

17 Ağustos 1999 İzmit Depremi Sonrasında Marmara'da Deprem Riski



17 Ağustos 1999 İzmit depremi, doğuda Karlıova'dan başlayıp batıda Yunanistan'a kadar uzanan ve uzunluğu yaklaşık 1600 km olan Kuzey Anadolu Fayı (KAF) üzerinde meydana gelmişti. Anadolu ile Avrasya levhaları arasındaki sınırı oluşturan ve yılda 2-3 cm/yıl hızla sürekli hareket eden KAF üzerinde, bugüne değin pek çok yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Yalnızca geçtiğimiz yüzyılda bile fayın 900 km'lik bölümü bir dizi yıkıcı depremlerle kırılmıştır (1999 İzmit depremi dışında). Depremler nedeniyle oluşan gerilme değişimini haritalayarak aktif fay haritası yardımıyla yorumlayan araştırmacılar, 1999 İzmit depreminin önce bölgenin yıkıcı bir deprem için çok yüksek risk taşıdığını başarıyla kestirmişlerdi. Bu çalışmamız 1999 İzmit depreminin bölgede var olan gerilme

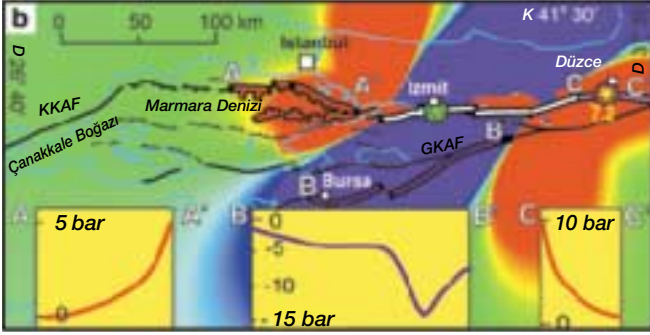
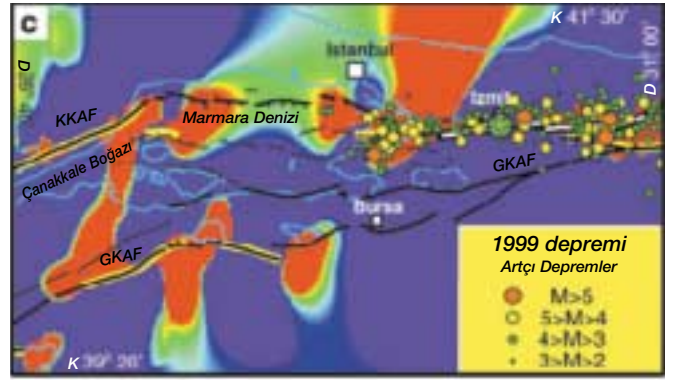
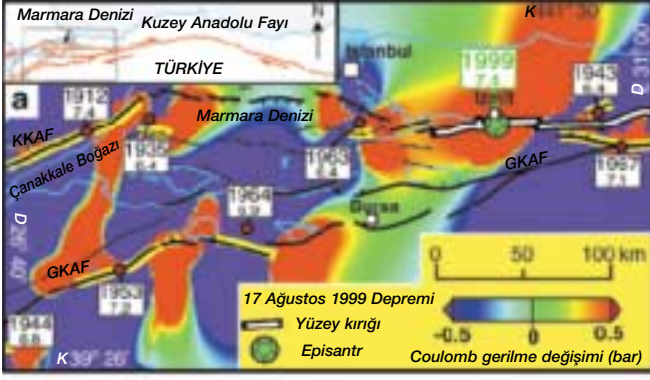
dağılımını önemli ölçüde değiştirdiğini göstermektedir. Gerilme alanı modellerinde 1700'lü yıllardan günümüze kadar meydana gelen ve büyüklüğü, $M_s=6$ ve daha büyük bütün depremler göz önüne alınmış, ayrıca depremler arasında intersismik dönemlerdeki küresel tektonik hareketler nedeniyle meydana gelen kalıcı gerilme birikimi, küresel konumlama sistemi (GPS) sonuçlarının yardımıyla çalışmaya eklenmiştir. Elde edilen gerilme dağılımı, KAF'ın uzun bir dönemdeki zaman-mekân davranışını ortaya koymuştur. Önümüzdeki birkaç on yılda (en fazla 30-40 yıl), Marmara Deniz'inin kuzey yarısında bir ya da iki ve yaklaşık 1999 İzmit depremi büyüklüğünde depremlerin olma olasılığının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

