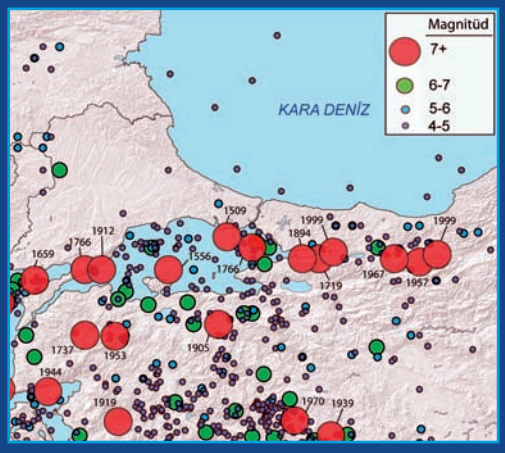
Polat Gülkan
Erol Kalkan

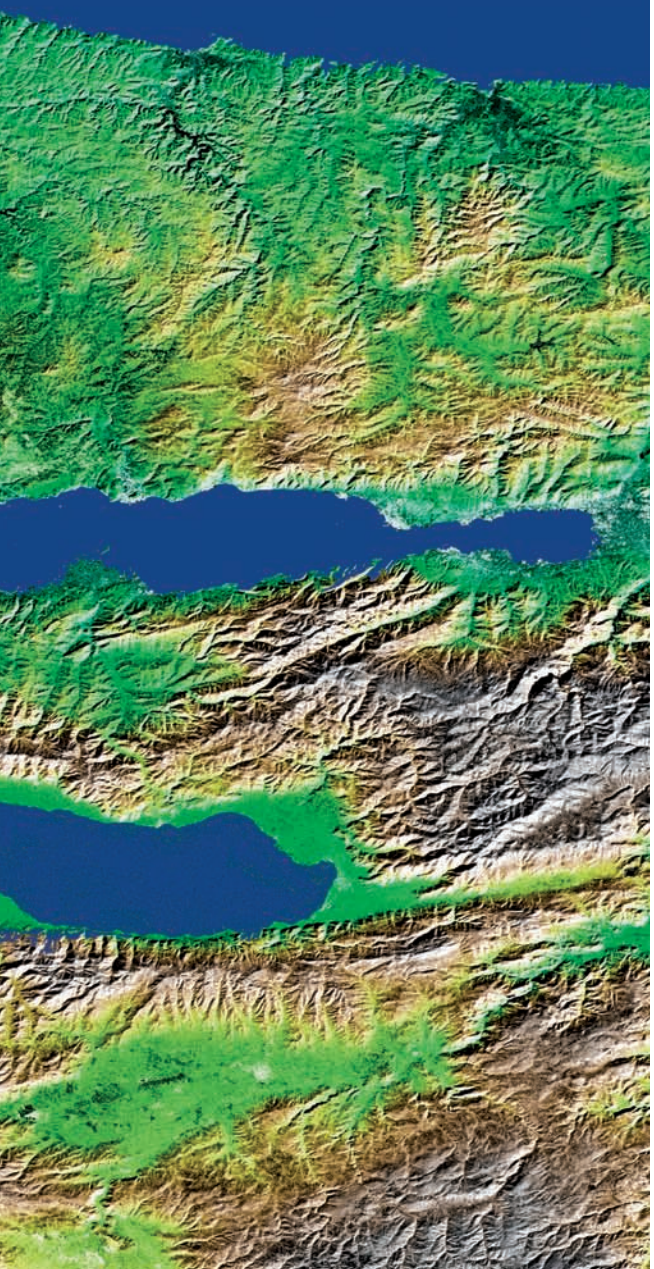
İhtimaller Hesabına Dayalı İstanbul ve Çevresindeki Deprem Tehlikesi

Bu yazının amacı, İstanbul ve yakın çevresinin maruz olduğu deprem tehlikesine dair 1999 depremlerinden bu yana devam eden tartışmalara bilimsel verilere ve hesaplara dayanan ve mümkün olduğu ölçüde kolay anlaşılır bir açıklama getirmektir. Depremlerin bir bölgede yaratabileceği tehlike, yani yerin sarsılması yüzünden yapılar üzerinde doğacak deprem etkileri, bölgenin deprem riskine, yani o bölgede olabilecek en yüksek deprem büyüklüğüne ve bölgenin zemin durumuna bağlıdır. Bu çalışmada, deprem oluşturma potansiyeline sahip aktif faylar ve son 500 yılda meydana gelmiş depremler ihtimal hesapları kullanılarak ilişkilendirilmiş ve Marmara Bölgesi'nde deprem sonucu doğacak yer hareketi şiddetinin dağılımı haritalanmıştır. Sunulan yeni deprem tehlike haritaları önceki bölgesel tehlike haritaları ile karşılaştırıldığında, Marmara Bölgesi'nde hissedilebilecek yer hareketi şiddetinde, benzer çalışmalara oranla % 10 ila % 15 arası artış görülmektedir.

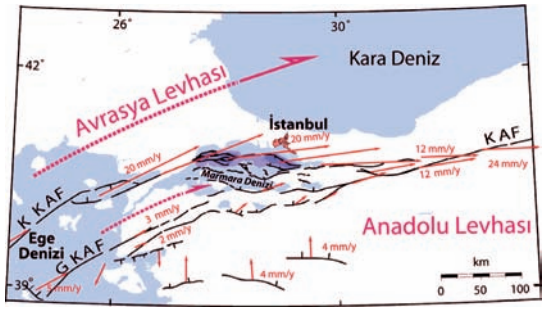
>>>



Şekil 1. 20nci yüzyılda Marmara Bölgesi'nde meydana gelen M4,0 ve üzeri depremler gösterilmiştir. M ≥ 7,0 depremler için son 500 yıla ait bilgiler dikkate alınmıştır (Bölgedeki büyük depremlerin detayları Ek A'da verilmiştir). Geçmişte meydana gelen depremlerin sıklığı, gelecekte meydana gelecek depremlerin sıklığını tahmin etmek için kullanılmıştır.

