

Etkileşime Dayalı Bir Olasılık Hesabı İstanbul Yakınlarında Olası Bir Deprem

Marmara Denizi yakınlarındaki Kuzey Anadolu Fay sisteminde, son 500 yılda oluşmuş depremler dikkate alınarak, 10 milyondan fazla insanın yaşadığı İstanbul'da büyük bir depremin meydana gelme olasılığı hesaplandı ve geçtiğimiz binyıl boyunca İstanbul'da meydana gelen depremlerin sıklığı, deprem kataloğuyla karşılaştırıldı. Günümüzdeki uygulamalardan farklı olarak, 17 Ağustos 1999 (M=7.4) İzmit depremi nedeniyle İstanbul'a yakın faylara aktarılan gerilmenin, zamana bağlı etkisi dikkate alındı. Yapılan hesaplardan, önümüzdeki 30 yıl içerisinde İstanbul'a yakın bir alanda büyük bir deprem olma olasılığı 62 ± 15 , önümüzdeki 10 yıl içinde ise 32 ± 12 olarak bulundu.

17 Ağustos 1999 (M=7.4) İzmit ve 12 Kasım 1999 (M=7.2) Düzce depremleri 18000 kişinin ölmüne, 15400 binanın yıkılmasına ve 10-25 milyar dolarlık hasara yol açmıştı. İzmit depremi, 1939 yılından bu yana batıya doğru göç eden 7 büyük depremin en sonuncusudur. Bu deprem bölgesinin hemen kuzeyinde bulunan ve çok hızlı bir biçimde büyüyen İstanbul'daysa, son 1500 yılda, 12 büyük deprem olmuş, ağır hasarlara yol açmıştı. Bu çalışmada İstanbul'daki deprem olasılığı, yeni bir yöntem olan, "depremlerin birbirleriyle etkileşimi" dikkate alınarak hesaplandı. Bu yeni yaklaşımda, faylar üzerindeki gerilmenin uzun dönemdeki yenilenmesinin, yakınlardaki diğer faylar üzerinde meydana gelen depremlerden etkilendiği kabul edildi.

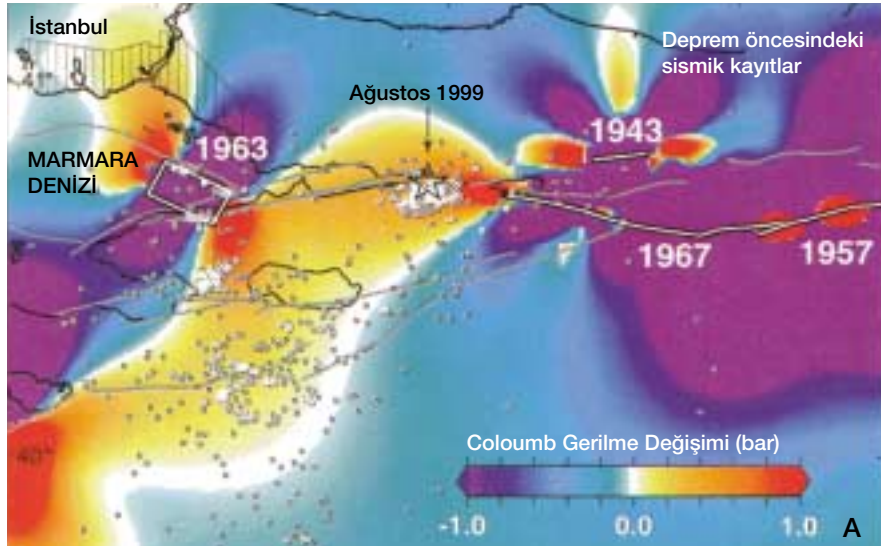
Diğer bir deyişle, bir fay üzerinde oluşan bir deprem, yakınındaki faylar üzerinde biriken gerilmenin artmasına ya da azalmasına yol açıyor.

