

itüdergisi/d

mühendislik

Cilt:2, Sayı:4, 99-111

Ağustos 2003

Coulomb gerilme etkileşimleri ve 1999 Marmara depremleri

Ziyadin ÇAKIR*, Aykut BARKA, Serdar AKYÜZ*İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul*

Özet

Bu çalışmada, Coulomb gerilme yöntemi kullanılarak, 1999 yılı öncesinde Marmara bölgesinde oluşan büyük depremlerin 17-Ağustos-1999 İzmit ve 12-Kasım-1999 Düzce depremlerini nasıl etkilediği, İzmit depreminin Düzce depremine olan etkisi ve günümüzde Marmara bölgesindeki deprem tehlikesi araştırılmıştır. InSAR ve GPS verileriyle bulunan fay parametrelerinin kullanıldığı Coulomb gerilmesi hesaplamaları İzmit depreminin, önceki depremlerden kaynaklanan statik gerilme artışının olduğu bir alanda meydana geldiğini göstermektedir. 1999 yılı öncesi depremlerin Düzce fayı üzerindeki gerilmeyi azaltmasına rağmen, Düzce depreminin İzmit depreminden kaynaklanan yüksek gerilme artışı nedeniyle tetiklendiği sonucu bulunmaktadır. Düzce ve öncesi depremler Adalar fayı üzerindeki gerilmeyi 5 bar'ın üzerinde yükselterek Marmara bölgesindeki deprem riskini arttırmış bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 1999 Marmara depremleri, Coulomb kırılma gerilmesi, fay etkileşimi, deprem tehlikesi.

Coulomb stress interactions and the 1999 Marmara earthquakes

Abstract

In this study, the effect of the previous earthquakes on the 1999 İzmit and Düzce earthquakes, the influence of the İzmit earthquake on the Düzce earthquake, and the seismic hazard in the Marmara region are investigated using Coulomb failure stress. Calculation of the Coulomb stress changes using the fault parameters deduced from modelling of the coseismic InSAR and GPS data shows that the İzmit earthquake occurred where the Coulomb stress was increased by the previous events. Despite of the stress decrease on the Düzce fault due to the events before 1999, the Düzce earthquake appears to have been triggered by the high increase in the static Coulomb stress transferred by the İzmit earthquake. The Düzce and the previous earthquakes increased the static stress in western and eastern Marmara by over 5 bars. Calculation of secular stress loading based on the modelling of interseismic GPS measurements shows that stress accumulation along the northern branch of the NAF is 0.37 bars per year. Thus, a stress increase of 5 bars corresponds to an increase normally accumulated in about 12 years by secular loading due to the continuous plate motion. In other words, the previous earthquakes brought forward the next earthquake in the Sea of Marmara by 12 years. The faults in this region therefore pose a serious seismic hazard particularly for Istanbul where over 12 million people live.

Keywords: 1999 Marmara earthquakes, Coulomb failure stress, fault interaction, earthquake hazard.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ziyadin ÇAKIR. cakirz@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 63 20

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Maden Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Analysis of the crustal deformation caused by the 1999 İzmit and Düzce earthquakes using synthetic aperture radar interferometry" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 21.02.2003 tarihinde dergiye ulaşılmış, 04.03.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.12.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Toplam uzunluğu 200 km'yi bulan bir yüzey kırığı meydana getiren 17 Ağustos İzmit (Mw=7.4) ve 12 Kasım 1999 Düzce (Mw=7.2) depremleri, oldukça yoğun bir nüfusun ve endüstri tesislerinin bulunduğu Doğu Marmara bölgesinde büyük ölçekte yıkıma ve can kaybına neden olmuştur (Şekil 1) (Barka vd., 2002; Akyüz vd., 2002; Hartleb vd., 2002). Bu bölgedeki bir sismik boşluğun varlığı, depremden çok daha önce belirlendiği için (Toksöz vd., 1979) 1999 İzmit depremi bilim dünyası için büyük bir sürpriz değildi (Toksöz vd., 1999). 19. ve 20. yüzyılda Kuzey Anadolu fayı (KAF) üzerinde meydana gelen depremlerin zamansal ve alansal göçünü dikkate alarak, Toksöz ve diğerleri (1979) İzmit körfezi bölgesinin (29°-30°D) 6 veya daha büyük bir depremin tehdidi altında olduğu sonucuna vardılar. Bu sismik tehlike, depremden iki yıl önce Stein ve diğerleri (1997) tarafından Coulomb gerilme analizlerine dayandırılarak nicelik (quantitative) olarak ele alındı ve yapılan ihtimal hesaplarından geçen yüzyılda KAF üzerinde meydana gelen depremlerin Körfez bölgesindeki deprem tehlikesini, 1996-2026 yılları arasında 1.07 kat arttığı sonucu çıkartıldı.

Eş-sismik yerdeğiştirmelerin neden olduğu statik Coulomb gerilme değişiminin deprem civarında bulunan diğer faylar üzerindeki kırılma gerilmesine olan etkisi son yıllarda yoğun bir şekilde incelenmektedir (Harris ve Simpson, 1992; Stein vd., 1992, 1994, 1997; King vd., 1994, 2001; Hubert vd., 1996; Harris, 1998; Nalbant vd., 1998; Hubert-Ferrari vd., 2000; King ve Cocco, 2000). Bu çalışmalar göstermektedir ki bir fay üzerinde meydana gelen bir deprem, civardaki faylar üzerinde meydana gelebilecek depremleri geciktirebilmekte, öne alabilmekte veya tetikleyebilmektedir. Dolayısıyla, bir bölgedeki deprem riski çalışmalarında Coulomb gerilme değişimi analizleri önemli bir yöntem haline gelmiştir. Örneğin, geçen yüzyılda KAF üzerinde meydana gelen ve batıya doğru göç eden depremlere dayanan Coulomb gerilme analizleri, bir depremin bir sonraki depremi tetiklediğini ortaya koymaktadır (Stein vd., 1997; Nalbant vd., 1998). Buradan, 1999 İzmit ve Düzce depremlerinin Marmara denizi altındaki

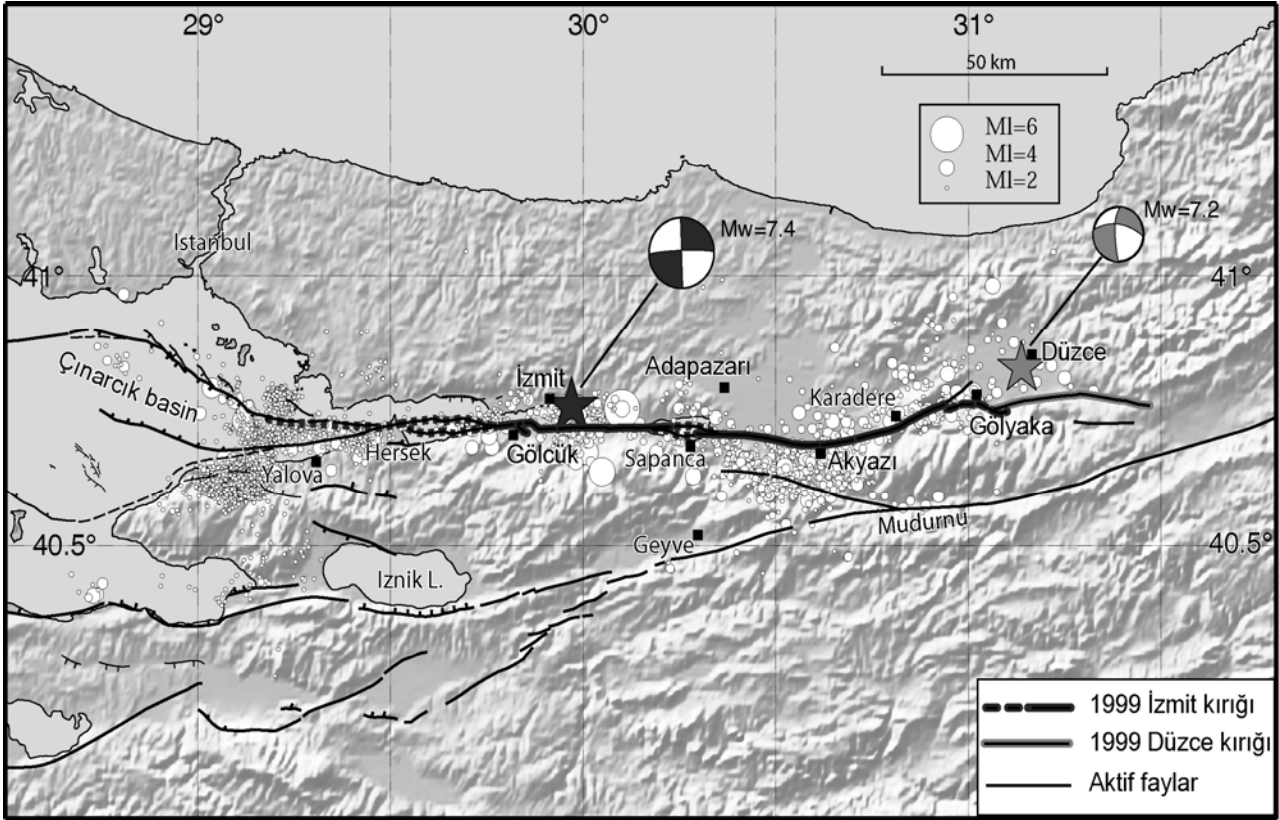
faylar üzerindeki gerilmeyi yükselterek bu bölgedeki deprem riskini arttırdığı sonucuna varılmaktadır (Barka, 1999). 1999 depremlerinin bölgede meydana getirdiği gerilme değişimleri bir çok araştırmacı tarafından Coulomb gerilme analizi yöntemi ile araştırılmıştır (Hubert-Ferrari vd., 2000; Parsons vd., 2000; Pınar vd., 2001; Papadimitriou vd., 2001, King vd., 2001). Ancak farklı araştırmacılar tarafından farklı deprem kaynak parametreleri kullandığı için bir birinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada ise, Colum gerilme değişimi hesaplamalarında InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) ve GPS (Global Positioning System) verilerinin elastik yarı uzayda meydana gelen yerdeğiştirmeler yöntemi ile modellenmesi sonucu elde edilen deprem kaynak parametreleri kullanıldı. İlk olarak, 1999'dan önce bölgede meydana gelen depremlerin İzmit ve Düzce fayları üzerinde meydana getirdiği gerilme değişimleri iki boyutlu olarak ortaya çıkartılıp yorumlandı. Daha sonra, İzmit ve daha önceki depremlerin Düzce depremine ve Marmara içindeki faylar üzerine olan etkisi araştırıldı.