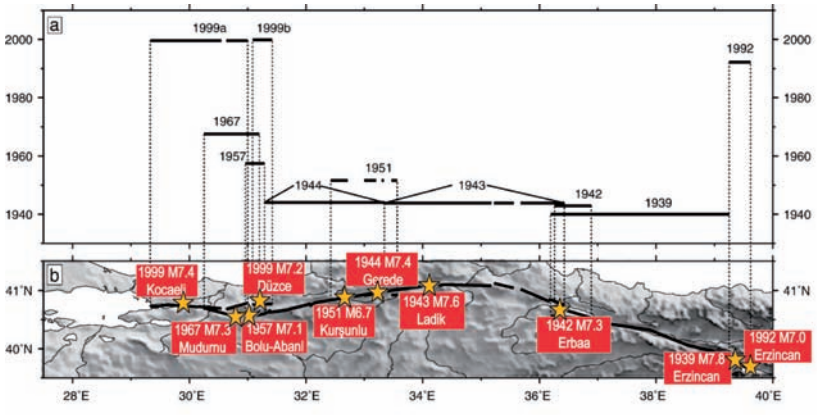


Ülkemiz nüfusunun üçte birini barındıran Marmara Bölgesi aynı zamanda Avrasya kıtasının tektonik açıdan en aktif kesimlerinden biridir. Son 500 yılda bölgede yerleri Şekil 1'de işaretlenen, sayısı 10'u geçen, hasar yapıcı deprem olmuştur (Ek A). Geçtiğimiz yüzyıl içerisinde ise bölgede Moment büyüklüğü (M) 7 ve üzerinde olan yedi deprem kaydedilmiş, bu depremlerden son ikisi (M7,4 Kocaeli ve M7,2 Düzce depremleri) 1999 yılında Marmara Bölgesi'nin doğu kesiminde uzanan Kuzey Anadolu Fay'ının (KAF) Marmara Bölgesi'nin doğu kesiminde uzanan bölümünden kaynaklanmıştır. Anadolu ve Avrasya levhaları arasındaki sınırı meydana getiren 1500 km uzunluğundaki sağ yanal atımlı KAF sistemi boyunca ölçülen yıllık kayma miktarı, GPS verilerine göre ortalama 20-25 mm'dir (Şekil 2). Tarihsel kayıtlar KAF üzerinde birbirini tetikleyen seri depremlerin meydana geldiğine işaret etmektedir. Fay üzerindeki en son deprem serisi ise 1939-1999 arasında gerçekleşmiştir. 1939 Erzincan depremi ile başlamak üzere genelde birbirini tetikleyerek doğudan batıya doğru ilerleyen bu en son seri içinde, KAF on büyük deprem (M>6,5) üretmiştir (Şekil 3). M7,4 Kocaeli depremi ile KAF zonundaki bu karakteristik deprem göçü Marmara Denizi'ne ulaşmıştır. KAF'nın Marmara Denizi'ni doğu-batı yönünde boydan boya kat etmesi ve fayın ana kolunun İstanbul'a çok yakın mesafeden geçmesi İstanbul'un karşı karşıya olduğu deprem teh-



Şekil 2. Marmara Bölgesi'nde yer alan aktif faylardaki yıllık kayma miktarları gösterilmiştir. Hız vektörleri tektonik gözlemlere ve GPS (küresel yer belirleme sistemi) verilerine göre çizilmiştir. Marmara Bölgesi'ndeki levhalar arası yıllık ortalama kayma miktarı 20-25 mm'dir.

Şekil 3. Kuzey Anadolu Fay (KAF) sistemi üzerinde İstanbul'a doğru ilerleyen, 1939 ve 1999 yılları arasında olmuş M6,5 ve üzeri 10 depremin merkez üstleri gösterilmektedir. Şekildeki (a) ve (b) panellerindeki kalın çizgiler depremler esnasında kırılan fayları, yıldızlar ise depremlerin merkez üslerini göstermektedir. Bu şekil USGS tarihsel depremler katalogundan (http://earthquake.usgs.gov/eartshquakes/world/historical_country.php) derlenmiştir.



likesinin (yapıların ve dolayısıyla toplumun maruz kalacağı deprem etkisi) ciddiyetini ortaya koymuştur. Bu yazının amacı İstanbul ve çevresinin karşı karşıya olduğu bu deprem tehlikesini bilimsel yöntemlerle ifade etmektir. Eldeki verilere göre beklenen Marmara deprem(ler)inin tam olarak ne zaman, nerede ve hangi ölçekte olacağını önceden kestirmek mümkün değilse de, bu deprem(ler)in yol açacağı yer hareketlerini ihtimalleriyle beraber ifade etmek mümkündür.

Prof. Dr. Polat Gülkan halen Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne bağlı Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'nin başkanıdır. 1996-2004 döneminde Uluslararası Deprem Mühendisliği Birliği'nde (IAEE) İcra Komitesi üyeliği, 2004-2008 arasında icradan sorumlu başkan yardımcılığı yapmış ve 2010-2014 dönemi için IAEE Başkanlığını üstlenmiştir. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası onun başında bulunduğu bir ekip tarafından hazırlanmıştır. Dr. Gülkan halen deprem mühendisliği alanındaki *"Earthquake Spectra"* adlı derginin editörlüğünü yürütmektedir. Profesör Gülkan 2004'te NATO Bilim Ödülü ve 2007'de TÜBİTAK Bilim Ödülüne layık bulunmuştur.

EK A: 1509'dan günümüze kadar Marmara Bölgesi'nde meydana gelen, yıkım ve can kaybına yol açan tarihi depremler (bkz. Şekil 1)

10 Eylül 1509: Marmara Bölgesi'ni etkileyen yıkıcı (Ms~7,2 - Ms: Yüzey dalgası büyüklüğü) deprem. Depremin merkez üssü belirsizdir. Ambraseys (2001) deprem kırığının 70 km'den daha fazla olmadığı ve depreme İstanbul'a yakın bir fay kesiminin yol açtığı sonucuna varmaktadır. Bu deprem sonrasında KAF'nın kuzey kesimi uzun bir süre (1509-1719) faaliyet göstermemiştir (Ambraseys ve Jackson, 2000).