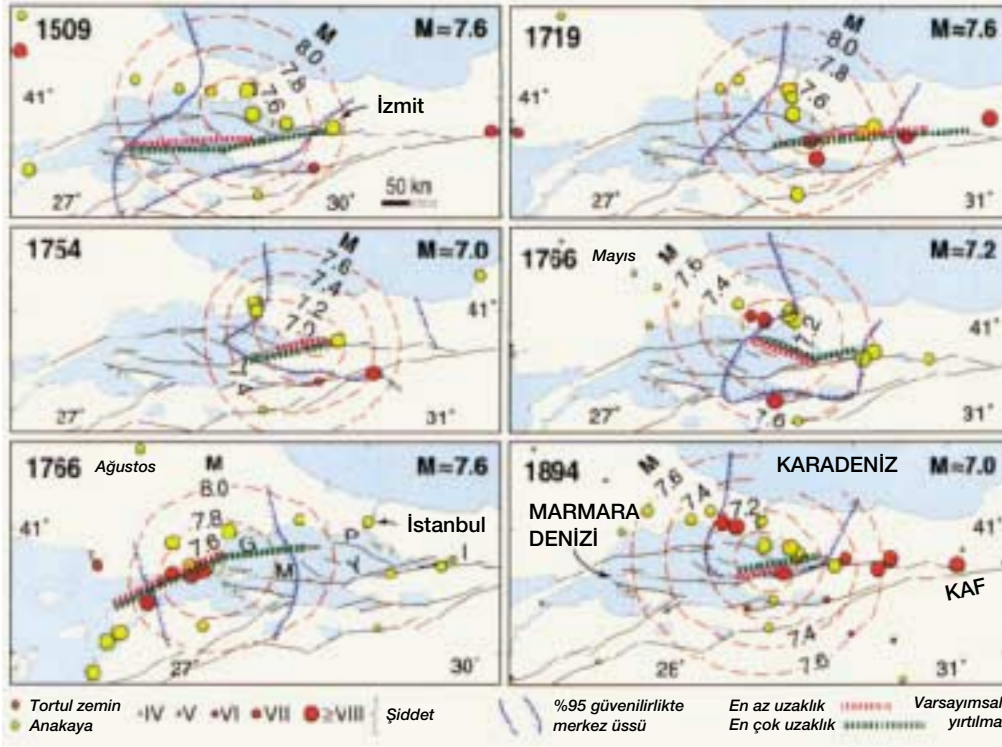
İstanbul'a doğru ilerleyen 60 yıllık depremler zincirinin, depremlerin birbirini tetiklemesinin bir sonucu olduğu kabul ediliyor. Bir deprem, üzerinde olduğu faydaki gerilmeyi azaltırken, komşu faylar üzerindeki gerilmeleri değiştirir. Deprem sonrası yapılan çalışmalar, sismik aktivitenin gerilmenin arttığı alanlarda arttığını, gerilmenin azaldığı alanlardaysa azaldığını ortaya koymuştur. İzmit depremi ve öncesinde oluşan öncü depremler, yani 1939'dan bu yana magnitudü 6.5'ten

büyük depremler nedeniyle, 1-2 bar'lık gerilim artışının olduğu bir alanda meydana gelmişti (Şekil 1A, 1B) (1). Buna karşılık İzmit depremi, Düzce depreminin meydana geldiği bölgede, yani kırığın doğusunda kalan bölgede, gerilimi 1-2 bar arttırırken, artçı depremlerin yoğun olarak meydana geldiği diğer bir alan olan kırığın batı tarafındaki bölgede, gerilimin 0.5-5 bar artmasına yol açmıştır (Şekil 1B). Bu gerilim değişiminin küçük ve büyük depremlerin oluşumuyla ilişkisi Ferrari ve diğerlerince de saptanmıştı. Bu da, deprem olasılığı çalışmalarında "gerilim transferi"nin de hesaba katılması gerektiğini ortaya koyuyor.

Bir deprem kataloğuna dayanılarak

Şekil 1A. 1900 yılından bugüne değin oluşan depremlerin neden olduğu gerilim değişikliği gösteriliyor. Bu şekilde, en uygun yönde, düşey konumlu doğrutu atımlı faylar üzerinde, 0 ile 20 km derinlikleri arasında meydana gelen en çok Coulomb gerilme değişimleri gösteriliyor (1). IZINET'in kurulmasından bu yana (1993-Temmuz 1999) elde edilen sismik veriler, şekilde verilen bölgeyi eşit bir biçimde kapsıyor. Hesaplanmış gerilim artışları; yükselmiş sismisite oranları ve henüz o tarihlere gerçekleşmemiş olan 17 Ağustos 1999 İzmit depremi ile ilişkilidir. Gerilimin azaldığı alanlarda sismik aktivitenin düşük olduğu gözleniyor. 17 Ağustos 1999 İzmit depreminden önce yapılan iki çalışmada bu bölgede gerilimin arttığı ve gelecekte olacak bir deprem tehlikesi rapor edilmişti.