KAF, İzmit'in 70 km doğusunda iki ana kola ayrılmaktadır. KAF'ın kuzey kolu (KKAF) Marmara Denizi içinden geçerken, güney koluysa (GKAF) denizin güneyinde karada devam etmektedir. Bu kollar üzerinde 1900'den İzmit depremi öncesine kadar büyüklüğü $6 \leq M < 7$ olan beş, $M \geq 7$ olan üç deprem olmuştur. Bu dönemde meydana gelen $M > 7$ dep-

remlerinin her birinde, birden fazla fay parçası kırılmıştır. Bu depremler tarihsel dönemde meydana gelen $M > 7$ depremlerin atımlarının kestirilmesinde kılavuz olarak kullanılmışlardır.

1900'den 1999 İzmit depremi öncesine değin bölgede meydana gelen ve büyüklükleri $M \geq 6$ olan depremlerin neden olduğu gerilme değişimi

Şekil 1a'da görülmektedir. 1963 Çınarcık ve 1967 Mudurnu Vadisi depremleri, 1999 İzmit depremi episantr bölgesine 0.5 ile 2 bar arasında bir gerilme yüklemesi yapmıştır. Bu bölge, daha önceki çalışmalarda deprem tehlike riski yüksek bir bölge olarak vurgulanmıştı. Kandilli Rasathanesi verilerine (İzinet deprem gözlem ağı) göre son birkaç yıldır mikrodep-



Şekil 1. Bu yüzyılda Marmara bölgesinde oluşan depremler nedeniyle optimum geometrideki kayma yüzeyleri üzerinde 6 km derinlikteki gerilme değişimi: a) 1999 İzmit depremi öncesi meydana gelen ve büyüklüğü, $M>6$ olan depremler için. Modellemede kullanılan fay parçaları sarı renkte, episantrları ise içi kırmızı dolgulu daireler ile ifade edilmiştir. Çalışma alanı sol üst köşedeki şekilde gösterilmiştir. b) 1999 İzmit depremi sırasında hareket eden dört fay parçası nedeniyle oluşan gerilme değişimi (içi beyaz renkli fay parçaları). Kırılma batıya İzmit Körfezi girişine doğru devam etmiş olabilir; ancak bu modele dahil edilmemiştir. İzmit kırığının doğu ucunun devamında bulunan fay parçaları (C-C' boyunca ve pembe renkli) İzmit depremi nedeniyle çok yüksek oranda gerilme yüklemesine maruz kalmış ve 12 Kasım 1999 Düzce depremi ($M=7.2$) sırasında hareket etmiştir. İzmit kırığının batı ucunda yer alan ve içi kırmızı