25 Mayıs 1719: Marmara Bölgesi'nin doğusunda meydana gelen ve geniş tahribata yol açan (Ms~7,4) deprem (Ambraseys ve Finkel 1991, 1995; Ambraseys ve Jackson 2000). İzmit Körfezi'nin her iki yakasındaki köyler ve kasabalar Düzce'ye kadar tahrip olmuştur. İstanbul surlarında, evlerde ve camilerde hasarlar rapor edilmiştir. Rivayetlere göre 6000 kişi hayatını kaybetmiştir.

2 Eylül 1754: Marmara Bölgesi'nin doğu kesimi başka bir büyük (Ms~7,0) deprem ile sarsılmıştır (Ambraseys ve Finkel 1991, 1995; Ambraseys ve Jackson 2000). 2000 kişi hayatını kaybetmiştir. Sarsıntı İzmit Körfezi'nin kuzey sahili boyunca İstanbul'a kadar büyük hasara yol açmıştır. Körfezin güney kenarında ise fazla bir hasar gözlenmemiştir. Ana şokun tsunami yarattığı tahmin edilmektedir.

22 Mayıs 1766: Marmara Denizi'nin kuzey sahili boyunca Tekirdağ-Şarköy'den İzmit yöresine uzanan alanda büyük hasara yol açan (Ms~7,1) yıkıcı deprem (Ambraseys ve Finkel 1991, 1995; Ambraseys ve Jackson 2000). Güney sahil boyunca da yıkım meydana gelmiştir. Toplam 4000 kişi ölmüştür; İstanbul'da 800 kişi ölmüştür. Deprem İstanbul Boğazı'nda kuvvetli bir tsunamiye yol açmıştır.

5 Ağustos 1766: 22 Mayıs 1766 depreminden birkaç ay sonra, Marmara Denizi'nin batı kesiminde başka bir çok büyük deprem (Ms~7,4) tetiklenmiştir (Ambraseys ve Finkel 1991, 1995; Ambraseys ve Jackson 2000). En yoğun tahribat Tekirdağ-Şarköy arasındaki Ganos Dağı civarında olmuştur.

10 Temmuz 1894: İstanbul'da doğurduğu sonuçlar fotoğrafla tespit edilen, tahripkâr (Ms~7,3) bir deprem şehrin güney kesimleri ve Adalar'da etkili olmuştur (Ambraseys ve Jackson 2000; Ambraseys 2001). Ana şok 1,5 m yüksekliğinde deniz dalgasına sebep olmuştur. Bu depremin Çınarcık havzası kenarındaki düşey bileşenli fay kısımları ile ilişkili olduğu ileri sürülebilir. 1894 depreminin fay sisteminin GB kesimindeki deniz içi bir kırılmayla ilgili olması daha kuvvetli bir ihtimaldir, ancak KD kenarındaki bir kırılmayla da ilişkilendirilmesi ihtimali dışlanamaz.

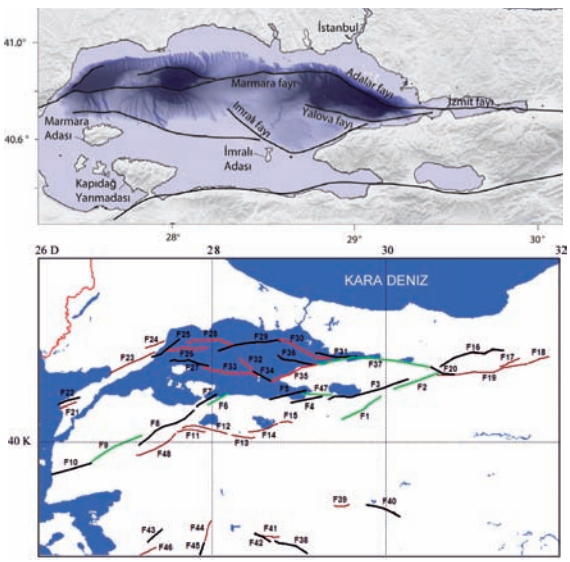
9 Ağustos 1912: Çanakkale bölgesinde meydana gelen bir deprem 300 köyü ve kasabayı yok etmiştir (Ambraseys ve Finkel 1991). Hasar İstanbul'a kadar uzanmıştır. Toplam can kaybı 2000 kadardır. Ana şok ile yüksekliği az olan bir tsunami arasında ilişki bulunmaktadır. Büyüklüğü Ms~7,4 olan 1912 Mürefte-Şarköy (Ganos) depremi muhtemelen Ganos kıvrımının her iki yanında, Saros Körfezi'nden Marmara Denizi'nin Orta Havzasına kadar olan bölgede, 140 km boyunda kırılmaya yol açmıştır.

17 Ağustos 1999: Marmara Denizi'nin doğu kesiminde meydana gelen M7,4 çok şiddetli deprem.

12 Kasım 1999: İzmit'in doğusunda kalan Düzce bölgesinde meydana gelem M7,2 tahripkâr deprem.

Şekil 4'te Marmara Denizi içerisinde yer alan faylar (Adalar, Orta Marmara, Yalova) ve bu faylarda karakteristik depremlere neden olacak segmentler belirlenmiştir. Deprem tehlike analizlerinde kullanılan fay segmentlerinin detayları ise Ek B'de yer almaktadır. Kocaeli'de meydana gelmiş olan 1719, 1999 ve İstanbul'da büyük hasar yaratmış olan 1509 ve 1766 depremlerinden hareketle, bu bölgede yaklaşık her 260 ile 280 yılda bir deprem olduğu sonucuna varılabilir (bkz. Şekil 1). Şekil 5'te 1999 depremi ve sonrasında KAF sistemi üzerindeki Coulomb gerilmesi dağılımı gösterilmektedir. KAF üzerindeki depremlerin batıya göçü, yanal atımlı fayların depremler esnasında birbirlerine gerilme aktardığı (gerilme transferi), bir diğer deyişle komşu fayları tetiklediği şeklinde yorumlanmıştır. Bu görüşe göre bir deprem, üzerinde gerçekleştiği faydaki gerilmeyi azaltırken, komşu faylar üzerindeki gerilmeleri değiştirir. Örnek olarak 1999 Kocaeli ve Düzce depremleri İzmit ve Düzce fayları üzerindeki gerilmenin boşalmasına sebep olurken, İstanbul'un güneyinden gecen Adalar ve Marmara fayları üzerinde (bkz. Şekil 4, segment F31, F30) ilave gerilmelerin meydana gelmesine yol açmış, böylece bu fayların kırılma ihtimalini artırmıştır. Şekil 5'teki kırmızı ile işaretlenen bölgeler, kırılma potansiyeli artan fayları göstermektedir.

