

1994-2004 El Hüseyma (Fas) depremleri: Eşlenik faylanmanın SAR interferometrisi ile tayini

Ahmet M. AKOĞLU*, Ziyadin ÇAKIR

İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, Katı Yer Bilimleri/Jeodinamik Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Fas'ın El Hüseyma şehri 10 yıl arayla 26 Mayıs 1994 ve 24 Şubat 2004 tarihlerinde meydana gelen iki deprem ($M_w=6.0$; $M_w=6.5$) ile sarsılmıştır. Gömülü doğrultu atımlı faylarda meydana gelen bu depremlerde yüzey kırığı oluşmamıştır. Aktif doğrultu atımlı faylar boyunca gözlenen morfolojik yapıların topoğrafyada çok belirgin olmaması ve sismik gözlemlerin yetersizliği nedeniyle bu iki depremin hangi faylar üzerinde oluştuğu, kinematikleri ve birbirleri arasındaki ilişki ortaya çıkartılamamıştır. Bu çalışmada Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) Envisat ve ERS uydularına ait radar görüntüleri Sentetik Açıklık Radar İnterferometrisi (InSAR) yöntemi ile işlenip bu iki depremin yeryüzünde meydana getirdiği yüzey deformasyonu farklı bakış açılarından haritalanmış ve atım dağılımları modellenmiştir. Elde edilen kosismik interferogramlar ve nihai fay modelleri depremlerin eşlenik faylar üzerinde meydana gelmiş olduğunu; 1994 depreminin sol yanal olup $K23^\circ D$ doğrultusunda, 2004 depreminin ise sağ yanal ve $K45^\circ B$ doğrultusunda olduğunu göstermektedir. Bu sonuç önceki araştırmalarda sismolojik analizlerden elde edilen çıkarımlar ile çelişmektedir. Son zamanlarda oluşan doğrultu atımlı faylarla ilişkili deprem aktivitesi göstermektedir ki Kuzey Afrika-Avrasya levha sınırındaki Rif bölgesi doğusunda ve batısında bindirme faylarıyla ilişkili depremlerin etkisi altındaki kuzey Cezayir ve Kadiz bölgelerinden sismotektonik açıdan farklılık göstermektedir. El Hüseyma ve civarında topoğrafyadaki hakim morfolojik yapıların halen sıkışma rejimi ürünleri olmaları bu bölgedeki D-B yönelimli açılma ile uyumlu doğrultu atımlı tektonik rejimin yakın zamanda başladığı fikrini desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Eşlenik faylanma, InSAR, Rif, Fas, El Hüseyma, aktif tektonik

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ahmet M. AKOĞLU. akoglua@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 63 20.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, Katı Yer Bilimleri Jeodinamik Programı'nda tamamlanmış olan "Analysis and modelling of earthquake deformation with SAR interferometry: Case studies from Turkey and the World" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 26.03.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 21.04.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

The 1994-2004 Al Hoceima (Morocco) earthquake sequence: conjugate fault ruptures deduced from InSAR

Extended abstract

We study the two North African earthquakes, May 26, 1994 ($M_w=6.0$) and February 24, 2004 ($M_w=6.4$) earthquakes that affected the Al Hoceima region of northern Morocco with the available InSAR data collected from both the ascending and descending orbits. Being the strongest earthquakes ever to be recorded instrumentally in the region, the analysis of the earthquakes has an important role in the tectonics of the region.

The Rif Cordillera belong to the E-W trending thrust-and-fold system of north Africa that results from the collision between Africa and Eurasia. The system includes the Tell Atlas mountain ranges of Algeria and Tunisia along the Mediterranean coast to the east, and forms a collision tectonics strip along the African-Eurasian plate boundary. The ongoing shortening rate between the two plates decreases towards the west from 6.3 to 2.3 mm/yr from Sicily to northern Morocco. The seismicity along the boundary is rather complex and varies significantly from west to east. The Al Hoceima sequence indicate that the Rif is being deformed under a strike-slip tectonic regime. However adjacent regions in northern Algeria to the east and the Gulf of Cadiz to the west are subject to thrust faulting. Neotectonic features of the Rif consist of the major Nekor and Jebha, NE-SW trending left-lateral strike slip faults accompanied by N-S trending normal faults that form a graben-like structure east of Al Hoceima and a conjugate network of relatively small NW-SE and NE-SW strike-slip faults. The transpressive tectonics and existence of a complex fault network with different types of faulting in the Rif probably reflect the rapidly changing local tectonic regime with block rotations during the Neogene and Quaternary. Several strong earthquakes are known to have occurred in the historical times.

The exact location, kinematics and relationships between the 1994 and 2004 earthquakes are poorly known since neither of them produced surface ruptures. Using Synthetic Aperture Radar interferometry (InSAR) we mapped the surface displacement

field of the two earthquakes to characterize their seismic source parameters. The availability of ascending and descending interferograms for both earthquakes allows us to constrain their rupture parameters with high confidence. We used European Space Agency's (ESA) ERS and Envisat SAR data, respectively. While the ERS Level-0 (raw) SAR data were processed using the JPL ROI_PAC software, the Envisat Level-1 (single-look) ASAR data were processed using DORIS SAR processing software, and precise satellite orbits from Delft University. The effect of topography which depends on the perpendicular separation between orbital trajectories is removed from the interferograms using the SRTM 3-arc-second (~ 90 m) posting digital elevation model. The interferograms were also filtered using a weighted power spectrum technique. We modelled the manually unwrapped fringes derived from the processed interferograms by using slip inversions on triangular fault patches instead of commonly used rectangular ones which enabled us to use non-planar more realistic fault models for the earthquakes.

Analysis of the interferograms and subsequent elastic modeling suggest that the two mainshocks occurred on blind conjugate strike-slip faults; the 1994 quake on a $N23^\circ E$ trending left-lateral and 2004 quake on a $N45^\circ W$ trending right-lateral fault. It is worthwhile to mention that, especially for the 2004 event, InSAR result contradicts previous inferences on the kinematics, location and rupture geometry of the earthquakes deduced from conventional analyses of seismic waveforms and aftershocks distribution which suggest a left-lateral fault plane instead of a right-lateral one.

The InSAR analysis reveals the fragmentation of the Rif Mountain throughout a complex network of conjugate blind faults consistent with the transpression tectonics along the plate boundary in North Africa. Although the two earthquakes took place in the Rif thrust-and-fold belt, the late Quaternary deformation indicates E-W extension in agreement with the NW-SE and NE-SW trending conjugate strike-slip faulting.

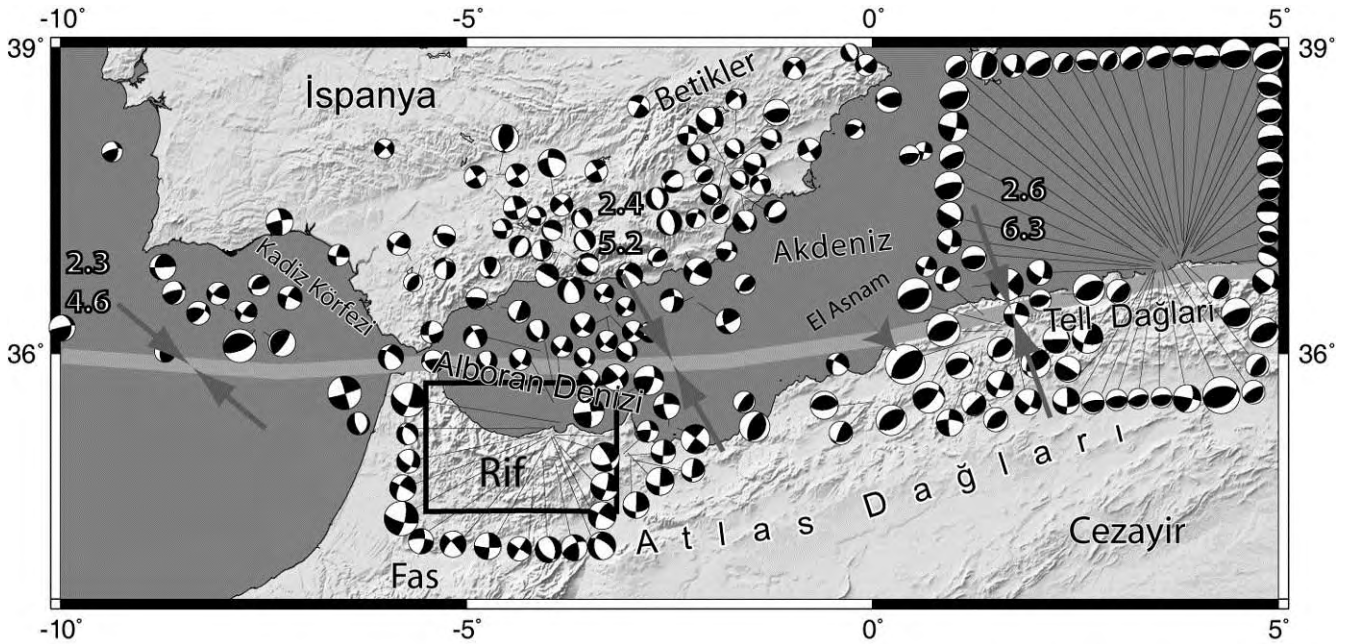
Keywords: Conjugate faulting, InSAR, Rif, Morocco, Al Hoceima, active tectonics.

