

Büyük Deprem Tahmininde Mikrodepremler

Deprem ve fay gibi jeofizik olayların farklı ölçeklerde benzer davranış (Fraktal) gösterdiği 1980'li yıllarda anlaşılmıştır (Öncel ve Alptekin, 1995). Fraktal, depremlerin zaman, uzay ve büyüklük dağılımlarının farklı ölçeklerde aynı davranmasıdır. Sismoloji'de fraktal dağılımın en temel bilinen ilişkisi deprem oluş frekansı (N) ile büyüklük (M) arasında ($\log N = a - bM$) bilinen bağıntıdır. Bu bağıntıda frekans-büyüklük arasındaki ilişkiyi veren b parametresi, yerin zemin, gerilme ve deformasyon özelliklerini temsil eden, deprem büyüklüğüne göre değişmeyen bir fraktal parametredir. Depremleri küçük ($0 < M < 3$), orta ($3 < M < 5.5$) ve büyük ($M > 5.5$) olarak kabaca tasnif edersek, b parametresi farklı büyüklük aralıklarındaki deprem popülasyonlarından aynı büyüklükte bir değerle hesaplanır. Zaten, fraktal olarak yukarıda nitelediğimiz ölçekle değişmezlik (scale invariance) özelliğinin anlamı budur. Depremlerin büyüklük-frekans düzeninin fraktal olmasından hareketle, büyük depremlerin zemin-gerilme koşulları küçük depremlerden belirlenebilmektedir.

Olabilecek bir depremin büyüklüğünü, yerin mekanik yapısıyla ilişkili olan gerilme artışı belirler. Genelde gerilmenin arttığı alanlara, yerin mekanik davranışı ile ilgili olarak gevrek (brittle) fakat malzeme dayanımı açısından nisbeten sağlam olduğu alanlara asperite alanları denir. Gerilme birikiminin büyük (küçük b değeri) olduğu asperite alanlarında beklenen deprem büyüktür. Krip alanları olarak tanımlanan bölgeler

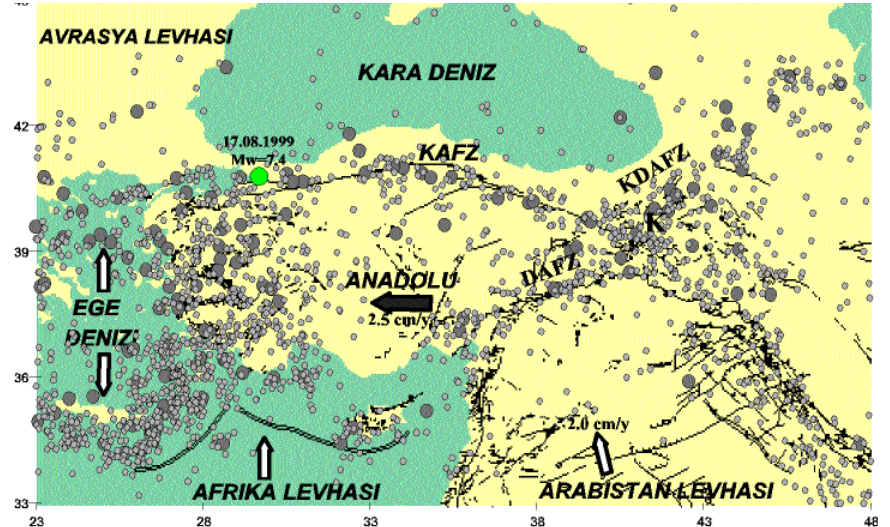
de ise malzeme mekanik olarak esnek (ductile) bir davranış gösterir. Gerilme birikiminin düşük olduğu krip (büyük b değeri) alanlarında gözlenen ve beklenen depremler çok küçüktür.

Türkiye'deki Aktif Fay Kuşakları ve Marmara Bölgesi'nin Depremselliği

Türkiye ve yakın çevresinin sismotektoniği, Avrasya, Afrika ve Arap levhaları ve bunlar arasındaki Ege, Anadolu, Doğu Anadolu levhalarının göreceli hareketleriyle ilişkilidir. Avrasya levhasına göre Arabistan levhasının kuzeye doğru hareketi, Anadolu ve Doğu Anadolu levhalarının sırasıyla batı ve doğuya doğru kaçışla-

rına neden olarak, kuzeyde Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), güneydoğuda Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ve kuzeydoğuda Kuzey Doğu Anadolu Fay Zonu (KDAFZ) üzerinde yanal hareketlere neden olmaktadır (Şekil 1). Düşey hareketlerin gözlemlendiği Batı Anadolu'da yer alan Ege levhası ise Anadolu levhasından daha farklı bir tektonik davranış özelliği göstererek GB yönünde Afrika levhasına doğru hareket etmektedir (Taymaz ve diğ., 1991).