Metod

Bir deprem meydana geldiğinde, komşu faylar üzerindeki mevcut statik gerilme durumunu değiştirmektedir. Bu değişim, elastik ve homojen yarı uzaydaki dikdörtgen düzlemler üzerinde meydana geldiği farzedilen yerdeğiştirmeler yöntemiyle hesaplanır (Okada 1985). Coulomb gerilme değişimi, $\Delta\sigma_f$, aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu' \Delta\sigma_n \quad (1)$$

Burada $\Delta\tau$ hedef fay düzlemindeki kesme gerilmesindeki değişim (- engelleme, + destekleme), $\Delta\sigma_n$ hedef fay düzlemine dik yönde olan normal gerilmedeki değişimdir (- gevşeme [destekleme], + sıkışma [engelleme]). μ' ise laboratuvar deneylerinden 0-0.8 arasında değiştiği bilinen etkin sürtünme katsayısıdır ki bu değer, daha önceki çalışmalara uygun olarak, buradaki hesaplamalarda 0.4 olarak kabul edildi. $\Delta\sigma_f$ arttığında hedef fayın kırılması kolaylaşır. Bunun tersine, $\Delta\sigma_f$ azaldığında ise kırılma zorlaşır.



Şekil 1. 1999 İzmit ve Düzce kırıklarını ve artçı şokların dağılımını gösteren topografik harita

Gerilmenin azaldığı alanlara gerilme gölgesi ismi verilmektedir (Harris, 1998). Eğer hedef fay konumu belirlenmez ise Coulomb gerilme değişimi optimum konumlu faylara göre hesaplanır. Optimum konum ise verilen bölgesel gerilme alanı ile dolaylı olarak belirlenir (Anderson 1951). Buradaki hesaplamalarda 150 barlık bir bölgesel gerilme kabul edildi.

Bir depremin neden olduğu gerilme değişimlerinin doğruluğu, hesaplamalarda o deprem için kullanılan kaynak parametrelerinin doğruluğu ile orantılıdır. Kullanılan kaynak parametreleri (yani kırığın uzunluğu, genişliği, yeri ve üzerinde meydana gelen kayma dağılımı ve miktarı) ne kadar doğru ise elde edilecek statik gerilme değişimleri de o kadar doğru olacaktır. Bu nedenle, deprem kaynak parametrelerinin çok iyi bir şekilde ortaya çıkartılması çok önemlidir. Kayma dağılımında ve kırığın geometrisindeki hatalar Coulomb gerilmesi dağılımında önemli sapmalara neden olabilir. Coulomb yöntemi üzerine daha detaylı bilgi için King ve diğerlerine (1994) başvurulabilir.

1999 İzmit depremi öncesinde bölgedeki Coulomb gerilme alanı

1999 tarihinden önce oluşan dört büyük depremin Marmara bölgesinde meydana getirdiği gerilme değişimleri Şekil 2a'da gösterilmektedir. Sürekli levha hareketleri nedeniyle oluşan yıllık gerilme birikimi bu hesaplamaya dahil edilmemiştir. Çünkü bütün faylardaki depremlerin tarihleri bilinmemektedir. Hangi tarihsel depremin, hangi fay segmentini kırdığı bilinmediği için toplam gerilme birikiminin ortaya çıkartılması söz konusu olamamaktadır. Hesaplama kullanılan dört büyük deprem ise 1912 Şarköy ($M_s=7.4$), 1944 Gerede ($M_s=7.3$), 1957 Abant ($M_s=7$) ve 1967 Adapazarı ($M_s=7.1$) depremleridir (Şekil 2a). 1935 Batı marmara ($M_s=6.4$), 1943 Hendek ($M_s=6.4$) ve 1963 Doğu Marmara ($M_s=6.4$) depremleri gibi bazı küçük depremler, yerlerinin çok iyi bilinmemesi nedeniyle ve bunların İzmit ve Düzce depremine olan etkilerinin önemsiz olduğu düşüncesiyle hesaplamalara dahil edilmemiştir. Ancak, King ve diğerleri (2001) 1963 Doğu Marmara depreminin, İzmit depremi fayının yırtılmasını kontrol ettiğini düşünmektedir.