Giriş

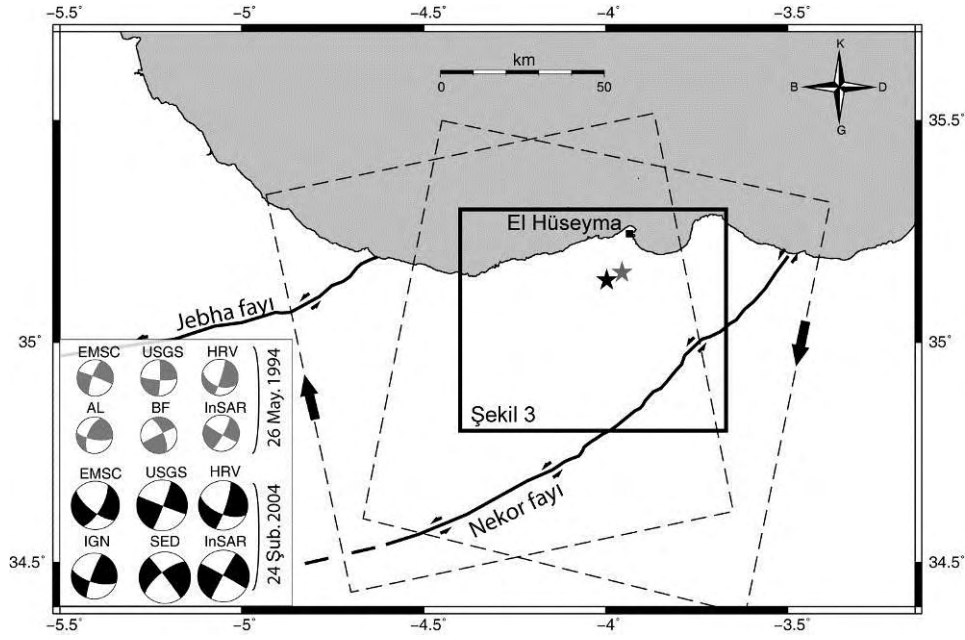
Fas'ın Akdeniz kıyısında yer alan El Hüseyma şehri (Şekil 1), 10 yıl ara ile meydana gelen 2 depreme maruz kalmıştır. İlk deprem ($M_w=6.0$) 26 Mayıs 1994 tarihinde, ikinci deprem ise ($M_w=6.4$) 24 Şubat 2004 tarihinde meydana gelmiş, 600 kişinin ölümüne ve 2500 binanın yıkılmasına neden olmuştur (Şekil 2; Ait-Brahim vd., 2004). Bu iki deprem, Avrasya ve Afrika plakaları arasındaki doğu-batı uzanımlı levha sınırı içinde Batı Akdeniz'de yer alan bir bindirme kuşağı olan Rif sıradağlarında aletsel periyotta meydana gelen en büyük yer hareketleridir (Şekil 1, DeMets vd., 1990). İki depremin merkez üslerinin birbirine yakın olduğu; El Hüseyma kentinin güneyinde, kente 15-20 km uzaklıkta oldukları bildirilmiştir (Şekil 2). Ne var ki, iki depremin de yüzey kırığı meydana getirmemiş olması (Ait-Brahim vd., 2004; El Alami vd., 1998; Jabour vd., 2004), buna ek olarak episantırların bulunduğu bölgede aktif faylanmanın belirgin morfolojik izlere sahip olmaması, bölgesel sismik ağın yeterli sıklıkta olmayışı, bu ağlar tarafından kaydedilen artçı şokla-

rın dağılımının kompleks ve dağınık oluşu (El Alami vd., 1998; Calvert vd., 1997) gibi nedenlerle depremlerin kaynak mekanizmaları detaylı olarak bilinmemektedir.

Odak mekanizması çözümleri iki depremin de KD-GB uzanımlı sol yanal veya KB-GD uzanımlı sağ yanal oblik doğrultu atımlı faylarla ilişkili olduklarını göstermektedir (Tablo 1). Depremlerin lokasyonlarında ve geometrilerindeki belirsizliğe rağmen depremden sonra yapılan sismolojik çalışmalarda iki depremin de sol yanal doğrultu atımlı oldukları öne sürülmüştür (El Alami vd., 1998; Calvert vd., 1997; Dorbath vd., 2005; Bezzeghoud ve Buform, 1999, Buform vd., 2005; Stich vd., 2005). Bu sismolojik çalışmaların aksine bölgede Sentetik (Yapay) Açıklık Radar İnterferometrisi (InSAR) kullanılarak yapılan ilk çalışmada (Çakır vd., 2006) sol yanal atımlı fay modellerinin InSAR verileri ile uyumsuz olduğu gösterilmiş ve 2004 depreminin sol yanal yerine KB-GD uzanımlı bir sağ yanal doğrultu atımlı fay üzerinde meydana gelmiş olması gerektiği ortaya konmuştur.



Şekil 1. 1951-2005 arasında Batı Akdeniz'de yaşanan depremlere ait odak mekanizması çözümleri (Buform vd., 2004, Instituto Geografico Nacional ve İsviçre Sismoloji Servisi) (Deformasyon tipi Cezayir'den Kadiz Körfezi'ne doğru değişim göstermektedir (Kalın gri oklu çizgi konverjans yönünü ve hızını (mm/yıl) gösterir) Çalışma alanı (Şekil 2) dikdörtgen ile gösterilmiştir



Şekil 2. Çalışma Alanı (ERS/Envisat iniş-çıkış yörüngelerine ait görüntü çerçeveleri kesikli çizgi ile gösterilmiştir) Şekil 3 siyah dikdörtgen ile belirtilen alandadır (Yıldızlar Calvert ve diğerleri (1997) ve USGS tarafından hesaplanmış episantırları gösterir)

Tablo 1. 1994 ve 2004 depremlerine ait odak mekanizması çözümleri

	Kaynak	Boylam	Enlem	Derinlik (km)	Mo (N.m) 10^{18}	Mw	Düzlem 1			Düzlem 2		
							Doğr.	Eğim	Kayma açısı.	Doğr.	Eğim	Kayma açısı
2004	SED	-3.997	35.142	12.0	5.18	6.4	115	84	157	208	67	7
	HRV	-3.840	35.270	12.0	3.93	6.3	113	61	-170	18	81	-29
	IGN	-3.997	35.142	6.0	2.70	6.2	107	67	171	200	82	23
	IAG	-4.000	35.140	-	2.88	6.3	107	73	-161	11	72	-17
	USGS	-3.997	35.142	13.0	4.90	6.4	111	89	-176	21	86	-1
	EMSC	-4.000	35.000	29.0	3.60	6.3	128	69	-158	30	69	-23
	InSAR	-3.993	35.127	6-10	6.60	6.5	322	87	-161	231	71	-3
1994	BB	-3.920	35.160	7	1.18	6.0	335	69	2	244	88	178
	USGS	-4.100	35.305	9	0.97	6.0	93	80	-174	2	84	-6
	HRV	3.910	35.370	10	1.01	5.9	112	48	-173	17	85	-7
	AL	3.990	35.280	13	-	-	100	70	157	202	60	23
	EMSC	-4.100	35.305	-	-	-	291	86	-166	200	76	-14
	InSAR	-4.039	35.202	6-10	2.00	6.1	292	84	-170	23	80	-6

SED: Swiss Seismological Service, HRV: Harvard, IGN: Instituto Geografico Nacional, IAG: Instituto Andaluz de Geofisica, USGS: United States Geological Survey, EMSC: European-Mediterranean Seismological Centre, BB: Bezzeghoud and Buforn (1999) , AL: El Alami ve diğerleri (1998). InSAR: Bu çalışma.