Alpin Deprem Kuşağı'nın ve Türkiye'nin en önemli kırık zonunu oluşturan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)'nu, doğuda Karlıova'dan (K ile gösterilmiş, Şekil 1) başlayarak Adapazarı'nın batısına kadar uzanır. KAFZ, Marmara Denizi'nin kuzeyinden ve güneyinden geçerek Kuzey Ege Denizi'ne kadar yanal ve düşey kırılma özelliği göstererek ve



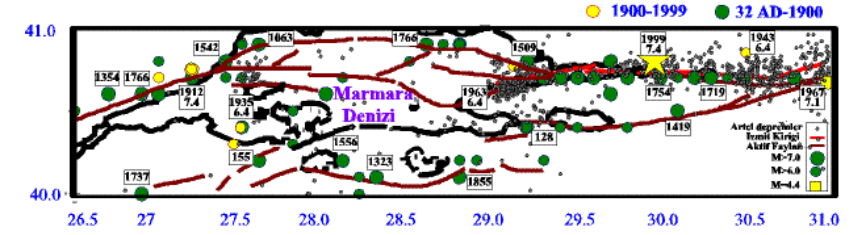
Şekil 1: Türkiye'nin sismotektonik haritası. 1899-1999 yıllarında $M_w > 4.5$ ve daha yukarı olan ana şok depremleri (Öncel ve Alptekin, 1999).

üç kola ayrılarak devam eder (Barka ve Kadinsky-Cade,1988; Şekil 2). Fay zonu bu bölgede, özellikle Adapazarı'nın batısından itibaren Marmara Bölgesi'nde, doğudaki belirgin morfolojisini ve tek ana fay çizgisi görünümünü kaybederek dallanma özelliği gösterir. Son 17 Ağustos İzmit depremi de bu kollardan biri üzerinde olmuştur. Tarihsel geçmişten günümüze bir çok depremin, Marmara Bölgesi'ndeki farklı kollardan hareketleriyle ilişkili olduğu, Şekil 2'deki tarihsel depremlerin farklı kollar üzerine düşmesinden de açıkça görülmektedir.

Anaşok Deprem Kataloğu

Depremlerin oluş sayılarıyla büyüklükleri arasındaki Log-Lineer fraktal değişimden yararlanılarak, büyük depremlerin yer alabileceği potansiyel alanların belirlenmesinde anaşok deprem kataloğu kullanılır. Anaşok deprem kataloğu, ham deprem kataloğunun işlenmesi ve artçışoklardan, kataloğun bilinen değişik (pencere ya da yığılma) yöntemlerinden birisinin uygulanması ile temizlenmesinden sonra elde edilen jeofizik veridir. Ham verilerin hiç bir işleme tabi tutulmadan kullanılması jeofizik parametreler üzerinde hatalara neden olduğu, belirlenmiş bilinen bir olgudur (Öncel ve Alptekin, 1999). Deprem kataloglarında, istasyon sayısındaki artmaya ya da kullanılan algoritmaların değişimine bağlı olarak bozulmalar (büyüklük değerlerinde kayma gibi) meydana gelmektedir. Bu bozulmaların hem düzeltilmesi hem de deprem kataloğunun rafine (decluster) edilerek uygun bir deprem kataloğu haline getirilmesi, sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir.

Öncel ve Alptekin (1999) Marmara Bölgesi'ndeki 1981-1999 yılları arasında toplanmış mikrodepremsellik verilerinde belirlenen deprem büyüklüklerindeki kaymayı (magnitude shift) düzelterek bölge için homojen bir anaşok karakterli mikrodepremsellik kataloğu hazırlamışlardır. Bölgeyle ilgili olarak yapılabilecek diğer araştırmalarda kullanılabil-



Şekil 2: Marmara bölgesinin aktif fay ve büyük depremleri (Ambraseys ve Finkel, 1995).

mesine imkan sağlamak için, hazırlanan katalog global bir web sitesine <http://www.angelfire.com/al/geophysics/index.html> yüklenmiştir.

