda kullanılan veri ile hesaplanan gerilme tensörü arasındaki uyumsuzluk, verinin tanımladığı kayma vektörü ile gerilme modelinin tanımladığı kayma vektörü arasındaki en küçük rotasyon açısıdır.

Anderson faylanma teorisi dikkate alındığında, gerilme tensörü analizi sonucunda σ_1 (P) ve σ_3 (T) yatay ve σ_2 (B) düşey düzlemde belirlenmişse faylanma doğrultu atımlı, σ_2 ve σ_3 yatay düzlemde ve σ_1 düşey düzlemde belirlenmişse faylanma normal ve σ_1 ve σ_2 yatay düzlemde ve σ_3 düşey düzlemde belirlenmişse faylanma ters atımlı bir faylanmadır (Twiss ve Moores 1992). Gerilme tensörü analizi sonucunda $R=0$ olarak hesaplanmışsa açılma yani normal faylanmalı, $R=0.5$ olarak hesaplanmışsa doğrultu atım faylanmalı ve $R=1$ olarak hesaplanmışsa sıkışma yani ters faylanmalı bir gerilme rejimi söz konusudur. $R=0-0.5$ aralığında bulunmuşsa transtansiyonel ve $R=0.5-1$ aralığında bulunmuşsa transpressif bir bölgesel gerilme rejimi söz konusudur.

Tablo 2’de verilen kaynak parametreleri bilinen ana şok depremler ile yapılan gerilme tensörü ters çözümü sonuçları Şekil 11a’da ve bu depremlere ilave olarak Tablo 3’de verilen 2011 Van depremi artçı depremleri mekanizma çözümleri içerilerek yapılan gerilme tensörü ters çözümü sonuçları da Şekil 11b’de verilmiş ve asal gerilme eksenlerinin belirlenen azimut ve dalım açıları ile R değerleri Tablo 6’da listelenmiştir. Görüleceği üzere, gerilme tensörü analizi sonuçları doğrultu atımlı bir gerilme rejimini ima etmektedir.

TARTIŞMA

Önceki bölümlerde yapılan analizlerin sonuçlarının değerlendirilmesi bağlamında yapılan



Şekil 8. 23 Ekim 2011 tarihli 2011 Van depremi artçı depremi nokta kaynak analizi sonuçları ve gözlenmiş (üstteki)/yapay dalga şekli karşılaştırması. Her bir dalga şekli solunda istasyon adı, dalga fazı, hangi bileşen kaydı olduğu ve istasyon azimutu bilgileri yer almaktadır.

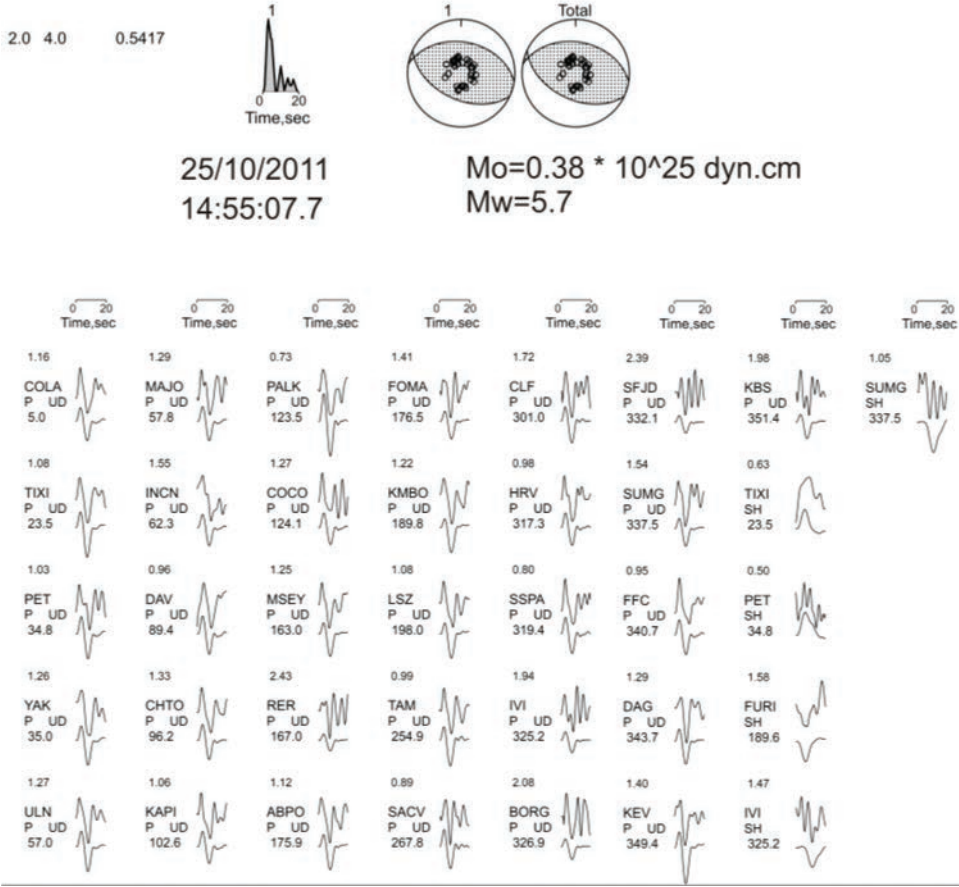
Figure 8. The point-source analysis results and observed (up)/synthetic (down) waveform pairs for the aftershock of the 2011 Van earthquake occurred on 23 October 2011. Station name, wave phase, component and station azimuth information are given in the left of the each waveform pair.