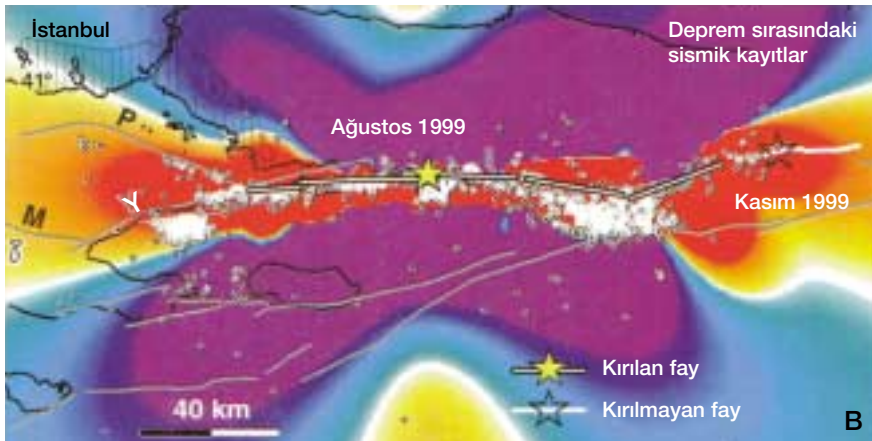


yapılan deprem olasılık analizi, bu katalogun kendisinden daha iyi olamaz. Yapılan genel gözlemler, en son gerçekleşen depremden bu yana, geçen zamana bağlı olarak artan olası bir deprem tehlikesini, yani bir deprem tekrarlanma sürecini destekler. Bu biçimdeki bir yenilenme olasılığının hesaplanması için, her bir fay üzerinde oluşmuş birkaç büyük depremi gösteren ve depremlerin büyüklüklerini, benzer olayların oluşma aralıklarını ve her fay üzerindeki en son depremden bugüne geçen zamanı doğru bir biçimde belirleyebileceğimiz ideal bir kataloga gereksinim vardır. Sayıları çok az olan bu kataloglardan biri de Ambraseys ve

Finkel'in Marmara Denizi çevresinde, M. Ö. 1500'den bu yana meydana gelen depremlerin tanımlandığı, bir çok belgeden yararlanarak hazırladıkları bir tarihsel deprem katalogudur (The Seismicity of Turkey and Adjacent Areas, A Historical Review, 1500-1800). Bu katalogta, 200 depreme ait hasar tanımlarından yararlanılarak, Mercalli eş deprem şiddeti eğrileri (MMI) belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Ardından ampirik azalım ilişkisinden yola çıkılarak, MMI'den bu depremlerin büyüklüklerinin ve merkezlerinin bulunması için Bakun ve Wentworth'un metodu kullanılmış. Bu bulgular, Marmara Denizi çevresinde olu-

şan, aletsel olarak kaydedilen ve MMI'si bilinen depremlerle (4) karşılaştırılıp yeniden yorumlanmıştır. Deprem yerlerindeki belirsizlikler tamamıyla MMI'deki tutarsızlıklar ve yetersizliklerden kaynaklanıyor.

Bu katalogta, Marmara Denizi ve civarında 1500 yılından bu yana meydana gelmiş ve şiddeti 7'den büyük 9 depremi içeriyor. Aletsel kayıt dönemi öncesinde (1900 yılı öncesi) oluşan 6 büyük depremin şiddeti, depremi meydana getirebilecek yeterli uzunluğa sahip faylar çevresinde (%95 doğruluk payı ile) en az olarak alınmıştır (Şekil 2). Deprem sonucu meydana gelen yeryüzü kırıklarının uzunluğu ve ortalama atım miktarları, kıtalardaki doğrultu atımlı faylar üzerinde meydana gelen depremlerin şiddetleriyle bu parametreler arasındaki ilişkiye bakılarak, elde edilen deneysel formüller kullanılarak hesaplandı. Marmara Denizi içindeki fayların karakterleri ve yerleri hakkında farklı görüşler bulunmakla birlikte, bu çalışmada Parke ve diğerlerinin sismik araştırmalardan elde ettiği sonuçlar dikkate alınmış; İstanbul'da şiddetli bir deprem oluşturmaya uygun 4 fay belirlenmiştir; Yalova, İzmit, Adalar ve orta Marmara fayları. İzmit'te meydana gelen iki depremden (1719, 1999), bu bölgede, yaklaşık her 280 yılda bir deprem olduğu sonucuna varılır. Yalova fayı üzerinde



Şekil 1B. Y işaretinin güney doğusundaki Yalova deprem kümeleri ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri gibi İzmit depreminin artçı sarsıntıları (depremden 12 gün sonra IZINET'den alınan verilerden), depremin neden olduğu gerilim artışı ile ilişkilidir. Y Yalova, P Adalar, M Marmara ortası ve I İzmit faylarını gösteriyor.

