

10 Mayıs 1997 Qa'emat (İran) Depremi (Mw=7.2) Sonlu-Fay Kayma Dağılımının Telesismik P ve SH Geniş Bant Dalga Şekillerinin Ters Çözümünden Belirlenmesi

Finite-Fault Slip Distribution of the 10 May 1997 Qa'emat (Iran), Earthquake (Mw=7.2) Determined From Inversion of the Telesismic P and SH Broad Band Waveforms

HATİCE DURMUŞ^{1*}, MURAT UTKUCU²

¹ Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kütahya

² Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 54187 Serdivan/Sakarya.

Geliş (received) : 20 Mayıs (May) 2018

Kabul (accepted) : 23 Kasım (November) 2018

ÖZ

Bu çalışmada, 10 Mayıs 1997 Qa'emat depreminin (Mw=7.2) sonlu-fay kırılma özellikleri araştırılmıştır. Hartzell ve Heaton (1983) tarafından geliştirilen bir lineer sonlu-fay ters çözüm yöntemi sonlu-fay kaynak özelliklerini elde etmek için geniş bant telesismik P ve SH cisim dalga şekillerine uygulanmıştır. 1997 Qa'emat depreminin çoklu-segment sabit rake açılı sonlu-fay modeli, kırılmanın üç pürüzün yenilmesiyle kontrol edildiğini, en büyük kaymanın 340 cm ile ortada yer alan pürüz üzerinde olduğunu, güneye doğru tek yönlü olarak ilerlediğini, 36 saniye sürdüğünü ve 1.26×10^{27} dyn.cm'lik bir sismik momenti serbestlediğini göstermiştir. Kuzeydeki pürüz 30×15 km²'lik bir kırılma alanı ile 220 cm maksimum kayma genliğine ve güneydeki pürüz 12×15 km²'lik bir kırılma alanı ile 220 cm maksimum kayma genliğine sahiptir. Benzer bir kayma dağılım modeli, kayma genliklerinde küçük farklılıklar ve daha sığ güney pürüz ile rake açısının 90°-180° aralığında değişimine izin verildiğinde de elde edilmiştir. Ayrıca değişken rake açılı ters çözüm, depremin baskın olarak sağ yanal kayma nedeniyle olduğunu ve arazide gözlemlendiği gibi güney pürüzde önemli bir ters kayma bileşenine sahip olduğunu göstermiştir. Değişken rake açılı ters çözüm için sismik moment 1.18×10^{27} dyn.cm olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *İran, Lut Bloğu, Sonlu-fay modellemesi, 10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi.*

ABSTRACT

In the present study, finite-fault rupture properties of the 10 May 1997 Qa'emat, Iran, earthquake (Mw=7.2) have been investigated. A linear finite-fault inversion method developed by Hartzell and Heaton (1983) is applied to the broadband teleseismic P and SH body waveforms in order to obtain the finite-fault source properties. The multi-segment, fixed-rake angle finite-fault modeling of the 1997 Qa'emat earthquake has shown that the rupture was controlled by failure of three asperities with a maximum slip of about 340 cm over the asperity in the middle, was unilateral to the south, lasted for 36 s and released a seismic moment of 1.26×10^{27} dyn.cm. The asperity in the north has maximum slip amplitude of 220 cm with a rupture area of 30×15 km² and the asperity in the south has maximum slip amplitude of 220 cm with a rupture area of 12×15 km². A similar slip distribution model has been obtained when the rake-angle allowed to vary in the range 90°-180° with small differences in slip amplitudes and a shallower southern asperity. The variable-rake angle inversion has further shown that the earthquake was due to dominantly dextral slippage and the southern asperity has a significant reverse slip component as observed in the field. A seismic moment of 1.18×10^{27} dyn.cm was estimated for the variable-rake angle inversion.

Keywords: *Iran, Lut Block, Finite fault modelling, 10 May 1997 Qa'emat earthquake.*

* H. Durmuş

e-posta: hatice.durmus@dpu.edu.tr

GİRİŞ

10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi ($M_w=7.2$), Lut Bloğu'nun KB'sını sınırlayan Abiz Fayı üzerinde meydana gelmiştir (Şekil 1). Kuzeyde Dasht-e-Bayaz fayından güneyde Sepestan Dağına kadar uzanan bu fay üzerinde oluşan yaklaşık 125 km uzunluğunda çok segmentli KB-GD genel doğrultulu sağ-yanal doğrultu atımlı yüzey kırığı (Ikeda vd., 1999; Berberian vd., 1999; Sudhaus ve Jonsson, 2011) İran depremleri ile ilişkili bilinen en uzun yüzey kırığıdır ve kırığın kuzey kısmı daha önce 1936 ve 1979 depremleri ile kırılmıştır (Berberian vd., 1999) (Şekil 2).

U.S. Geological Survey (USGS) tarafından dış merkez koordinatları $33.83^\circ\text{K}-59.81^\circ\text{D}$ (Şekil 1b) ve odak derinliği 10 km olarak verilen (Çizelge 1) depremde 1500'den fazla insan hayatını kaybederken 2600'den fazla insan yaralanmış ve 12.000 civarı ev yıkılmıştır (Berberian vd., 1999; Walker vd., 2011). Grünthal vd. (1999) bu bölgenin doğu İran'daki en yüksek sismik tehlikeye sahip bölge olduğunu vurgulamıştır. Birçok araştırmacı ve sismoloji merkezi tarafından 1997 Qa'emat depreminin kaynak mekanizma çözümleri çeşitli veri setleri kullanılarak yapılmıştır (Çizelge 1). Bütün bu çözümler deprem için sağ-yanal doğrultu atımlı faylanmaya işaret etmektedir.

İran, kıta-kıta çarpışması (Zagros, Alborz, Kopet Dag), okyanusal litosferin kıtasal litosfer altına dalımı (Makran) ve genç orojen ile dalma-batma zonu arasındaki keskin geçiş (Minab-Zendan-Palami Fay Sistemi (MZPFS)) gibi tektonik süreçlerin karşılaştığı doğal bir laboratuvar niteliğindedir (Vernant vd., 2004) (Şekil 1a). İran'daki aktif deformasyon güneyde Arabistan plakası ile kuzeyde Avrasya plakası arasındaki yakınsamadan kaynaklanmaktadır (Berberian, 1981; Jackson ve McKenzie, 1984; Talebian ve Jackson, 2002) ve çarpışan bu iki plaka arasındaki sıkışma zonuındaki konumundan dolayı İran, dünyadaki sismik olarak en aktif bölgelerden biridir (Engdahl vd., 2006). Ambraseys ve Melville (1982), tüm İran'da 1900 yılından bu yana büyüklüğü $M>7.0$ olan bir depremin her 7 yılda bir, büyüklüğü $6.0<M<7.0$ olan bir depremin ise her iki yılda bir meydana geldiğini vurgulamıştır.

Vernant vd. (2004) tarafından elde edilen GPS kabuksal hız alanı, Arabistan plakasının Avrasya'ya göre 22 ± 2 mm/yıl hızla hemen hemen kuzeye doğru hareket ettiğini ortaya koymaktadır (Şekil 1a). Yakınsama hareketinin yatay bileşeni Zagros'ların kuzeyindeki sağ-yanal doğrultu atımlı Main Recent Fayı (MRF) ile, düşey bileşeni ise orta Zagros Bindirme Kuşağı

(ZBK) ile karşılanmaktadır. ZBK, yakınsamanın 7 ± 2 mm/yıllık kısmını karşılarken MRF boyunca sağ-yanal yer değiştirmeler yaklaşık 3 ± 2 mm/yıl'dır (Vernant vd., 2004) (Şekil 1a). Güneyde Makran dalma-batması tarafından karşılanmayan Arabistan ve Avrasya yakınsamasının bir kısmı doğu İran'da Lut Bloğundaki doğrultu atımlı faylar aracılığı ile Kopet Dag bindirme-kıvrım kuşağına aktarılmaktadır ve birçok ters fay ile bu kuşak güneyde Orta İran bloğundan ayrılmaktadır (Berberian, 1981). Vernant vd. (2004)'e göre Kopet Dag'da yakınsama hareketinin 6 ± 2 mm/yıllık kısmı karşılanmaktadır. Orta İran boylamlarında ise kısalma Zagros (7 ± 2 mm/yıl) ve Alborz kıvrım kuşakları üzerinde (8 ± 2 mm/yıl) dağılmıştır (Vernant vd., 2004; Hessami ve Jamali, 2006). Doğu ve Orta İran arasındaki iletilen kabuksal hızlardaki fark Lut bloğunun doğusu ve batısını sınırlandıran faylar boyunca karşılanmaktadır.