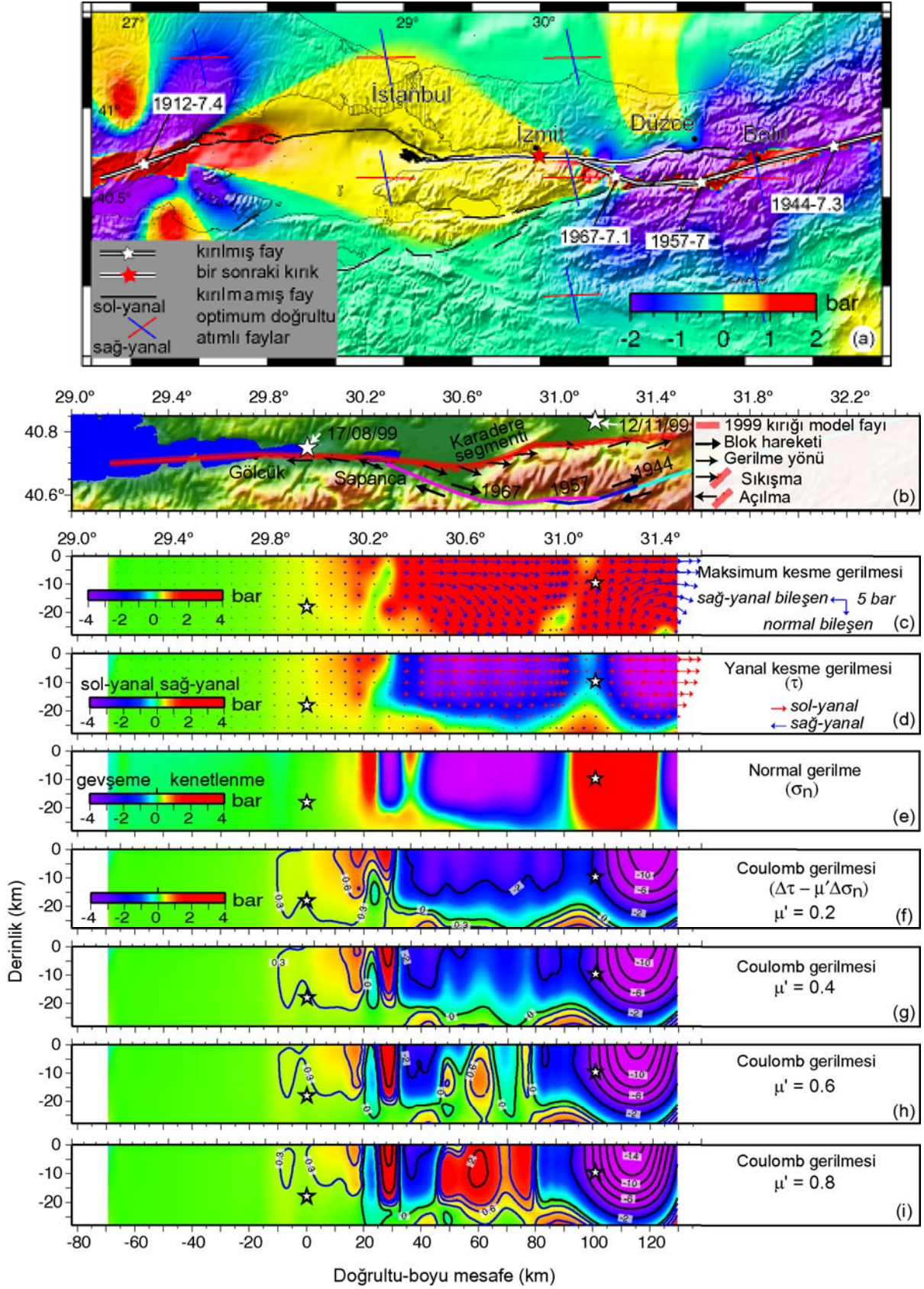
Bu araştırmacılar İzmit kırığının Yalova açıklarında sonlanmasını 1963 depremi nedeniyle burada meydana gelen gerilme azalmasına (gerilme gölgesi) bağlamaktadır. Ancak, bu depremin Adalar fayı üzerinde mi, yoksa güneydeki Çınarcık fayı üzerinde mi meydana geldiği tam olarak bilinmemektedir (Nalbant vd., 1998). Modellenen bu dört depremin her biri yüzey kırığı meydana getirmiştir ve oluşan yerdeğişirmeler arazi gözlemleri ile tespit edilmiştir (Ergin, 1969; Ambraseys ve Zatopek, 1969; Barka, 1996; Barka ve Kadinsky-Cade, 1988; Ambraseys ve Jackson, 1998; Altunel vd., 2000). Dolayısıyla, bu depremlerin yerleri, kırık uzunlukları ve kayma miktarı iyi bir şekilde bilinmektedir. Coulomb gerilmesi hesaplarında, her bir deprem için kullanılan fay kırığı uzunluğu, genişliği ve atım miktarlarının verdiği deprem büyüklüğü ile o depremin aletsel olarak ölçülen deprem büyüklüğünün aynı olmasına dikkat edilmiştir.

Şekil 2a'da gösterilen Coulomb gerilme değişimi haritasından, daha önce oluşan depremlerin Marmara denizi bölgesini, doğuda İzmit ve batıda Ganos ve civarı olmak üzere her iki taraftan gerdiği ortaya çıkmaktadır. 1999 öncesi depremler İzmit depremi merkezi civarında gerilmenin yaklaşık 0.3 bar artmasına neden olmuştur. Düzce bölgesi ise, daha sonradan detaylı olarak gösterileceği üzere, gerilme gölgesi altındadır. Yani, eski depremler Düzce fayı üzerindeki gerilmeyi düşürerek, bu fayın kırılmasını engelleyici bir etki göstermektedir.

Optimum fayların konumu, tanımlanan bir bölgesel gerilme alanından dolayı olarak belirlenir. Burada en düşük ve en büyük gerilme eksenleri yatay olarak kabul edilmiş olup, sıkışma eksenini $K30^\circ B$ doğrultusundadır. Bu tanımlama her ölçüm noktası için iki farklı optimum doğrultu vermektedir. Bunlardan bir tanesi KB-GD uzanan olan sol yönlü, diğeri ise D-B uzanan sağ yönlü doğrultu-atımlı fayları temsil eder, ki bu da arazi gözlemlerine uygundur (Şekil 2a). Dolayısıyla, Şekil 2a'da gösterilen gerilme değişimi, İzmit ve Düzce kırıklarının doğrultusu her yerde D-B yönünde olamadığı için, fayın tamamında meydana gelen gerilme değişimini

yansıtmamaktadır. Bu nedenle, gerilme değişimini optimum konumlu faylar yerine, gerilmenin 1999 kırıkları üzerine düşen bileşenini hesaplamak daha doğru olacaktır. Bu amaçla, 1999 kırıklarının konumu ve geometrisi InSAR ve GPS verilerinin modellenmesinden elde edildi. Bu modellemede kullanılan her bir yapay fay parçasının merkezi üzerinde meydana gelen gerilme değişimi hesaplandı ve sonra doğrusal aradeğerleme (interpolation) yapıldı. Böylece, bu yöntemle fay yüzeyi boyunca oluşan gerilme değişimi alansal olarak sergilenebilmektedir (Şekil 2c-i). Daha önce oluşan depremlerin (yani 1912, 1944, 1957 ve 1967) 1999 İzmit ve Düzce kırıkları üzerinde neden olduğu kesme gerilmesi Şekil 2c'de gösterilmektedir. Burada görüldüğü gibi, kesme gerilmesinin büyüklüğü ve yönü, fayın doğrultusu boyunca ve de derinlere doğru homojen bir dağılım göstermemektedir. Bunun nedeni ise, 1999 kırıkları ile daha önceki deprem kırıkları arasındaki geometrik ve konumsal ilişkidir. 1999 ile önceki deprem kırıklarının doğrultusu ve konumu farklılaşma gösterdikçe, önceki depremlerin oluşturduğu blok hareketleri 1999 kırıkları üzerinde çeşitli fay kinematiklerini teşvik etmektedir (Şekil 2b, 2c ve Şekil 3). 1967 Adapazarı kırığının batı ucunun Sapanca civarında olması ve 1999 İzmit kırığına açılı bir konumda olması nedeniyle, 1999 kırıklarının Sapanca'nın doğusunda kalan bölümünde, normal veya ters bileşenli ve hemen hemen tamamen sol-yanal doğrultu-atımlı faylanma teşvik edilirken, Sapanca'nın batısında kalan bölümlerinde normal ve ters bileşenli, sadece sol-yönlü doğrultu-atımlı faylanma teşvik edilmektedir (Şekil 2b, 2d ve Şekil 3). Kesme gerilmesinin sağ-yönlü (faylanmayı teşvik edici) veya sol-yönlü (faylanmayı engelleyici) olması, 1999 kırıklarının 1967 kırığının batı ucunun doğusunda mı yoksa batısında mı olduğuna bağlıdır (Şekil 2b ve 2d). Diğer taraftan, kesme gerilmesinin normal veya ters olması ve de dolayısıyla normal gerilmenin sıkışmalı (faylanmayı engelleyici) veya açılmalı (faylanmayı teşvik edici) olması önceki kırıklarla 1999 kırıkları arasındaki açıya bağlıdır (Şekil 2b, 2c ve 2e). Şekil 2d ve 2e'de gösterilen kesme gerilmesi ve normal gerilmelerden hesaplanan Coulomb gerilme değişimi Şekil 2g'de gösterilmektedir.