Marmara Bölgesi'nde şiddetli deprem üretebilecek bir diğer fay ise Tekirdağ'ın güneyinden geçen ve Saros körfezine doğru uzanan Marmara fayıdır (bkz. Şekil 4, segment F33). Bu fayın batı bölü-

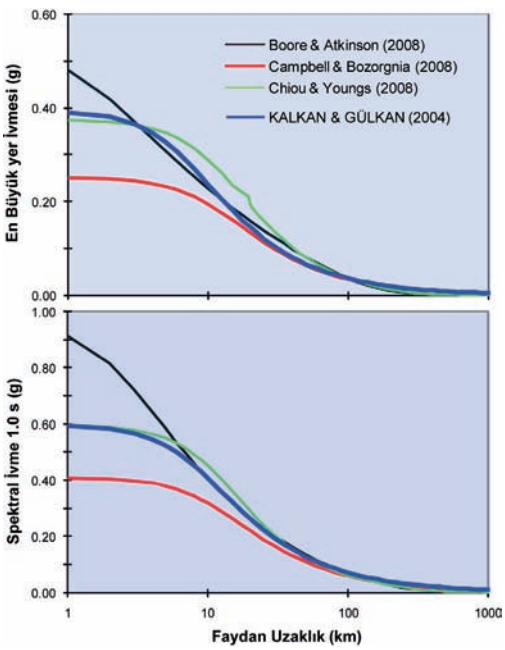


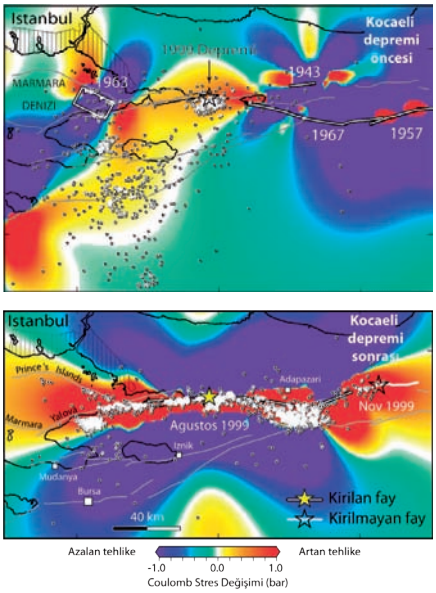
Şekil 4. Marmara Bölgesi'ndeki aktif faylar ve fayların segmentasyonu gösterilmiştir; fay segmentlerinin uzunlukları ve yaratabilecekleri karakteristik deprem büyüklükleri Ek B'de verilmiştir. Bölgedeki faylar Le Pichon v.d. (2001) ve Armijo'nun v.d. (2005)'in çalışmalarından derlenmiştir.
Aktif bir fayda depremlerin sıklığı fayın uzunluğuna ve faydaki kayma miktarına (fayın bir tarafının diğer tarafına göre ne kadar hareket ettiğine) bağlıdır. Uzun faylar büyük depremlere yol açarken, kayma miktarı yüksek olan faylarda sık depremler meydana gelmektedir.

münde 1766'da ve 1912'de M6,8 ve M7,4 büyüklüğünde şiddetli iki deprem olmuştur (bkz. Şekil 1). Bu fayın 500 yıldan fazladır kırılmayan Orta Marmara kesiminde (Şekil 4'te segment F25, F29 ve F30) büyük bir deprem (M>7,0) meydana getirebilecek stres birikimi olduğu tahmin edilmektedir .

Depremlerin "tekrarlanma" modeliyle gerçekleştiği kabul edilirse (başka modeller de vardır, fakat bu detaylara girmeyeceğiz) 2030'lu yıllara kadar Marmara Denizi içerisinde İstanbul'u etkileyecek M ≥ 7,0 deprem olma ihtimali yüzde 44 ± 18 olarak hesaplanmaktadır. Deprem mühendisliği uygulamalarının güvenilir esaslara dayalı olması için, bölgenin deprem tehlikesinin ve bu şiddetteki depremin yaratabileceği riskin mümkün olan en doğru şekilde tespit edilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmadaki deprem tehlikesinin hesaplanmasında, ihtimal esaslarına dayalı olarak ABD için 2008'de hazırlanan Ulusal Deprem Tehlikesi Haritaları'nda da uygulanmış olan iki farklı deprem kaynak modellemesine gidilmiştir: [1] Yuvarlatılmış karelaj esaslı deprem modeli ve [2] faylanma esaslı model. Modellerin ilki, büyük depremlerin meydana geldiği yerlerin daha küçük depremlerin yığılma gösterdiği yerler olduğu kabulüne dayalıdır. Bu model ağırlıklı olarak deprem kataloğuna dayanmakta ve M4,0 ve M6,5 arası depremlerin temsil ettiği tehlikeyi, zamana bağlı olmayan Poisson modeli ile karakterize etmektedir. Faylanma esaslı modelde ise M>6,5 üzerindeki depremlerin tehlikesi, fay segmentasyonu nitelikleri ve eski depremlerden hareketle hesaplanmaktadır. Böylece herhangi bir noktadaki deprem tehlikesi, M≤6,5 için yuvarlatılmış karelaj modelinden, M>6,5 için de fay modelinden elde edilmektedir. Bölgenin deprem tehlikesi bu iki modelden kaynaklanan tehlike değerlerinin toplamı alınarak hesaplanmıştır.