Tablo 6. Van Gölü bölgesi içinde meydana gelmiş depremlerden yapılan gerilme tensörü analizi sonuçları. Analiz sırasında hesaplanan ve sonuçta elde edilen asal gerilme eksenlerinin dağılımları için Şekil 11'e bakınız.

Table 6. Stress tensor analysis results for the earthquakes occurred in the Lake Van Area. Distribution of the principal stress axes estimated during the analysis and resulted from the analysis are shown in Figure 11.

	σ_1		σ_2		σ_3		R	Gerilme rejimi
	Azimet (o)	Dalim (o)	Azimet (o)	Dalim (o)	Azimet (o)	Dalim (o)		
Pınar vd., 2007	335	16	255	32	42	53	0.8	Transpressif
Bu çalışma ¹	169	19	296	61	71	22	0.6	Doğrultu atımlı
Bu çalışma ²	174	19	333	70	82	7	0.5	Doğrultu atımlı

¹ Tablo 2'de verilen kaynak parametreleri bilinen ana şok depremler ile yapılan gerilme tensörü ters çözümü sonuçları. ² Tablo 2'de verilen kaynak parametreleri bilinen ana şok depremlere ilave olarak Tablo 3'de verilen 2011 Van depremi artçı depremleri mekanizma çözümleri de içerilerek yapılan gerilme tensörü ters çözümü sonuçları



Şekil 9. 25 Ekim 2011 tarihli 2011 Van depremi artçı depremi nokta kaynak analizi sonuçları ve gözlenmiş (üstteki)/yapay dalga şekli karşılaştırması. Her bir dalga şekli solunda istasyon adı, dalga fazı, hangi bileşen kaydı olduğu ve istasyon azimutu bilgileri yer almaktadır.