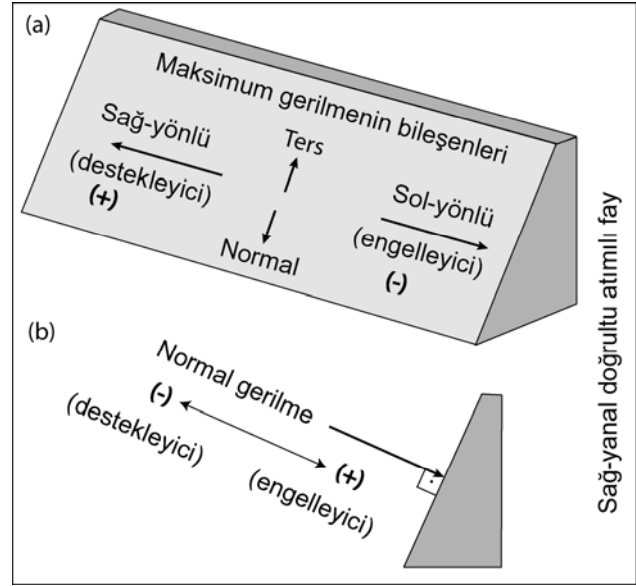
Coulomb gerilme etkileşimleri



Şekil 2. a) 1999 İzmit depremi öncesinde bölgedeki Coulomb gerilme dağılımı (optimum konumlu doğrultu-atımlı faylara ve 10 derinlikteki değişimlere göre hesaplanmış) b-i) Önceki depremlerin İzmit kırığı üzerinde neden olduğu blok hareketleri ve gerilme değişimleri

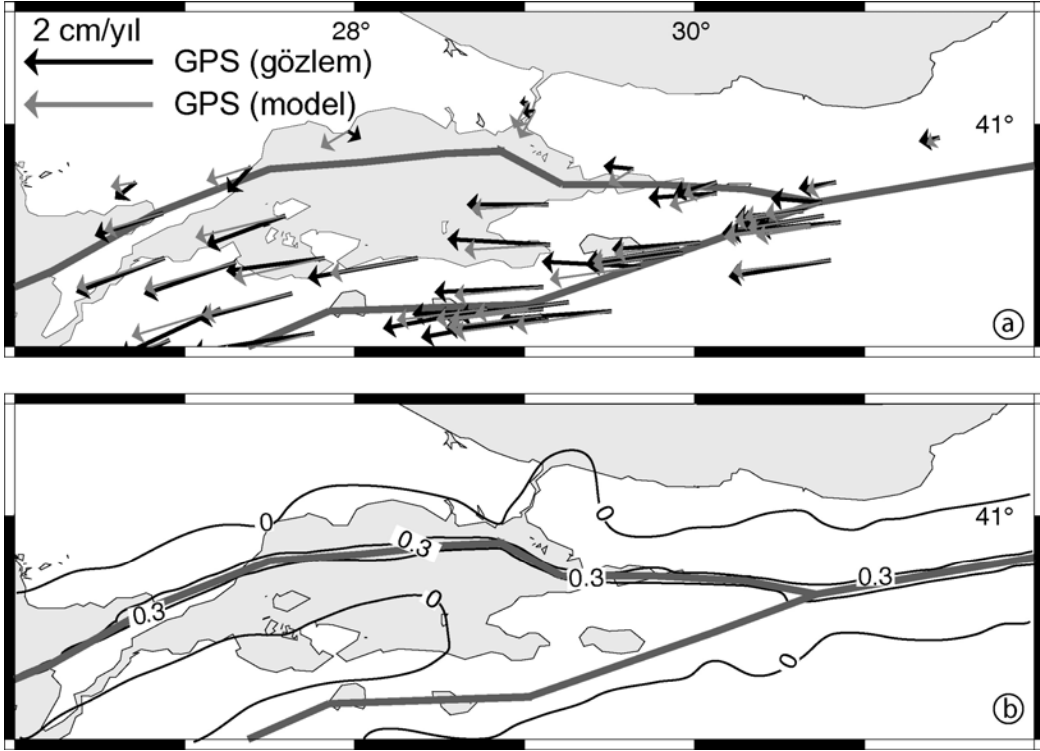
Bu şekilde görüldüğü gibi, 1999 kırıkları üzerindeki Coulomb gerilme değişimi Sapanca'nın batısında sadece artış (faylanmayı teşvik edici), doğusunda ise çoğunlukla azalma (faylanmayı engelleyici) göstermektedir. 2.5 bar'a ulaşan ve muhtemelen çoğunlukla fay ucu etkisinden kaynaklanan bir gerilme konsantrasyonu Sapanca civarında gözlenmektedir. Bu bölgenin haricinde, gerilme artışının fayın her yerinde oldukça düşük olduğu (<1 bar) gözlenmektedir. İzmit depremi odağı civarında ise yaklaşık 0.3 bar'dır. Bulunan bu değer, etken sürtünme katsayısı, μ' , değerinin 0.4 olduğu varsayıldığında elde edilen değerdir. Şekil 2f, 2h ve 2i'de gösterildiği gibi, eğer hesaplamalar farklı μ' değerleri kabul edilerek yapılırsa bu gerilme değişimleri farklı olacaktır. Azalan μ' değerleri ile birlikte İzmit depremi odağı civarındaki gerilme değişimi artma göstermektedir. Öbür taraftan, μ' değeri arttıkça Karadere segmenti ve civarında negatif (faylanmayı engelleyici) olan Coulomb gerilmesi, bu bölgede mevcut olan yüksek normal gerilme düşmesi (faylanmayı teşvik edici) nedeniyle, artarak pozitif olmaktadır. Buna karşılık, μ' değeri arttıkça Düzce segmenti boyunca mevcut olan gerilme azalması giderek daha da düşük seviyelere inmektedir. Doğrultularındaki farklılıkla birbirinden ayrılan KAF'ın bu iki farklı fay segmentinin varlığı, üzerlerine düşen gerilme dağılımı ile de belirginlik kazanmaktadır. Dolayısı ile, Coulomb gerilme dağılımında da ortaya çıkan bu açık segmentasyon, Düzce fayının İzmit depremi ile birlikte aynı anda kırılmasını önleyen faktörlerden birisi olabilir. Şekil 2f-i'de açıkça görüldüğü gibi, her μ' değeri için İzmit depreminin odağı gerilmenin arttığı bir bölgede bulunmaktadır. Ancak μ' değerinin 0.4 veya daha düşük olduğu kabul edildiğinde, İzmit depremi kırığının doğuya doğru ilerleyerek gerilme gölgesinde bulunan kısımlarında yırttığı görülmektedir. Dolayısıyla, 0.4 değerinin gerçeğe yakın bir değer olduğu kabul edildiğinde, Sapanca'nın doğusunda bulunan gerilme gölgesinin, kırığın doğuya doğru ilerlemesine bir engel teşkil etmediği sonucu çıkarılır. Bu durum bir paradoks değildir ve başka yerlerde de gözlenmiştir. Örneğin, 1999 Hector Mine, California, depreminin kırığı, 7 yıl öncesinde oluşan Landers

depreminin neden olduğu bir gerilme artışı bölgesinde başlayıp gerilme gölgesinde devam etmiştir (Pollitz ve Sacks, 2002; Fred ve Lin, 2001).



Şekil 3. Kesme (a) ve normal (b) gerilme bileşenlerinin yön ve işaretleri için burada kabul edilen işaretleme biçimi

İntersismik GPS gözlemlerinin (McClusky vd., 2000) modellenmesine dayalı olarak elde edilen hesaplamalara göre, Kuzey Anadolu Fayının kuzey kolu boyunca yıllık gerilme birikimi yaklaşık 0.37 bar'dır (Şekil 4). Bu değer, King ve diğerlerinin (2001) aynı yöntemle elde ettiği 0.4 bar'lık değerle örtüşmektedir. Buradan, İzmit depremi odağı civarındaki 0.3 bar'lık statik gerilme artışı, sürekli levha hareketleri karşılık gelmektedir. Dolayısı ile, 1999 yılı öncesi oluşan depremlerin İzmit depremi üzerine olan etkisi çok azdır. Bu düşük gerilme artışının sebeplerinden bir tanesi 1967 kırığının doğrultusudur. 1967 kırığı KB-GD doğrultusuna sahip olduğu için, bu depremin D-B yönde uzanan faylar üzerine düşen gerilme artışı nispeten daha düşüktür. Ayrıca bu kırık üzerindeki hareketin arazi gözlemlerine uygun olarak tamamen doğrultu-atımlı olduğu kabul edilmiştir. Fakat, fay üzerindeki kaymanın oblik normal bileşeni mevcut ise bu gerilme miktarı gerçekte daha fazla olacaktır.