Bu çalışmada ERS ve Envisat SAR verileri kullanılarak 1994 ve 2004 depremleri incelenmiş, iki depreme ait interferogramlardan elde edilen modeller ile iki depremin birbirleriyle olan ilişkileri araştırılmıştır. 2 deprem için hem iniş (descending) hem çıkış (ascending) yörüngesine ait veri temin edilebilmiş olması çalışmanın hassasiyetini arttırmıştır. Bölgede eşlenik fayların mevcudiyeti ve bunların InSAR ile tayini yerel tektoniğe ve ilişkili deprem hasar analizlerine ışık tutacaktır. Çalışmada ayrıca eşlenik fayların kinematığı ve Afrika-Avrasya levha sınırı deformasyon zonundaki kosismik doğrultu atımlı faylanmalar tartışılmıştır.

Bölgenin sismotektoniği

Rif Sıradağları Afrika ve Avrasya levhalarının çarpışması sonucu Kuzey Afrika'da meydana gelmiş olan ve Tel Atlas dağlarını da kapsayan Doğu-Batı uzanımlı bindirme zonu içindedir. Global levha modelleri ve GPS gözlemlerine göre Afrika ve Avrasya arasında süregiden kısalma Sicilya'dan Fas'a doğru 6.3 mm'den 2.3 mm'ye düşmektedir (Şekil 1, Nocquet ve Calais, 2004). Güncel sismisite ve 1994-2004 El Hüseyma depremleri Rif'in doğrultu atımlı bir tektonik rejim altında deforme olmakta olduğuna işaret etmektedir. Ne var ki, doğuda Ceza-yir'in kuzeyi ve batıda Cadiz Körfezi gibi komşu bölgeler bindirme kaynaklı deformasyon altındadır (Morel ve Meghraoui, 1996). Levha sınırında kısalma oranının doğudan batıya azalmasının sismisiteye yansıyor yansımadığını anlamak için uzun yıllar sismolojik gözlem yapılması gerektiği açıktır.

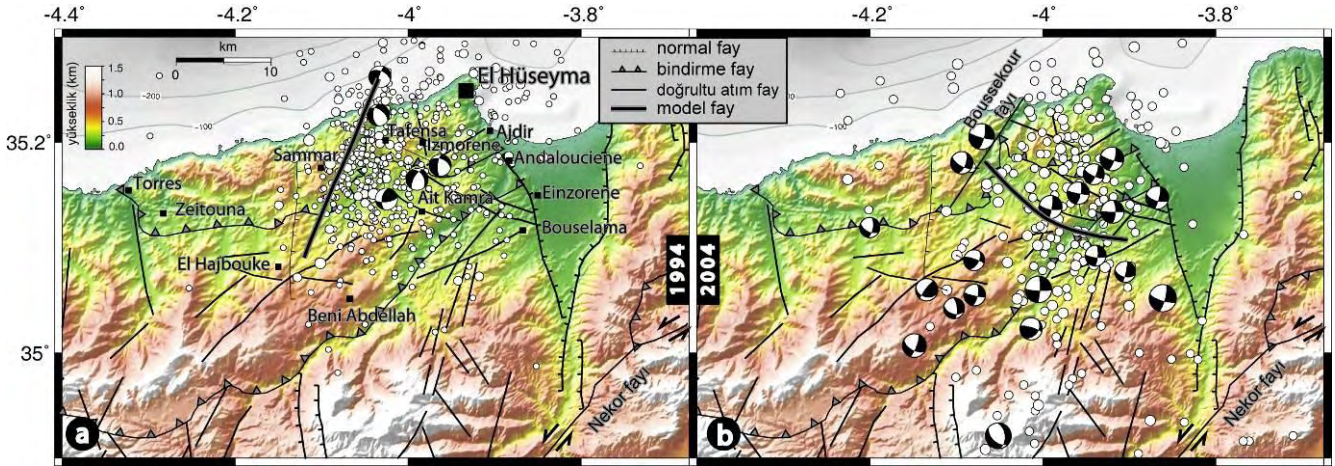
Rif'in neotektonik unsurları sol yanal doğrultu atımlı ve KD-GB uzanımlı Nekor ve Jabha faylarıdır (Şekil 2). Bunların yanısıra, kuzey-güney yönelimli ve El Hüseyma'nın doğusunda graben tarzı yapılar oluşturan normal faylar ile ortalama 10-20 km uzunluklara sahip ve eşlenik bir yapı sergileyen KB-GD ve KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı faylar gözlenir (Şekil 3). Bölgede aletsel dönem boyunca ekseriyetle orta büyüklükte depremler yaşanmış olsa da geçmişte özellikle 1801 depremi gibi büyük depremler meydana geldiği bilinmektedir (Jabour vd., 2004; Ramdani vd., 1989). Ne var ki bu geçmiş depremler-

le ilişkili aktif ve sismojenik fayların tayini için de bölgede çalışma yapılması gerekmektedir.

1994 depremi için farklı araştırmacılar tarafından farklı ipuçları (artçı şok dağılımı, makrosismisite, bölgesel tektonik, denizel sismik profiller vb.) kullanılarak ortaya atılan çözümlerin tümü birbiriyle uyumlu olarak sol yanal atımlı bir mekanizmaya işaret ediyor olsa da depremin lokasyonu ve geometrisi hakkında bir ortak görüş bulunmamaktadır. Calvert ve diğerleri (1997) kırığın Beni Abdellah ve El Hüseyma arasında uzandığını söylerken El Alami ve diğerleri (1998) benzer bir yönelimi (K20°-30°D) olan fakat 6-7 km daha batıda yer alan bir fay önermektedir (Şekil 3). Diğer taraftan, Bezzeghoud ve Buforn (1999) K5°B ve K30°B yöneline sahip iki fayın kırıldığı bir çözüm ileri sürmektedirler. Benzer bir durum 2004 depremi için de mevzubahistir; Stich ve diğerleri (2005) ve Buforn ve diğerleri (2005) kaynak zaman fonksiyonları ve sismik dalga modellemelerine dayanarak El Hüseyma'nın güneyinde KKD-GGB yönelimli sol yanal atımlı bir faylanma, Dorbath ve diğerleri (2005) ise artçı şok dağılımlarını kullanarak sağ yanal KB-GD yönelimli ve sol yanal KD-GB yönelimli 2 muhtemel faylanma öne sürmüştür.

InSAR verisinin işlenmesi

Bu çalışmada 1994 ve 2004 depremlerine ait yüzey deformasyonlarının incelenmesi için Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) ERS ve Envisat uydularına ait radar verileri kullanılmıştır. ERS Level-0 (ham) SAR verisi JPL'in ROI_PAC yazılımı (Rosen vd., 2004) ile, Envisat Level-1 (Single-Look), ASAR verisi ise Delft Üniversitesi'nin DORIS yazılımı (Kampes vd., 2003) ile işlenmiştir. Yörünge hatalarının giderilmesi için yine Delft Üniversitesi'nin hassas yörünge verileri (Scharoo ve Visser, 1998) kullanılmış olup, topografyadan kaynaklanan faz bilgisi ise SRTM (~90 m) sayısal yükseklik modeli (Farrve Kobrick, 2000) ile kaldırılmıştır. Her deprem için biri uydunun iniş diğeri ise çıkış yörüngesinden olmak üzere en az 2 interferogram oluşturulan bu çalışmada elde edilen nihai interferogramlar bir filtreden de (Goldstein ve Werner, 1998) geçirilmişlerdir.