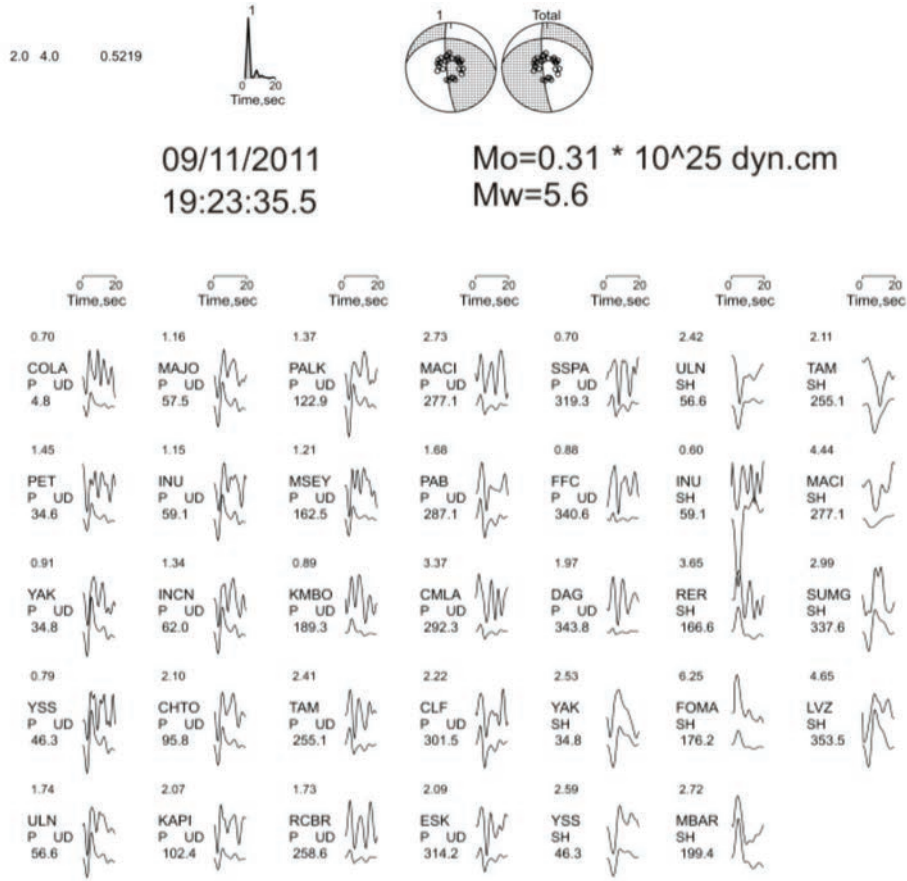
Figure 9. The point-source analysis results and observed (up)/synthetic (down) waveform pairs for the aftershock of the 2011 Van earthquake occurred on 25 October 2011. Station name, wave phase, component and station azimuth information are given in the left of the each waveform pair.

yorumlar buradaki tartışmanın kapsamına dahildirler ve anlatımın akıcılığı ve devamlılığı açısından tamamı bu bölümde içerilmemiştir.

Telesismik sonlu-fay analizi sonuçları 2011 Van depreminin Van fayı üzerinde güneybatıya tek taraflı bir kırılma sonucu oluştuğunu, kayma genliğinin 5 m'yi aştığını, kırılmanın genellikle derinde kalıp sığ fay kesimlerine pek ulaşmadığını ve önemli kırılmanın yaklaşık 25 km x 16 km'lik bir fay alanını kapsadığını önermektedir. Elliot vd., (2013) InSAR verilerinin modellenmesinden 2011 Van depremi kırılmasının bir çift, basamaklı (en echelon) ve KB'ya doğru farklı eğimleri olan iki fay segmentinden oluştuğunu

ve bunlardan doğuda yer alanının üzerinde kaymanın 6 m'ye batıda olanın üzerinde ise 9 m'ye ulaştığını önermişlerdir. Şekil 4'de verilen kayma dağılım modeli her ne kadar iki segmentli bir model fay düzlemi kullanılmadan tek segmentli bir fay modeli kullanılarak elde edilmiş olsa da odağın GB'sında kalan kırılma alanının doğu ve batı yarları arasındaki kayma genlikleri (doğu yarısı için yaklaşık 2.5 m ve batı yarısı için yaklaşık 5.5 m) farkı ile bu bulguyu destekler niteliktedir.