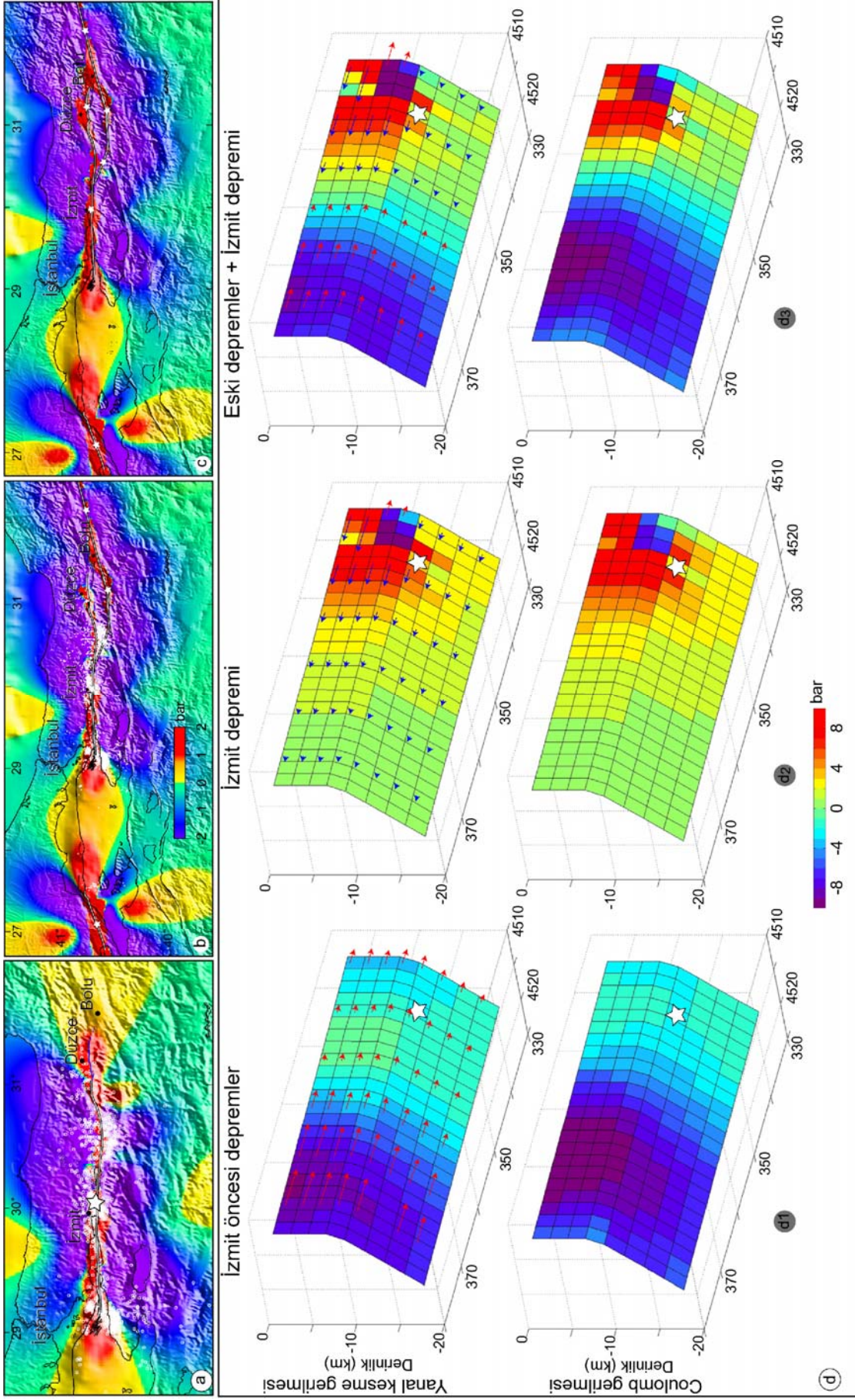
Şekil 4. Marmara bölgesindeki GPS gözlemlerinin modellenmesi (a) ve bu modele göre yıllık Coulomb gerilme birikimi (bar) (b)

İzmit depreminin bölgede neden olduğu statik gerilme değişimleri ve bunun Düzce depremine olan etkisi

İzmit depreminin Marmara bölgesinde neden olduğu gerilme değişimi, daha önceden farklı araştırmacılar tarafından hesaplanmıştır (Hubert-Ferrari vd., 2000; Parsons vd., 2000; Papadimitriou vd., 2001; Pınar vd., 2001). Ancak, elde edilen modeller genel olarak birbirine benzemekle birlikte, aralarında bazı önemli farklılıklar mevcuttur. Dolayısı ile, her bir modele göre belirlenecek deprem riski analizi de farklı olacaktır. Bu farkların başlıca nedeni ise her bir araştırmacının Coulomb hesaplamalarında kullandığı farklı fay parametreleridir. Bu çalışmada ise, InSAR ve GPS verilerinin modellenmesi sonucu elde edilen fay parametreleri kullanıldı (Çakır vd., 2001 ve 2002). Bu parametrelerle InSAR ve GPS verileri oldukça iyi bir şekilde tahmin edildiği için, şüphesiz bunların kullanılması ile elde edilecek Coulomb gerilme değişimlerinin çok daha güvenilir olacaktır. Bu çalışmada elde edilen, İzmit depreminin neden olduğu Coulomb gerilme değişimi Şekil 5a'da gösterilmektedir. Artçı sarsıntılarının büyük bir bölümünün gerilmenin

arttığı alanlarda bulunması, bunların muhtemelen Coulomb gerilme transferi nedeniyle tetiklendiğini işaret etmektedir. İzmit depremi öncesi meydana gelen depremlerin neden olduğu gerilme değişimleri sonucunda Düzce bölgesi gerilme gölgesi altında kalmıştır (Şekil 2a). Diğer bir deyişle, bu bölgede deprem riski azalmıştır. Ancak, İzmit depreminin neden olduğu yüksek gerilme artışı, bu bölgenin gerilme gölgesinden çıkmasına ve çok büyük bir ihtimalle Düzce depreminin tetiklenmesine neden olmuştur (Şekil 5b).

Eşsismik InSAR ve GPS verilerinin modellenmesinden Düzce depreminin muhtemelen birden fazla fay kırığı ile ilişkili olduğu sonucu çıkmaktadır. Düzce depreminde, düşeye yakın eğimli Düzce fayı ile muhtemelen eskiden kuzeye doğru eğimli bir bindirme düzleminin kırılmış olma ihtimali göz önünde bulundurularak yapılan modeller, InSAR ve GPS verilerini oldukça iyi bir şekilde açıklayabilmektedir. Jeodezik veriler yardımıyla bulunan Düzce depremi kırığı üzerinde, önceki depremlerin neden olduğu gerilme değişimleri hesaplandı (Şekil 5d).



Şekil 5. a) İzmit depreminin neden olduğu Coulomb gerilme değişimi b) Düzce depremi öncesi Coulomb gerilme durumu c) Düzce depreminden sonra Marmara bölgesindeki gerilme durumu d) Önceki depremlerin Düzce kırığı üzerinde meydana getirdiği Coulomb gerilme değişimleri

1999 yılı öncesi meydana gelen depremler, Düzce kırığı üzerinde kesme gerilmesini, bu fayın kinematığının tersine, sol yönlü olarak, teşvik etmekte ve ayrıca normal gerilmenin artmasına neden olmaktadır (Şekil 5d1). Dolayısıyla, 1999 öncesi depremler Düzce fayı üzerindeki statik gerilmeyi tamamen azaltmaktadır. Düzce depremi odağı civarında bu azalma 1-2 bar dolayındadır. Ancak, yukarıda da söz edildiği gibi, İzmit depremi nedeniyle meydana gelen yüksek gerilme artışı (Şekil 5d2), kırığın batı bölümlerini gerilme gölgesinden çıkarmakta ve Düzce odağı civarındaki gerilmeyi bu deprem öncesinde 3-4 bar'a yükseltmektedir (Şekil 5d3).