Şekil 3. El Hüseyma bölgesinin morfotektonik yapısı, 1994(a) ve 2004(b) artçıları (El Alami vd., 1998; Instituto Geografico Naciona)

Elde ettiğimiz interferogramların birkaçı Şekil 4'te saçakları (fringe) *wrapped* yani açılmamış halde sunulmuştur. Şekil 4'teki her bir saçak radar bakış açısı yönünde yarım dalgaboyluk (ERS ve Envisat için 2.83 cm) bir menzil (range) değişimini ifade etmektedir. Sahil şeridinden uzaktaki ekili-dikili alanlarda ve güneyde dağlık bölgelerde sinyal korelasyonu düşüyor olsa da El Hüseyma'nın kıyı bölgelerinde deprem yüzünden meydana gelen kosmik deformasyon alanları oldukça net bir şekilde interferogramlarda görülebilmektedir. 1994 depremine ait deformasyonun bir kısmı ise fay denize uzandığı için takip edilememektedir (Şekil 4).

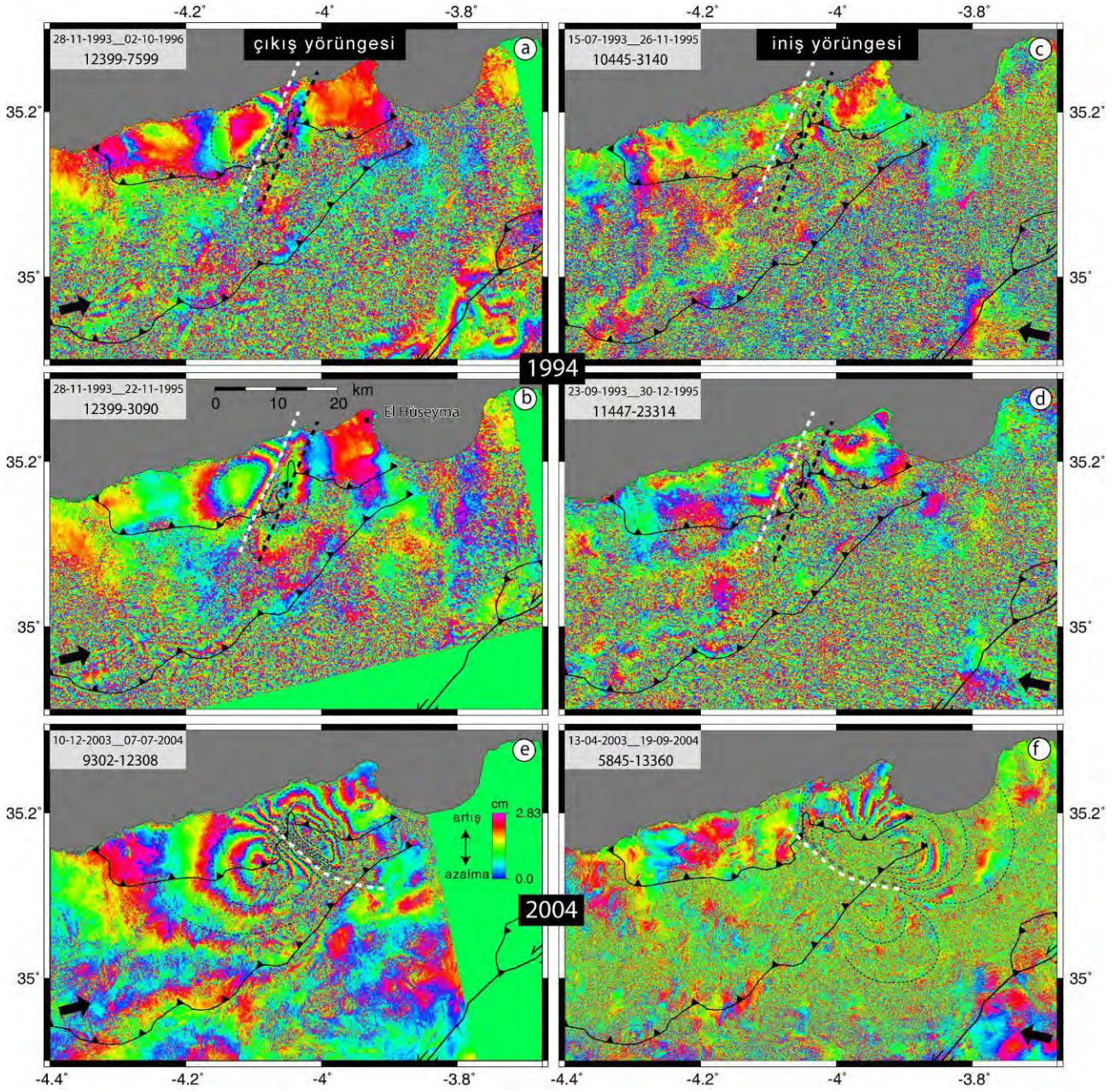
İnterferogramlardaki saçak sayısı deprem büyüklüğü ile orantılıdır: 1994 depremi iniş yö-rüngesi interferogramındaki (Şekil 4c,d) 4 saçak radar bakış yönünde 11 cm'lik, 2004 çıkış yö-rüngesi interferogramındaki (Şekil 4e) 8 saçak ise yine radar bakış yönünde 23 cm'lik yer de-ğiş-tirmeye işaret etmektedir.

Deprem alanındaki (özellikle 1994 interfe-rogramlarındaki) düşük koherans büyük bir ihtimal ile görüntü çiftleri arasındaki 3 yıla varan uzun zaman aralığında yüzeyin yansıtma karakterinde meydana gelen değişimlerden kaynaklanmaktadır. Görüntü çiftleri arasında 7 aylık zaman aralığına sahip 2004 çıkış yö-rüngesi interfe-rogramı bu nedenle minimum dekore-lasyona uğramış olmalıdır.

Kıyı bölgesinde topografya ile ilişkili atmosfere sinyal gözardı edilebilecek düzeyde iken, deprem odağının güneybatısında yüksek dağlar barındıran bölgelerde ciddiye arzedebilir (Şekil 3). Hakikaten, 2004 depremi çıkış yö-rüngesi interfe-rogramında güneydeki bindirme fay boyunca gözlenen ilk saçak açıkça topografya kaynaklı gözükme-dir (Şekil 4).

Bir noktadaki deformasyonu 3 boyutta kaydeden Küresel Konumlama Sisteminin (GPS) aksine InSAR deformasyonu sadece radar bakış yönü boyunca yani radar ile yerdeki bir nokta arasında kaydetmektedir. Yerdeki nokta ile radar uydusu arasından geçen doğru birim vektörü tanımlar. Bir kartezyen (doğu, kuzey, yukarı) koordinat sisteminde, iniş yö-rüngesi için birim vektörümüz +0.39, - 0.08, +0.92; çıkış yö-rüngesi için ise -0.41, -0.09, +0.91'dir. Şekil 4'te iniş ve çıkış yö-rüngelerine ait interferogramlarda aynı işaretli ortak loblar yüzeydeki deformasyonun çoğunlukla düşey olduğu alanlara işaret etmektedir (yüzeyin radardan uzaklaşıp yaklaşmasına bağlı olarak çökme veya yükselme gözlenen alanlar).