Pınar vd., (2007), deprem odak mekanizmalarından Van Gölü bölgesi içinde gerilme rejimini transpressif olarak bulmuşlardır. Bu çalışmada,



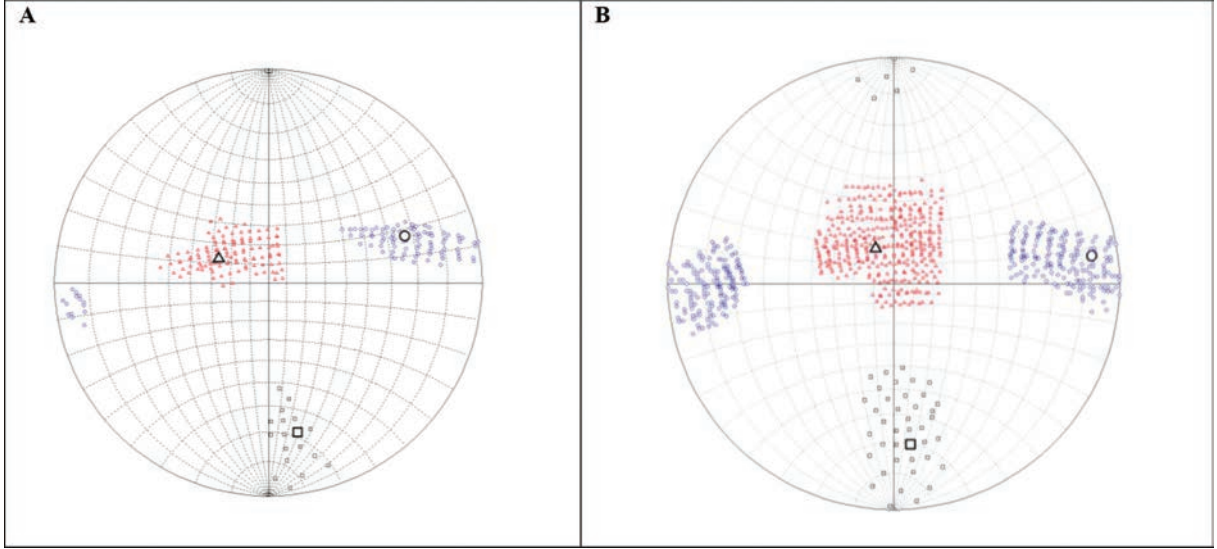
Şekil 10. 9 Kasım 2011 tarihli 2011 Van depremi artçı depremi nokta kaynak analizi sonuçları ve gözlenmiş (üstteki)/yapay dalga şekli karşılaştırması. Her bir dalga şekli solunda istasyon adı, dalga fazi, hangi bileşen kaydı olduğu ve istasyon azimutu bilgileri yer almaktadır.

Figure 10. The point-source analysis results and observed (up)/synthetic (down) waveform pairs for the aftershock of the 2011 Van earthquake occurred on 9 November 2011. Station name, wave phase, component and station azimuth information are given in the left of the each waveform pair.

Van Gölü bölgesi için deprem odak mekanizmalarından yapılan bölgesel gerilme tensörü analizi sonucunda gerilme rejimi Tablo 3'de verilen 2011 Van depremi artçı deprem kaynak mekanizmalarının kullanılıp kullanılmamasına bakılmaksızın doğrultu atımlı bir gerilme rejimi bulunmuştur. Bu noktada, bu çalışmada Pınar vd., (2007)'den farklı olarak gerilme tensor analizinde 2011 Van depremi ana şok kaynak mekanizması ile Utkucu (2013)'de çözümü yapılmış iki depremin (Tablo 2'de 1972 Gevaş ve 1976 Van depremleri) odak mekanizmalarının içerildiği hatırlatılmalıdır. Özkaymak (2004), Van Gölü doğusu için arazi verileri fay kinematiği analizinden, Van Gölü doğusu içinde gerilme rejiminin yaklaşık K-G doğrultulu bir sıkışma

rejimi olduğunu ifade etmiştir. Tüm bu sonuçlar Van Gölü bölgesi içinde gerilme rejiminin yerel olarak değiştiği ve doğrultu atımlı rejimin baskın olduğu transpressif bir rejimin hâkim olduğu şeklinde yorumlanabilir.