Öncel ve Wyss'in (2000) Marmara Bölgesindeki potansiyel alanların, yani asperitelerin belirlenmesine yönelik çalışmasında, yukarıda belirtilen katalog kullanılmıştır. Marmara Bölgesi'ni 5 km aralıklarla dilimleyerek, her bir dilim noktasından geçirilen 20 km çaplı dairelerden, içine en az 50 deprem düşen alanlar için gerilme (b-değeri) ve deprem etkinliği (a-değeri) değişimleriyle ilişkili parametrelerden hareketle, 17 Ağustos depremininkine (Mw=7.4) denk büyüklükte bir depremin Marmara Bölgesi'nin hangi alanlarında vuku bulabileceği konusunu incelemiştir. Bu incelemede yerel yinelenme (TL) parametresinden yararlanılmıştır. Bir sonraki paragrafta, kullanılan parametrelerin elde edilmesi ve yorumlanması ile ilgili bilgiler verilecektir.

Büyük Depremlerin Olabileceği Alanların Kestirimi

Asperite fiziksel olarak depremi oluşturacak gerilmeye karşı dayanımı en fazla olan alan demektir. Bu alanlar gelecekte bir depremi oluşturabilecek alanlar olduğu gibi, olabilecek bir depremi durduran alanlarda olabilir (Öncel ve Wyss, 2000). Evrendeki jeofizik fenomenlerin fraktal bir geometriye sahip olduğunun belirlenmesi, jeofizik yapıların modellenmesinde yeni bir dönem açmıştır (Turcotte, 1997). Frekans-Büyüklük (FB) arasındaki ilişkiyi veren sismolojinin meşhur istatistik bağıntısı:

$$\text{Log}N=a-b \quad (1) \text{ şeklindedir.}$$

Burada N, m büyüklüğünü aşan depremlerin sayısıdır; a ve b para-

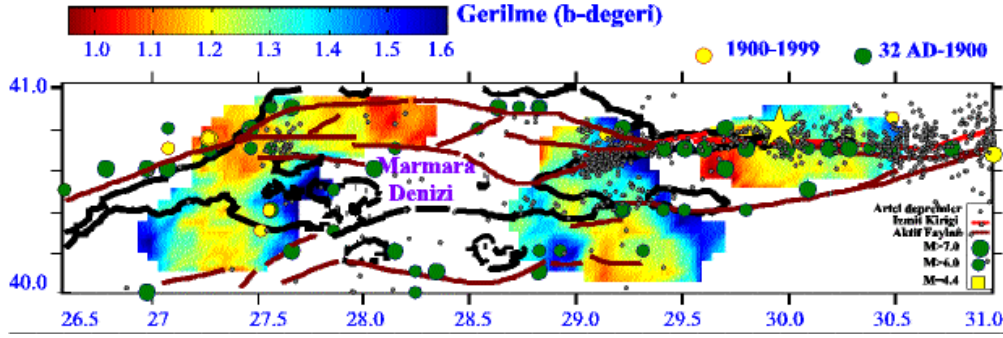
metreleri ise sabittirler. Gutenberg-Richter bağıntısı olarak bilinen bu bağıntının bir fraktal dağılım olduğu, Japon bilim adamı Aki (1981) tarafından gösterilmiştir.

Öncel ve Wyss'in (2000) Marmara Bölgesi'ndeki büyük depremlerin gelişebileceği potansiyel alanların, yani asperitelerin belirlenmesine yönelik çalışmasında anaşok depremleri kullanılmıştır. Marmara Bölgesi'ni 5 km aralıklarla dilimleyerek, her bir dilim noktasından geçirilen 20 km çaplı dairelerden içine en az 50 deprem düşen alanlar için gerilme (b değeri) ve deprem etkinliğindeki (a değeri) değişimle yakından ilişkili olduğu ispatlanmış bulunan jeofizik fraktal değişkenlerinden hareketle, son 17 Ağustos depreminin büyüklüğüne (Mw=7.4) denk bir depremin yinelenme periyodları ve muhtemel yerleri aşağıdaki bağıntı kullanılarak belirlenmiştir:

$$\text{TL}(M) = dT/10(a-bM) \quad (2)$$

Öncel ve Wyss (2000), bölgede 7.4 büyüklüğünde bir depreme neden olabilecek gerilme, etkinlik değişimleri ve bunlara bağlı yinelenme zamanlarını gösteren haritayı yukarıda verilen yöntemle ve daha sonraki paragraflarda açıklanacak rafine edilmiş deprem verisinden hareketle belirlemişlerdir. Uygulanan yöntemde kullanılan fraktal değişkenlerin fiziksel anlamları ve belirlenen alanların deprem tehlike risklerine aşağıda değinilecektir.