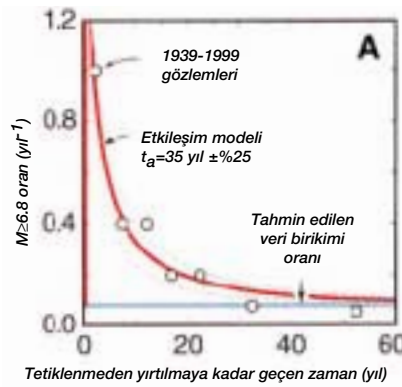


Şekil 3. 500 yıllık kataloga bağlı olarak yapılan Şekil 2'den elde edilen sismik kaymalar, Marmara Denizi ve yakınındaki Kuzey Anadolu Fay sistemine dik alınan dört kesitte özetlenmiştir. Büyüklüğünün yaklaşık 7 ve üzerinde olduğu aletsel verilerle kesin bilinen ya da böyle olduğu hesaplanan bütün tarihsel depremler kullanılmıştır. Ortalama sismik enerji, açığa çıkma oranı GPS verilerinden elde edilen enerji birikimini dengelemektedir. Parantez içinde verilen depremlerin verilen kesitlere kadar uzanıp uzanmadığı tam olarak belli değildir (1766a Mayıs; 1766b Ağustos).

meydana gelen üç depremden (1509, 1719, 1894), deprem tekrarlanma süresinin burada yaklaşık 190 yıl olduğu ortaya çıkar. Adalar ve orta Marmara faylarındaysa, sırasıyla 1766 ve 1509 yıllarında birer deprem olduğu belirlenmiştir. Bu faylar için deprem tekrarlanma aralıkları, katalogdaki bu depremlere ait atım miktarlarının, GPS (Global Positioning System) verilerinden elde edilen kayma hızlarına bölünmesiyle elde edildi. Hesaplamalar Adalar fayı için yaklaşık 210 yıl, Marmara ortası fayı için yaklaşık 450 yıllık bir deprem tekrarlanma aralığını ortaya koyuyor. Buradan da, bu dört faydan en az ikisinin deprem tekrarlanma zamanının çok yaklaştığı sonucu ortaya çıkıyor.

Katalogdaki depremlerin büyüklüklerini, yerlerini ve tekrarlanma sürelerinin doğruluğunu sınamanın yollarından biri, küçük büyük depremlerin bağıl bolluğunun, b değeri (Gutenberg-Richter ilişkisi: Deprem magnitüdüyle deprem sayısı arasındaki bir fonksiyonun eğim değeri) ile karşılaştırılması, diğeriyse GPS'den elde edilen gerilim birikiminin, kataloglardan elde edilen sismik gerilim boşaltımıyla tutarlı olup olmadığının kontrol edilmesidir. Katalogdaki sıklık-büyüklik (frequency-Magnitude) ilişkisinden b değerinin, dünya ortalamasına yakın olarak, en büyük olasılıkla 1.1 olduğu hesaplandı. Faylar üzerinde sünümlü kaymanın (deprem oluşturmadan fayın sürekli kayması-aseismic creep) gözardı edilecek düzeyde olduğu kabul edilirse, yeterince uzun bir zaman boyunca, depremler tarafından açığa çıkartılan enerjinin, faylardaki yüklenme nedeniyle oluşan enerjiyi dengelemesi gerektiği ortaya çıkar. Marmara Denizi ve yakınındaki Kuzey Anadolu Fayı'nın katalogta hesaplanan kayma hızıyla (23.5±8 mm/yıl) GPS verilerinden elde edilen kayma hızı (22±3 mm/yıl) karşılaştırıldı (verilen bütün bu hassasiyetler bir standart sapmadır) (Şekil 3). b~1 değeri için, enerjinin büyük bir kısmı büyük depremlerce açığa çıkarılıyor. Bu nedenle, GPS ile katalogdaki deformasyon arasındaki tutarlılık, M~7.6 dan büyük üç depremin yerlerinin ve büyüklüklerinin mantıklı sınırlar içerisinde olduğu anlamına geliyor.

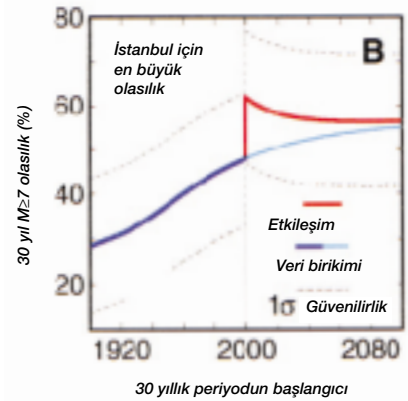
Son 500 yılda oluşan depremleri içeren bu katalogu sınamanın belki de en iyi yollarından biri, İstanbul'da MMI'nin yaklaşık VIII veya daha büyük olduğu bir sarsıntıyı oluşturabilecek potansiyele sahip olarak gördüğümüz üç fay için bulunan tekrarlanma zamanlarından, tahmin edilen, zamana bağlı olmayan Poisson olasılığının hesaplanmasıdır. Bu olasılık, her bir fay