2011 Van depremi, Karadeniz içinde Bartın ili açıklarında meydana gelmiş 3 Eylül 1968 Bartın depremi ($M_s=6.6$) (Alptekin vd., 1986) istisnası dışında Türkiye'de aletsel dönemde meydana gelmiş ve odak mekanizması bilinen büyük depremler içinde nerdeyse tamamen ters faylanma sonucu oluşmuş ilk depremdir (25 Eylül 1975 Lice depreminin hemen hemen eşit büyüklükte ters ve sol-yanal doğrultu atımlı faylanma bileşenlerine sahip olduğu



Şekil 11. (a) Tablo 2’de verilen Van Gölü bölgesindeki ana şok depremlerin P ve T eksenlerinden ve (b) ana şok depremler ve Tablo 3’de verilen 23 Ekim 2011 Van depreminin artçılarıyla hesaplanan gerilme tensörü analizi sonuçları. Küçük semboller analiz sırasında hesaplanan asal gerilme eksenlerini gösterirken büyük ve kalın çizgili semboller aynısını en iyi uyumu veren gerilme modeli için vermektedir. Kareler, üçgenler ve çemberler sırasıyla en büyük asal gerilme eksenini σ_1 , orta asallerilme eksenini σ_2 ve en küçük asal gerilme eksenini σ_3 azimut ve dalım açıları çiftlerine işaret etmektedir. Asal gerilme eksenlerinin azimut ve dalım açıları çiftlerinin ve gerilme büyüklüğü oranı R’nin değerleri için Tablo 6’ya bakınız.

Figure 11. Results of the stress tensor analysis estimated from (a) the P- and T-axes of the focal mechanisms of the mainshocks in the Lake Van region given in Table 2 (b) from the mainshocks and the 23 October 2011 Van earthquake’s aftershocks given in Table 3. The smaller symbols denote estimated principal stress axes while the large and solid symbols show the same for the best-fitting stress model. The squares, triangles and circles indicate the azimuth and plunges of the maximum compression axis σ_1 , the intermediate stress axis σ_2 and the minimum stress axis σ_3 , respectively. See Table 6 for the values of the azimuth and plunge pair of the principal stress axes and the stress magnitude ratio R.

hatırlatılmalıdır). Bu deprem bölgede yaygın olarak gözlenen doğrultu atımlı faylanmaların yanısıra ters faylanmalarında meydana gelebileceğini kanıtlamıştır.

SONUÇLAR

23 Ekim 2011 Van depreminin geniş bant uzak-alan cisim dalga şekilleri kullanılarak sonlu-fay modellemesi yapılmış ve kırılmanın ters faylanma sonucu oluştuğu ve tek taraflı olarak 25 km’lik bir uzaklık boyunca GB’ya yayıldığı görülmüştür. Kırılmanın 5 km’den şığ derinliklere pek yayılmadığı, en büyük kaymanın 5.5 m civarında olduğu, kırılmanın yaklaşık 11 sn sürdüğü ve toplamda 4.6×10^{19} Nm’lik ($M_w=7.1$) bir sismik momentin özellikle 5-9 sn kırılma zamanı aralığında serbestlendiği belirlenmiştir. Sonlu-fay analizi en büyük kayma alanı için 3

sn’lik bir yükselim zamanı önermiştir. 2011 Van depreminin 3 büyük artçı depreminin uzak-alan nokta kaynak modellemeleri sonucu elde edilen kayak mekanizmaları bu artçı depremlerin sadece ana şok kırılma düzleminde ya da komşu ters faylar üzerinde oluşmadığını 9 Kasım 2011 artçı depreminde olduğu gibi komşu doğrultu atımlı faylar üzerinde de artçı depremlerin tetiklendiğine işaret etmiştir.

Van Gölü bölgesindeki mevcut ana şok deprem odak mekanizmaları kullanılarak ve bunlara 2011 Van depremi artçı depremleri eklenerek gerilme tensör analizleri bölgede gerilme rejiminin doğrultu-atımlı olduğunu ve sıkışma gerilmesi ekseninin kabaca K-G doğrultusunda uzandığını önermiştir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışmada kullanılan 29 Ekim 2011 Van depremi artçı deprem lokasyonları Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Tarafından sağlanmıştır.

Yazarlar, lokasyon verilerini sağlayan Dr. Dogan KALAFAT'a teşekkür ederler.

"Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir." Proje Numarası: 2012-01-14-005)

REFERANSLAR

- AFAD (2011). Van depremi (23 Ekim 2011) raporu. T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara. 100 pp.
- Akyüz S, Zabcı C, Sançar T ., 2011. 23 Ekim 2011 Van depremi hakkında ön rapor. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Kasım 2011, 19 pp (in Turkish).
- Albini, P., Demircioglu, M. B., Locati, M., Rovida, A., Sesetyan, K., Stucchi, M., and Vigano, D.: In search of the predecessors of the 2011 Van (Turkey) Earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 83, 855–862, doi:10.1785/0220110146, 2012.
- Alptekin, Ö., Nabelek, J.L. ve Toksöz, M.N., 1986. Source Mechanism of the Bartın earthquake of September 3, 1968 in Northwestern Turkey: evidence for active thrust faulting at the southern Black Sea margin, *Tectonophysics*, 122, 73-88.
- Ambraseys, N. N, Finkel, C., 1995. The seismicity of Turkey ve adjacent areas: a historical review, 1500-1800. Eren Publication, İstanbul, ISBN 975-7622-38-9, 240 pp.
- Ambraseys, N. N., 1988. Engineering seismology. *Earthquake Eng Struc* 17:1-105.
- Ambraseys, N. N, Adams R. D., 1989. Long-term seismicity of North Armenia. *Eos. Transactions, American Geophysical Union*, 70:145-154.
- Ambraseys, N. N., 1989. Temporary seismic quiescence: SE Turkey. *Geophys J* 96:311-331.
- Ambraseys, N., 2009. Earthquakes in the Mediterranean ve Middle East: a multidisciplinary study of seismicity up to 1900. Cambridge University Press. 947pp. ISBN 978-0-521-87292-8.
- Atzori, S, Tolomei, C., Salvi, S. Zoffoli, S. , 2011. Coseismic ground displacement ve preliminary source models for the 10/23/2011, MW=7.2, Van earthquake, Eastern Turkey. Available from URL: http://www.sigris.it/images/stories/SIGRIS-4-Van_1stRep.pdf
- Barka, A., Kadinsky-Cade K., 1988. Strike-slip fault geometry in Turkey ve its influence on earthquake activity. *Tectonics* 7:663-684.
- CEDIM, 2011. Comparing the current impact of the Van Earthquake to past earthquakes in Eastern Turkey. Center for Disaster Management ve Risk Reduction Technology (CEDIM) Forensic Earthquake Analysis Group, Report 4, November 2011, 28 pp.
- Çelebi, E., Çağlar, N., Özocak, A., Aktaş, M., Kutanis, M., Mert, N., Özcan, Z., Kırtel, O., 2011. 23 Ekim 2011 Van-Erciş depremi değerlendirme raporu. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 58 pp (in Turkish).
- Degens, E. T, Wong, H. K., Kurtman, F., Finkch, P., 1978. Geological development of Lake Van. in: *The Geology Lake Van*. MTA Press, No. 169:134-146.
- Dhont, D., Chorowicz, J., 2006. Review of the neotectonics of the Eastern Turkish–Armenian Plateau by geomorphic analysis of digital elevation model imagery. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 95:34–49. doi:10.1007/s00531-005-0020-3.
- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H. R., Tavakoli , F., 2011. NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: Results from the Iranian permanent GPS network *Earth ve Planetary Science Letters* , 307,27–34 doi:10.1016/j.epsl.2011.04.029.
- Elliott, J.R. Copley, A. C. , Holley, R., Scharer, K. ve Parsons, B., 2013. The 2011 Mw