Marmara Denizi'nde Gerilme: İlk olarak 1960'lı yıllarda, Amerikalı bilim adamı Scholz, gerilmeye, FB bağıntısındaki (1) b parametresinin ilişkili olduğunu belirlemiştir. Kırılmalarda artan (düşük b) ve azalan (büyük b) gerilme alanlarının FM bağıntısından belirlenebileceği, bu araştırmacının yaptığı laboratuvar deneyleriyle ortaya konmuştur. Depremde açığa çıkan enerjinin, gerilme kadar kırılan malzemeyle de iliş-



Şekil 3: Marmara Bölgesi'nde gerilme değışimleri (Öncel ve Wyss, 2000). İzmit depreminden önce gerilmenin nasıl arttığı ve benzer gerilme birikimlerinin Marmara bölgesinde nerelerde olduğu görülmektedir. Ayrıca depremden sonra artçı şokların nasıl dağıldığı görülmektedir.

kili olduğu, yine aynı yıllarda Japon bilim adamı Mogi tarafından laboratuvar koşullarında ortaya çıkarılmış olan diğer önemli bir gelişmedir.

Laboratuvar koşullarında belirlenen açığa çıkan enerjinin biriken gerilme miktarı ve kırılan malzemeyle ilişkili olduğunu belgeleyen ve yukarıda değinilen deneysel sonuçlar, fay zonlarıyla ilgili olarak yapılan incelemelerin fiziki dayanaklarını oluşturmuşlardır. Özellikle, San Andreas fay zonunda ve Japon'ya daki aktif faylarda, kalite ve kantitesi yüksek deprem verilerinden hareketle yapılan incelemelerde gerilme değışimlerinin belirlenebilmiş olması bu yaklaşımın, kırık zonlarında büyük depremlerin oluşamayacağı (krip:büyük b değeri) ve oluşabileceği (asperite:düşük b değeri) alanların belirlenmesinde kullanılabilirliğini göstermiştir (Wiemer ve Wyss, 1997, Öncel ve diğ., 2000).

Marmara Bölgesi'ndeki gerilme değışimleri ayrıntılı olarak verilmiştir (Şekil 3). Gerilmenin büyük olduğu yerler (kırmızı), büyük depremleri oluşturacak enerjinin depolandığı alanları göstermektedir. Benzer çalışmalar dünyanın değışik yerleri içinde yapılmış ve San Andreas fay zonunda gerilmenin küçük olduğu (yüksek b değeriyle temsil edilen) ve fayın plastik özellik gösterdiği alanlar (krip) ile (Amelung ve King, 1997; Wiemer ve Wyss, 1997);

San Jacinto fayındaki Anza sismik boşluğun (Wyss ve diğ., 2000) ve Morgan Hill depreminin yer aldığı asperite alanları (küçük b değeri ile temsil edilen) belirlenmiştir.

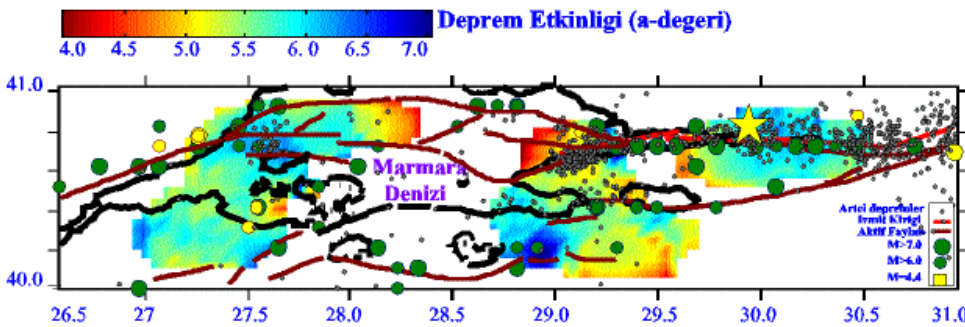
Marmara Bölgesi'nde Deprem Etkinliği: Laboratuvar koşullarında gerilme şiddeti ile b değerinin doğrusal olarak değıştikleri, yani aralarında pozitif bir korelasyona sahip oldukları belirlenmiştir (Main, 1992). Kısaca, gerilme konsantrasyonunun büyük olduğu (düşük b) yüksek dayanımlı alanlar, fayın kitlendiği asperite alanlarını, düşük dayanımlı alanlar (büyük a) ise, kırılmanın daha sık gözlemlendiği ya da beklenilebileceği çatlak (crack) zonları simgeler. Gerilme konsantrasyonunun fazla olduğu alanların (düşük b) veya daha yumuşak bölgelerin (büyük a), jeofizik fraktal değışkenleri ile belirlenebileceği yukarıda değinilen çalışmalarla ortaya konmuştur.