Şekil 4. A. Gerilim transferine olan geçici reaksiyon. Gelecekte oluşacak deprem merkezlerinde gerilimin ≥ 0.5 bar arttırıldığı, şiddetleri 6.8 ve daha büyük olan, Kuzey Anadolu Fayı'yla ilişkili 13 deprem, zamanın bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Deprem oranı, Dieterich tarafından ve kendi araştırmalarımızdan da tahmin edildiği üzere (5), artçı depremlere benzer biçimde zamanla ters orantılı olarak (t -1) azalma gösterir. B. İstanbul'da MMI~> VIII şiddetinde bir sarsıntıya neden olabilecek, $M \geq 7$ 'den büyük bir depremin olma olasılığı, zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Üç fayın her biri için olan olasılıklar birbiriyle toplanmıştır (6). Büyük, ancak zamanla azalan olasılık artışına 17 Ağustos 1999 İzmit depremi neden olmuştur. "Veri birikimi" (Background) deprem yenilenmesinden kaynaklanan olasılığı işaret eder; "Etkileşim" (Interaction) ise gerilim transferini ve deprem yenilenmesini içerir. Açık mavi renkli çizgi, 17 Ağustos 1999 İzmit depreminin meydana gelmediği var sayılırsa bu durumdaki olasılığı vermektedir.

üzerinde oluşan birkaç depremin ortalamasından elde edilen bir değerdir ve gelecekteki otuz yıl için $\%29 \pm 15$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, İstanbul'da M.Ö. 447 ile M.S. 1508 tarihleri arasındaki bin yıllık dönemde MMI'nin yaklaşık VIII ya da daha büyük olduğu depremleri içeren katalogdan elde edilen Poisson olasılığıyla karşılaştırılabilir. Bu katalog, depremlerin yerleri hakkında kesin bir bilgi olmadan, Poisson hesaplamasında kullanılan uzun dönem tekrarlanma aralıklarını verir. M.Ö. 447 ile M.S. 1508 tarihleri arasında en azından 8 deprem İstanbul'da ciddi hasarlara yol açmıştır. Bu da, İstanbul'da önümüzdeki 30 sene içerisinde kuvvetli deprem olma olasılığının, katalogdan hesaplanan değere yakın olarak, $\%20 \pm 10$ civarında olduğu anlamına gelir. Dolayısıyla son 500 yılda oluşan depremleri içeren katalogdan elde edilen deprem tekrarlanma süreleri, öteki kaynaklardan elde edilen sürelerle tutarlılık gösterir.

Üzerinde gerilimin arttığı fayların, gerilimi değişmemiş diğer faylardan daha önce kırılacağı göz önünde tutularak, deprem olasılık hesaplarına deprem tekrarlanması ve gerilim transferi de eklenmiştir. İstanbul'un 50 km yakınında olan üç faydan ikisinin deprem tekrarlanma döneminin sonlarında olduğu kabul edildiğinden, yenilenme olasılığı Poisson olasılığından daha yüksektir. Ayrıca, gerilim transferinin



neden olduğu kalıcı gerilim artışı, zamanla azalan geçici gerilim artışı tarafından daha da artırılır. Bu geçici artış, hız ve konuma bağlı sürtünmenin bir etkisi sonucunda oluşur ve birbiri ardına olan depremler, deprem kümelenmesi ve artçı depremlerin oluşumu gibi doğal sismik olaylarda ve laboratuvar deneylerinde gözlemlenen davranışları tanımlar. Geçici azalmanın süresi, Kuzey Anadolu Fay kuşağında bir depremin oluşmasıyla, bunun diğerini tetikleme arasında geçen zamandan yararlanılarak hesaplanmıştır (Şekil 4.A). Hesaplamalarda kullanılan parametreler yaklaşık olarak belirlenmiştir. Belirsizliklerin boyutu hakkında bilgi sahibi olmak için Monte Carlo simülasyonundan yararlanılmıştır (6). Buradan elde edilen olasılık fonksiyonları (Şekil 4B), her bir fay üzerinde meydana gelen en son depremden bu yana geçen zaman arttıkça, sürekli bir artış gösterirken, Ağustos ayında ani bir sıçramayı ve sonrasında azalmayı da gösteriyor. İstanbul'da önümüzdeki 30 yıl içerisinde kuvvetli bir sarsıntının (MMI ~, > VIII; yer sarsıntısı ivmesi 0.34-0.65g) olma olasılığı % 62±15 olarak hesaplan-

Fay	30 Yıl (%)	10 Yıl (%)	1 Yıl (%)	Veri Birikimi	Etkileşim	Veri Birikimi
Yalova	33±21	22±18	14±11	7±7	1.7±1.7	0.8±0.8
Adalar	35±15	26±12	16±9	10±6	2.1±1.6	1.1±0.7
Marm. ort.	13±9	11±8	5±5	4±4	0.6±0.7	0.5±1.0
Toplam	62±15	49±15	32±12	20±9	4.4±2.4	2.3±1.5