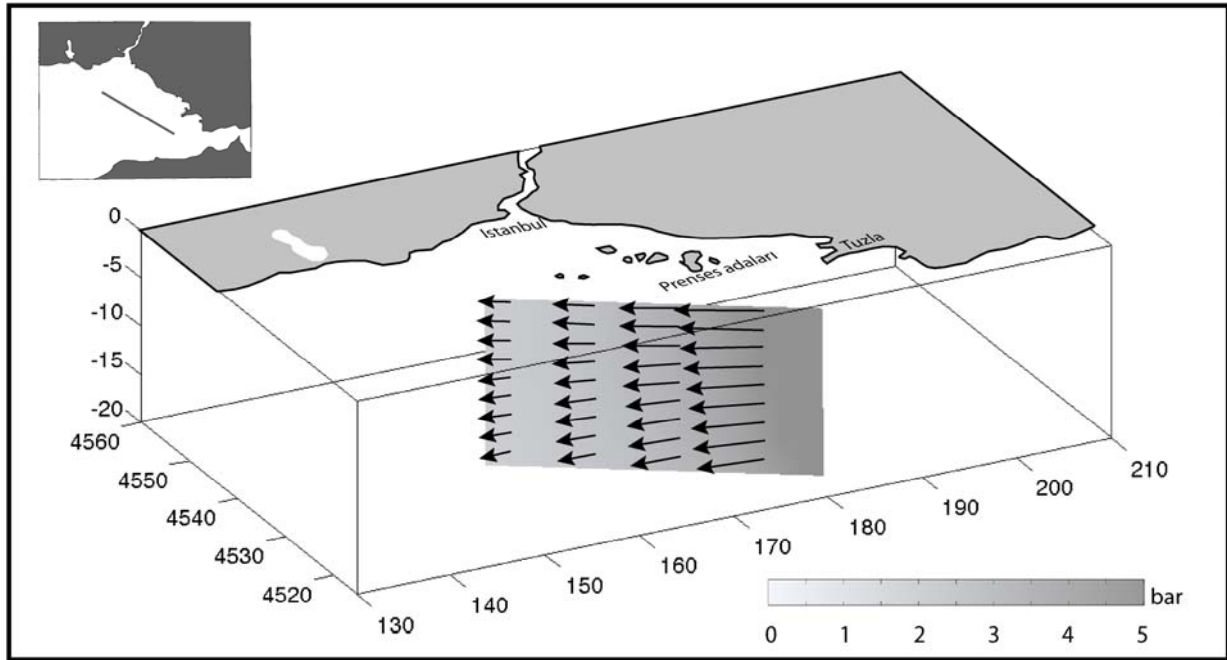
Düzce depreminden sonra Marmara bölgesi ve civarındaki gerilme durumu

1999 Düzce ve daha öncesinde oluşan depremler sonucunda Marmara bölgesinde meydana gelen gerilme değişimi Şekil 5c'de gösterilmektedir.

Yüksek gerilme artışının meydana geldiği üç bölge bulunmaktadır: Bolu, Doğu Marmara ve Batı Marmara denizi. Bir bar'ın üzerinde bir gerilme artışının bulunduğu Bolu bölgesindeki bu artış, 1944 Gerede kırığı ile 1999 Düzce kırığı

arasında 12-15 km'lik kırılmamış bir fay zonunun varlığından kaynaklanmaktadır (Şekil 5c). Bolu, Kuzey Anadolu fayının Marmara ve Ege denizine doğru devam eden iki ana kola ayrıldığı bir bölgede bulunmaktadır. Güney kolun Mudurnu vadisi boyunca devam eden kısmı 1944, 1957 ve 1967 depremleri ile kuzey kolun Düzce, Karadere ve İzmit boyunca devam eden kısmı ise 1999 depremleriyle kırılmıştır. Bolu civarında, bu iki kol 20-25 km genişlikteki bir sıçrama zonu ile birbirinden ayrılmaktadır. Bu zon içerisinde, yaygın olarak bir çok küçük ve süreksiz faylar bulunmaktadır. Bu bölgede yapmış oldukları detay paleosismoloji çalışmalarından, Barka ve diğerleri (2001) bu bölgenin 6'dan büyük deprem üretebilecek bir potansiyele sahip olmadığı sonucuna ulaşmışlardır.

Deprem riski en yüksek iki bölge ise, gerilme artışının 5 bar'ın üzerine çıktığı, 1999 kırıklarının doğusundaki Adalar ve batısındaki Tekirdağ bölgeleridir. Adalar fayı üzerinde meydana gelen gerilme değişimlerini ortaya çıkarmak için, güneye doğru 85° eğimli, 34 km uzunluğunda bir fay düzlemi belirlendi ve bu düzlem ikişer kilometre karelik parçalara bölünerek her bir parça üzerine düşen gerilme miktarı hesaplandı (Şekil 6).



Şekil 6. Adalar fayı üzerinde İzmit ve öncesi depremlerin meydana getirdiği gerilme değişimi (Oklar kesme gerilmesinin yönünü ve büyüklüğünü vermektedir.)

Fay düzleminin konumu ve geometrisi, bu bölgede yapılan detay batimetri ve derin sismik çalışmalardan (Le Pichon vd., 2001; Armijo vd., 2002; Singh vd., 2002) elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak belirlendi. Şekil 6'da gösterildiği gibi, İzmit kırığı ucu yakınlarında maksimum olan, Adalar fayı üzerindeki Coulomb gerilme artışı (5 bar'ın üzerinde) batıya ve derinlere doğru azalarak devam etmektedir. Önceki depremlerin (hemen hemen tamamen İzmit depremi) Adalar fayı üzerinde meydana getirdiği kesme gerilmesi değişimi, düşük normal bileşenli sağ-yanal doğrultu atımlı bir faylanmayı teşvik etmektedir. Buradan, bu fay boyunca oluşan doğrultu atımlı artçı şokların (Özalaybey vd., 2002) muhtemelen Coulomb gerilme transferiyle tetiklenmiş artçı sarsıntılar olduğu ve dolayısı ile bu fayın gerçek kinematığını kesin olarak yansıtmayacağı sonucu çıkarılabilir.

Sonuçlar

Günümüze kadar civar bölgelerde meydana gelen depremler nedeniyle oluşan gerilme artışları, Marmara bölgesindeki deprem riskini yükseltmiştir. Özellikle 1912 Ganos ve 1999 İzmit depremleri bölgenin batısında ve doğusunda gerilmenin 5 bar'ın üzerinde artmasına neden olmuştur. 5 bar'lık bu artış, sürekli levha hareketleri ile normalde 12-13 yılda birikebilmektedir. Diğer bir deyişle eski depremler, gelecekte Marmara denizi altındaki Kuzey Anadolu fay zonu üzerinde oluşacak depremi 12-13 yıl daha erken bir zamana çekmiştir. Bu bölgede 1766 yılından beri (236 yıldır) büyük bir depremin olmadığı ve büyük depremlerin burada yaklaşık 250 yılda bir tekrarlandığı düşünüldüğünde (Ambraseys ve Finkel 1991; Ambraseys, 2001), Marmara bölgesi ve özellikle İstanbul yakın bir depremin ciddi tehdidi altındadır.

Tartışmalı olmakla Marmara denizi altında Kuzey Anadolu fay zonu tek bir fay parçadan oluşmayıp, toplam yaklaşık 140 km uzunluğunda üç segmentte ayrılmakta (Le Pichon vd., 2001; Armijo vd., 2002). Bu parçalı yapının var olduğu kabul edilirse, gelecekteki bir deprem bu segmentlerin birini kırabileceği gibi, İzmit depremine benzer bir şekilde, üçünü birden de kırabilir ve dolayısı ile, depremin büyüklüğü de

kırılacak segment sayısı ile doğru orantılı olacaktır. Kırık uzunluğu (L) ile depremin moment büyüklüğü (Mw) arasındaki istatistiklerden ortaya çıkartılan amprik formüllere [$M_w=4.95+1.2 \log L$ (Anderson vd., 1996); $M_w=5.08+1.16 \log L$ (Wells ve Coppersmith, 1994)] göre, üçünün birden kırılması, maksimum atımın 5 metre olacağı, yaklaşık 7.5 büyüklüğünde bir deprem üretecektir. Gelecekteki bir depremde bir veya en fazla iki parçanın aynı anda kırılabileceği var sayıldığında, karşımıza çıkan soru bu depremin hangi parça üzerinde oluşacağıdır. 1939 Erzincan depreminden bu yana batıya doğru göç eden depremler zinciri göz önüne alındığında, gelecekteki depremin muhtemelen doğuda, Adalar bölgesinde oluşacağı düşünülebilir. Ancak bu soruya daha sağlıklı bir cevap bulmak için Marmara bölgesinde oluşan tarihsel depremlerin tam olarak nerelerde oluştuğu bilinmesi gerekmektedir. Örneğin 1912 depreminin Marmara denizi içerisinde doğuya doğru ne kadar devam ettiği bilinmemektedir. Eğer 1912 depreminde doğudaki segment tamamen kırılmış ise gelecekte meydana gelecek depremin maksimum uzunluğu daha kısa (~ 80 km) olacak ve dolayısı ile büyüklüğü de daha az (~ 7.3) olacaktır.