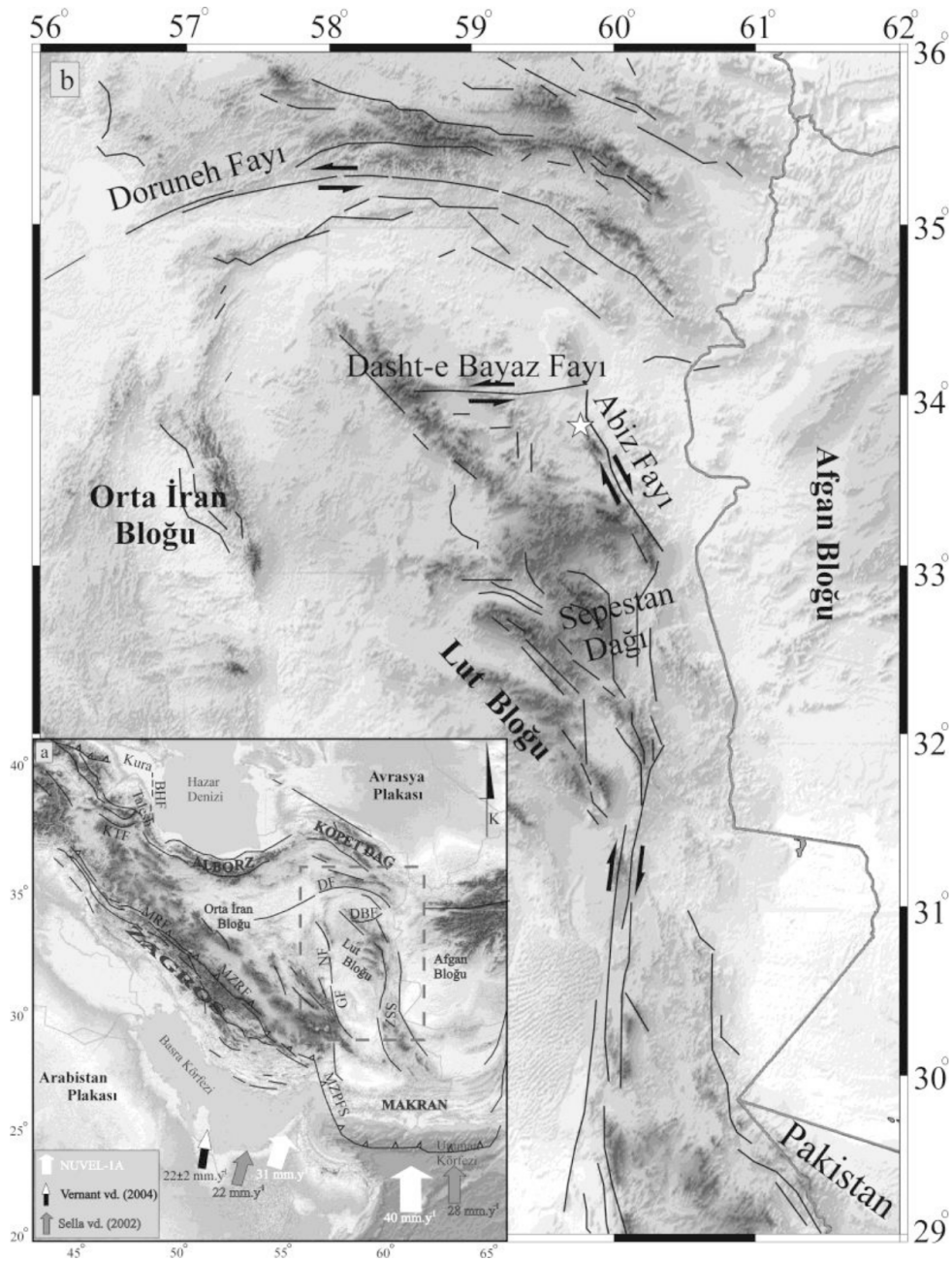
KB-GD doğrultulu ve sağ-yanal doğrultu atımlı 1997 Qa'emat depremi yüzey kırığı, kuzeyde D-B sol-yanal doğrultu atımlı fay sistemi olan Dasht-e-Bayaz fay sistemi ile kesişmektedir (Şekil 1b). Bu nedenle Qa'emat depremi, yüzey kırığı içeren büyük bir deprem olmasının yanı sıra kıtasal blokları sınırlayan doğrultu atımlı fayların kesişme bölgelerinin nasıl davrandığı ve aynı fay uzunluğu boyunca farklı zamanlarda oluşan deprem kırılmalarının birbirleri ile olan ilişkilerinin irdelenmeleri açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada yapılacak sonlu-fay ters çözümünüyle elde edilecek kayma modelinin bu irdelenmeye olanak sağlayacak bir gayret olacağı düşünülmektedir.

KULLANILAN VERİ

10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi sonlu-fay ters çözümünde, episantral uzaklıkları 36° ile 89° arasında değişen 21 istasyondaki geniş-bant P dalga şekli ile 16 istasyondaki geniş-bant SH dalga şekli kullanılmıştır. P ve SH dalga şekilleri alet tepkileri giderildikten sonra verilerin karmaşıklığı ve yüksek frekans içeriği dolayısıyla, 0.01-0.5 Hz frekans aralığında Butterworth bantgeçişli filtre kullanılarak filtrelenmiş ve 0.20 sn örnekleme aralığı ile tekrar örneklenmiştir. Ters çözümde hız kayıtları kullanılmış olup P dalga şekilleri için 50 sn'lik kayıt uzunluğu, SH dalga şekilleri için 60 sn'lik kayıt uzunluğu seçilmiştir.

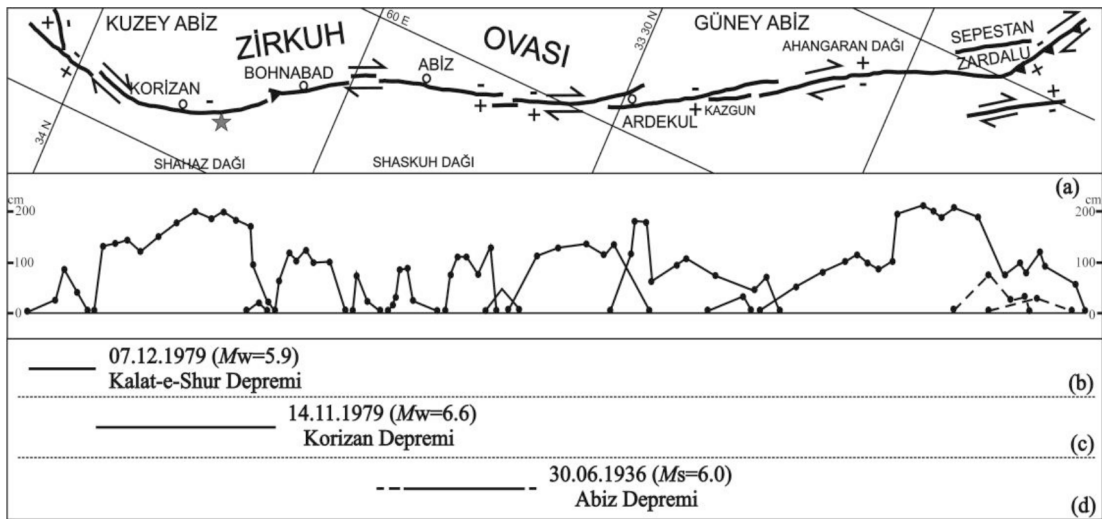
SONLU-FAY MODEL PARAMETRİZASYONU

1997 Qa'emat depreminin oluşturduğu yüzey kırığı incelendiğinde yüzey kırığının tek bir doğrultuya



Şekil 1. a) İnan'ın basitleştirilmiş tektonik haritası. Büyük oklar NUVEL-1A, Vernant vd. (2004) tarafından verilen Arabistan plakasının Avrasya'ya göre göreceli hareketini temsil etmektedir. Siyah çizgiler aktif fayları temsil etmektedir ve Vernant vd. (2004)'ten alınmıştır. BHF: Batı Hazar Fayı, DBF: Dasht-e Bayaz Fayı, DF: Doruneh Fayı, GF: Gowk Fayı, KTF: Kuzey Tebriz Fayı, MZPFS: Minab-Zendan-Palami Fay Sistemi, MRF: Main Recent Fayı, MZRF: Main Zagros Reverse Fayı, NF: Nayband Fayı, SSZ: Sistan Suture Zonu b) Doğu İnan'daki belli başlı faylar ve Lut bloğunu çevreleyen fay sistemleri. Beyaz yıldız depremin episantrını temsil etmektedir. Faylar Walker ve Khatib (2006)'dan alınmıştır

Figure 1. a) Simplified tectonic map of Iran. Large arrows represent movement of the Arabian plate relative to the Eurasian Plate given by the NUVEL-1A, Vernant et al. (2004) and Sella et al. (2002). Black lines represent active faults that were taken from Vernant et al. (2004). BHF: West Hazar Fault, DBF: Dasht-e Bayaz Fault, DF: Doruneh Fault, GF: Gowk Fault, KTF: North Tebriz Fault, MZPFS: Minab-Zendan-Palami Fault System, MRF: Main Recent Fault, MZRF: Main Zagros Reverse Fault, NF: Nayband Fault, SSZ: Sistan Suture Zone b) The major faults in the Eastern Iran and the fault systems surrounding the Lut block. White star represents epicenter of the earthquake. The faults were taken from the Walker and Khatib (2006).



Şekil 2. 10 Mayıs 1997 Qa'emat depreminin yüzey kırığı. (a) Yüzey kırığı boyunca ölçülen yer değiştirme miktarları ve (b), (c) ve (d) yüzey kırığı boyunca sırasıyla 1979 Kalat-e-Shur, 1979 Korizan ve 1936 Abiz depremlerinin tahmini kırılma uzanımlarını göstermektedir. Gri yıldız depremin episantrını temsil etmektedir. (Berberian vd. (1999)'dan değiştirilerek alınmıştır)

Figure 2. The surface rupture of the 10 May 1997 Qa'emat earthquake. (a) Amount of displacements measured along the surface rupture and (b), (c) and (d) show the approximate rupture extends of the 1979 Kalat-e-Shur, the 1979 Korizan and the 1936 Abiz earthquakes, respectively, along the surface rupture. Grey star represents epicenter of the earthquake (after Berberian et al. (1999)).