- 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake
Journal Of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 118, 1–19, doi:10.1002/jgrb.50117.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., 2011. 23 Ekim 2011 Van depremi saha gözlemleri ve kaynak faya ilişkin ön değerlendirmeler. MTA Jeoloji Etütler Dairesi, Ankara, 22 pp (in Turkish).
- Eyidoğan, H., Güçlü, U., Utku Z, Değirmenci, E., 1991. Macroseismic guide for large Turkey earthquakes 1900-1988. İstanbul Technical University, Faculty of Mine, Department of Geophysics, İstanbul, 198 pp (in Turkish).
- Hartzell, S. H, Heaton, T. H., 1983. Inversion of strong-ground motion ve teleseismic wave form data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. Bull Seismol. Soc. Am. 73:1553-1583.
- Hayes, G., 2011. Updated Result of the Oct 23, 2011 Mw 7.1 Eastern Turkey Earthquake available from URL: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usb0006bqc/finite_fault.php.
- Jackson, J., 1992. Partitioning of strike-slip ve convergent motion between Eurasia ve Arabia in Eastern Turkey ve the Caucasus, J Geophys Res 97:12471-12479.
- Jackson, J., McKenzie, D. P., 1984. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey ve Pakistan. Geophys J R Astr Soc 77:185-264.
- Jeffreys, H., ve K. E. Bullen, 1958. Seismological Tables, Office of the British Association, Burlington House, London.
- JMO (2011). Van (Tabanlı-Edremit) depremleri raporu. Jeoloji Mühendisleri Odası Raporu, Ankara. 52 pp (in Turkish).
- Kalafat, D., 1995. 1964-1994 yılları arasında Türkiye ve yakın çevresinde etkili olmuş depremlerin makrosismik gözlemleri. Deprem Araştırma Bülteni 73:60-97 (in Turkish).
- Kalafat, D., 1998. Anadolu'nun tektonik yapısının deprem mekanizmaları açısından irdelenmesi. Deprem Araştırma Bülteni 77:1-277 (in Turkish).
- Kalafat, D., Güneş, Y., Kara, M., Deniz, P., Kekovalı, K., Kuleli, S. H, Gülen, L., Yılmaz M, Özel, N., 2007. A revised ve extended earthquake catalogue for Turkey since 1900($M \geq 4.0$). Boğaziçi University, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bebek-İstanbul, 553 pp (in Turkish).
- Kikuchi, M. ve H. Kanamori, 1991. Inversion of complex body wave-III, Bull. Seism. Soc. Am., 81, 2335-2350.
- Koçyiğit A, Yılmaz A, Adamia S, Kuloshvili, S., 2001. Neotectonics of East Anatolia plateau (Turkey) ve lesser Caucasus: implication for transition from thrusting to strike-slip faulting. Geodinamica Acta, 14:177-195.
- Koçyiğit, A. and Altın, D., Tectonostratigraphic Evolution of the North Anatolian Palaeorift (NAPR): Hettangian-Aptian Passive Continental Margin of the Northern Neo-Tethys, Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, 11, (2002), p.1-27
- Lahn, E., 1946. A note about earthquakes in Van area (July-November 1945). Maden Tetkik ve Arama ve Enstitüsü 1(35):126-132 (in Turkish and French).
- Lahn, E., 1949. Seismological investigations in Turkey. Bull Seismol Soc Am 39:67-71.
- Langston, C. A, Helmberger, D. V., 1975. A procedure for modelling shallow dislocation sources. Geophys J R astr Soc 42:117-130.
- Lawson, C.L., Hanson, R.J., 1974. Solving Least Square Problem. Prentice-Hall, New Jersey, 339 pp.
- Litt, T., Krastel, S., Sturm, M., Kipfer, R., Örcen, S., Heumann, G., Franz, S. O., Ulgen, U. B, Niessen, F., 2009. 'PALEOVAN', International Continental Scientific Drilling Program (ICDP): site survey results ve perspectives. Quaternary Sci Rev 28:1555–1567. doi:10.1016/j.quascirev.
- 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., Veis, G., 2000. GPS constraints on plate kinematics ve dynamics in the Eastern Mediterranean ve Caucasus. *J Geophys Res* 105:5695-5719.
- McKenzie, D. P., 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys JR astr Soc* 30: 109-185.