Aynı tip yö-rüneye ait kosmik interferogramlardaki saçak loblarının şekline ve dağılımına bakıldığı takdirde 2 depremin birbirinden farklı doğrultulu faylarda meydana geldiği rahatlıkla anlaşılabilir. Zira lobların yöneliminin hizaya gelmesi için kabaca 90°'lik bir rotasyon gerekmektedir (Şekil 4). Bu 2 depremin



Şekil 4. 1994(a,b,c,d) ve 2004(e,f) depremlerinin kosmik interferogramları (Kalın, kesikli beyaz çizgi model fayların yüzey izdüşümüdür, kalın kesikli siyah çizgi ise fay tabanının yüzeydeki izdüşümünü sembolize eder, bindirme fayları lokasyon kıyası yapılabilmesi için referans olarak çizdirilmiştir)

aynı ortak mekanizmayı paylaşamayacağını da göstergesidir. Saçakların yaridairesel şekli ve dağılımına bakıldığında, 1994 depreminin çıkış yörüngesi interferogramındaki lobların arasından geçen KD-GB yönelimli bir fayda oluştuğu görülmektedir ki bu da sol yanal bir faylanmaya işaret eder (Şekil 4a). Bu sonuç önceki sismolojik kökenli araştırmalardan elde edilen sonuçlar ile uyumludur (El Alami vd., 1998; Calvert vd.,

1997; Bezzeghoud ve Buforn, 1999). Ne var ki bu aynı zamanda, Çakır ve diğerleri (2006)'de öne sürüldüğü üzere, 2004 depreminin Buforn ve diğerleri (2005) ve Stich ve diğerleri (2005)'nin sismolojik yorumlarının aksine sağ yanal ve KB-GD yönelimli bir fayda meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 4e-f). Saçak loblarının ve ilişkili kosmik yer değiştirme alanlarının paterni iki depremin de kör eşlenik doğrul-

tu atımlı faylarda meydana geldiğini işaret etmektedir. Saçakların fay etrafında devamlılığı, saçak loblarının merkezlerinin (maksimum deformasyon zonlarının) faydan uzaklığı 1994 ve 2004 kosismik kırıklarının yüzeye ulaşmadığının ve asıl atımın sığ kesimler yerine derinlerde cereyan ettiğinin göstergeleridir.

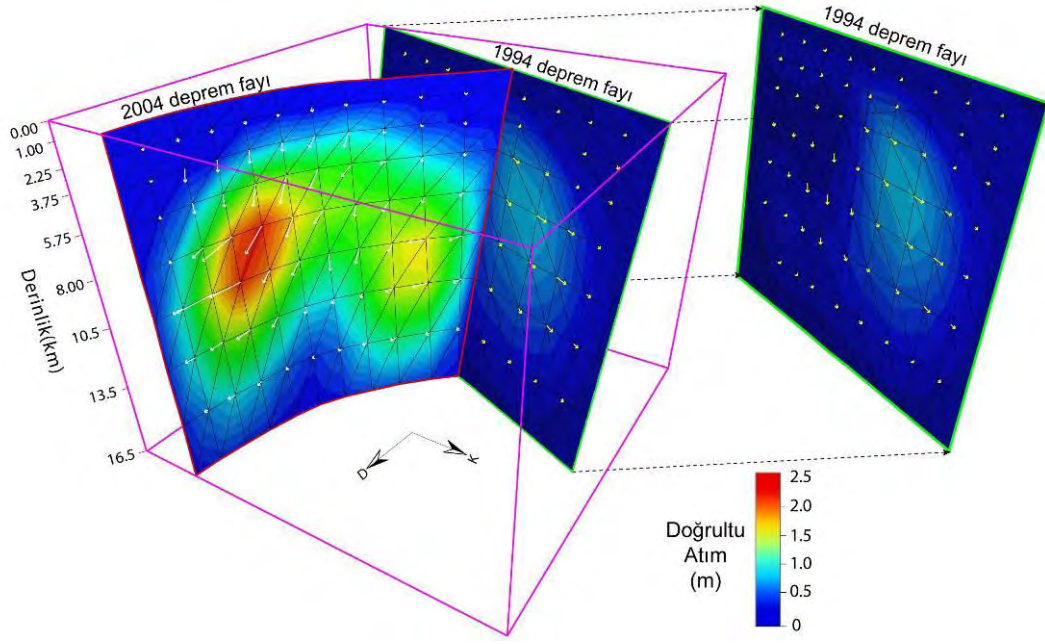
1994 ve 2004 depremlerinin elastik modellenmesi

İki depremin kosismik interferogramlarının analizi depremlerin karakteristiği ve konumu hakkında fikir vermektedir. Buna ek olarak faylanmanın detaylı geometrisi ve ilgili atım dağılımının tespiti için modellemeye başvurulması gerekmektedir. Modelleme için 3 boyutlu sınır elemanlar metodu kullanan Poly3Dinv kodu kullanılmıştır (Maerten vd., 2005; Thomas, 1993). Program, lineer elastik, homojen bir yarı uzayda sınır elemanlar yaklaşımı ile elde edilen üçgensel dislokasyonları ve sönümlü en küçük kareler minimizasyonunu kullanmaktadır. Aşağıda değinileceği üzere, InSAR verisi 2 fay kırığının kesişimini gerektirmektedir; 2004 depremi de düz olmayan bir fay yüzeyinde meydana gelmiştir. Poly3D kullanılarak üçgensel elemanlar tanımlanabilmiş ve daha gerçekçi 3 boyutlu fay yüzeyleri elde edilmiştir ki bu dikdörtgen dislokasyonlar tanımlandığında özellikle kıvrımlı ve segmentli fay modelleri kullanımında karşılaşılabilecek boşlukların ve üst üste binmelerin yaşanmamasını sağlamıştır. Bu yöntem doğal olarak kompleks fayları modellerken özellikle yakın alanda jeodezik veriye uyumu iyileştirmektedir (Maerten vd., 2005; Resor vd., 2005).

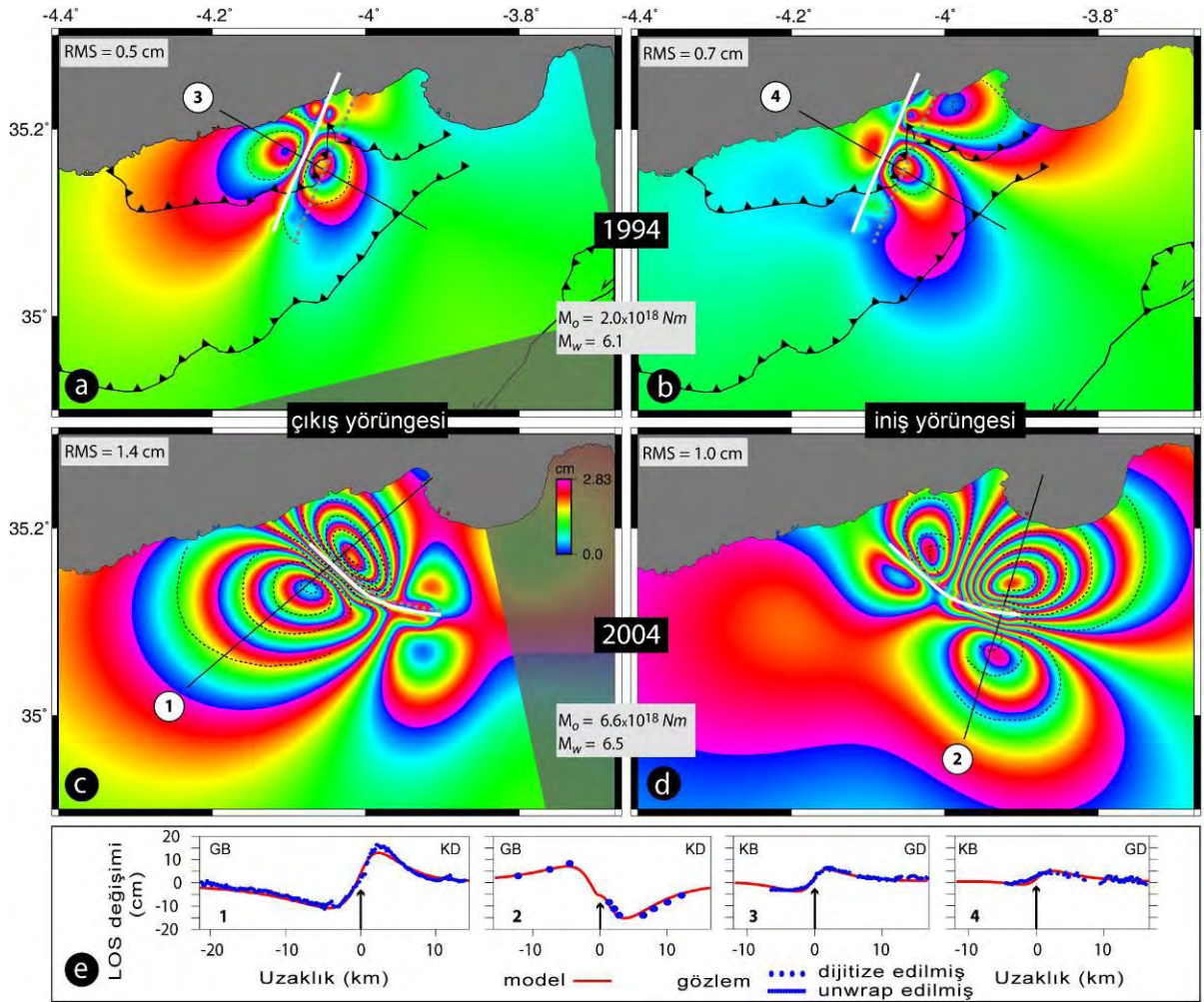
Üçgenlerden oluşan fay yüzeyleri MATLAB® kullanılarak hazırlanmıştır. Fay boyunca üçgensel elemanların uzunlukları ortalama olarak aynı alınmakla birlikte (1.7-2 km), artan derinlikle birlikte ters çözülen atımın çözünürlüğü azaldığı için eğim yönünde kalınlıkları 1 km'den 3.5 km'e doğru kademe kademe arttırılmıştır. Deprem odağının güneyindeki düşük koheranslı bölgelerde gözle rahatlıkla seçilen fakat düşük hata ile *unwrap* edilemeyen yani açılmamış saçaklar yüzünden ters çözümde açılmış (*unwrapped*) veri yerine el ile sayısallaştırılmış saçaklar kullanılmıştır (Şekil 4).