Çizelge 1. 10 Mayıs 1997 Qa'emat depreminin çeşitli araştırmacılar ve kuruluşlar tarafından verilen kaynak parametreleri.

Table 1. The source parameters of the 10 May 1997 Qa'emat earthquake given by various researchers and organizations.

	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)	Mo ($\times 10^{19}$ Nm)	Doğrultu (°)	Eğim (°)	Rake (°)
HRV(Harvard)	-	-	27	7.70	338	89	177
USGS	33.83	59.81	10	5.40	340	88	-179
Berberian vd. (1999) ¹	33.83	59.81	15	6.63	333	86	173
Sudhaus ve Jonsson (2011) ²	33.52	60.02	6	7.64	154	88	192

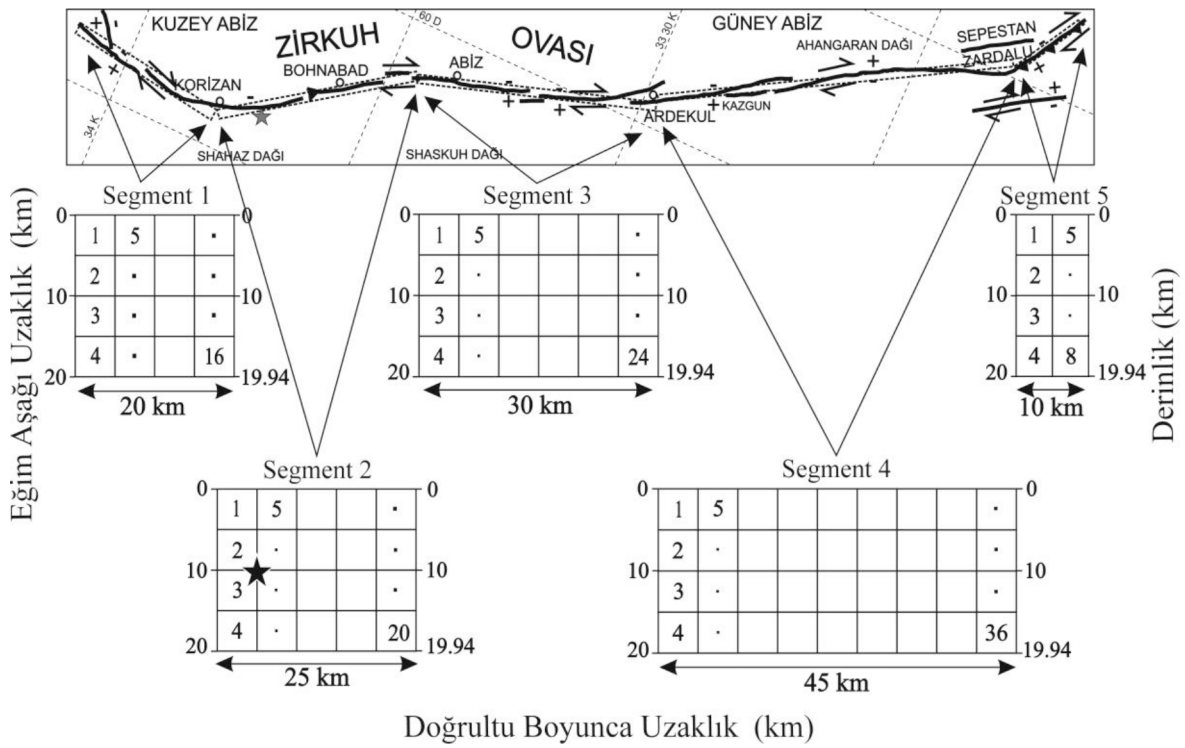
¹ Telesismik P ve SH dalga şekillerinin ters çözümünden; ² InSAR verilerinin ters çözümünden.

¹ From the inversion of teleseismic P and SH waveforms; ² From the inversion of InSAR data.

sahip olmadığı görülmektedir (Şekil 2) (Berberian vd., 1999). Kırığın kuzey kısmı (kuzeyde Dasht-e-Bayaz fayından güneyde Ardekul'a kadar), batıda Shahaz ve Shaskuh dağları ile doğuda Zirkuh ovası arasında yer alır. Bu kısımda kırığın doğrultusu, kuzeyde Dasht-e-Bayaz fayı ile kesiştiği bölgede 10° den, Korizan kasabasına yakın K-G doğrultuya ve Bohnabad yakınlarında 155°'ye değişerek önemli ölçüde değişim göstermiştir. Ayrıca doğrultunun tekrar 155° olduğu Bohnabad ile Ardekul arasında bir bükülme (S

şeklinde) meydana gelmiştir. Ardekul'un güneyindeki yüzey kırıklarının doğrultusu ise 33.16°K-60.23°D koordinatından çarpıcı şekilde 125°'ye değişir.

Çalışmada, model parametrisasyonunun karmaşıklığını azaltmak amacıyla haritalanan yüzey kırığında yaklaşık aynı doğrultuya sahip fay segmentleri tek segment kabul edilerek 5 segmentli bir sonlu-fay modeli oluşturulmuştur (Şekil 3, Çizelge 2). Buna göre yüzey kırığının Korizan kasabasının kuzeyinde



Şekil 3. 10 Mayıs 1997 Qa'emat depreminin yüzey kırığı ve ters çözüm için kullanılan beş segmentli sonlu-fay modeli. Siyah kesikli çizgili dikdörtgenler fay modelinin yüzey izdüşümünü ve gri yıldız depremin odağını temsil etmektedir. Yüzey kırığı uzanımı Berberian vd. (1999)'dan alınmıştır

Figure 3. The surface rupture of the 10 May 1997 Qa'emat earthquake and the five-segment finite-fault model used for the inversion. Black dashed outlined rectangles represent surface projection of the model fault and the grey star shows the earthquake epicenter. Extent of the surface rupture has been taken from Berberian et al. (1999)

Çizelge 2. 10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi sonlu-fay ters çözümünde kullanılan çok segmentli fay modeli parametreleri.

Table 2. The multi-segment fault model parameters used in the 10 May 1997 Qa'emat earthquake finite-fault inversion.

	Uzunluk (km)	Genişlik (km)	Doğrultu (°)	Eğim (°)	Fay Parçası Sayısı
Segment 1	20	20	190	87	16
Segment 2	25	20	140	87	20
Segment 3	30	20	164	87	24
Segment 4	45	20	330	87	36
Segment 5	10	20	118	87	8

kalan kısmı bir segmentle (Segment1), Korizan ile Abiz kasabasının hemen kuzeyi arasında kalan kısım bir segmentle (Segment 2), Abiz'in hemen kuzeyi ile Ardekul kasabası arasında kalan kısım bir segmentle (Segment 3) ve Ardekul kasabasının güneyindeki

yüzey kırıkları açık şekilde farklı doğrultuya sahip olduklarından dolayı iki farklı segmentle (sırasıyla Segment 4 ve Segment 5) temsil edilmiştir. Bu fay segmentlerinin eğimleri 87° olarak tanımlanmış ve her bir segmentin eğim aşağı genişliği 20 km olarak seçil-

miştir. Modellemede fayın üst kenarı yer yüzeyi ile çakıştırıldığından 87° eğime sahip fay modeli 19.94 km derinliğe kadar uzanmaktadır (Şekil 3).

Kullanılan ters çözüm metodu gereği çok segmentli model fay düzlemi, 5km x 5km boyutlarında toplam 104 adet fay parçasına bölünmüş (Şekil 3) ve 36 nokta kaynak her bir fay parçası üzerine düzgün olarak dağıtılmıştır. Berberian vd. (1999) da olduğu gibi USGS'in belirlediği dış merkez koordinatları (33.83°K-59.81°D) kırılmanın başlangıç noktası olarak alınmıştır. Bu dış merkez noktasının çalışmada kullanılan fay modeli üzerine izdüşümü yaklaşık 10 km derinliğe karşılık gelmektedir.

Modellemede fay parçası sentetik sismogramlarının hesaplanması için kırılma hızının başlangıçta verilmesi gerekmektedir. Deprem sırasındaki kırılma hızının ne olduğuna dair herhangi bir bilginin olmayışından dolayı başlangıçta verilmesi gereken kırılma hızı, Necioğlu (1999) tarafından verilen bölgesel kabuksal hız yapısında (Çizelge 3) üst kabuktaki ortalama makaslama dalga hızının %85'ine karşılık gelen değer olan 3.3 km/sn olarak alınmıştır.