Şekil 6. Türkiye deprem verileri kullanılarak elde edilen Kalkan ve Gülkan (2004) azalım ilişkisinin ABD'nin batı kesimi için geliştirilmiş yeni nesil yer hareketi tahmin ilişkileri (Boore ve Atkinson 2008; Campbell ve Bozorgnia 2008; Chiou ve Youngs 2008) ile karşılaştırılması. Üstte: En yüksek yer ivmesi; Altta: T = 1 s' deki spektral ivme. İvme tahminleri hayali bir deprem (M7,0, kaya zemin, yatay atımlı fay, odak derinliği 10 km) göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

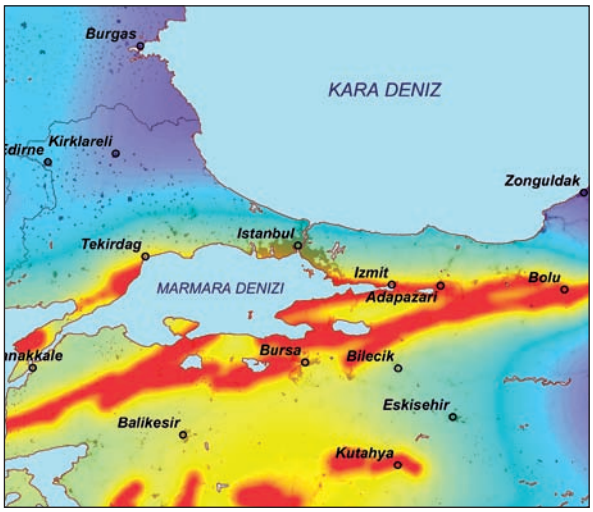




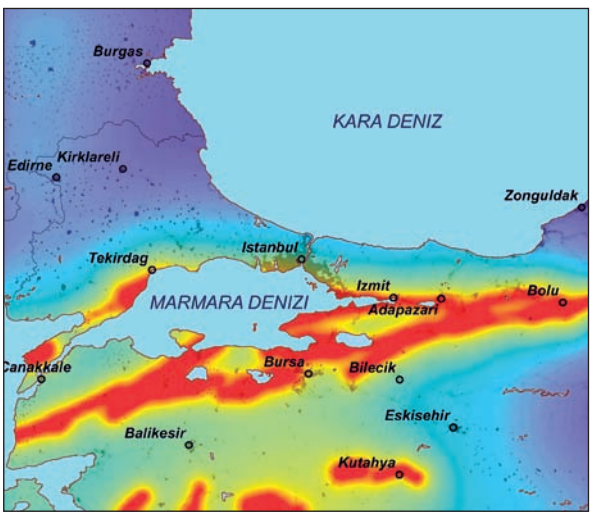
Şekil 5. Kuzey Marmara faylarındaki gerilme (Coulomb gerilmesi) dağılımı. KAF sisteminin İstanbul'un güneyinde (Orta Marmara) ve güney doğusunda (Adalar kesiminde) yer alan kolu, 1999 Kocaeli depremiyle aktarılan gerilme artışı nedeniyle kırılma potansiyeli taşımaktadır (1999 Kocaeli ve Düzce depremleri sonrası faylar üzerindeki gerilme dağılımını gösteren bu grafik Parsons v.d. (2001) çalışmasından alınmıştır).

Bu modellerden kaynaklanan ivme değerlerinin (yer hareketi şiddeti ölçüsü) Marmara Bölgesi üzerindeki dağılımı bir dizi gözleme dayalı azalım (sarsıntı-mesafe) ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır. Azalım ilişkisi, belirli bir büyüklükteki depremin, belirli bir mesafede ve jeolojik özellikleri bilinen bir zeminde sebep olacağı yer hareketinin daha önceki depremlerden elde edilen ölçümlere dayalı olarak kestirilmesine yarayan ampirik bir denklemdir. Bu çalışmada yer hareketinin tahmini için ABD'nin batı bölgesi için hazırlanmış üç "yeni nesil" azalım ilişkisi ile Türkiye verisi kullanılarak geliştirilen bir azalım ilişkisi kullanılmıştır. Şekil 6'da odak derinliği 10 km olan yanal atımlı bir fayın üreteceği hayali bir depremin, kaya zemin üzerinde yaratacağı en büyük yer ivmesi ve 1 saniye periyottaki (T=1 s) spektral ivme kestirimi bu dört azalım ivmesi kullanılarak modellenmiştir. 1 saniyedeki spektral ivmeden kasıt, yer hareketindeki bütün harmonik titreşimler sonucu, 1 saniye periyotta (T = 1 s) serbest salınım gösteren (8-12 katlı betonarme çerçeve yapılara denk düşen) bir yapıdaki maksimum ivmedir. Gerçek bir deprem kaydında farklı periyotlarda birçok harmonik titreşim vardır ve her harmonik titreşim yapı üzerinde farklı dinamik davranışın doğmasına sebep olur. Türkiye verisi kullanılarak geliştirilen bir azalım ilişkisi (yani Kalkan ve Gülkan azalım denklemi) ile elde edilen en büyük yer ivmesi ve 1 s'deki spektral ivme değerleri, ABD yeni nesil denklemleriyle benzer sonuçlar vermektedir. Buradan hareketle yapılan hesaplarda sözü edilen denklemin Türkiye'deki ölçmelere dayalı sonuçlarına diğer üç denklemin toplamı kadar (% 50) ağırlık verilmiştir.