1994 depreminin fay parametrelerini elde edebilmek için, önceki çalışmaların tamamı (El Alami vd., 1998; Calvert vd., 1997; Bezzeghoud ve Buforn, 1999) sol yanal bir mekanizma öneriyor olsa da hem sol hem de sağ yanal, değişken doğrultu ve eğimlere sahip faylar kullanılarak modelleme çalışmaları yürütülmüş-tür. En iyi modelimiz El Hajbouke ile Tafensa'nın 3 km kadar açığında denize kadar uzanan toplam 16 km uzunluğunda sol yanal bir fay önermektedir. Bu fay artçı şok dağılımı ile uyum içinde olup, El Alami ve diğerleri (1998)'nin deprem fayı olarak nitelendirdiği Boussekkour fayı ile de uyumludur (Şekil 3b). K23°D uzanımlı fay güneydoğuya doğru 77°'lik bir eğime sahiptir ki bu da Harvard CMT çözümleriyle uyumludur (Tablo 1). Model fayın görünür saçakları kesmemesi gerektiğinden muhtemel fay doğrultusu $\pm 5^\circ$ 'lik bir aralık içinde olmak zorundadır. Fayın eğimi ise KB'dan GD'ya eğimli bir dizi fayın ters çözümü ile bulunmuştur. Nihai model fayımızın güney kısmındaki atımda büyük pay eğim-atım bileşenine (normal faylanma) aittir; 4 ila 8 km derinlikler arasında atım değeri 0.8 m'yi bulmaktadır (Şekil 5). Bu eğim atım bileşeni iniş ve çıkış interferogramlarında gözlenen ortak saçak lobunu da açıklamakta ve sismolojiden elde edilen odak mekanizma çözümleriyle uyum göstermektedir (Tablo 1). Fayın kuzeyinde yer değiştirme ekseriyetle doğrultu atım bileşeninden oluşmakta ve atım değerleri 0.9 m'yi bulmaktadır. 2 yörüngeden de veri temin edilmiş olması modellemenin güvenilirliğini arttırmasının yanı sıra yüzey deformasyonunun 2 farklı bakış açısı ile görüntülenmiş olması radar bakış yönündeki yer değiştirmeye neden olan hareketin karakterinin düşey mi yoksa yatay mı olduğu konusundaki belirsizliği de gidermektedir.

Bu çalışmada 2004 depremi de tekrar modellenmiştir. Nihai modelimiz 19 km uzunluğunda sağ yanal atımlı, 87-88°D eğimli ve doğrultusu güneyde K85°B, kuzeyde ise K38°B olan (ortalama K45°B, Şekil 6) bir faydır. Bu fay geometrisi Çakır ve diğerleri (2006) ile aynı olmakla birlikte fayın kuzey kısmı 1994 model fayı ile çakıştığı için kısaltılmıştır. Modelleme sonucu elde edilen atım dağılımı fayın kıvrıldığı zonda yer alan bir düşük atım bölgesi tarafından ikiye ayrılan iki asperite göstermektedir (Şekil 5). Fayın güneyinde BKB-DGD yönelimli kısmındaki



Şekil 5. 1994 ve 2004 depremleri nihai fay modelleri için 3B atım dağılımı



Şekil 6. Model (sentetik) interferogramlar ve veriye uyumu sınamak amacıyla alınan kesitler

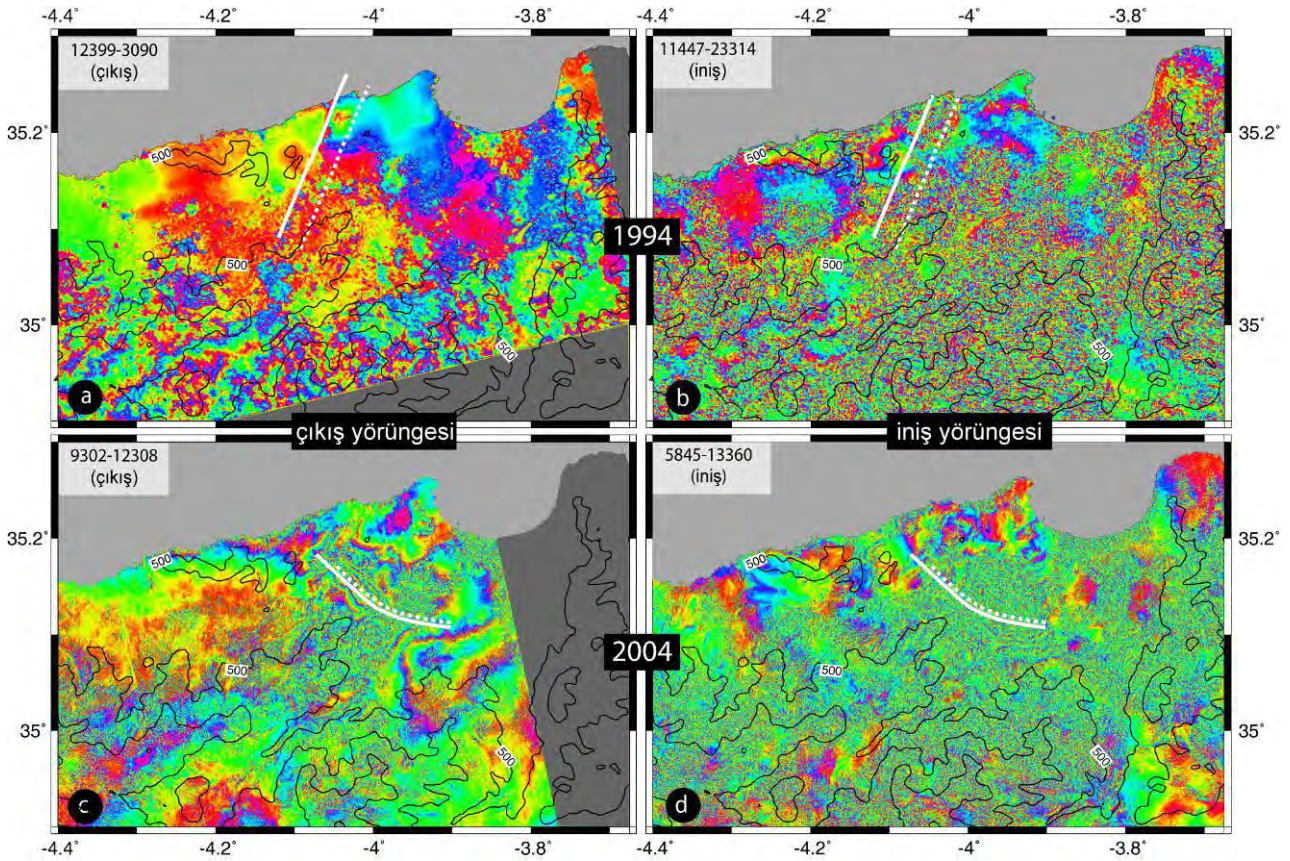
asperite toplam sismik momentin %70'lik bir kısmına tekabül etmekte olup doğrultu atım baskındır ve maksimum atım 7 km derinlikte 2.7 metreyi bulur. 1994 fayına yakın olan ve 9 km derinlikteki diğer asperitede ise maksimum atım 1 metre civarı olup Çakır ve diğerleri (2006)'ne nazaran daha da iyi çözülmüştür.