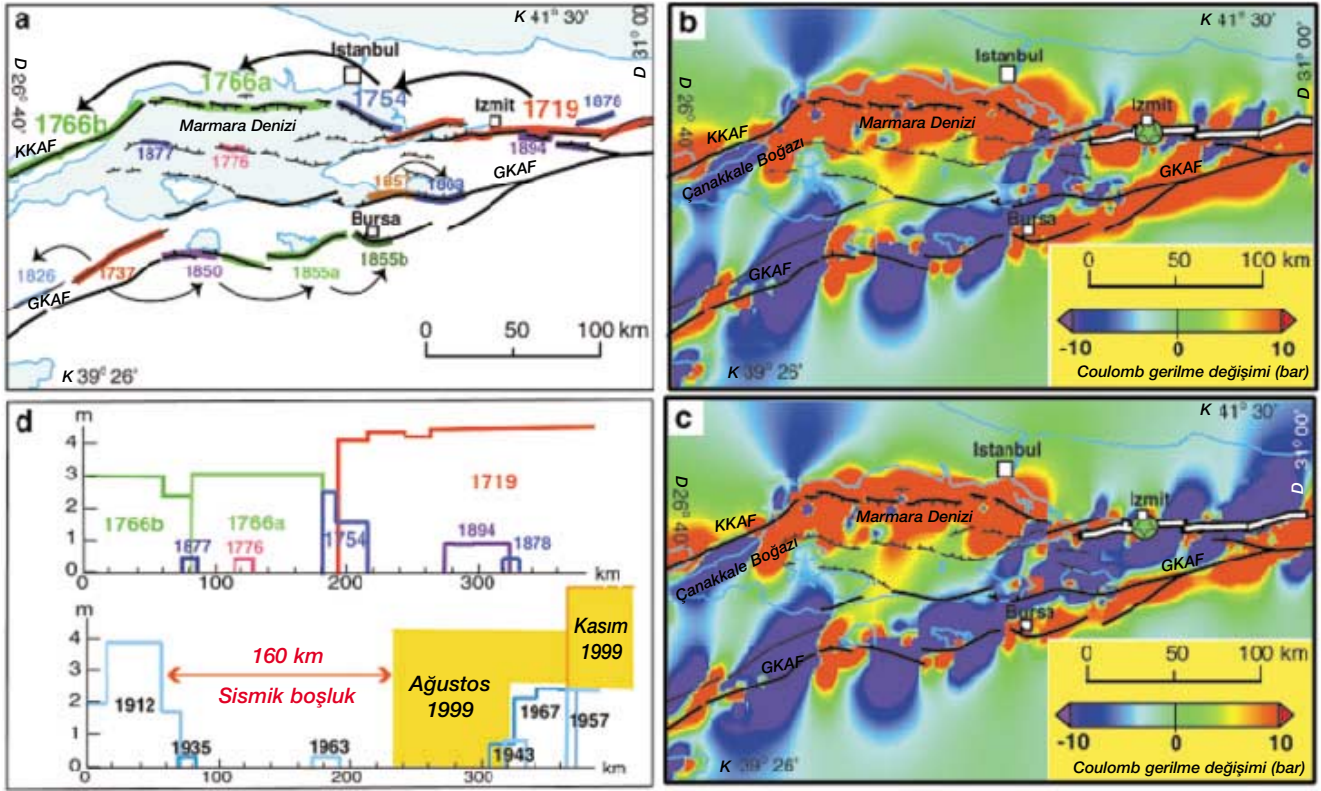
renkle ifade edilen fay parçaları da yüksek oranda gerilme yüklenmiştir. Küçük pencere şekillerde A-A', B-B' ve C-C' kesitleri boyunca meydana gelen Coulomb gerilme değişimleri gösterilmiştir. A-A' kesiti içi kırmızı renkli her iki fay boyunca gerilme değişimini göstermektedir. Çünkü her iki fay da hemen hemen aynı oranda gerilme yüklemesine maruz kalmışlardır. c) 1900 yılından günümüze meydana gelen bütün depremler nedeniyle oluşan gerilme değişimi. Artçı şoklar dikkat çekecek şekilde gerilme yükseliminin olduğu bölgelerde birikmişlerdir. Bununla birlikte, 1963 Çınarcık depreminin gerilim boşalttığı gölge bölgesinde hemen hemen hiç deprem olmamıştır.