Ters çözümde 6 zaman penceresi kullanılmıştır ve her bir zaman penceresi içinde kaynak yükselim-zaman fonksiyonu 0.5 sn yükselim ve 0.5 sn düşüme sahip eşkenar üçgen ile temsil edilmiştir. Her bir zaman penceresi bir öncekinden 1 sn geciktirilmiştir. Böylece fay düzlemi üzerindeki her bir noktada toplam 6 sn'lik bir yükselim zamanına olanak sağlanmıştır. Farklı sabit rake açıları ve rake açısının 90°-180° arasında serbest bırakıldığı birçok ters çözüm denemesi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

TERS ÇÖZÜM SONUÇLARI

1997 Qa'emat depremi için çok segmentli bir fay modeli parametrisasyonuna değinilmiş olsa da tek segmentli fay modeli ile de gözlenmiş dalga şekilleri modellenmeye çalışılmış ve birkaç deneme sonucunda tek segmentli model ile bu depremin modellenmeyeceği anlaşılmıştır. Çok segmentli fay modeli için farklı rake açılarının ve kırılma hızlarının kullanıldığı birçok ters çözüm denemesinin yanı sıra farklı eğim yönleri için de denemeler yapılmıştır (Çizelge 4). İlk iki denemede (Model QM1 ve QM2) tüm segmentlerin eğim yönleri aynı kabul edilmiş (QM1'de B-KB, QM2'de D-KD), üçüncü denemede ise (Model QM3) dördüncü segmentin eğim yönü Berberian vd. (1999) ve Sudhaus ve Jonsson (2011) tarafından belirtildiği gibi diğer segmentlerden farklı olarak doğuya eğimli kabul edilmiştir.

QM3 modeli ile yapılan denemede elde edilen hata miktarı ilk iki denemenin hata miktarından daha düşük çıkmış (Çizelge 4) ve daha sonra rake açısı ve kırılma hızlarının değiştirildiği birçok ters çözüm denemesi yapılmıştır. Başlangıç olarak kırılma hızı 3.3 km/s alınmış ve rake açıları ise Berberian vd.(1999)'da belirtilen faylanma türlerine göre her bir segment için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Buna göre ilk dört segment için sağ-yanal doğrultu atımlı faylanmayı temsil eden, beşinci segment için ise sağ-yanal doğrultu atım ve ters atım bileşen içeren rake açıları seçilmiştir. Çizelge 4'de görüldüğü gibi yapılan tüm ters çözüm denemeleri sonucunda en küçük hata miktarı Model QM7 ile elde edilmiştir.

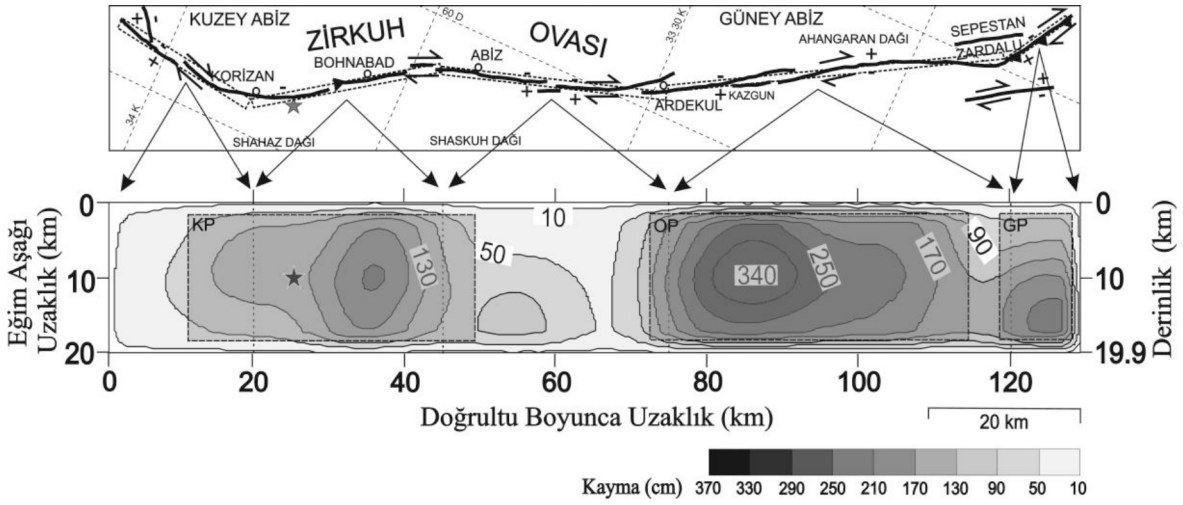
Model QM7 ters çözüm denemesi sonucunda elde edilen kayma dağılım modeli Şekil 4'de verilmiştir. Bu model için hesaplanan sentetik dalga şekilleri ile

Çizelge 3. 10 Mayıs 1997 Qa'emat depreminin sonlu-fay analizinde kullanılan kabuksal hız modeli (Necioğlu, 1999).
Table 3. The crustal velocity model used in the 10 May 1997 Qa'emat earthquake finite-fault analysis (Necioğlu, 1999).

Kalınlık (km)	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (gr/cm ³)
3.0	5.20	3.00	2.55
9.0	6.10	3.52	2.69
17.0	6.50	3.75	2.85
23.0	6.80	3.90	3.00
-	8.15	4.70	3.40

Çizelge 4. 10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi için yapılan sonlu-fay ters çözüm denemeleri.
Table 4. The finite-fault inversion trials carried out for the 10 May 1997 Qa'emat earthquake.

Model	Doğrultu (°)					Eğim (°)					Rake (°)					Kırılma Hızı (km/s)					Moment (dyn.cm)	b-ax	Varyans	Kayna Miktarı (cm)	
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅					
QM1	190	140	164	150	118	87	180	180	180	180	135	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	8.96*10 ²⁶	34.261	0.09973797	230
QM2	10	320	344	330	298	87	180	180	180	180	135	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	1.38*10 ²⁷	32.905	0.09285130	340
QM3	190	140	164	330	118	87	180	180	180	180	135	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	1.37*10 ²⁷	32.925	0.09265433	420
QM4	190	140	164	330	118	87	175	180	180	180	135	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	1.35*10 ²⁷	32.855	0.09245833	360
QM5	190	140	164	330	118	87	175	175	175	135	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	1.04*10 ²⁷	34.043	0.09887601	280
QM6	190	140	164	330	118	87	170	170	170	135	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	7.67*10 ²⁶	34.155	0.09907966	240
QM7	190	140	164	330	118	87	-175	-175	-175	135	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	1.26*10 ²⁷	32.597	0.09070893	340
QM8	190	140	164	330	118	87	-170	-170	-170	135	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	9.75*10 ²⁶	33.470	0.09521810	260
QM9	10	320	344	330	298	87	-175	-175	-175	135	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	1.11*10 ²⁷	33.283	0.09466400	270
QM10	190	140	164	330	118	87	-175	-175	-175	135	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	1.08*10 ²⁷	33.551	0.09607148	230
QM11	190	140	164	330	118	87	-175	-175	-175	135	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	1.39*10 ²⁷	32.729	0.09176625	270
QM12	190	140	164	330	118	87	90-180					3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	1.18*10 ²⁷	32.790	0.09255265	310



Şekil 4. 10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi yüzey kırıkları haritası (üstte) ve sabit rake açısı kullanılarak yapılan ters çözüm denemeleri sonucu tercih edilen kayma dağılım modeli (altta). Kayma dağılımı Tablo 4'de Model QM7'ye karşılık gelmektedir. 10 cm'den büyük kaymalar 40 cm aralıklarla konturlanmıştır. Yüzey kırıkları Berberian vd. (1999)'dan alınmıştır. Yıldız depremin odağını temsil etmektedir. Siyah kesikli çizgili dik-dörtgenler fay modelinin yüzey izdüşümünü ve kuzey, orta ve güney pürüzleri (sırasıyla KP, OP ve GP) çevrelenmiştir.

Figure 4. The map of surface ruptures of the 10 May 1997 Qa'emat earthquake (top) and the slip distribution model preferred for the fixed-rake inversion trials (bottom). The slip distribution corresponds to Model QM7 in Table 4. Slips larger than 10 cm are contoured with 40 cm intervals. The surface rupture has been taken from Berberian et al. (1999). Star represents hypocenter of the earthquake. Black dashed outlined rectangles represent surface projection of the model fault and northern, middle and southern asperities (KP, MP and SP, respectively) are enclosed.