- METU/EERC (2011) 23 Ekim 2011 Mw 7.2 Van depremi sismik ve yapısal hasara ilişkin saha gözlemleri. Report No: 2011-04, Kasım 2011, Ankara, 76 pp.
- MTA, Türkiye Yenilenmiş Diri Fay Haritası, available at: http://www.mta.gov.tr/v2.0/default.php?id=yeni_diri_fay_haritalari_goruntule (last access: 19 June 2013), 2012.
- Özkaymak, Ç., Yürür, T., Köse, O., 2004. An example of intercontinental active collisional tectonics in the Eastern Mediterranean region (Van, eastern Turkey). 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, 14-20 April 2004, Thessaloniki, Greece, Proceedings Book, pp 591-593.
- Pınar, A., 1995. Rupture process ve spectra of some major Turkish earthquakes ve their seismotectonic implications. Dissertation, Boğaziçi University, İstanbul.
- Pınar, A., Honkura, Y., Kuge, K., Matsushima, M., Sezgin, N., Yilmazer, M., Ögütçü, Z., 2007. Source mechanism of the 2000 November 15 Lake Van earthquake ($M_w = 5.6$) in eastern Turkey ve its seismotectonic implications. *Geophys J Int* 170(2):749-763, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03445.x
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, 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., Karam, G., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone ve implications for the dynamics of plate interactions. *J Geophys Res* 111, B05411, doi:10.1029/2005JB004051.
- Sandvol, E., Türkelli, N., Barazangi, M., 2003. The Eastern Turkey Seismic Experiment: The study of a young continent-continent collision: An example from eastern Turkey. *Geophys Res Lett* 30(24), 8038, doi:10.1029/2003GL018912, 2003.
- Sinclair, T., 1999. Two problems concerning the Van Region: Arakel of Tabriz on the earthquake of 1646 ve evidence for the rise in the level of the lake. In: Zachariadou E, (ed.), *Natural Disasters in the Ottoman Empire*, Crete University Press, pp 207-222.
- Stewart, G. S., Kanamori, H., 1982. Complexity of rupture in large strike-slip earthquakes in Turkey. *Phys Earth Planet Inter* 28: 70-84.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ., 1992. Active fault map of Turkey. *Publ Miner Res Explor Ins. Turk*, Ankara, Turkey.
- Şengör, A. M. C, Görür, N., Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip faulting ve related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In *Strike-slip faulting ve basin formation*, eds. Biddle KT ve Christie-Blick N, *Spec Publ Soc Econ Paleontol Mineral* 37-227-264.
- Şengör, A. M. C, Özeren, S., Genç, T., Zor, E., 2003. East Anatolian high plateau as a mantle-supported, north-south shortened domal structure. *Geophys Res Lett* 30(24), 8045, doi:10.1029/2003GL017858, 2003.
- Taşman, C.E., 1946. Varto ve Van earthquakes. *Publ Miner Res Explor Ins Turk*, 2(36):287-291 (in Turkish).
- Taymaz, T., Eyidoğan, H., Jackson, J., 1991. Source parameters of large earthquakes in the East Anatolian fault zone (Turkey). *Geophys J Int* 106:537-550.
- Toksöz, M. N., Nabelek, J., Arpat, E., 1978. Source properties of the 1976 earthquake in eastern Turkey: a comparison of field

- data ve teleseismic results, *Tectonophysics*, 49:199-205.
- Twiss, R. J. and Moores, E.M., 1992. *Structural Geology*, W.H. Freeman ve Co., New York, sf. 203.
- Utkucu, M., 2013. 23 October 2011, Van, Eastern Anatolia, earthquake (Mw=7.1) and seismotectonics of Lake Van area. *J. Seismol.*, 17, 783–805, doi: 10.1007/s10950-012-9354-z.
- 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 ve plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran ve northern Oman. *Geophys J Int* 157:381-398.
- Wald, D. J., Heaton, H. T., 1994. Spatial ve temporal distribution of slip for the 1992 Lveers, California, earthquake, *Bull Seismol Soc Am* 84:668-691.
- Wong, H.K., Degens, E.T., 1978. The bathymetry of Lake Van, eastern Turkey. In *The Geology Lake Van*, pp. 6-10. eds. Degens ET ve Kurtman F, M.T.A. Press, No. 169, Ankara, Turkey.