rem aktivitesinin İzmit depremi episantr bölgesinde yoğunlaştığı göze çarpmaktadır. İzmit depremi, gerilme yüklemesinin olduğu bölgeden başlamış ve dört ana kırık üzerinden en az 110 km uzunluğunda ve 5 m'ye varan sağ-yanal atımla meydana gelmiştir (Şekil 1a). 1999 İzmit depremi, civarındaki gerilme dağılımını önemli ölçüde değiştirerek, Adalar ve İstanbul'un güneyinden geçen KKAF'ın 25 km'lik kısmı üzerinde 5 ile 1 bar arasında, yaklaşık üç ay sonra Düzce depreminin meydana geldiği fay üzerindeyse 10 bar'a varan bir yüklemeye yapmıştır (Şekil 1b). 12 Kasım 1999 Düzce depremi 5 m'ye varan sağ-yanal ve kısmi olarak 4 m'ye varan düşey bir faylanmayla meydana gelmiştir. Her iki büyük deprem üzerinde Bursa'nın da yer aldığı KAF'ın güney kolunun (GKAF) 120 km'lik bir bölümünde, gerilmeyi 15 ile 3 bar arasında azaltarak, bu kol üzerinde gelecekte olası bir depremi, daha ileriki bir tarihe erteleyerek bölgeyi rahatlatmıştır (Şekil 1b). Kandilli Rasathanesi'nin kaydettiği büyük artçı şoklar, 1999 İzmit depremi gerilme haritası ile karşılaştırıldı-

ğında, artçı şokların ya ana fay parçaları üzerine ya da gerilmenin en çok arttığı deprem kırığının her iki uç bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 1c). Daha önce oluşan depremler modellemeye dahil edildiğinde, 1999 İzmit depremi kırığının batı ucuna yakın bir yerde meydana gelmiş olan, 1963 Çınarcık depremi kırığı boyunca oluşan gerilmenin düştüğü gerilme gölgesi bölgesine hemen hemen hiç artçı şok düşmemektedir. Buysa aradan geçen 36 yıl sonra bile gerilme gölgesinin etkisinin sürdüğünü göstermektedir.

Kuzey Anadolu Fayı'nın sismik davranışı 1700 yılından günümüze kadar oluşan $M>6$ bütün depremlerin gerilme alanlarının modellenmesi ile daha iyi anlaşılabilir (Şekil 3a). 1700-1900 yılları arası oluşan depremlerin yaptığı hasar dağılımıyla ilgili bilgiler elimizdedir. Bu bilgiler, haritalanmış aktif fay verileri ve faylanma-deprem büyüklüğü arasındaki amprik bağıntılarla birleştirildiğinde, gerilme alanı modelleme çalışmaları için gerekli giriş verileri elde edilebilmektedir. Küresel konumlama sisteminin (GPS) verilerine göre, küresel tektonik ha-

reketlerden (göreceli levha hareketleri) dolayı Kuzey Anadolu Fayı'nın yüksek bir yıllık kayma oranına sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu tektonik hareket, KAF boyunca ayrı bir gerilme alanı (seküler gerilme alanı) oluşturduğundan hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu gerilme, kırılğan kabuğun altında plastik hareket gösteren alt kabuğun hareketi kaynak kabul edilerek, GPS verilerine göre hareket eden bir kayma yüzeyinin sonucu olarak modellenmiştir (çerçeve yazı ve Şekil 2). Gerek 1700 yılından 1999 İzmit depremi öncesine kadar oluşan bütün depremler ($M>6$), gerekse tektonik hareketler nedeniyle oluşan gerilme dağılımı Şekil 3b'de görülmektedir. Modelleme, deprem sonrasında alt kabukta meydana gelen ve ortamı dengelemeye yönelik viskoz hareketlerin gerilme değişimini içermemektedir. İzmit depreminin olduğu gerilmeli bölge, 40 km ile sınırlıdır ve deprem episantrı ile batıya doğru gelişmiş bütün kırıkları içermektedir. Doğuya doğru uzanan kırıklar deprem öncesi homojen bir gerilme ile yüklenmemiştir. Fakat kırılma ilerledikçe gerilme ile yüklenmiş-