Marmara Bölgesi'nde Büyük Depremlerin Oluşabileceği Alanlar: Düşük b ve a değerlerinden, yinelenme periyodu en küçük bir TL anomali değerine karşılık gelir. Bu değer her iki parametrenin; hem daha büyük bir gerilme konsantrasyonuna, hem de daha yumuşak bir alan ya da fay parçasına karşı gelebilecek olan büyüklüklerinden hesaplandığı ve fayın mekanik özelliklerinin belirlenmesinde daha kuvvetli bir fiziksel temele dayanmakta oldu-

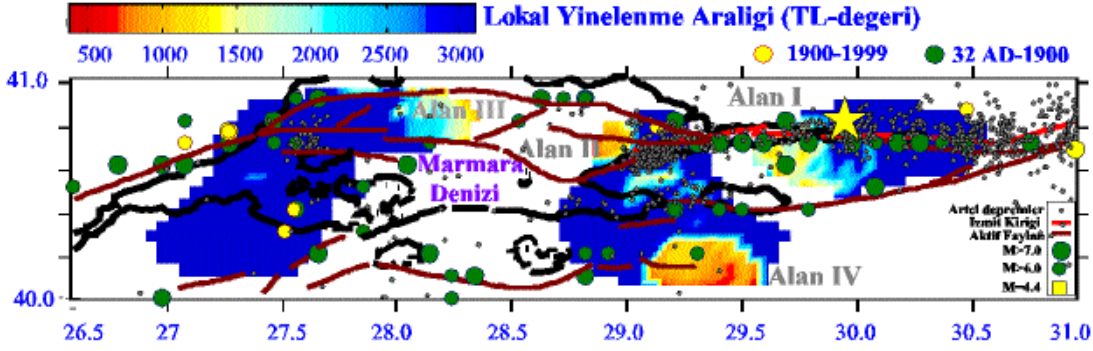
ğu için, yol açtığı sonuçlar da daha güvenilirlerdir. Aşağıda verilen ve belirlenen alanlara ait olan yorumlar, basıma hazır son bir çalışmadan derlenmiştir (Öncel ve Wyss, 2000).

Alan I: Kandilli Rasathanesi'nden derlenen M>3 artçı şok dağılımlarından görülebileceği gibi, son 17 Ağustos artçı şok zonunun uzunluğu yaklaşık 220 km'dir. Artçı şok dağılımının, 29°-31°D derece boylamları arasında kalan en batı ucunda büyük bir deprem yığılması görülmektedir. Bu yığılmanın, 17 Ağustos depreminin USGS tarafından verilen yerinin doğu ucuna, fakat kırığının tam ortasına denk düştüğü gözlenmiştir (bak Şekil 1 ve 2). Bu sonuç asperite olarak belirlenen alanlardan biri olan Alan I'in kenarına denk düşmekte ve TL anomalilerinden hareketle asperite alanlarının belirlenebileceğini göstermektedir.

Alan II: Bazı araştırmacılar tarafından bu alana yakın bir yerde 1963'de meydana gelmiş olan depremin neden olduğu lokal gerilme artımı üzerinde durulmaktadır (bak Şekil 4d, Nalbant ve diğ., 1998). Buna ilave olarak, 21 Ekim 1999 gününde yer alan ve İstanbul'da hissedilmiş bulunan M=4.4 depremi ve beş artçı şoku, bu alanda ki gerilmenin yüksek olabileceğini göstermektedir. Kuzey Anadolu Fay Zonu boyunca gelebilecek bir kırığın, 28.8°D boylamındaki bu alandan başlayarak ba-



Şekil 4: Deprem etkinliğinin Marmara Bölgesi'ndeki değışimi. Deprem etkinliğinin arttığı alanlar a parametresinin büyük olduğu yerlere karşılık gelmektedir ve Şekil 3 de verilen haritanın lejantı ile değışiktir. Genelde daha düşük etkinliğin (küçük a değeri) daha büyük gerilme birikiminin (Şekil 3, küçük b değeri) alanlara karşılık gelir.