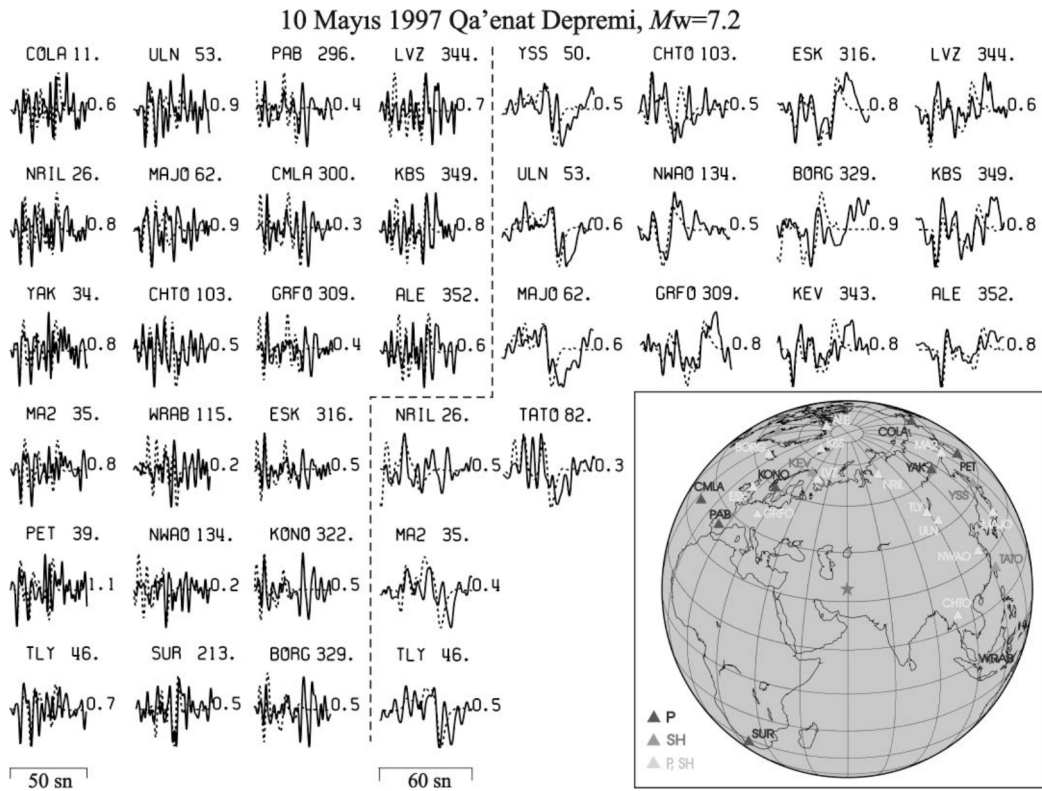
gözlenmiş dalga şekilleri ise Şekil 5'de karşılaştırılmıştır. Elde edilen kayma dağılım modeli incelendiğinde (Şekil 4) depremin üç fay pürüzünün kırılması ile oluştuğu ve en büyük yer değiştirmenin 3.5 m civarında olduğu görülmektedir.

TARTIŞMA

Üç fay pürüzünden kırılmanın başladığı Kuzey Pürüzü (KP), yüzey kırığının Korizan kasabasının kuzeyi ile Abiz kasabası arasındaki kesiminde yerleşmiş olup maksimum kayması 220 cm'dir. KP yaklaşık 30x15 km²'lik bir fay alanında 100 cm ve üzeri kayma değerlerine sahiptir. Maksimum kaymanın 340 cm'yi aştığı Orta Pürüz (OP) ise Ardekul kasabası ile güneydoğuda yüzey kırıklarının GD'ya doğru keskin bir doğrultu değiştirdiği kısım arasında yerleşmiştir. 1997 Qa'emat depreminin en güneyindeki ve en küçük kırılma alanını örten pürüzünü teşkil eden Güney Pürüzü (GP) ise yaklaşık 15x15 km²'lik bir kırılma alanına sahiptir.

Sabit rake açısı kullanılarak yapılan ters çözüm denemelerinin ardından rake açısının serbest bırakıldığı

bir ters çözüm denemesi yapılmıştır (Çizelge 4, Model QM12). Yüzey kırığının en güneyinde gözlenen önemli ters faylanmalı kayma (Şekil 2) gözetilerek rake açısı 90°-180° arasında serbest bırakılmıştır. Bu ters çözüm denemesi sonucu elde edilen kayma dağılım modeli ve bu model için hesaplanan sentetik sismogramlarla gözlenmiş sismogramların karşılaştırılması sırasıyla Şekil 6 ve 8'de verilmiştir. Şekil 4 ve 6'daki kayma dağılım modellerinin karşılaştırılmasından görüleceği üzere rake açısının sabit alınması veya 90°-180° arasında serbest bırakılması ile elde edilen kayma dağılımları genel anlamda birbirine benzerlik göstermektedir. Vurgulanabilecek farklar her üç pürüz için de en büyük kayma değerlerinin değişken rake açılı model için daha düşük olması ve GP'nin daha sığda yerleşmesi şeklinde sıralanabilir. Şekil 6 ayrıca kaymanın doğrultu atımlı ve ters atımlı kayma bileşenlerini de göstermektedir. Görüleceği üzere 1997 Qa'emat depremi kırılmasında doğrultu atımlı kayma bileşeni baskındır. Ancak, faylanmanın en güneyindeki 20 km'lik bölümünde ters faylanmalı kaymanın sağ-yanal kaymaya denk genliklere eriştiği de not edilmelidir ki bu sonuç, depremin haritalanan



Şekil 5. Gözlenmiş dalga şekilleriyle (sürekli çizgi) sabit-rake açılı ters çözümlerden 10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi için tercih edilen kayma dağılım modelinden hesaplanmış dalga şekillerinin (kesikli çizgi) karşılaştırılması. Sismogram çiftlerinin üstünde istasyon adı ve azimutları ve sağında ise sentetik/gözlenmiş dalga şekli genlik oranları gösterilmiştir. Ters çözümden kullanılan istasyonların azimutal dağılımları sağ alt köşede gösterilmiştir.

Figure 5. The comparison observed waveforms (continuous line) and synthetic waveforms (dashed line) for the preferred slip distribution model resulted from the fixed-rake inversions for the May 10, 1997 Qa'emat earthquake. The station name and azimuths are shown above the pair of seismograms and the synthetic/observed wave amplitude ratios are shown on the right of the seismogram pairs. The azimuthal distributions of the stations used in the inverse solution are shown in the bottom right corner.

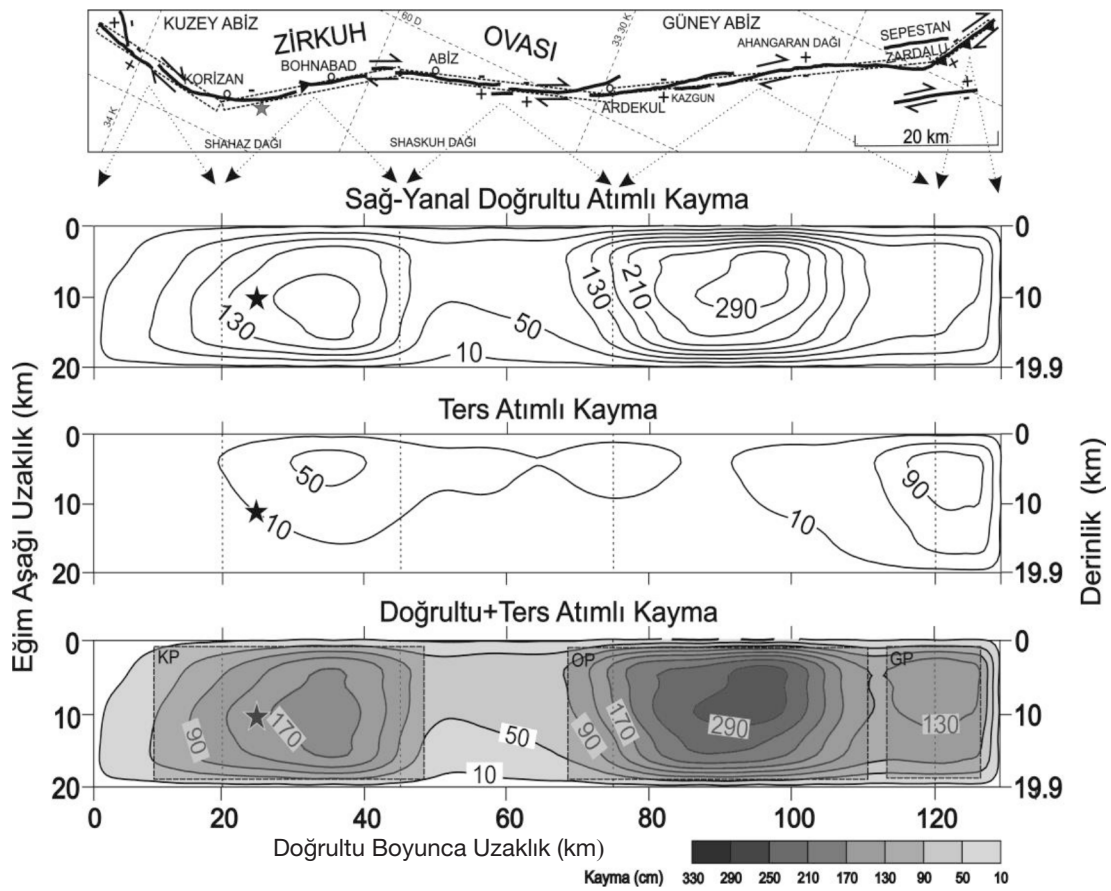
yüzey kırığının bu kesiminde yüzeyde gözlemlenen ters atımlı yer değiştirmelerle de uyumludur.

Şekil 6, KP'nin sığ kesimlerinde de genliği 50 cm'yi aşan ters faylanmalı kaymaya işaret etmektedir. Fayın doğrultusunun KB-GD'dan K-G'e değiştiği bu kesimde (Bohnabad yerleşimi civarı) yüzeyde Berberian vd. (1999) 70 cm'ye yakın ters atımlı yer değiştirme rapor etmiştir. Bu kayma dağılım modeli için elde edilen sismik moment 1.18×10^{27} dyn.cm'dir.