Tablo 1. Mayıs 2000 tarihinden itibaren İstanbul'un 50 km civarındaki faylarda meydana gelebilecek deprem olasılıkları. "Toplam" üç fay için verilen olasılıktır (45). Verilen hata payları 1 standard deviasyon değerindedir. "Veri birikimi" yenilenmeyi, "Etkileşim" ise yenilenme ve gerilim transferinin neden olduğu etkileşimi vermektedir.

mıştır. Bu oran önümüzdeki 22 yıl için %50±13 iken, önümüzdeki 10 yıl için ise %32±12 olarak hesaplanmıştır (Tablo 1). Hesaplamalara gerilim yenilenmesinin katılması ortalama zaman olasılığını ikiye katlarken, etkileşimin katılması bu olasılığı 1.3 kat arttırmaktadır.

Geçtiğimiz 1500 yıl boyunca İstanbul'da ciddi boyutta hasara yol açan 12 deprem ve 30 yıllık Poisson ve ortalama zaman olasılıklarından hesaplanan %15-25'lik değer, İstanbul'da gelecekte yaşanacak önemli bir yıkımı doğruluyor. İstanbul yakınlarındaki bu fayların deprem döngülerinin son döneminde olmaları (1894'den bu yana şiddetli bir depremin olmaması bunun bir göstergesidir) tekrarlanma olasılığını %49±15'e çıkarıyor. Hesaplamalar,

1999 İzmit depreminden sonra meydana gelen gerilim değişikliklerinin sismik aktiviteyi artırmasına neden olduğunu gösteriyor ve 7.2 büyüklüğündeki Düzce depreminin ve Yalova yakınlarında birçok artçı depremin meydana gelmesi de bunu doğruluyor. Yapılan bu hesaplamalar, 1999 İzmit depreminin, Marmara denizi altındaki faylar üzerindeki gerilmeyi aynı biçimde artırdığını ortaya koyuyor. Bu da etkileşime dayalı olasılık değerinin daha da yukarılara, %62±15'e çıkmasına neden oluyor.

Tom Parsons¹, Shinji Toda², Ross Stein¹, Aykut Barka³, James H. Dieterich¹

¹US Geological Survey, ²Earthquake Research Institute, University Tokyo,

³Istanbul Technical University

N. Ambraseys, T. Wright, E. Fielding, A. Ito, J. Parke, and C. Finkel'e görüşlerini ve ön sonuçlarını bizimle paylaştıkları için, W. Bakun'e bilgisayar yardımı ve bu makaleyi görsel geçirdiği için ve J. C. Savage, and W. Thatcher, C. Straub, and S. Kriesch'e makaleyi görsel geçirdikleri için teşekkür ederiz. Desteklerinden dolayı SwissRe'ye ayrıca teşekkür ederiz.

Dipnotlar:

1. Coulomb kırılma gerilmesi ($\Delta C\sigma = \Delta \tau_r + \mu \Delta (\Delta \sigma_n)$, $\mu = \mu(1 - B_r)$) olarak hesaplanır. Burada $\Delta \tau_r$ gerilimdeki değişiklik, μ sürtünme katsayısı, $\Delta \sigma_n$ normal gerilimdeki değişiklik ve B_r Skempton katsayısıdır. Gerilme değerleri yan uzayda olduğu varsayılan bir elastik yerdığızime modelinden bulunmuştur. Viskoelastik etkiler hesaba katılmadı. İzmit depremi için InSAR'dan (radar uydusu interferometrisi) elde edilmiş bir kayma modeli kullanılmıştır; diğer depremlere ait kayma modelleri Nalbant ve diğerlerinden ve Stein ve diğerlerinden alınmıştır. Toplam atımı büyük olan diğer doğrultu atımlı faylarda tespit edildiği gibi, sürtünme katsayısı 0.2 olarak alınmıştır. Kırılmaya müsait bir konumda, sağ yönlü doğrultu atımlı fayların D-B yönünde uzandığı, K55-B yönünde sıkışan, 100 bar'lık bir deviatorik tektonik gerilim kullanılmıştır.

2. İkinci tür ihtimal dağılımı kullanılmıştır. μ ve α 'nın sırasıyla ortalama tekrarlanma zamanı ve değişken katsayısını gösterdiği ve $(\mu/2\pi\alpha^2) \exp(-t/\mu) / (2\pi\alpha^2 t)$ şeklinde tanımlanan Matthews'un Brownian geçiş zaman fonksiyonlarıdır. Ayrıca, zamana bağımlı hesaplamalar için lognormal dağılımı metodunu kullanılmıştır. Hiç bir katalog, tekrarlanma süresinin değişken katsayısını hesaplamak için yeterli olamamaktadır ve bu nedenle 0.5 gibi makul bir değer alınmıştır.