1994 ve 2004 depremleri için InSAR verisinin modellenmesi ile elde edilen jeodezik momentler sırasıyla, 2.0×10^{18} Nm ($M_w=6.1$) ve 6.6×10^{18} Nm'dir ($M_w=6.5$). Moment değerleri sismolojiden elde edilen değerler ile uyumludur (Tablo 1). Şekil 6'da görülebileceği üzere model faylarımız interferogramlarda görülen ana unsurları güzel bir şekilde tekrarlayabilmektedir. RMS değerleri 1 frincin (2.8 cm) altındadır. Sentetik (modelden üretilen) ve gerçek interferogram arasındaki uyum bu iki interferogramın birbirinden çıkartılması ile elde edilen artık interferogramlardan ve alınan kesitlerden de sına-

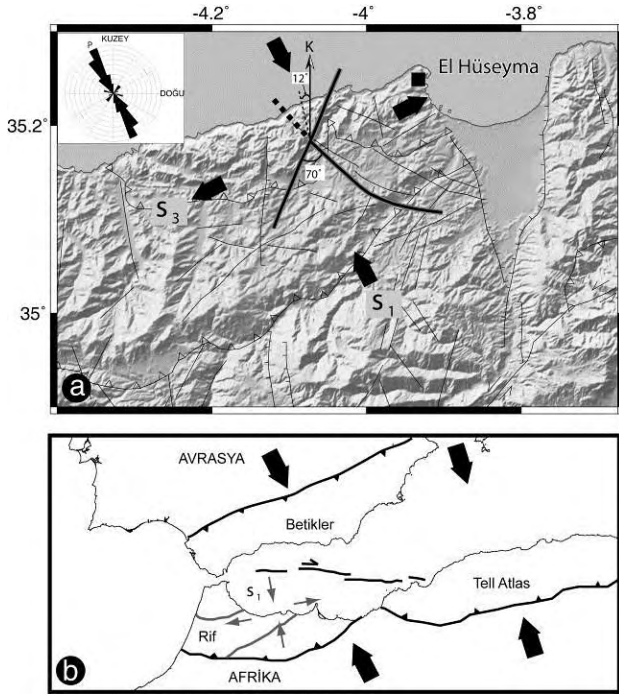
nabilir (Şekil 6e ve 8). Artık (residual) interferogramlarda geriye kalmış saçakların bir kısmı büyük bir olasılıkla atmosferik kökenli olup diğer bir kısmı ise yakın alanda modellenemeyen fay kompleksitesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, 1994 çıkış yörüngesi artık interferogramında (Şekil 7a) fayın batısındaki geriye kalmış fazın bir kısmı daha önce de değinildiği üzere topografik yükselim ile fazın açık korelasyonu nedeniyle atmosferik kökenli olmalıdır. Bu nedenle, her ne kadar ufak olsa da bu interferogramın bir nebze homojen atmosferik etki barındırdığını söyleyebiliriz.

Sonuçlar ve tartışma

InSAR verilerinin analizi ardışık 26 Mayıs 1994 ($M_w=6.0$) ve 24 Şubat 2004 ($M_w=6.4$) depremlerinin $K23^\circ D$ ve $K45^\circ B$ yönelimli eşlenik doğrultu atımlı faylarda meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 8a). Bu eşlenik faylar arasındaki



Şekil 7. Bir önceki şekilde yer alan sentetik interferogramların asıl interferogramlardan çıkartılması ile elde edilen artık (residual) interferogramlar (Siyah konturlar topografyayı göstermektedir, kontur aralığı 500 metredir)



Şekil 8. (a) El Hüseyma bölgesinde stres alanı
(b) Blok tektonik model

dar açı kabaca 70° olup laboratuvar testlerine (Byerlee, 1978) göre sürtünme katsayısı 0.6 ile 0.85 arasında olan, homojen, kusursuz, sağlam bir kayada beklenen Coulomb sürtünmesinden $5-10^\circ$ daha büyüktür. Buna göre ya bu eşlenik faylar düşük bir sürtünme katsayısına sahiptir ya da içlerinden biri daha önce kırılmış olup tekrar düşük makaslama stresi altında reaktive olmuş bir faydır. Maksimum asal birincil gerilme (σ_1) ekseninin eşlenik faylar arasındaki dar açığı ikiye ayırdığını öngören Anderson-Byerlee mekaniği (Anderson, 1951) baz alınacak olursa El Hüseyma ve Rif bölgesinde σ_1 yönü $\sim K12^\circ B$ olur ki bu değer sismik tensör inversiyonundan (Medina, 1995) ve 1968-1994 arası bölgede meydana gelmiş 44 depremin P-eksenlerinin oryantasyonundan elde edilen $K15^\circ-25^\circ B$ yönelimi ile uyumludur (Şekil 8a). Bu değer NUVEL-1A levha hareketi (DeMets vd., 1990) ve GPS modellerinin (Nocquet ve Calais, 2004) ön gördüğü $K40^\circ-50^\circ B$ değerinden farklı olsa da bu modellerin kıtasal ölçekleri ve çok az GPS noktası gibi dezavantajları yüzünden lokal blok tektoniği ve levha sınırındaki lokal stres alanının muhtemel varyasyonlarını yansıtmaları beklenmemelidir. Diğer yandan, $K40^\circ-50^\circ B$ değeri ile

$K12^\circ B$ yatay stres σ_1 (Şekil 8a) değeri arasındaki farklılık Rif'i, rijit Afrika ve Avrasya levhaları arasındaki oblik konverjans nedeniyle D-B yönünde deforme olan bir zon olarak nitelendirdiğimizde mantıklı bir yapıya bürünmektedir (Şekil 8b). Bu transpresif sistemde, doğrultu atım parçalanması levha hareket vektörü ile levha sınırı normalisi arasında kalan açığı ikiye bölen bir kısalma yönü tayin eder (Teyssier, 1995).

Hem sol hem de sağ yanal doğrultu atımlı depremlerin meydana gelmesi Rif'in dağıttık bir doğrultu atım deformasyonuna uğradığını ön gören tezi desteklemektedir (Calvert vd., 1997). 1994 depreminin modellenmesi sonucu elde edilen fay Boussekkour fayı (Şekil 3b) ile çakışıyor olsa da 2004 depremi daha önceden bilinmeyen yeni bir aktif fay üzerinde meydana gelmiştir. Nekor ve Boussekkour faylarının birbirleriyle paralel olduğu düşünülecek olursa Nekor fayının güncel stres alanı içinde optimum konumlu bir durumda olduğu ve gelecekte meydana gelecek büyük bir deprem öncesi elastik deformasyon biriktirmekte olduğu öne sürülebilir. Bu nedenle, gelişmiş uzaktan algılama yöntemlerinden de istifade edilerek Rif bölgesinde büyük deprem üretebilecek aktif fay haritaları yeniden gözden geçirilmelidir.