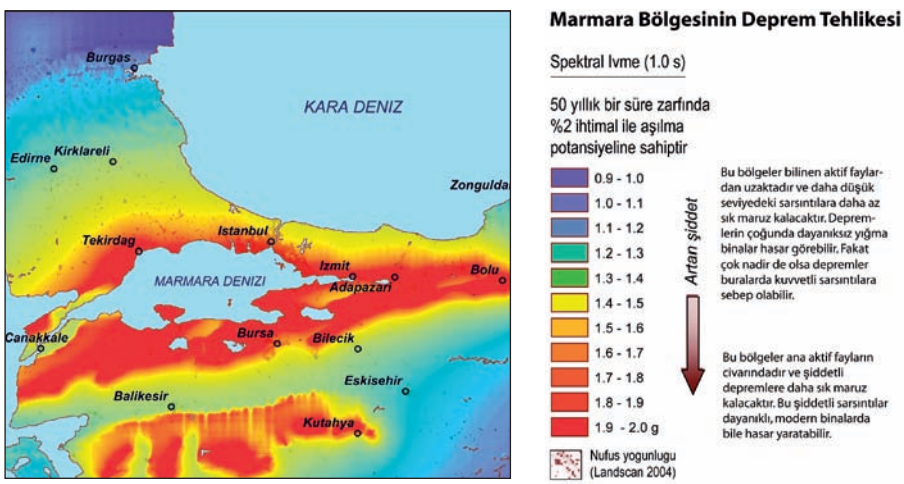
Fay ve yuvarlatılmış karelaj modellerinden elde edilen bulgular, yer hareketi tahmin ilişkileri ve ihtimal hesapları ile değerlendirilmiş ve Marmara Bölgesi için deprem tehlikesi hesaplanmıştır. Şekil 7, 8 ve 9'da bölgenin deprem tehlikesi bir dizi haritada işaretlenmiştir. Aynı haritaların arka planında ise nüfus yoğunluğu gösterilmiştir. Böylece nüfus yoğunluğunun en çok olduğu bölgelerdeki deprem tehlikesi daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Şekillerde, gelecekte Marmara Bölgesi'ndeki muhtemel depremlerin yol açacağı yer hareketinin şiddeti ve ona bağlı olarak meydana gelebilecek hasar, matematik hesap çerçevesinde gösterilmiştir. Renklerle ifade edilen "tehlike" değerleri, Marmara Bölgesi'nin güney ve doğu kesimlerinde daha geniş bir alanda ve daha yüksek bir tehlikeye işaret etmektedir. Değişken zemin etkisini dikkate almaksızın kaya zeminde hesaplanan en büyük yer ivmesi değeri, Kuzey



Şekil 7. Marmara Bölgesi'nin deprem tehlikesi kaya zemin şartları göz önüne alınarak en büyük yer ivmesi şeklinde ifade edilmektedir. En büyük yer ivmesi yumuşak zeminlerde meydana gelen sıvılaşma ve toprak kayması riskinin belirlenmesinde kullanılır.



Şekil 8. Marmara Bölgesi'nin deprem tehlikesi kaya zemin şartları göz önüne alınarak T = 0,2 s'deki spektral ivme için verilmektedir. Kaba bir tahminle T = 0,2 s için belirlenen spektral ivmenin dağılımı alçak (2-3 kat) yapılardaki hasar ile örtüşecektir.



Şekil 9. Marmara Bölgesi'nin deprem tehlikesi kaya zemin şartları göz önüne alınarak T = 1 s'deki spektral ivme için verilmektedir. Kaba bir tahminle T = 1 s için belirlenen spektral ivmenin dağılımı orta yükseklikte olan (8-12 kat) yapılardaki hasar ile örtüşecektir.

Anadolu Fay hattının Marmara denizinin içine uzanan kesimleri boyunca 1,5 g (g: yerçekimi ivmesi) olarak bulunurken, bu değer İstanbul'un Marmara Deniz'i kıyı şeridinde 1 g'ye ve Bursa şehir merkezinde ise 1,2 g'ye ulaşmaktadır (Şekil 7). En şiddetli yer hareketi gösteren kesimler 1901'den bu güne kadar büyüklüğü 4 ve üzeri depremlerin meydana geldiği noktalara denk gelmektedir.

Şekil 8'de gösterildiği gibi ender depremler sırasındaki yer hareketi 0,2 s periyotta 2,8 g kadar yüksek bir spektral ivme değerine yol açma potansiyeline sahiptir. T = 1 s için maksimum spektral ivme ise 1,5 g mertebesine ulaşmaktadır (Şekil 9). Verilen bütün ivme değerleri 50 yıllık bir süre zarfında % 2 ihtimal ile aşılma potansiyeline sahiptir. Farklı bir ifadeyle, verdiğimiz haritalardaki yer hareketleri ortalama olarak yaklaşık her 2500 yılda bir ortaya çıkmaktadır. Kritik mühendislik yapıları için bu seviye tasarıma esas teşkil etmektedir. Genel bir ifade ile 2-3 katlı betonarme yapılar için T = 0,2 s, 8-12 katlı betonarme yapılar için T = 1 s, davranışı ve yetersiz kapasitedeki binalar için muhtemel hasarı tayin eden spektral ivmeye denk gelmektedir. Bir diğer deyişle T = 0,2 s ve T = 1 s için belirlenen spektral ivmenin dağılımı, alçak ve orta yükseklikte olan yapılardaki hasar ile örtüşecektir (Şekil 8 ve 9).

Yer'in göstereceği en büyük ivme ile 0,2 ve 1 s'deki spektral ivmeyi gösteren haritaların hazırlanmasında zemin şartları dikkate alınmamış ve zeminin üst 30 m'deki kesimi kaya olarak (kayma dalgası hızı V_{s30}=760 m/s) varsayılmıştır. Buna karşılık henüz taşlaşmamış ve daha gevşek zemin tabakalarının ve diğer bazı jeolojik şartların zeminin deprem dalgaları karşısındaki davranışını değiştireceği ve "zemin büyütmesi" adı ile bilinen ivme artışına sebep olacağı hatırda tutulmalıdır. Bu çalışma kapsamında orta sertlikteki (V_{s30} = 360 m/s) ve yumuşak zeminler (V_{s30} = 180 m/s) için de tehlike haritaları hazırlanmıştır; bunlar http://nsmp.wr.usgs.gov/ekalkan/marmara/tr.html internet adresinde verilmektedir. Yine aynı adreste mühendislik uygulamalarında kolaylık sağlaması amacıyla, her üç zemin grubu için deprem tehlikesi eğrisi ile tasarım hesap spektrumu eğrisi sunulmaktadır.