Şekil 3. 1700 yılından günümüze hem deprem hem de tektonik hareket nedenli gerilme değişimi. a) 1700 ile 1900 yılları arası oluşan depremleri modellemeye kullanılan fay parçalarının yerleri. b) 1999 İzmit depremi öncesi gerilme değişimi. İzmit depremi episantrı yüksek gerilmeli bölgede yer almıştır (yeşil renkli yıldız). c) İzmit depremi sonrası gerilme değişimi. Gerilme Marmara Denizi altındaki faylar üzerinde artarken, GKAF üzerinde azalmıştır. d) 1700 yılından günümüze 26°40' ve 31°10' boylamları arasında kalan Kuzey Anadolu Fayı ve onun kuzey kolu (KKAF) üzerinde depremler sırasında oluşan kayma miktarlarının, göreceli levha hareketi yayına paralel olarak izdüşümleri. Buna göre 18. yüzyılda Marmara bölgesindeki bütün faylar boşluk bırakmayacak biçimde hareket etmişlerdir (üstte). Yani 1766 yılına kadar biriken atım miktarları depremler ile boşaltılmıştır. Küçük depremler toplam birikimin küçük bir kısmını karşılamaktadır. 1900 yılından günümüze Marmara Denizi'nin doğu ve batı bölgelerinde yer alan büyük depremler ile biriken atım boşaltılırken (altta) Marmara Denizi içinde 160 km uzunluğunda biriken atımın boşaltılmadığı, bir sismik boşluk olarak ifade edilebilecek bölge kırılmadan kalmıştır. 1999 İzmit ve Düzce depremleri Marmara Denizi'nin doğu kısmındaki biriken atımları boşaltarak o bölgelerdeki boşlukları doldurmuşlardır.

dır. 17 Ağustos 1999 İzmit depremi, KKAF üzerinde biriken 5 m'lik bu kayma birikimini boşaltmıştır (Şekil 3d). 12 Kasım 1999 Düzce depremiyse İzmit depremi kırık zonunu doğuya KAF'ın 1944 yılında kırılan kesimine doğru uzatmıştır. KAF'ın Düzce bölümünün kırılmasıyla Erzincan ile Marmara Denizi arasındaki bölüm tümüyle kırılmış oldu. Kırılmanın niye Marmara Denizi'nde devam etmediği sorusu üç olasılık içinde yanıtlanabilir. İlk olasılık, 1963 Çınarcık depreminin oluşturduğu gerilme gölgesi koridorunun etkisi (Şekil 1a), kırılmayı durdurucu bir etki yapmış olabilir. İkinci olasılık Marmara Denizi'ndeki fayların geometrisiyle ilgili olabilir. 1719 ve 1999 depremlerinde hareket eden ve baskın olarak yanal hareket karakterinde olan faylar, Marmara Denizi'nin doğusunda aynı biçimde sürmüyor olabilir. Adaların ve İstanbul'un güneyinden geçen fayların hareket bileşenlerinin

büyük bir kısmının düşey hareket olması nedeniyle, farklı fay sistemlerine hareketin aktarılması kolayca mümkün olmayabilir. Son olasılık, fay parçalarının geometrisine ve atım bilgisine dayalı olan gerilme modellememizin gösterdiğine göre, hareket daha önceki depremlerin (1963 depremi dahil olmak üzere) neden olduğu gerilme düşümüyle ilgili olarak sürmemiş olabilir (Şekil 3b). Model İzmit depremi de dahil edildiğinde, 1766'dan günümüze Marmara Denizi'nde 160 km uzunluğunda, KKAF boyunca biriken 5.5 m'lik atım kendini göstermektedir. KKAF'ın tersine olarak, GKAF'ın 1700'den günümüze hangi dönemde tümüyle kırıldığı bilinmemektedir. Bununla birlikte, bu fay kolu boyunca Bursa'nın batısında büyük depremlerin olduğu bilinmektedir. Bu zaman aralığında Bursa'nın doğusunda hiçbir büyük deprem olmamıştır. Bursa'nın doğusunda olan en son büyük

deprem 1417'de meydana gelmiştir. Bu zamana kadar, GKAF'ın 125 km'lik bu kısmı boyunca 3.5 m'lik bir atım birikmiştir.