Şekil 4 ve 6'da verilen her iki kayma dağılım modeli de 1997 Qa'emat depremi için genel olarak güneye doğru tek taraflı bir kırılmaya işaret etmektedir. KP'nin yenilmesiyle başlayan kırılma, kayma genliğinin 50 cm civarına düştüğü Abiz ve Ardekul yerleşimleri arasındaki göreceli olarak moment serbestlenmesindeki

düşüşün ardından en büyük pürüz OP'nin ve ardından GP'nin yenilmesiyle devam etmiştir. Bu durum kırılmanın uzay-zaman evriminin gösterildiği Şekil 8'de açıkça gözlenebilmektedir.

Kırılma odakta başlamış, yaklaşık 6 saniye iki yönlü olarak ilermiş (kuzeybatı ve güneydoğuya doğru) ve daha sonra tek yönlü olarak güneydoğuya doğru yayılmasını sürdürmüştür. KP'nin kırılması yaklaşık 8 sn sürmüş, OP'nin kırılması 18 ile 30 sn arasında gerçekleşmiş ve bunu son 6 sn'de GP'nin yenilmesi izlemiştir. Toplam kırılma 36 saniye de gerçekleşmiştir. OP'nin en büyük kayma bölgesindeki kaymanın 5 sn civarında sürdüğü görülmektedir. Bu da bu deprem için yükselim zamanının 4-5 sn civarında olduğunu önermektedir. Gheitanchi ve Raeesi (2004), 1997



Şekil 6. 10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi yüzey kırıkları haritası (üstte) ve değişken rake açısı (90° - 180° arasında) kullanılarak yapılan ters çözüm denemeleri sonucu tercih edilen kayma dağılım modeli (altta). Kayma dağılımı Tablo 4'de Model QM12'ye karşılık gelmektedir. 10 cm'den büyük kaymalar 40 cm aralıklarla konturlanmıştır. Yüzey kırıkları Berberian vd. (1999)'dan alınmıştır. Yıldız depremin odağını temsil etmektedir. Siyah kesikli çizgili dikdörtgenler fay modelinin yüzey izdüşümünü ve kuzey, orta ve güney pürüzleri (sırasıyla KP, OP ve GP) çevrelenmiştir.

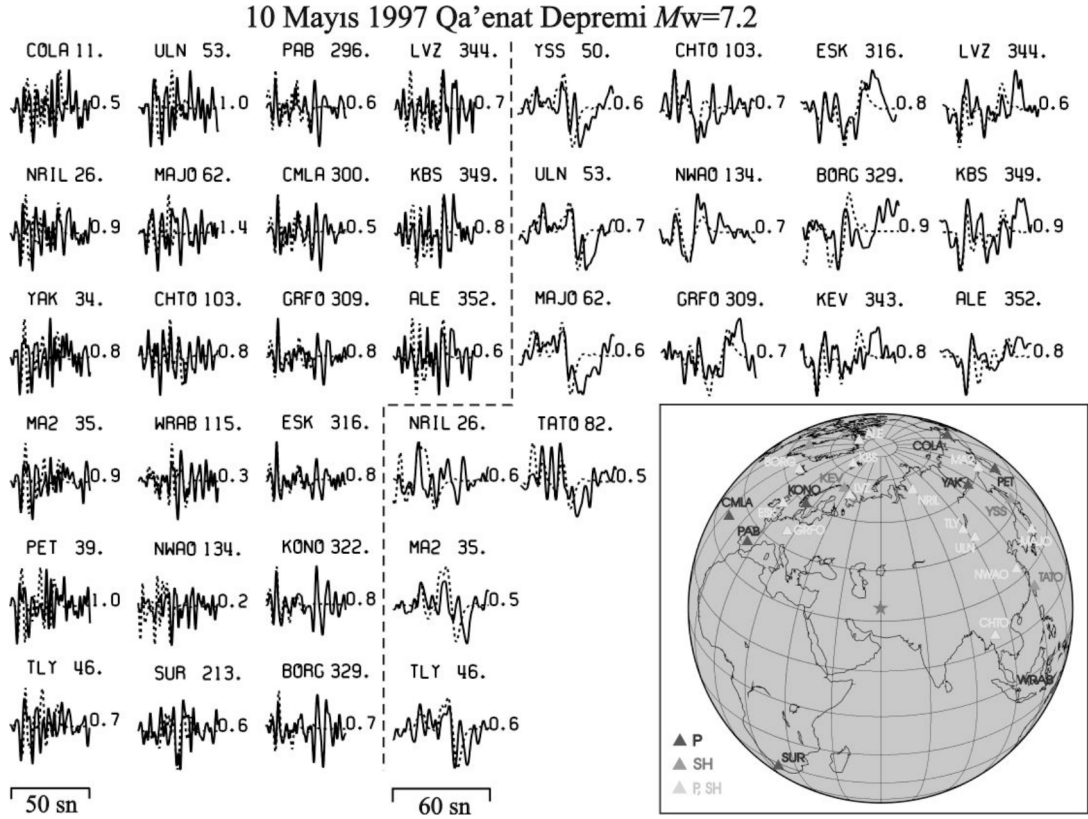
Figure 6. The map of surface ruptures of the 10 May 1997 Qa'emat earthquake (top) and the slip distribution model preferred for the variable-rake (between 90° - 180°) inversion trials (bottom). The slip distribution corresponds to Model QM12 in Table 4. Slips larger than 10 cm are contoured with 40 cm intervals. The surface rupture has been taken from Berberian et al. (1999). Star represents hypocenter of the earthquake. Black dashed outlined rectangles represent surface projection of the model fault and northern, middle and southern asperities (KP, MP and SP, respectively) are enclosed.

Qa'emat depreminin artçı deprem aktivitesinin analizini yaptığı çalışmada artçı deprem dağılımlarının genel olarak depremin yüzey kırığı boyunca KB-GD yönelimli olduğunu vurgulamıştır. Bu da yukarıda Şekil 8 ile açıklanan kırılmanın kuzeybatıda başlayarak güneydoğuya doğru ilerlediği ifadesini desteklemektedir.

1997 Qa'emat depremi kırılma süreci için literatürde yer alan iki çalışma bulunmaktadır. Bunlardan biri (Berberian vd., 1999) telesmik P ve SH cisim dalgası şekillerinin nokta kaynak ters çözümlemesi, diğeri ise InSAR verilerinden bulunan çok segmentli sonlu-

fay kayma dağılım modelidir (Sudhaus ve Jonsson, 2011). Önceki kırılma modelleri bu çalışmada belirlenen sonlu-fay kayma dağılım modelleri ile Şekil 9'da karşılaştırılmıştır. Genel olarak kaynak modelleri arasında bir benzerlik olduğu söylenebilir (Şekil 9).

Berberian vd (1999)'un 4 alt olaylı (Şekil 9'da S1, S2, S3 ve S4) nokta kaynak modelinde nokta kaynakların, kırılan fay uzunluğu üzerindeki uzay-zaman konumları bu çalışmada belirlenen pürüz lokasyonları ile uyumludur. Şekil 9'da görüleceği üzere KP, OP ve GP sırasıyla S1, S3 ve S4 alt olayları ile uzay-zaman konumları ve faylanma tipleri açısından benzerlik



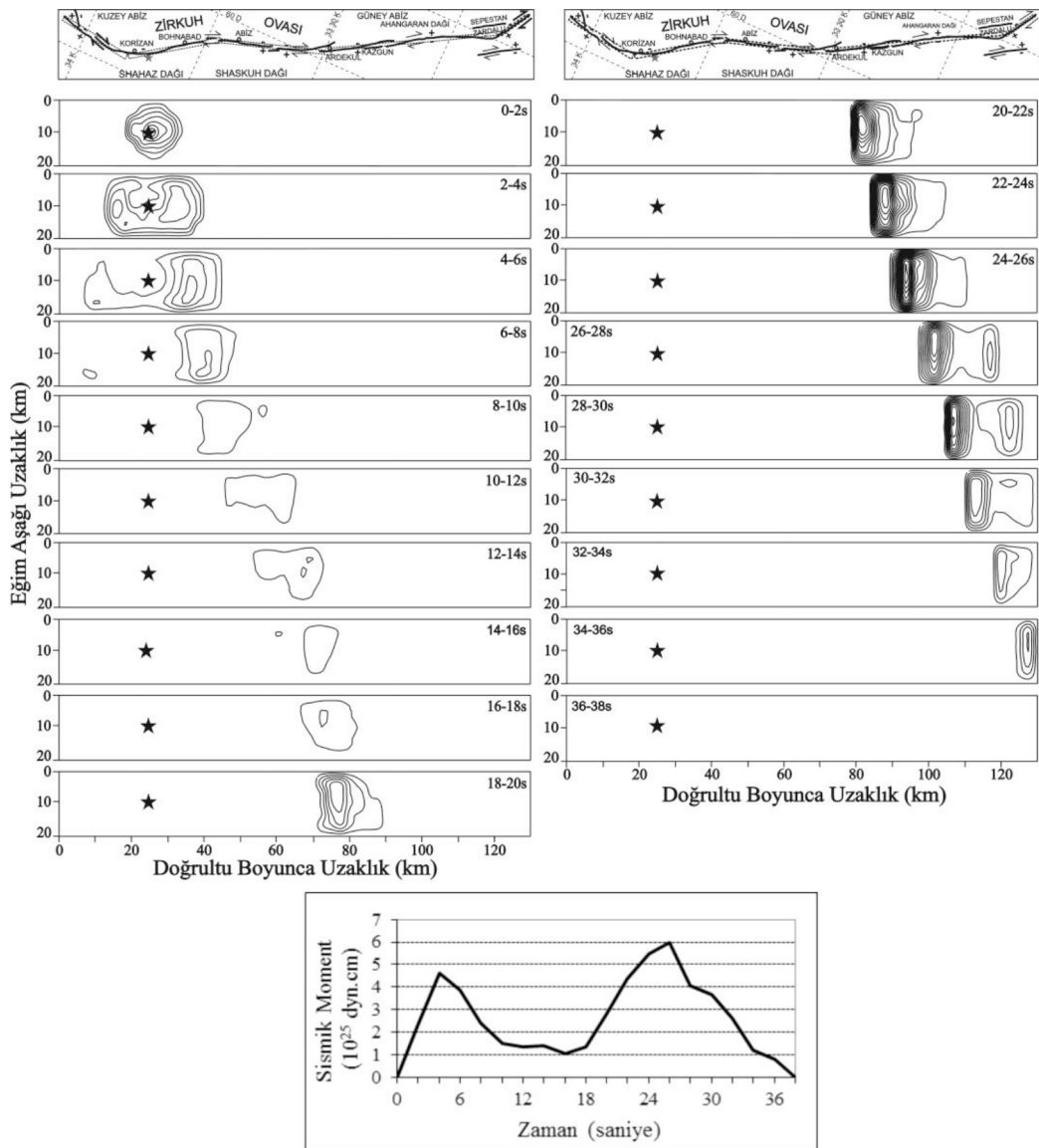
Şekil 7. Gözlenmiş dalga şekilleriyle (sürekli çizgi) değişken-rake açılı ters çözümlerden 10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi için tercih edilen kayma dağılım modelinden hesaplanmış dalga şekillerinin (kesikli çizgi) karşılaştırılması. Sismogram çiftlerinin üstünde istasyon adı ve azimutları ve sağında ise sentetik/gözlenmiş dalga şekli genlik oranları gösterilmiştir. Ters çözümde kullanılan istasyonların azimutal dağılımları sağ alt köşede gösterilmiştir.