Yukarıda bahsedildiği gibi, İzmit depreminin çevrede neden olduğu gerilme değişimi bir çok farklı araştırmacı tarafından hesaplanmıştır. Ancak genel olarak birbirine benzemekle birlikte, ortaya sürülen modeller arasında bazı önemli farklar bulunmaktadır. Dolayısı ile, her bir modele dayanılarak elde edilen deprem ihtimali hesapları, kısa ve uzun dönem deprem uyarıları gibi çalışmalar birbirinden farklı olacaktır. Bu nedenle, Coulomb çalışmalarında mümkün olduğunca en iyi şekilde belirlenmiş deprem parametreleri kullanılmalıdır. Bu şekilde artçı depremlerin yerleri çok daha iyi belirlenebilir. Ancak, unutulmamalıdır ki Coulomb modellerinin artçı şokların yerlerini çok iyi tahmin etmesi, bu modellerin her zaman doğru olduğu anlamına gelmez. Örneğin, önceki çalışmalarda Jeodezik (Reilinger vd., 2000; Wright vd., 2001) ve sismolojik verilerden (Özalaybey vd., 2002) ortaya çıkartılan sonuçların tersine, Coulomb modellerinin özellikle Yalova civarındaki artçı

şokları daha iyi tahmin ettiği gerekçesiyle, Pınar ve diğerleri (2001) İzmit depremi kırığının Hersek burnunun batısına geçmediği görüşündedir. Ancak, artçı şokların Coulomb gerilmesi ile ilişkisi tartışıldığında, genellikle olduğu gibi, burada da artçı depremlerin kinematığı gözardı edilmektedir. Farklı kinematikteki optimum faylara göre yapılan Coulomb hesaplamaları farklı sonuçlar verecektir. Örneğin, optimum konumlu doğrultu-atımlı faylara göre hesap edilmiş Coulomb gerilme değişimleri, optimum konumlu eğim-atımlı faylara göre hesap edilmiş Coulomb gerilme değişimleri ile aynı değildir. Dolayısı ile, örneğin doğrultu-atımlı faylara göre hesaplanmış Coulomb gerilme dağılımı ile normal faylanmayla gelişen artçı şokların yerleri arasında hiç bir ilişki olmayabilir. Sismik çalışmalar, Yalova civarında oluşan depremlerin büyük bir kısmının saf eğim-atımlı faylanmalardan kaynaklandığını göstermektedir (Örgülü ve Aktar 2001; Pınar vd., 2001; Özalaybey vd., 2002). Dolayısıyla, bu artçı sarsıntıların Coulomb gerilme transferi sonucunda tetiklenmiş olup olmayacağını ileri sürebilmek için, Coulomb gerilme değişimlerini, Pınar ve diğerlerinin (2001) yaptığı gibi optimum konumlu doğrultu-atımlı faylara göre değil, optimum konumlu normal-atımlı faylara göre hesap etmek gerekmektedir.

Dolayısıyla, bir depremin kaynak parametrelerini, bu parametrelerin ortaya koyduğu Coulomb gerilme değişimi ile artçı şokların uyumuna göre değerlendirirken dikkatli olmak gerekmektedir. Nihayetinde, Coulomb tetikleme dışında, artçı sarsıntılar bir çok farklı nedenlerle de meydana gelebilir (örneğin, dinamik gerilme değişimi, sıvı hareketleri, deprem-sonu asismik kayma (after-slip), alt kabuktaki deprem sonrası vizkoelastik dengeleme hareketleri, vs.). Normal faylanmaya bağlı gelişen Yalova artçı şok kümesi, muhtemelen Coulomb tetikleme sonucunda oluşmayan bir sismik aktiviteye örnek teşkil edebilir. Çünkü İzmit depreminden kaynaklanan Coulomb gerilme değişimleri optimum konumlu normal faylara göre hesaplandığında, bu artçı şok kümesi, gerilmenin hemen hemen tamamıyla negatif olduğu bir alanda bulunmaktadır. Buradaki sarsıntılara

neden olabilecek faktörlerden birisi olarak dinamik tetikleme gösterilmektedir (Özalaybey vd., 2002)

Deprem öncesinde İzmit ve Düzce kırıkları üzerine düşen Coulomb gerilme değişimleri ile bu kırıklar üzerinde daha sonra meydana gelen kayma dağılımı arasında bir korelasyon gözlenmemektedir. İzmit depreminin Düzce fayı üzerindeki gerilmeyi 5-6 bar arttırarak büyük olasılıkla Düzce depremini tetiklemiş olabileceği düşünülmektedir. Ancak, bu eşsismik etki, Düzce depreminin neden İzmit depremi ile değil de, yaklaşık üç ay sonra meydana geldiğini tek başına açıklayamamaktadır. Statik Coulomb gerilme artışının yanı sıra, İzmit depremi sonrası oluşan viskoelastik deformasyonların da (Ergintav vd., 2002) Düzce depreminin oluşmasına önemli derecede katkı sağladığı düşünülmektedir (Hearn vd., 2002).

Teşekkür

Coulomb gerilme hesaplamalarında, Toda ve diğerleri (1998) tarafından geliştirilen ve ücretsiz dağıtılan Coulomb2.1 programı kullanıldı (<http://quake.wr.usgs.gov/research/software/#Coulomb>). Coulomb kursunu düzenleyip veren Ross Stein ve Shinji Toda'ya ve bu kursa imkan veren Bilkent Üniversitesi'ne teşekkür ederiz. İlk aşamalarda bu makale üzerine yaptığı yorum ve düzeltmelerinden dolayı Süleyman Nalbant'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Akyüz, H. S., Hartleb, R., Barka, A., Altunel, E., Sunal, G., Meyer, B. ve Armijo, R., (2002). Surface rupture and slip distribution of the 12 November 1999 Düzce earthquake (M 7.1), north Anatolian fault, Bolu, Turkey, *Bulletin of Seismic Society of America*, **92**, 61-66.
- Altunel, E., Barka, A. ve Akyüz, H. S., (2000). Slip distribution along the 1912 Mürefte-Şarköy earthquake, North Anatolian fault, western Marmara, 341-349, in: *The 1999 Izmit and Düzce Earthquakes: Preliminary results*, ed: A. Barka, O. Kozacı, S. Akyüz and E. Altunel, Istanbul Technical University, Istanbul.
- Ambraseys, N. N. ve Zatopek, A., (1969). The Mudurnu Valley, west Anatolia, Turkey,