İzleyen modeller Marmara Denizi'ndeki fayların davranışı hakkında yaptığımız kabullerin doğruluğuna bağlıdır. Bölgede KAF'ın 3 cm/yıl bir hız ile hareket ettiği kabul edilmiştir. Bu oran çok yüksek görülebilir; ancak aksi halde, gerek Ganos (Tekirdağ) bölgesinde (ortalama deprem atımı 3-4 m), gerekse İzmit Körfezi'nde (4-5 m atım) meydana gelen depremlerin ortaya çıkardığı atımları açıklamak oldukça zordur. Gerek tarihi depremlerin atım miktarı, gerekse kollar üzerindeki levha hareketlerinin hızları olduğundan daha yüksek alınmış olabilir. KAF boyunca oluşan levha kayma hızını 2 cm/yıl aldığımızda, biriken atım miktarları 1/3 oranında azalacaktır. Buna karşın tarihi depremler için öngörülen atımların genliği azalsa da dağılımın şekli

bozulmayacaktır (Şekil 3d). Benzer bir genlik azalımı gerilme dağılımında da olacaktır. Yani öngörülen yıllık levha hareket hızlarının değişmesi modelimizi çok fazla etkilemeyecektir. Modelimizi önemli olarak etkileyecek tek etken, Marmara Denizi'nin altındaki faylarda büyük oranda krip (sürünme) ya da sünme hareketinin olmasıdır. Halbuki bu faylarda tarihsel dönem boyunca bir çok deprem olmuştur. Bu gerçek krip ihtimalini ortadan kaldırmaktadır.

Gerilme alanı değişimiyle atım birikiminin birlikte tartışılması, gözlemlerin önemini daha çarpıcı bir şekilde ortaya koyabilir. Marmara Denizi altındaki faylarda 5 m'lik bir atım birikimi bulunmaktadır. Bu birikim 1719 depremini izleyen 1754 ve 1766 depremleriyle ortaya çıkan atım miktarlarından daha büyük olabilir (Şekil 3d). Marmara Denizi'nin gerek doğusu gerekse batısındaki faylar, bu yüzyılda olan depremlerle gerilme yüklenmişlerdir (Şekil 1). Batıdaki gerilme artımı 1912 Mürefte-Şarköy depreminden bu yana de-

vam ederken, doğuda İzmit depremiyle bir yüklenme oluşmuştur. 1719 yılında İzmit depremine benzer büyük bir deprem olmuş ve onun batıya doğru devamındaki faylarda 35 yıl aradan sonra bir deprem daha meydana gelmiştir (1754 depremi). Aynı fay, 1999 İzmit depremi nedeni ile 1 ile 5 bar arasında bir gerilme yüklenmiştir (Şekil 1b). Bu nedenle, bu fayın özellikle artçı depremler dönemi süresince hareket etmesi olasılıklardan biridir. 1754 depreminden 12 yıl sonraki 1766 depremi geri kalan fayları hareket ettirmiştir. Benzer bir davranış tekrar görülebilir.

Bu çalışma sonucu KAF'nin depremlerle ilgili davranışı şu biçimde özetlenebilir: Levha hareketleri nedeniyle fay zonu üzerinde sürekli bir gerilme birikimi oluşmaktadır. Bütün fay sistemi kırılmaya yakın bir hâle ulaştığında, sistemin farklı bölümleri arasında kuvvetli bir benzerlik oluşmakta ve küçük gerilme değişimlerine son derece duyarlı, kritik bir döneme girilmektedir. Böylece, küçük gerilme yüklemeleri (1-5 bar

üst kabuktaki kırılmaları tetikleyecek kadar yeterli olmakta ve fay zonu'nun büyük bir kısmı birbirini izleyen depremler dizisi şeklinde kırılma eğilimi göstermektedir. Kuzey Anadolu Fay zonu'nun büyük bir kısmı 1668 ile 1766 yılları arasındaki yaklaşık 100 yıllık bir dönemde sözedildiği biçimde kırılmıştır. Bu yüzyılda KAF, İzmit ve Düzce depremleri son depremler olmak üzere, doğudan batıya doğru büyüklüğü $M>7$ olan bir dizi depremle hareket etmiştir. Gelecek birkaç onyılıda (30-40 yıl) KAF'nin Marmara Denizi altındaki bölümü de hareket ederek bu deprem dizisi tamamlanacaktır.