<<<

Yazımızın amacı herhangi bir deprem tarihi, yeri veya büyüklüğü için tahmin yürütmek değildir; mühendislik hesapları ve kritik planlama amaçları için yol gösterici arka plan bilgileri sağlamaktır. Spektral ivmelerin kullanılmasıyla, yapıların deprem yüklerine karşı tasarımında kullanılan hesap spektrumlarını elde etmek mümkündür. İnternet sitesinde verdiğimiz zemin etkilerini de yansıtan tahminlerimiz mühendislik uygulamaları için önem taşımaktadır.

Bu yazıda verilen sonuçlar ile Marmara Bölgesi için yapılan daha önceki çalışmaların en önde gelen farkı, fay özelliklerinin tanımı ile yer hareketi tahmin denklemlerinde yatmaktadır. Yer hareketinin tam ve doğru olarak tahmin edilmesi eldeki sorunun çok bilinmeyenli doğası yüzünden mümkün değildir. Belirsizliklerin asgariye indirilmesi, ancak yerinde alınmış kayıtların doğru olarak işlendiği yer hareketi tahminlerine ağırlık verilmesi yoluyla gerçekleşebilir.

Yazının bir başka farkı deprem tehlikesi teşkil edecek kaynakların özelliklerinin tanımı ve yeni nesil yer hareketi tahmin denklemlerinin Bayesçi yaklaşımla ele alınmasında yatmaktadır. Marmara Bölgesi'nin geneli için Şekil 7, 8 ve 9'da gösterdiğimiz tablo, aynı bölge için daha önceki tahminlere nazaran yüzde 10 ila 15 kadar bir artışa işaret etmektedir . Tabiatıyla beklenebilecek en büyük tehlike yer hareketi şiddetinin en yüksek değerlere ulaştığı kesimlerde yer almaktadır, ancak bölgenin tamamı yüksek bir deprem tehdidine maruzdur. Bu tehdidin can ve mal kaybı şeklinde ve içinde hatırı sayılır belirsizlik ihtiva edecek tarzda yeniden ifade edilmesi ise yazımızın amacı dışındadır.

EK B: Marmara Bölgesi için deprem tehlike analizinde kullanılan fay segmentlerinin özellikleri (bkz. Şekil 4)

Fay Segment	Faylanma	Uzunluk (km)	Karakteristik Magnitüd (M)	Kayma Miktarı (mm/y)	Aktivite Oranı (deprem/y)	Fay Segment	Faylanma	Uzunluk (km)	Karakteristik Magnitüd (M)	Kayma Miktarı (mm/y)	Aktivite Oranı (deprem/y)
F1	Yatay-Atımlı	45	7.0	20	0.0073	F25	Yatay-Atımlı	31	6.8	20	0.0095
F2	Yatay-Atımlı	48	7.0	20	0.0070	F26	Yatay-Atımlı	44	7.0	20	0.0074
F3	Yatay-Atımlı	82	7.3	20	0.0049	F27	Yatay-Atımlı	42	7.0	20	0.0077
F4	Yatay-Atımlı	31	6.8	20	0.0094	F28	Yatay-Atımlı	51	7.1	23	0.0077
F5	Yatay-Atımlı	36	6.9	20	0.0085	F29	Yatay-Atımlı	62	7.2	23	0.0068
F6	Yatay-Atımlı	22	6.7	20	0.0119	F30	Yatay-Atımlı	51	7.1	23	0.0077
F7	Yatay-Atımlı	28	6.8	20	0.0101	F31	Yatay-Atımlı	20	6.6	23	0.0148
F8	Yatay-Atımlı	63	7.2	20	0.0058	F32	Yatay-Atımlı	16	6.5	20	0.0150
F9	Yatay-Atımlı	58	7.1	20	0.0062	F33	Yatay-Atımlı	57	7.1	20	0.0062
F10	Yatay-Atımlı	40	7.0	20	0.0079	F34	Yatay-Atımlı	20	6.6	20	0.0128
F11	Yatay-Atımlı	28	6.8	20	0.0101	F35	Yatay-Atımlı	41	7.0	20	0.0077
F12	Yatay-Atımlı	46	7.0	20	0.0072	F36	Yatay-Atımlı	36	6.9	20	0.0085
F13	Yatay-Atımlı	21	6.6	20	0.0121	F37	Yatay-Atımlı	112	**7.5**	23	0.0045
F14	Yatay-Atımlı	29	6.8	20	0.0099	F38	Normal	36	6.9	18	0.0076
F15	Yatay-Atımlı	21	6.7	20	0.0121	F39	Yatay-Atımlı	15	6.5	18	0.0140
F16	Yatay-Atımlı	66	7.2	20	0.0056	F40	Normal	37	6.9	18	0.0075
F17	Yatay-Atımlı	21	6.6	20	0.0122	F41	Normal	30	6.8	18	0.0088
F18	Yatay-Atımlı	21	6.6	20	0.0124	F42	Normal	10	6.3	18	0.0185
F19	Yatay-Atımlı	90	7.3	20	0.0046	F43	Yatay-Atımlı	20	6.6	15	0.0096
F20	Yatay-Atımlı	26	6.7	20	0.0107	F44	Yatay-Atımlı	22	6.7	15	0.0089
F21	Thrust	19	6.6	20	0.0133	F45	Yatay-Atımlı	15	6.5	15	0.0116
F22	Thrust	23	6.7	20	0.0114	F46	Yatay-Atımlı	20	6.6	15	0.0096
F23	Normal	49	7.1	10	0.0034	F47	Yatay-Atımlı	30	6.8	20	0.0097
F24	Normal	33	6.9	10	0.0045	F48	Yatay-Atımlı	46	7.0	20	0.0072

Teşekkür: Okan Tüysüz'e, Ömer Emre'ye, Ross Stein'a, Volkan Sevilgen'e, Tuna Onur'a ve Nazan Yılmaz'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Dr. Erol Kalkan, ODTÜ İnşaat Muhendisliği Bölümü'nü bitirdikten sonra, yüksek lisansı Boğazici Üniversitesi ve ODTÜ İnşaat Muhendisliği Bölümlerinde, doktorayı Kaliforniya Üniversitesi (UC Davis),'de tamamlamıştır. Kaliforniya'nın en son deprem tehlike haritasını hazırlayan ekibe liderlik etmiştir. 60'ın üzerinde uluslararası yayını bulunan Dr. Kalkan, halen ABD Jeolojik Araştırmalar Dairesi (USGS)'nde Deprem Mühendisliği araştırma üyesi ve ABD Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi İzleme Merkezi direktörüdür. Bölgesel deprem tehlike haritalarının hazırlanması, yer hareketinin tahmini, yapılarda meydana gelecek deprem tesirlerinin kestirimi konularında çalışmaktadır.