- earthquake of 22 July 1967. *Bulletin of Seismic Society of America*, **59**, 521-589.
- Ambraseys, N. N. ve Finkel, C., (1991). Long-term seismicity of Istanbul and of the Sea of Marmara region, *Terra Nova*, **3**, 527-539.
- Ambraseys, N. N. ve Jackson, J. A., (1998). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, **133**, 390-406.
- Ambraseys, N. N., (2001). The earthquake of 10 July 1894 in the Gulf of Izmit (Turkey) and its relation to the earthquake of 17 August 1999, *Journal of Seismic Exploration*, **5**, 117-128.
- Anderson, E. M., (1951). The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain, *Oliver & Boyd, Edinburgh*, 206 p.
- Anderson, J. G., Wesnousky, S. G. ve Stirling M. W., (1996). Earthquake size as a function of fault slip rate, *Bulletin of Seismic Society of America*, **86**, 683-690.
- Armijo, R., Meyer, B., Navarro, S., King, G. C. P. ve Barka, A., (2002). Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: A clue to propagation processes of the North Anatolian Fault, *Terra Nova*, **14**, 80-86.
- Barka, A. ve Kadinsky-Cade, K., (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity, *Tectonics*, **7**, 663-684.
- Barka, A., (1996). Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939-1967, *Bulletin of Seismic Society of America*, **86**, 1238-1254.
- Barka, A., (1999). The 17 August 1999 Izmit earthquake, *Science*, **285**, 1858-1859.
- Barka, A., Altunel, E., Akyüz, S., Çakır, Z., Kozacı, O., Lettis, W., Bachhuber, J., Hitchcock, C. ve Helms, J., (2001). Seismic Activity and Fault Segmentation of the NAF in the Bolu Mountain: Relationship between the November 12, 1999 and the February 1, 1944 Earthquakes, *EUG XI Meeting, Strasburg, France*.
- Barka, A., Akyüz, S. H., Altunel, E., Sunal, G., Çakır, Z., Dikbaş, A., Yerli, B., Armijo, R., Meyer, B., de Chabalier, J. B., Rockwell, T., Dolan, J. R., Hartleb, R., Dawson, T., Christofferson, S., Tucker, A., Fumal, T., Langridge, R., Stenner, H., Lettis, W., Bachhuber, J. ve Page, W., (2002). The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake M=7.4, North Anatolian fault, *Bulletin of Seismic Society of America*, **92**, 43-60.
- Çakır, Z., de Chabalier, J. B., Armijo, R., Meyer, B., Barka, A. ve Peltzer, G., (2001). The August 17, 1999 Turkey Earthquake seen with InSAR Imagery and Tectonic Field Observations, *EUG XI Meeting, Strasburg, France*.
- Çakır, Z. de Chabalier, J. B., Armijo, R., Meyer, B., Barka, A. ve Peltzer, G., (2002). Surface deformation of the 1999 Izmit earthquake deduced from InSAR, *EGS XXVII General Assembly, Nice, France*.
- Ergin, K., (1969). 22 Temmuz 1967 Adapazarı-Mudurnusuyu Vadisi depremi üzerine incelemeler. *ITU Arz Fiziği Enstitüsü Yayınları*, **27**.
- Ergintav, S., Bürgmann, R., McClusky, S., Çakmak, R., Reilinger, R.E., Lenk, O., Barka, A. ve Özener, H., (2002). Postseismic deformation near the Izmit earthquake (17 August 1999, M=7.5) rupture zone, *Bulletin of Seismic Society of America*, **92**, 194-207.
- Fred, A. M. ve Lin, J., (2001). Delay triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by viscoelastic stress transfer, *Nature*, **411**, 180-183.
- Harris, R. A. ve Simpson, R. W., (1992). Changes in static stress on southern California faults after the 1992 Landers earthquake, *Nature*, **360**, 251-254.
- Harris, R. A., (1998). Stress triggers, stress shadows and implications for seismic hazards, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 24347-24358.
- Hartleb, R. D., Dolan, J. F., Akyüz, H. S., Dawson, T. E., Tucker, A. Z., Yerli, B., Rockwell, T. K., Toraman, E., Çakır, Z., Dikbaş, A. ve Altunel, E., (2002). Surface rupture and slip distribution along the Karadere segment of the 17 August 1999 Izmit and the western section of the 12 November 1999 Düzce, Turkey, earthquakes, *Bulletin of Seismic Society of America*, **92**, 67-78.
- Hearn, E. H., Bürgmann, R. ve Reilinger, R. E., (2002). Dynamics of Izmit earthquake postseismic deformation and loading of the Düzce earthquake hypocenter, *Bulletin of Seismic Society of America*, **92**, 172-193.
- Hubert, A., King, G. C. P., Armijo, A., Meyer, B. ve Papanastassiou, D., (1996). Fault re-activation, stress interaction and rupture propagation of the 1981 Corinth earthquake sequence, *Earth Planet Science Letters*, **142**, 573-585.
- Hubert-Ferrari, A., Barka, A., Jacques, E., Nalbant, S. S., Meyer, B., Armijo, R., Tapponnier, P. ve King, G. C. P., (2000). Seismic hazard in the Marmara Sea following the 17 August 1999 Izmit earthquake, *Nature*, **404**, 269-273.
- King, G. C. P., Stein, R. S. ve Lin, J., (1994). Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bulletin of Seismic Society of America*, **84**, 935-953.
- King, G. C. P. ve Cocco, M., (2000). Fault interaction by elastic stress changes: new clues from earthquake

- sequences, *Advances in Geophysics*, **44**, 1–38.
- King, G. C. P., Hubert-Ferrari, A., Nalbant, S., Meyer, B., Armijo, R. ve Bowman, D., (2001). Coulomb interactions and the 17 August 1999 Izmit, Turkey earthquake, *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, **333**, 557-570.
- Le Pichon, X., Sengör, A. M. C., Demirbag, E., Rangin, C., Imren, C., Armijo, R., Gorur, N., Cagatay, N., de Lepinay, B.M., Meyer, B., Saatçılar, R. ve Tok, B., (2001). The active main Marmara fault, *Earth Planet Science Letters*, **192**, 595-616.
- McClusky, S. C., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Georgiev, I., Hamburger, M., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidse, G., King, R., Kotzev, Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadaria, M., Ouzounis, A., Paradisissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Teableb, A., Toksöz, N. ve Veis, Y., (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, **105**, 5695–5719.
- Nalbant, S. S., Hubert, A. ve King, G. C. P., (1998). Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the North Aegean sea, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 14469-24486.
- Okada, Y., (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of Seismic Society of America*, **75**, 1135-1154.
- Örgülü, G. ve Aktar, M., (2001). Regional moment tensor inversion for strong aftershocks of the August 17, Izmit earthquake (Mw=7.4), *Geophysical Research Letters*, **28**, 371-374.
- Özalaybey, S., Ergin, M., Aktar, M., Tapırdamaz, C., Biçmen, F. ve Yörük, A., (2002). The 1999 Izmit earthquake sequence in Turkey: seismological and tectonic aspects, *Bulletin of Seismic Society of America*, **92**, 376-386.
- Papadimitriou, E. E., Karakostas, V. G. and Papazachos, B.C., (2001) Rupture zones in the area of the 17.08.99 Izmit (NW Turkey) large earthquake (Mw 7.4) and stress changes caused by its generation, *Journal of Seismology*, **5**, 269–276.
- Parsons, T., Shinji, T., Stein, R. S., Barka, A. ve Dieterich, J. A., (2000). Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: an interaction-based probability calculation, *Science*, **228**, 661-665.
- Pınar, A., Honkura, Y. ve Kuge, K., (2001). Seismic activity triggered by the 1999 Izmit earthquake and its implications for the assessment of future seismic risk, *Geophysical Journal International*, **146**, F1–F7.
- Pollitz, F. F. ve Sacks, I.S., (2002). Stress triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by transient deformation following the 1992 Landers earthquake, *Bulletin of Seismic Society of America*, **92**, 1487-1496.
- Reilinger, R. E., Ergintav, S., Bürgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Barka, A., Gürkan, O., Hearn E. H., Feigl, K. L., Çakmak, R., Aktuğ, B., Özener, H. ve Toksöz, M. N., (2000). Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999 M=7.5, Izmit, Turkey earthquake, *Science*, **289**, 1519-1524.
- Singh, S., Hirn, A., Voogd, B., Vigner, A., Bazin, S., Charvis, P., Gelil L., Saatçiler, R., Taymaz, T., Özalaybey, S., Çetin, S., Ocakcioğlu, N., Ricolleau, A. ve Karakoç, F., (2002). 3D geometry of the North Anatolian fault system in the Çınarcık basin: Preliminary results, *1th International symposium of Istanbul Technical University Faculty of Mines on earth sciences, abstract book, p 11*.
- Stein, R. S., King, G. C. P. ve Lin, J., (1992). Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude=7.2 Landers earthquake, *Science*, **258**, 1328-1332.
- Stein, R. S., King, G. C. P. ve Lin, J., (1994). Stress triggering of the 1994 M=6.7 Northridge, California earthquake by its predecessors, *Science*, **256**, 1432-1435.
- Stein, R. S., Barka, A. ve Dieterich, J. H., (1997). Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering, *Geophysical Journal International*, **128**, 594-604.
- Toda, S., Stein, R. S., Reasenberg P. A. ve Dieterich, J. H., (1998). Stress transferred by the Mw=6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 24543-24565.
- Toksöz, M. N., Shakal, A. F. ve Michael, A. J., (1979). Space-time migration of earthquakes along the North Anatolian fault zone and seismic gaps, *Pageoph*, **117**, 1258-1270.
- Toksöz, M. N., Reilinger, R. E., Doll, C. G., Barka, A. A. ve Yalçın, N., (1999). Izmit (Turkey) earthquake of the 17 August 1999: first report, *Seismic Research Letters*, **70**, 669-679.
- Wells, D. L., ve K. J. Coppersmith, (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture, length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of Seismic Society of America*, **84**, 974-1002.
- Wright, T. J., Fielding, E. J. ve Parsons, B. E., (2001). Triggered slip: observations of the 17 August 1999 Izmit earthquake using radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, **28**, 6, 1079-1082.