Teşekkür: Çalışmanın bazı bölümlerinde laboratuvar imkanlarından yararlandığımız TÜBİTAK-MAM'a ve makaleyi okuyup yapıcı katkılarda bulunan Doç.Dr. Semih Ergintav'a teşekkür ederiz.

Aurélia Hubert-Ferrari¹, Aykut Barka², Süleyman S. Nalbant³, Eric Jacques², Bertrand Meyer⁴, Rolando Armijo⁴, Paul Tapponnier & Geoffrey C. P. King¹

¹ Department of Geosciences, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA., ² İTÜ, Maden Fakültesi, Jeoloji Bölümü, Ayazağa, İstanbul, Turkey., ³ İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fak., Jeofizik Müh. Böl., Sismoloji A.B.D., İstanbul, Turkey., ⁴ Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg (UMS 830 of CNRS), Strasbourg, France. Laboratoire de Tectonique et Mécanique de la Lithosphère (UMR 7578 of CNRS), Institut de Physique du Globe, Paris.

1700 – 1900 Yılları Arasındaki Depremler İçin Fay Parametreleri

Türkiye'deki büyüklüğü $M>6.0$ olan depremlerle oluşan kırıklar yeryüzünde fark edilebilecek jeomorfolojik değişiklikler oluşturmaktadır. Bu da fayın geometrisini haritalamaya fırsat vermektedir. Her fay parçasının karakteristik parametreleri vardır (uzunluk, doğrultu, eğim ve dalım). Bu bilgiler tarihi depremleri tanımlayan hasar dağılımı, sismik deniz dalgaları ya da sıvılaşma bilgileriyle birleştirildiğinde, tarihsel depremlerin parametrelerini yaklaşık olarak bulma fırsatı sağlamaktadır. İstanbul çevresinde 1700-1900 dönemi için büyüklüğü $M>6.0$ olan 15 deprem bulunmaktadır. Bu deprem kayıtlarında $M>7$ depremler iki veya daha fazla kırıkla oluşurlarken daha küçük depremler tek bir kırıkla oluşmaktadır. Bu depremler sırasında oluşan kırıklar başlıca hasar dağılım bilgilerinden faydalanılarak saptandılar. Depremlerin büyüklük ve momentleri ölçükleme bağıntıları ile saptanmaktadır. Modelleme aşamasında, ilk olarak fayları gösteren kayma yüzeyleri üzerine kayma miktarları atanmıştır. Kayma doğrultularına göreli olarak hareket eden levha hareketlerinin doğrultusuna paralel alınmıştır. Gerekli diğer parametrelerse iki ölçüt kullanılarak belirlenmiştir: Birincisi, eğer bir deprem diğerinden büyükse, onun büyüklüğü ve oluşturduğu faylanma da diğerinden daha büyüktür. İkincisi, aynı bölgede olan iki deprem varsa ve onların hangi fay üzerinde olduklarını gösterir açık bir bilgi yoksa, büyük olasılıkla bu depremler birbirine

yakın veya birbirinin devamı olan faylar üzerinde meydana gelmişlerdir. Bu son ölçüye en iyi örnek 1719 ve 1999 depremleridir. Her iki depremin de hasar dağılımı hemen hemen aynı yerlerde olmuştur. Ancak 1719 depremi İstanbul'da daha fazla hasara sebep olmuştur. Eğer aynı faylanma 1999 depreminde tekrarlıysaydı, İstanbul'da daha fazla hasar olması gerekirdi. Bu nedenle 1719 depreminde, 1999 İzmit ve Düzce depremlerindeki faylanmaya ek olarak İstanbul'a daha yakın başka bir deniz altındaki fayın da hareket etmiş olabileceği sonucuna varılmıştır. Birinci ölçüde uyan örnekler ise batıya doğru göç eder şekilde oluşan 1719, 1754, 1766a ve 1766b depremlerinde görülmektedir. Bu depremler devamlı olan fayın farklı kısımlarında meydana gelmişlerdir. Oluşan bu büyük altı tarihi depremin gerek yerleri gerekse deprem parametrelerini belirlemek daha küçük depremlere göre çok daha kolay olmuştur. Diğer depremler için 20 km aralıklı iki hatta üç değişik bölge saptamak mümkündür. Örneğin 1894 depremi 1999 ve 1719 depremlerinin oluşturduğu hasar dağılımına benzer bir dağılım göstermiştir. Fakat neden olduğu yıkım çok daha azdır. Dolayısıyla bu depremin kırığı daha kısa, birden fazla iki parçadan oluşmalıdır. Ancak daha küçük olan bu depremlerin genel atım boşalmasına katkılan küçüktür ve yerlerindeki hata çalışmanın sonuçlarını etkileyecek derecede büyük değildir.