3. d'nin deprem merkezi ile deprem eş şiddet eğrisi (MMI) arasındaki mesafeyi gösterdiği $M = (MMI + 3.29 + 0.0206d) / 1.68$

formülasyonu, hem aletsel gözlemlerin, hem de şiddet zonlanmasi gözlemlerinin yapıldığı, Kaliforniya'da meydana gelmiş 30 depremden elde edilmiştir. Bu ilişkideki RMS turatlılığı, 5X5 km aralıklı gridler halinde rastgele alanlarda hesaplanmıştır. MMI'nin VI'den küçük olduğunu gösteren raporlar hesaba katılmamıştır. MMI'nin VIII'den büyük olduğunu gösteren gözlemler VIII olarak alınmıştır. Çünkü VIII'den büyük sarsıntılardan emin olmak için binalardaki hasarların dışında diğer bazı gözlemler gerekmektedir. Ayrıca çok dayanıksız bir şekilde inşa edilmiş yapılar için MMI=VIII olabilir.

4. 1912 Ms=7.4 Saros-Marmara (360 intensitesi), 1963 Ms=6.4 Yalova (11 intensitesi) ve 1999 Ms=7.4 (185 intensitesi) İzmit depremlerinin şiddet dağılımları kalibre edilmiştir. Deprem merkezleri ve büyüklüklerindeki hata payını hesaplamak için 1912 ve 1999 depremleri için rastgele 50 ve 25 (tarisnel depremler için ortalama bir değer) intensitesi değeri seçilmiştir. Buradan, deprem merkezlerinin, %5 bir hata payıyla, ±50 km çaplı bir alan içinde sınırlandığını, bulunan deprem büyüklüklerinin ise ±0.3 bir hata payına sahip olduğu hesap-

lanmıştır. Lokasyon düzeltmesi yapılmamıştır. Çünkü deprem merkezlerinin çoğunlukla sedimenter alanlarda olduğunu gösteren her hangi bir belirtiye rastlanmamıştır. Ayrıca, bu tür düzeltmelerin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi, ayrıntılı jeolojinin bilinmesi ile mümkündür.

5. Gerilim değişmesinden sonra beklenen bir deprem oranında $R(t) = r [1 - \exp(-\Delta t/a \sigma) - 1] \exp(-t/\tau) + 1$ geçici gerilim değişimi, değişken Poisson işlemi $P(r, \Delta t) = 1 - \exp(-J_r R(t) \Delta t)$ yoluyla, Δt zaman aralığı boyunca verilen bir büyüklükte bir depremin meydana gelme olasılığı ile alakalı olabilir. Burada r background sismisitesi oranı, Δt Coulomb gerilim değişimi, σ state/rate aslı parametresi, σ toplam normal gerilme, t zaman ve r geçici azalma süresidir. Geçici olasılık değişimi kalıcı değişiklik üzerine eklenir. Bu durum, gerilimdeki değişikliklerin sebep olduğu, beklenen bir depreme kadar geçen süredeki gecikme veya hızlanmadan kaynaklanmaktadır. Beklenen deprem sayısı $N(t)$ zaman aralığı Δt ile entegre edilerek

$N(t) = r_s \{ \Delta t + r_s \ln(1 + [\exp(-\Delta t/a \sigma) - 1] \exp(-\Delta t/\tau)) / \exp(-\Delta t/a \sigma) \}$ olur. Burada r_s kalıcı olasılık değişikliği ile ilgili olan, beklenen deprem oranıdır. Bu oran $r_s = -(1/\Delta t) \ln(1 - P_r)$ olarak tanımlanan sabit Poisson olasılığı denkleminde elde edilir. Burada P_r şartlı olasılık olup, herhangi bir dağılım kullanılarak elde edilebilir. Tekrarlanma aralığı ve bir deprem sonrası geçen zamana ilaveten, bu teknikte her bir fay üzerindeki gerilim değişiminin (burada her fay yüzeyi üzerine düşen ortalama olarak hesaplanmış gerilim değişimi kullanılmaktadır), geçici gerilim azalmasının (Stein ve diğerlerindeki verilerden yararlanılarak yapılan Şekil 4A) ve gözlemlenen deformasyon oranından (0.1 bar/yıl) fay geometrisinden elde edilen, her bir fay üzerindeki gerilim hızı değerinin bilinmesi gerekmektedir. Hata miktarının sınırlarını tespit etmek için 1000 Monte Carlo araştırması yapılmıştır. Bu Monte Carlo simülasyonlarında kullanılan parametrelerden dört tanesi, 0.5 biçim faktörüne sahip deprem tekrarlanma zamanı hariç, her araştırmada 0.25 biçim faktörüne sahip bir normal dağılımdan rastgele çekilmiştir. Sırasıyla yapılan Monte Carlo araştırmaları Brownian geçiş zamanı ve lognormal dağılımı yapılmıştır.