Şekil 5: Marmara Bölgesi'nde belirlenen asperite alanları. Son İzmit depreminin yinelenme periyoduna benzer dört alan depremden önce derlenen ve daha sonra işlenen deprem verilerinden belirlenmiştir.

tıya doğru hareket etmesi beklenebilir. Aynı zamanda asperitenin kuzey sınırının 1754 depremi ile ilişkilendirilmesi (Hubert-Ferrari ve diğ., 2000, Şekil 3), bu bölgedeki asperitenin, yaklaşık 250 yıldan beri deprem enerjisinin depolandığı bir alan olduğuna işaret etmektedir.

Alan III: Bu alan, gelecekte yer alacak kırılmalar üzerinde önemli rol oynayabilecek bir potansiyele sahiptir. Şüphesiz, $M > 7$ olan depremlerin yerleri birer nokta ile resmedildikleri için, haritalanmasına çalışılan asperite alanlarının tarihsel geçmişte olmuş depremlerle ilişkilendirilmeleri zordur. Bu nedenle bu alanın, geçmişte olduğunu bildiğimiz deprem kırıklarının gelişimi üzerinde ne tür bir rol oynadığı konusunda bir şey söylemek mümkün değildir. Hubert ve Ferrari ve diğerlerinin, (2000), tarihsel depremlerin bilinen kırıklarla ilişkilendirmesine yönelik çalışmalarını göz önüne alırsak, mevcut asperitenin kuzey ucu 1766 depremi ile, güney ucu ise 1776 yılındaki depremle sınırlanmaktadır. Bu bilgilerin doğruluğu kabul edilecek olursa, var olan deprem potansiyelinin bu alanda da büyük olabileceği ortaya çıkmaktadır.

Alan IV: Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) güney kolu, deprem tekrarlanma süresinin en düşük değerle gözlemlendiği bir alandır. Bu alanda gözlenen en büyük deprem 1983 yılında vuku bulmuş olan $M=5.5$ depremidir. Bu nedenle bu alan, istatistiksel açıdan sismik suskunluğa sahiptir. Diğer taraftan, gözlenen suskunluk ve tekrarlanma süresinin (TL) küçük olması, orta büyüklükteki 1983 depreminden kaynaklanıyor olabilir. Bu kol bu depremden sonra, bir kaç yıl için deprem etkinliğini arttırmış ve sonra, normal olan düşük deprem etkinliğine geri dön-

müş de olabilir. Bu nedenle Alan IV'ün civarındaki suskunluğun büyük olmasına karşın, gelecekte olabilecek bir ana şokun beklenebileceği bir alan olarak gösterilmesi tereddütle karşılanmalıdır. Çünkü deprem etkinliğinde gözlenen son değişimler, 1983 yılındaki depremin sonucu olarak yorumlanabilir (Öncel ve Wyss, 2000). Gene Hubert-Ferrari ve diğ., (2000) çalışmasına göre bu alana 1855 yılında bir deprem kırığı düşmüş olması bu bölgedeki deprem potansiyelinin yüksek olabileceğini göstermektedir.

Sonuç

Gerilme (b değeri) ve etkinlik (a değeri) değişimlerine bağlı olarak ve yerel yinelenme zamanı TL'nin anomalî değerlerinden hareketle, potansiyel deprem alanları (asperite) belirlenmiştir. Alan I, 17 Ağustos depreminin kırığının daha batıya doğru ilerlemesini engelleyen engel (bariyer) tipi bir davranış göstermektedir. Alan II ve Alan III arasında deprem etkinliğinin düşük olmuş ve depremlerin bir saçılma göstermiş olmasından dolayı gelecekte depremin yeri olduğu ileri sürülen bölümdeki hareket, KAFZ'nun diğer bölümlerinde gözlenen asismik, yani depreme bağlı olmayan bir davranışa karşılık geliyor da olabilir. Çünkü daha büyük depremlerin izcisi olan bir mikrodeprem aktivitesinin olmaması bu düşüncüyü kuvvetlendirmektedir. Son çalışmaların ışığında, fay boyunca yer alan küçük ve büyük ölçekteki depremlerin davranışlarının benzerlik gösterdiği görüşü yerbilimlerinde ağırlık kazanmıştır (Öncel, 1995, 1996a,b, 2000). Yinelenme sürelerinin tehdit oluşturabilecek büyüklükte bir deprem için incelenmesi ve yerel değişimlerinden hare-