Kaynaklar

- Barka, A.A. 17 August 1999 Izmit earthquake. *Science* 258, 1858-1859 (1999).
 Barka, A.A. The North Anatolian Fault zone. *Ann. Tectonicae* VI (suppl.), 164-195 (1992).
 Reilinger, R.E. ve diğ. Global Positioning System measurements of the present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. *J. Geophys. Res.* 102, 9983-9999 (1997).
 Hubert, A. La faille Nord-Anatolienne (cinématique, morphologie, localisation, vitesse et décalage total) et modélisations utilisant la contrainte de Coulomb sur différentes échelles de temps. Doktora Tezi, Denis Diderot University, Paris VII (1998).
 Armijo, R., Meyer, B., Hubert, A. & Barka, A. Westward propagation of the North Anatolian fault into the northern Aegean: Timing and kinematics. *Geology* 27, 267-270 (1999).
 Ambraseys, N.N. Some characteristic features of the North Anatolian fault zone. *Tectonophysics* 9, 143-165 (1970).
 Ambraseys, N.N. & Finkel, C. Long-term seismicity of Istanbul and of the Sea Marmara region. *Terra Nova* 3, 527-539 (1991).
 King, G.C.P., Stein, R.S. & Lin, J. Static stress changes and the triggering of earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84, 935-953 (1994).
 Nalbant, S.S., Hubert, A. & King, G.C.P. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea. *J. Geophys. Res.* 103, 24469-24466 (1998).
 Stein, R.S., Barka, A.A. & Dieterich, J.H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.* 128, 594-604 (1997).
 Straub, C., Khale, H.G. & Schindler, C. GPS and geological estimates of the tectonic activity in the Marmara Sea region, NW Anatolia. *J. Geophys. Res.* 102, 27587-27601 (1997).
 Barka, A.A. & Kadinsky-Cade, K. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonophysics* 7, 663-684 (1988).
 Harris, R.A. Stress triggers, stress shadows and implications for seismic hazard. *J. Geophys. Res.* 103, 24347-24358 (1998).
 Harris, R.A. & Simpson, R.W. In the shadow of 1857: Effect of the great Ft. Tejon earthquake on subsequent earthquakes in southern California. *Geophys. Res. Lett.* 23, 229-232 (1996).
 Kanamori, H. & Anderson, D.L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 65, 1073-1095 (1975).
 Wittlinger, G. et al. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Albyn Tigh fault. *Science* 282, 74-76 (1998).
 Pollitz, F.F. & Dixon, T.H. GPS measurements across the northern Caribbean plate boundary zone: impact of postseismic relaxation following historic earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 25, 2233-2236 (1998).
 Ambraseys, N.N. & Finkel, C.F. In Historical seismograms and earthquakes of the world (eds. Lee, W.H.K., Meyers, H. & Shimazaki, K.), 173-180 (Acad Press, 1988).
 Dieterich, J. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. Geophys. Res.* 99, 2601-2618 (1994).
 Somette, A. & Somette, D. Self organized criticality and earthquake. *Europhys. Lett.* 9, 197 (1989).
 Bowman, D.D. et al. An observational test of the critical earthquake concept. *J. Geophys. Res.* 103, 24359-24372 (1998).
 Okada, Y. Internal deformation due to shear and tensile fault in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 82, 1018-1040 (1982).
 Segall, P. & Harris, R. Slip deficit on the San Andreas Fault at Parkfield, California, as revealed by inversion of geodetic data. *Science* 233, 1409-1413 (1986).