Figure 7. The comparison observed waveforms (continuous line) and synthetic waveforms (dashed line) for the preferred slip distribution model resulted from the variable-rake inversions for the May 10, 1997 Qa'emat earthquake. The station name and azimuths are shown above the pair of seismograms and the synthetic/observed wave amplitude ratios are shown on the right of the seismogram pairs. The azimuthal distributions of the stations used in the inverse solution are shown in the bottom right corner.

göstermektedir. S2 alt olayının olduğu bölgede çalışmada bulunan gerek sabit ve gerekse değişken rake açılı kayma modelleri göreceli olarak düşük kayma (0.5-1 metre arası) önermektedir. S2'nin S1 ve S3'e göre daha küçük (S1'den yaklaşık 3 kat S3'den yaklaşık 5 kat daha küçük) olması da bir benzerlik olarak ifade edilebilir. Ancak S2 sağ-yanal doğrultu atımlı faylanma bileşeni olsa da ters faylanma ağırlıklı bir kaynaktır. Bu çalışmada bulunan değişken rake açılı model bu kaynağın bulunduğu fay alanında ters faylanma bileşenine işaret etse de ağırlıklı olarak sağ-yanal faylanma ifade etmektedir (Şekil 9).

Çalışmada bulunan kayma modelleri ile Sudhaus ve Jonsson (2011)'in InSAR verilerinden bulunduğu sonlu-fay kayma modeli karşılaştırıldığında uyum yukarıda

söz edilen nokta kaynak modellemesi sonuçlarına göre daha az olmasına rağmen önemli benzerlikler de ifade edilebilir (Şekil 9). InSAR modelindeki Korizan kasabası ve odak güneyinde yer alan 3 metre üzeri kayma ve Ardekul kasabası güneyindeki genel olarak 3 metreden daha az kaymaya sahip pürüzler KP ve OP'nin konumları ile benzerdir. Ancak bu çalışmadaki modeller OP'nin hem kırılma alanı hem de kayma genliği açısından daha büyük bir pürüz olduğunu önermektedir. GP'nin bulunduğu bölgede InSAR modelinin de ters faylanma ağırlıklı bir faylanma önermesi diğer önemli bir benzerlik olarak ifade edilebilir. En önemli fark Ardekul kasabası kuzeyinde KP ile OP arasındaki kayma boşluğunda yerleşmiş ve kayma genliği yer yer 3 metreyi aşan önemli bir



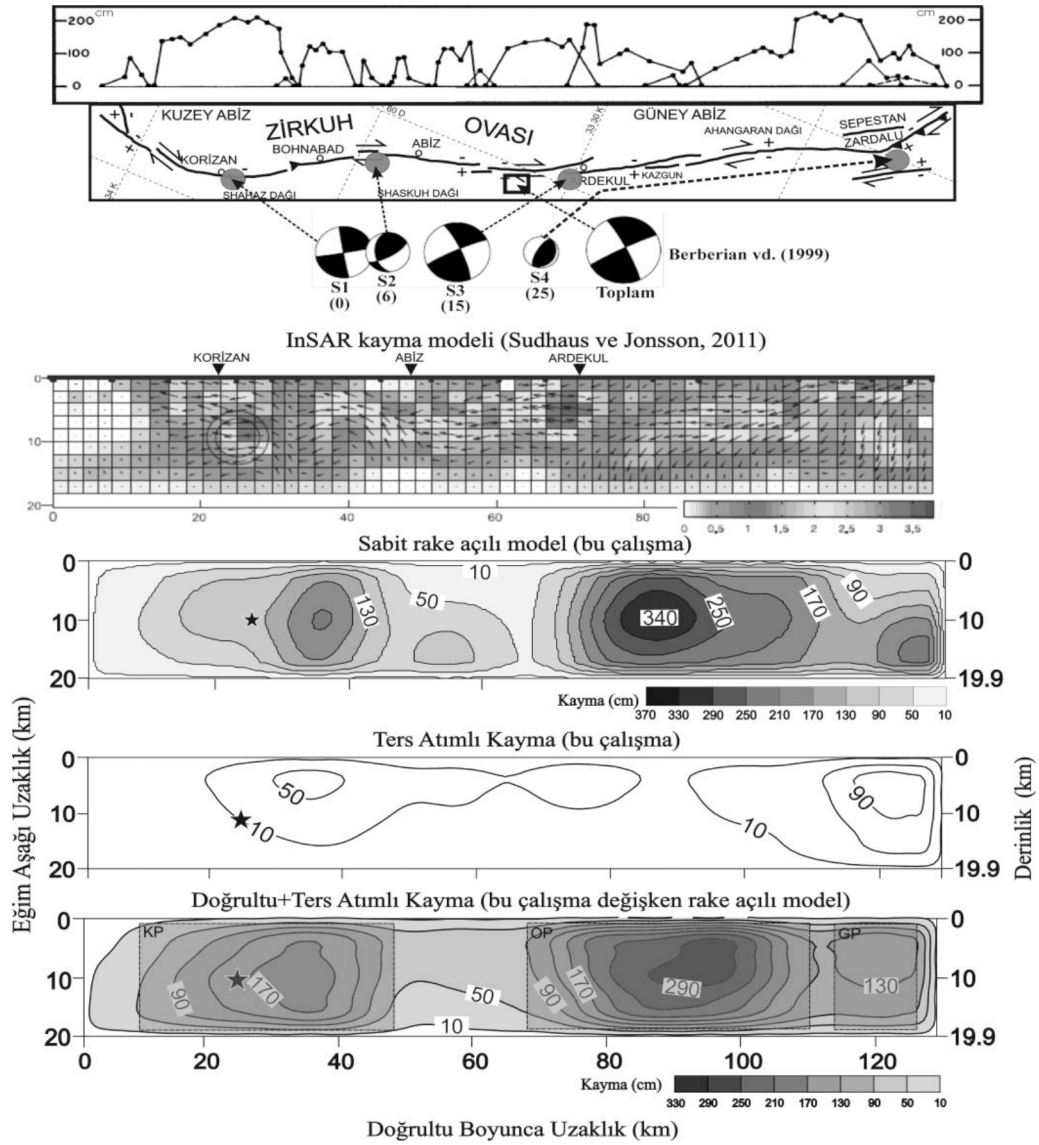
Şekil 8. 10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi kırılmasının 2 saniye zaman aralıkları ile hesaplanan uzay-zaman evrimi (üst-te) ve sismik moment serbestlenmesini tanımlayan kaynak-zaman fonksiyon (altta). 10 cm'nin üzerindeki kaymalar 10 cm aralıklarla konturlanmıştır. Yıldız depremin odağını göstermektedir.

Figure 8. The space-time evolution of the May 10, 1997 Qa'emat earthquake calculated for 2 seconds time intervals (top) and source-time function defining the seismic moment release. The slips over the 10 cm are contoured with 10 cm intervals. The star shows hypocenter of the earthquake.

pürüzün InSAR modelinde görülmesidir. Bu pürüzün güney bölümü OP'nin kuzey kenarıyla kayma genliği olarak olmasa da konum olarak örtüşmektedir (Şekil 9).