1994-2004 depremlerinin meydana geldiği KB-GD ve KD-GB yönelimli fayların Rif'in bindirme faylarını (Şekil 3) kesiyor olması, Kuvarterner doğrultu atım tektoniğinin Tersiyer bindirme tektoniği üzerine yerleşmekte olduğunun bir göstergesidir (Meghraoui vd., 1996). Bölgede jeomorfolojik unsurlarının tam gelişmemiş olması doğrultu atım tektoniğinin muhtelemen ilk safhalarında olduğuna işaret etmektedir. Rif Dağları'ndaki depremlerin odak çözümleri (Şekil 1), $K15^\circ B$ σ_1 ve $K75^\circ D$ σ_3 normal bileşenli doğrultu atım mekanizmaları vermekte olup transpresif tektonik modelle uyumludurlar. Bu takdirde eşlenik fay sistemi, Afrika-Avrasya (İberya) çarpışma tektoniği çerçevesinde, batıya doğru kaçış ile ilişkili, Rif tektonik bloğunu etkileyen atım bölümlenmeli bir fragmentasyon olarak yorumlanabilir (Şekil 8b; Morel ve Meghraoui, 1996).

Kaynaklar

- Ait-Brahim, L., Nakhcha, C., Tadili, B., El Mrabet, A. ve Jabour, N., (2004). Structural analysis and interpretation of the surface deformations of the February 24th, 2004 Al Hoceima earthquake, *EMSC-Newsletter*, **21**, 10-12.
- Ait-Brahim, L., Tadili, B., Nakhcha, C., Mouayn, I., Ramdani, M., Limouri, M., El Qadi, A., Sossey Alaoui, F. ve Benhalima, M., (2004). Modeling in the Eastern Rif (Northern Morocco) using active faults and seismicity for the strong motion, *Pure and Applied Geophysics*, **161**, 10811091, 0033-4553/04/061081-11, doi: 10.1007/s00024-003-2487-9.
- Anderson, E.M., (1951). *The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain*, Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Bezzeghoud, M. ve Buforn, E., (1999). Source parameters of the 1992 Melilla (Spain, Mw 4.8), 1994 Alhoceima (Morocco, Mw 5.8) and 1994 Mascara (Algeria, Mw 5.7) earthquakes and seismotectonic implications, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**, 359-372.
- Buforn, E., Bezzeghoud, M., Udias, A. ve Pro, C., (2004). Seismic sources on the Iberia-African plate boundary and their tectonic implications, *Pure and Applied Geophysics*, **161**, 623-646.
- Buforn, E., Bezzeghoud, M., del Fresno, C., Borges, J. F., Madariaga, R. ve Udías, A., (2005). Study of the fracture process of Al Hoceima earthquake (24/02/2004, Mw=6.2) from regional and teleseismic data, *Geophysical Research Abstracts*, **7**, 05301, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-05301.
- Byerlee, J., (1978). Friction of rocks, *Pure and Applied Geophysics*, **116**, 615-626.
- Calvert, A., Gomez, F., Seber, D., Barazangi, M., Jabour, N., Ait-Brahim, L. ve Demnati, A., (1997). An integrate geophysical investigation of recent seismicity in the Al-Hoceima Region of North Morocco, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**, 637-651.
- Çakır, Z., Meghraoui, M., Akoglu, A.M., Jabour, N., Belabbes, S. ve Ait-Brahim, L., (2006). Surface deformation associated with the Mw 6.4, February 24, 2004 Al Hoceima (Morocco) Earthquake deduced from InSAR: Implications for the active tectonics along North Africa, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**, 1-10, doi: 10.1785/0120050108.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. ve Stein, S., (1990) Current plate motions, *Geophysical Journal International*, **101**, 425-478.
- Dorbath, L., Hahou, Y., Delouis, B., Dorbath, C., Van Der Woerd, J., Badrane, S., Frogneux, M., Haessler, H., Jacques, E., Menzhi, M. ve Tapponnier, P., (2005). Études sismologiques sur le séisme D'al Hoceima: Localisation, et mécanisme du choc principal et des répliques, contraintes et structure de la zone epicentrale, *Colloque International Seisme d'Al Hoceima: Bilan et perspectives*, 24-26 Şubat, El Hüseyma, Fas.
- El Alami, S.O., Tadili, B., Cherkaoui, T.E., Medina, F., Ramdani, M., Ait-Brahim, L. ve Harnafi, M., (1998). The Al Hoceima earthquake of May 26, 1994 and its aftershocks: a seismotectonic study, *Annali di Geofisica*, **41**, N4, 519-537.
- Farr, T. ve Kobrick, M., (2000). Shuttle radar topography mission produces a wealth of data, *AGU EOS*, **81**, 583-585.
- Goldstein, R. ve Werner, C., (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophysical Research Letters*, **25**, 4035-4038.
- Jabour, N., Kasmi, M., Menzhi, M., Birouk, A., Hni, L., Hahou, Y., Timoulali, Y. ve Badrane, S., (2004). The February 24th, 2004 Al Hoceima earthquake, *European-Mediterranean Seismological Centre Newsletter*, **21**, 7-10.
- Kampes, B., Hanssen, R. ve Perski, Z., (2003). Radar interferometry with public domain tools, *Proceedings of FRINGE 2003*, December 1-5, Frascati, İtalya.
- Maerten, F., Resor, P.G., Pollard, D.D. ve Maerten, L., (2005). Inverting for slip on three-dimensional fault surfaces using angular dislocations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 1654-1665.
- Medina, F., (1995). Present-day state of stress in northern Morocco from focal mechanism analysis, *Journal of Structural Geology*, **17**, 7, 1035-1046.
- Meghraoui, M., Morel, J.L., Andrieux, J. ve Dahmani, M., (1996). Tectonique plio-quadernaire de la chaîne tello-rifaine et de la mer d'Alboran; Une zone complexe de convergence continent, *Bulletin Societe Geologique de France*, **167**, 1, 141-157.
- Morel, J.L. ve Meghraoui, M., (1996). The Goringe-Alboran-Tell tectonic zone, a transpression system along the Africa-Eurasia plate boundary, *Geology*, **24**, 755-758.
- Nocquet, J-M. ve Calais, E., (2004). geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe, *Pure Applied Geophysics*, **161**, 661-681, 0033-4553/04/030661-21, doi: 10.1007/s00024-003-2468.

- Ramdani, M., Tadili, B. ve El Mrabet, T., (1989). *The present state of knowledge on historical seismicity of Morocco* in Payo, G., Radu, C. ve Postpischil, D., eds, *Proceedings of the Symposium on Calibration of Historical earthquakes in Europe and Recent Developments in Intensity interpretation*, European Seismological Commission, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 257-279.
- Resor, P.G., Pollard, D.D., Wright, T.J. ve Beroza, G.C., (2005). Integrating high-precision aftershock locations and geodetic observations to model coseismic deformation associated with the 1995 Kozani-Grevena earthquake, Greece, *Journal of Geophysical Research*, **110**, B09402, doi:10.1029/2004JB003263.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Peltzer, G. ve Simons, M., (2004). Updated repeat orbit interferometry package released, *EOS, Transactions, AGU*, **85**, 35.
- Scharoo, R. ve Visser, P., (1998). Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 8113-8127.
- Stich, D., de Lis Mancilla, F., Baumont, D. ve Morales, J., (2005). Source analysis of the MW6.3, 2004, Al Hoceima earthquake (Morocco) using regional apparent source time functions, *Journal of Geophysical Research*, **110**, B06306, doi:10.1029/2004JB003366. PDF.
- Teyssier, C., Tikoff, B. ve Markley, M., (1995). Oblique plate motion and continental tectonics, *Geology*, **23**, 447-450.
- Thomas, A.L., (1993). Poly3D: A three-dimensional, polygonal element, displacement discontinuity boundary element computer program with applications to fractures, faults, and cavities in the earth's crust, *Yüksek Lisans Tezi*, Stanford Üniversitesi, Stanford, Kaliforniya.