6. a-c fayları için birleştirilmiş olasılık formülasyonu $P = 1 - (1 - P_a)(1 - P_b)(1 - P_c)$, deprem tehlikesi için bağımsız bir kaynağın varlığını kabul eder. Çünkü gelecekte olacak etkileşimleri ve de yakın zamanda oluşan depremler dışında, geçmişte meydana gelmiş bütün depremler sonucu oluşan etkileşimleri hesaplamaya dahil edemeyiz.

Kaynaklar

- A. A. Barka, Bull. Seismol. Soc. Am. 86, 1238
 A. Ito, et al., Precise Distribution of Aftershocks of the Izmit Earthquake of August 17, 1999, Turkey, Eos Trans. 80, F662
 C. F. Finkel, N. N. Ambraseys, The Marmara Sea earthquake of 10 July 1894 and its effect on historic buildings, Anatolia Moderna Yeni Anadolu VII (Bibliothèque de l'Institut Français d'Etudes Anatoliennes-Georges Dumézil, Paris, 1996), vol. 43.
 C. Straub, H.-G. Kahle, C. Schindler, J. Geophys. Res. 102, 27,587
 C. Gürbüz, et al., Tectonophysics in press
 D. L. Wells, K. J. Coppersmith, Bull. Seismol. Soc. Amer. 84, 974
 The most recent event for the Yalova segment is 1894.6 İzmit segment, 1999.7; Ganos fault, 1912.7; Quinciano's Islands fault, 1766.7; Central Marmara fault, 1509.8
 D. J. Wald, V. Quintero, T. H. Heaton, H. Kanamori, Earthquake Spectra 15, 557
 G. C. P. King, R. S. Stein, J. Lin, Bull. Seismol. Soc. Amer. 84, 935
 Hubert-Ferrari et al., Nature 404, 269
 I. Kein, Bull. Min. Res. Explor. Inst. Turkey 72, 1
 J. C. Savage, Bull. Seismol. Soc. Am. 81, 862 (1991).
 J. Dieterich, J. Geophys. Res. 99, 2601
 J. H. Dieterich, B. Kilgore, Proc. Nat. Acad. of Sci. USA 93, 3787
 J. R. Parke, et al., Terra Nova, in press.
 K. Aki, Bull. Earthquake Res. Ins. 43, 257
 M. N. Toksöz, A. F. Shakal, and A. J. Michael, Pageoph 117, 1258
 M. V. Matthews, J. Geophys. Res. in press.
 Nalbant, S. S., A. Hubert, G. C. P. King, J. Geophys. Res. 103, 24469
 N. N. Ambraseys, C. F. Finkel, Terra Nova 3, 527
 N. N. Ambraseys, C. F. Finkel, Terra Nova 2, 167
 N. N. Ambraseys, C. F. Finkel, The Seismicity of Turkey and Adjacent Areas: A historical review, 1500-1800 (Muhittin Salih Eren, İstanbul).
 N. N. Ambraseys, C. F. Finkel, Annales Geophysicæ 5B, 701
 N. N. Ambraseys, Earthqu. Engin. and Structural Dynamics 17, 1
 P. A. Reasenberg, R. W. Simpson, Science 255, 1687
 R. A. Harris, J. Geophys. Res. 103, 24,347
 R. S. Stein, A. A. Barka, J. H. Dieterich, Geophys. J. Int. 128, 594
 R. S. Stein, Nature 402, 605
 S. G. Wesnousky, Bull. Seismol. Soc. Amer. 89, 1131
 Includes earthquakes in 1509, 1556, 1719, 1754, 1766, 1855, 1857, 1863, 1877, 1894, 1953, and 1964 from (12-14) and (35).
 S. Toda, R. S. Stein, P. A. Reasenberg, J. H. Dieterich, J. Geophys. Res. 103, 24,543
 T. J. Wright, P. C. England, E. J. Fielding, M. Haynes, B. E. Parsons, Eos Trans. 80, F671
 T. Parsons, R. S. Stein, R. W. Simpson, P. A. Reasenberg, J. Geophys. Res. 104, 20,183
 W. H. Bakun, C. M. Wentworth, Bull. Seismol. Soc. Amer. 87, 1502
 Working Group Calif. Earthquake Probabilities, Seismic hazards in southern California: Probable earthquakes, 1994-2014, Bull. Seismol. Soc. Amer. 85, 379-439
 Working Group Calif. Earthquake Probabilities, U.S. Geol. Surv. Circular 1053
 Working Group Calif. Earthquake Probabilities, U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 99-517
 Y. Ogata, Bull. Seismol. Soc. Am. 82, 1018
 Y. Ogata, J. Geophys. Res. 104, 17995