InSAR ile yapılan çalışmada bulunan kayma modelleri arasındaki farkların çeşitli nedenleri olduğu tartışılabilir. En önemli nedenin kullanılan verilerin kayma yükselim zamanına olan duyarlılıklarının farklı olması

olduğu düşünülmüştür. Çalışmada deprem dalga şekilleri kullanıldığından bulunan modeller kosmik kayma dağılımlarıdır (kayma yükselim zamanı genel olarak <10sn). Sudhaus ve Jonsson (2011)'in kullandığı InSAR verisi 1997 Qa'emat depremi sonrası 1-2 yıllık bir zaman aralığını kapsamaktadır. Dolayısıyla InSAR kayma dağılımı sadece kosmik değil post-sismik kaymayı (kayma yükselim zamanı aylar mertebesinde) ve artçı deprem aktivitesine ait kaymaları



Şekil 9. 10 Mayıs 1997 Qa'emat depremi yüzey kırığı boyunca ölçülen yer değiştirme miktarları (en üst çerçeve), yüzey kırığı uzanımı (üstten ikinci çerçeve), Berberian vd. (1999)'un belirlediği telesismik kırılma sürecindeki nokta kaynakların (S1, S2, S3 ve S4 etiketli siyah daireler) konumları ve kaynak mekanizmaları (siyah-beyaz plaj topları), Sudhaus ve Jonsson (2011)'in InSAR kayma dağılım modeli (üstten üçüncü çerçeve) ve bu çalışmada bulunan sonlu-fay kayma dağılımları (son üç çerçeve). Nokta kaynaklarının altında parantez içindeki rakamlar, nokta kaynakların kırılma başlangıcından kaç saniye sonra kırıldıklarını temsil etmektedir. InSAR kayma modelindeki büyük daire ve çalışmada bulunan kayma modellerindeki siyah yıldızlar depremin odağını göstermektedir. Kesikli dikdörtgenlerle çevrili gri alanlar pürüzleri temsil etmektedir.

Figure 9. The slip distribution along the May 10, 1997 Qa'emat earthquake's surface rupture (top frame), surface rupture extend (second frame from the top), the location of point sources (solid circles labeled as S1, S2, S3 and S4) and the source mechanisms (black and white beach balls) from the teleseismic rupture process of Berberian et al. (1999), InSAR slip distribution model of Sudhaus and Jonsson (2011) (third frame from the top) and the finite fault slip distribution models from the present study (the last three frames). The numbers in parentheses below the point sources represent their rupture time after the rupture initiation. The large circle in the InSAR slip model and the black stars in the slip models show the hypocenter. The dashed grey areas enclosed with rectangles represent the asperities.

da içermektedir. Nitekim Sudhaus ve Jonsson (2011), modellerinin ters faylanmalı 16 Haziran 1997 ve doğrultu atım faylanmalı 25 Haziran 1997 artçı depremlerinin kaymalarını da içerdiğini kendileri ifade etmiştir. Bu açıdan KP ve OP arasında yerleşmiş ve OP'nin kuzey kenarında kaymasının azaldığı bölge ile örtüşen InSAR kayma modelindeki pürüzün kaymasının daha çok postsismik kayma olabileceği tartışılabilir.

Çalışmada bulunan kayma modelleri ile InSAR kayma modeli arasında ayrıntıda ifade edilebilecek farkların kullanılan verinin çözünürlüğü ve model parametrisasyonu ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Sudhaus ve Jonsson (2011) 17 segmentli bir fay modeli kullanmış ve bu fay segmentleri bir kenarı 2.25 km olan onlarca kare şeklinde fay parçasına bölünmüştür. Bu çalışmada kullanılan veri bu şekilde bir model parametrisasyonu için yeterli çözünürlüğe sahip değildir. Bu nedenle InSAR kayma modeli oldukça ayrıntılı iken çalışmada bulunan kayma modelleri kaynağın göreceli olarak daha genel bir görüntüsünü vermektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, 10 Mayıs 1997 Qa'emat ($M_w=7.2$) depreminin sonlu-fay kırılma özellikleri telesismik genişbant P ve SH dalga şekillerinin ters çözümünden belirlenmiş ve ters çözüm sonuçları Çizelge 4'de özetlenmiştir. Doğu İran'da Abiz fayı üzerinde meydana gelen ve çok segmentli bir yüzey kırığı üreten 1997 Qa'emat depremi kırılmasının üç fay pürüzünün yenilmesi ile kontrol edildiği ve toplamda kırılmanın 36 sn sürerek yaklaşık 1.26×10^{27} dyn.cm'lik bir sismik momenti serbestlediği görülmüştür. Kırılmanın başladığı Kuzey Pürüzü (KP), yüzey kırığının Korizan kasabasının kuzeyi ile Abiz kasabası arasında yerleşmiş olup maksimum kayması 220 cm'dir. KP yaklaşık 30×15 km²'lik bir fay alanında 100 cm ve üzeri kayma değerlerine sahiptir. Maksimum kaymanın 340 cm'yi aştığı Orta Pürüz (OP) ise Ardekul kasabası ile güneydoğuda yüzey kırıklarının güneydoğuya doğru keskin bir doğrultu değiştirdiği kısım arasında yerleşmiştir. 1997 Qa'emat depreminin en güneyinde ki ve en küçük kırılma alanını örten pürüzünü teşkil eden Güney Pürüzü (GP) ise yaklaşık 15×15 km²'lik bir kırılma alanına sahiptir. Rake açısının 90° - 180° aralığında değişimine izin verildiği ters çözümde kayma genliklerinde küçük farklılıklar ve daha sığ güney pürüzü hariç benzer bir kayma dağılım modeli elde edilmiştir. Değişken rake açılı ters çözüm, depremin

baskın olarak sağ yanal kayma nedeniyle olduğunu ve arazide gözlemlendiği gibi güney pürüzde önemli bir ters kayma bileşenine sahip olduğunu göstermiştir. Değişken rake açılı ters çözüm için sismik moment 1.18×10^{27} dyn.cm olarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- Ambraseys, N.N. and Melville, C.P., 1982. A History of Persian Earthquakes. Cambridge University Press, New York.
- Berberian, M., 1981. Active faulting and tectonics of Iran, in Zagros, Hindu Kush, Himalaya: Geodynamic Evolution, Geodyn. Ser., vol. 3, edited by H. K. Gupta and F.M. Delany, pp. 33-69, AGU, Washington, D.C., doi: 10.1029/GD003p0033.
- Berberian, M., Jackson, J.A., Qorashi, M., Khatib, M.M., Priestley, K., Talebian, M. and Ghafuri-Ashtiani, M., 1999. The 1997 May 10 Zirkuh (Qa'emat) earthquake (M_w 7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran. Geophys. J. Int., 136, 671-694.
- Engdahl, E.R., Jackson, J.A., Myers, S.C., Bergman, E.A. and Priestley, K., 2006. Relocation and assessment of seismicity in the Iran region. Geophys. J. Int., 167 (2), 761-778, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03127.x,
- Gheitanchi M. R. and Raeesi, M., 2004. Analysis of the 1997 Zirkuh (Ghaen-Birjand) aftershock sequence in east-central Iran. Acta Seismologica Sinica, 17 (1): 38-46.
- Grunthal, G., Bosse, C., Sellami, S., Mayer-Rosa, D. and Giardini, D., 1999. Compilation of the GSHAP regional seismic hazard for Europe, Africa and the Middle East. Annali di Geofisica, Vol. 42, No. 6, 1215-1223.
- Hartzell, S. H. and Heaton, T. H., 1983. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. Bull. Seism. Soc. Am. 73, No. 6, 1553-1583.
- Hessami, K. and Jamali, F., 2006. Explanatory Notes to the Map of Major Active Faults of Iran. JSEE: Spring 2006, Vol. 8, No. 1.
- Ikeda, Y., Imaizumi, T., Sato, H., Hessami, K. and Khatib, M.M., 1999. Surface faults associated with the Qayen, northeast Iran, earthqu-

- ake of May 10, 1997. *Active Fault Res.*, 18, 1–13.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984. Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 77, 185-264.
- Necioğlu, A., 1999. Determination of crustal and upper mantle structure between Iran and Turkey from the dispersion of Rayleigh waves. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, Vol. 2, No 4, pp. 139-150.
- Sella, G.F., Dixon, T.H. and Mao, A., 2002. REVEL: A model for Recent plate velocities from space geodesy. *J. Geophys. Res.*, Vol. 107, No. B4, 2081, doi:10.1029/2000JB000033.
- Sudhaus, H. and Jonsson, S., 2011. Source model for the 1997 Zirkuh earthquake (MW=7.2) in Iran derived from JERS and ERS InSAR observations. *Geophys. J. Int.*, 185, 676–692, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.04973.x.
- Talebian, M. and Jackson, J., 2002. Offset on the Main Recent fault of NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia- Eurasia collision zone. *Geophys. J. Int.*, 150, 422–439.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. and Chery, J., 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J. Int.*, 157, 381-398, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02222.
- Walker, R.T. and Khatib, M.M., 2006. Active faulting in the Birjand region of NE Iran. *Tectonics*, Vol. 25, TC4016, doi:10.1029/2005TC001871.
- Walker, R.T., Bergman, E.A., Szeliga, W. and Fiel-ding, E.J., 2011. Insights into the 1968–1997 Dasht-e-Bayaz and Zirkuh earthquake sequences, eastern Iran, from calibrated relocations, InSAR and high-resolution satellite imagery. *Geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05213.x.