Kaynaklar

Ambraseys, N.N., "The earthquake of 10 July 1894 in the Gulf of Izmit (Turkey) and Its Relation to the Earthquake of 17 August 1999, *Journal of Seismology,* Cilt 5, s. 117–128, 2001.
Ambraseys, N.N. ve Finkel, C., "Long-term Seismicity of Istanbul and of the Marmara Sea Region", *Terra Nova*, Cilt 3, s. 527–539, 1991.
Ambraseys, N. ve Finkel, C., *The Seismicity of Turkey and Adjacent Areas 1500–1800*, Eren Yayıncılık ve Kitapçılık Ltd., 1995.
Ambraseys, N. ve Jackson, J., "Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500", *Geophysical Journal International,* Cilt 141, s. F1–F6, 2000.
Armijo, R., Meyer, B., Navarro, S., King, G., Barka, A., "Asymmetric Slip Partitioning in the Sea of Marmara Pull-apart: A Clue to Propagation Processes of the North Anatolian Fault", *Terra Nova*, Cilt 14, Sayı 2, s. 80–86, 2002.
Armijo, R., Pondard, N., Meyer, B., ve diğ., "Submarine Fault Scarps in the Sea of Marmara Pull-apart North Anatolian Fault: Implications for Seismic Hazard in Istanbul", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems,* Cilt 6, s. 1-29, 2005.
Atakan, K., Ojeda, A., Meghraoui, M., Barka, A. A., Erdik, M., Bodare, A., "Seismic Hazard in Istanbul Following the 17 August 1999 Izmit and 12 November 1999 Düzce Earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America,* Cilt 92, Sayı 1, s. 466-482, 2002.
Boore, D. M., Atkinson, G., "Ground motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s", *Earthquake Spectra*, Cilt 24, Sayı 1, s. 99-138, 2008.
Campbell, K., Bozorgnia, Y., "NGA Ground motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s", *Earthquake Spectra*, Cilt 24, Sayı 1, s. 139-171, 2008.
Chiou, B., Youngs, R., "An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra", *Earthquake Spectra*, Cilt 24, Sayı 1, s. 173-215.
Erdik, M., Demircioğlu, M., Şeşetyan, K., Durukal, E. Siyahi, B., "Earthquake Hazard in Marmara Region, Turkey", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* Cilt 24, s. 605-631, 2004.
Flerit, F., Armijo, R., King, G.C.P., Meyer, B., Barka, A., "Slip Partitioning in the Sea of Marmara Pull-apart Determined From GPS Velocity Vectors", *Geophysical Journal International*, Cilt 154, s. 1–7, 2003.
Frankel, A., "Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States", *Seismological Research Letters*, Cilt 66, Sayı 4, s. 8-21, 2005.
Hubert-Ferrari, A., Barka, A., Jacques, E. ve diğ., "Seismic Hazard in the Marmara Sea Following the 17 August 1999 Izmit Earthquake", *Nature,* Cilt 404, s. 269–272, 2000.
Kafka, A.L., Walcott, J. R., "How Well does the Spatial Distribution of Smaller Earthquakes Forecast the Locations of Larger Earthquakes in the Northwestern United States", *Seismological Research Letters*, Cilt 69, s. 428-440, 1998.
Kafka, A. L., "Statistical Analysis of the Hypothesis that Seismicity Delineates Areas Where Future Large Earthquakes are Likely to Occur in the Central and Eastern United States", *Seismological Research Letters*, Cilt 73, Sayı 6, s. 992–1003, 2002.
Kalkan, E., Gülkan, P., "Site-dependent Spectra Derived from Ground Motion Records in Turkey", *Earthquake Spectra,* Cilt 20, Sayı 4, s. 1111-1138, 2004.
Kalkan, E., Gülkan, P., Yilmaz, N., Celebi, M., "Reassessment of Probabilistic Seismic Hazard in the Marmara Region", *Bulletin of the Seismological Society Of America,* Cilt 99, Sayı 4, s. 2127–2146, 2009.
Kalkan, E., Wills, C.J., Branum, D.M.,"Seismic Hazard Mapping of California Considering Site Effects", *Earthquake Spectra*, 2010 (in-press).
Le Pichon, X., Şengor, A.M.C., Demirbag, E. ve diğ., "The Active Main Marmara Fault", *Earth and Planetary Science Letters*, Cilt 192, Sayı 4, s. 595–616, 2001.
Lorenzo-Martin, F., Roth, F. Wang, R., "Elastic and Inelastic Triggering of Earthquakes in the North Anatolian Fault Zone", *Tectonophysics*, Cilt 424, s. 271–289, 2006.
Parsons, T., Toda, S., Stein, R., Barka, A., Dieterich, J.H., "Heightened Odds of Large Earthquakes Near Istanbul: An Interaction-Based Probability Calculation", *Science,* Cilt. 288, s. 661-665, Nisan 2000.
Parsons T., *Journal of Geophysical Research,* Cilt 109, Sayı B05304, s. 1-21, 2004.
Petersen, M.D., Frankel, A.D., Harmsen, S. C., ve diğ., "Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps", U.S. Geological Survey Open-File Report 2008–1128, 2008.
Pondard, N., Armijo, R., King, G.C.P., Meyer, B., Flerit, F., "Fault Interactions in the Sea of Marmara Pull-apart (North Anatolian Fault): Earthquake Clustering and Propagating Earthquake Sequences," *International Journal of Geophysics*, Cilt 171, s. 1185-1197, Subat 2007.