ketle bir sonraki depremi oluşturabilecek asperite alanların belirlenmesi, ülkemizde ilk defa uygulanan yeni bir yaklaşımdır (Öncel ve Wyss, 2000). Yöntemin yeterince sınanmamış olduğu dikkate alındığında, gelecek depremlerin yerlerini belirlemekle ilgili yapılan çalışmanın sonuçlarına (Öncel ve Wyss, 2000) kuşku ile bakılması gerekeceğinden; depremin gelecekte Alan II, III ve IV ile verilen asperitelerde olabileceğini kesin olarak söylemek mümkün değildir.

Ali Osman Öncel
İÜ., Jeofizik Mühendisliği Bölümü

Kaynaklar

- Aki, K., 1981, A probabilistic synthesis of precursory phenomena: in Earthquake Prediction: An International Review, Maurice Ewing Ser., vol. 4, edited by D. W. Simpson and P. G. Richards, p. 566-574. A
- Ambraseys, N.N., Finkel, C. F., 1995, The Seismicity of Turkey and adjacent areas: Eren Press, 240p.
- Barka ve Kadinsky-Cade, 1988
- Hubert-Ferrari, A., Barka, A., Nalbant S., Meyer, B., Armijo, R., (2000), 17 Ağustos 1999 depremi sonrasında Marmara'da deprem riski. Bilim ve Teknik, sayı: 389, sayfa: 54 - 58.
- Main, I.G., P.G. Meredith & P.R. Sammonds (1992). Temporal variations in seismic event rate and b-values from stress corrosion constitutive laws, Tectonophysics 211, 233-246.
- Main, I.G. (1992). Damage mechanics with long-range interactions: correlation between the seismic b-value and the two point correlation dimension, Geophys. J. Int. 111, 531-541.
- Mogi, K., 1962, Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes, Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ. 40, 831-853.
- Öncel ve Wyss (2000): The major asperities of the 1999 Mw7.4 İzmit earthquake, defined by the microseismicity of the two decades before it, GJI, press.
- Öncel, A.O., Wilson, T., Nishizawa, O., 2000. Size Scaling Relations in the Active Fault Networks of Japan and their correlation with Gutenberg-Richter b-Values, Revised for Journal of Geophysical Research, in press.
- Öncel, A.O., Alptekin, Ö., 1999. Effect of aftershocks on estimation of earthquake hazard parameters: An example from the north Anatolian fault zone, Vol 19, 1-11, Natural Hazards.
- Öncel ve Alptekin (1999): Marmara Bölgesi'nin Mikrodepremselliği ve Sismik Tehlike, Proje No: 1038/250897.15.
- Öncel, A. O., Main, I., Alptekin, Ö., Cowie, P., 1996a. Spatial variations of the fractal properties of seismicity in the Anatolian Fault Zones, Tectonophysics 257, 189-202.
- Öncel, A.O., Main, I., Alptekin, Ö., Cowie, P., 1996b. Temporal variations of the fractal properties of seismicity in the North Anatolian fault zone between 31°E and 41°E, Vol.146, No.2, Pure and Applied Geophysics.
- Öncel, A.O., Alptekin, Ö., 1995. Fractal distribution and its application in Seismology, Jeofizik, 10, 11-316, ISSN 0259-1472.12.
- Öncel, A.O., Alptekin, Ö., Main, I., 1995. Temporal variations of the fractal properties of seismicity in the western part of the North Anatolian fault zone: possible artefacts due to improvements in station coverage, Vol.2,147-157, Nonlinear processes in Geophysics.
- Turcotte, D. L., 1997, Fractals and chaos in geology and geophysics: Cambridge University Press, Cambridge, 2nd edition, 398p.
- Taymaz, T., Jackson and D. McKenzie, 1991, Active tectonics of the north and central Aegean Sea, Geophys. J. Int. 106, 537-550.
- Wiemer, S., and M. Wyss, 1997, Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times?, J. Geophys. Res., 102, 15115-15128.