

# FRAKTAL DAĞILIM VE SİSMOLOJİDEKİ UYGULAMALARI

## Fractal Distribution and Its Applications in Seismology

Ali Osman ÖNCEL\* ve Ömer ALPTEKİN\*

### ÖZET

Jeolojik olayların çoğunluğu fraktal özellik gösterirler. Fraktal özelliğe sahip olan bir sistemin veya sürecin temel özelliği ölçekle değişmez oluşu veya kendine benzer oluşudur. Bu özelliklere sahip olan sistemler veya süreçler bir güç yasası ile temsil edilebilirler. Fraktal özellik fraktal boyut ( $D$ ) ile temsil edilir. Fraktal boyut sistemdeki veya veri grubundaki karmaşıklığın bir ölçüsü olup anlamı kullanılan veriye ve uygulanan yöntemle göre değişir. Fraktal kavramı son 10-15 yıldan beri arazide ve laboratuvarında gözlenen kırık sistemlerinin karmaşık yapısını açıklamakta kullanılmaktadır. Öte yandan sismik aktivite gösteren fay zonları ölçek değişmez özelliği olan karmaşık sistemler olup depremlerin uzay ve zaman dağılımlarını temsil eden fraktal boyut (korelasyon boyutu  $D_c$ ) ile fay uzunluğu ve kaynak boyutunu temsil eden Gutenberg-Richter bağıntısından bulunan  $b$  parametresi arasında bir korelasyon gözlenmektedir. Depremselliğin fraktal boyutu deprem oluş sürecindeki düzensizliğin ve depremlerin yığılma özelliklerinin bir ölçüsüdür. Fraktal boyutun zaman ve uzaydaki değişimleri büyük depremlerin ön belirtisi olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmanın amacı fraktal kavramını ve sismolojideki kullanımını açıklamak ve Türkiye'deki doğrultu atımlı fay sistemlerinin ve bu faylarla ilişkili sismik etkinliğin fraktal özellikleri konusundaki araştırmalar hakkında kısa bilgi vermektir.

### ABSTRACT

Most of the geological events show fractal properties. The basic properties of a system or process having fractal properties are scale invariance or self-similarity. Processes or systems having these properties can be represented by a power law distribution. Fractal feature is represented by fractal dimension. Fractal dimension is a measure of the complexity in a system and data, the meaning of its changes with respect to used data and method. Fractal concept is used to express for the complexity of fracture systems observing in the field and laboratory for the last ten or fifteen years. Furthermore, fault zones showing seismic activity are complex systems having scale invariance and it is observed that there is a negative correlation between the fractal dimension (corelation dimension  $D_c$ ) representing spatial and temporal variations of earthquakes and the  $b$ -value of the Gutenberg-Richter relation representing fault length and source dimension. Fractal dimension of seismicity is a measure of the complexity in the earthquake occurrence process and the clustering of earthquakes. Spatial and temporal variations of the fractal dimension are used as indicators of the large earthquakes. The aim of this study is to describe briefly the fractal concept and the using of this concept in seismology and to give information about the continued research relating with the fractal properties of strike-slip fault systems in Turkey and their seismic activity.

### GİRİŞ

Kuramsal özellikleri Polonya'lı fizikçi Mandelbrot (1982) tarafından verilen fraktal geometri kavramı farklı ölçeklerde düzensizliğe sahip doğa olaylarının modellenmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle dağlar, nehirler, deniz girintisi, faylar gibi jeolojik yapıların ve depremler gibi doğal olayların incelenmesinde, fraktal geometri kavramı geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Kayaçalarda kırık sistemlerinin gelişmesi ve depremlerin oluşumu fraktal

olayların tipik örneklerini oluştururlar. Gutenberg-Richter bağıntısı deprem oluşumunun fraktal olduğunu gösterir. Ayrıca, pek çok araştırma deprem oluşumunun zaman ve uzay dağılımlarının da fraktal olduğunu göstermiştir (Kagan ve Knopoff, 1980; Sadovskiy ve diğ., 1984; Harita, 1989; Öncel ve diğ., 1994). Bu çalışmanın amacı fraktal kavramını kısaca açıklamak ve Türkiye'deki fay sistemleri ve depremselliğin fraktal özellikleriyle ilgili çalışmalar hakkında bilgi vermektir.

\* İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sismoloji Anabilim Dalı

### FRAKTAL DAĞILIMIN TANIMI

Doğrusal karakteristik boyutları  $r_n$  olan cisimlerin sayısı ( $N_n$ ) ile karakteristik boyutları arasında

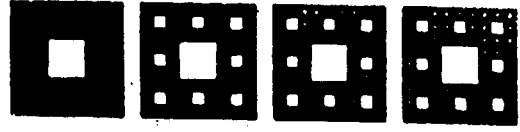
$$N_n = C / r_n^D \quad (1)$$

şeklindeki bir ilişki  $D$  fraktal boyutu ile bir fraktal dağılımı ifade eder.  $C$  bir orantı sabitidir. Fraktal boyut bir tamsayı olduğunda Öklidiyen boyuta eşittir. Bir noktanın Öklidiyen boyutu sıfır, doğrunun bir, karenin iki, kübün ise üçtür. Fraktal boyut, parçasallığın bir tanımı olduğundan genelde bir tamsayı değildir. Fraktal kavramı aynı zamanda cisimlerin istatistiksel dağılımına da uygulanabilir. Fraktal boyut  $D$  nin belirlenmesi için (2) bağıntısı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$D = \ln(N_{n+1} / N_n) / \ln(r_n / r_{n+1}) \quad (2)$$

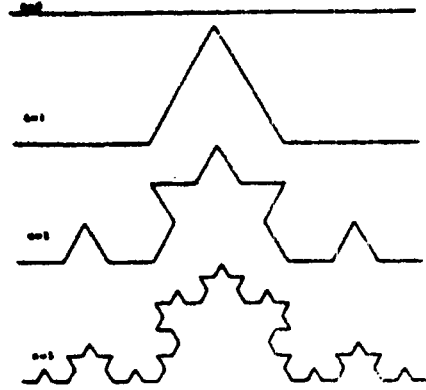
(1) ve (2) ile verilen matematiksel gösterimler bir sonsuz aralıkta geçerli olmakla birlikte, herhangi bir fiziksel uygulama için fraktal dağılımın alt ve üst sınırları olmalıdır. Fraktal dağılımın temel özelliği ölçek bağımsız olmasıdır. (1) ve (2) ile verilen tanımlarda karakteristik bir uzunluk ölçeği bulunmamaktadır.  $D$  ile gösterilen fraktal boyut, dağılımdaki büyük ve küçük cisimlerin göreceli önemini göstermektedir (Mandelbrot, 1982; Turcotte, 1992).

Fraktal dağılımın açıklanmasında kullanılan en iyi örnek Koch eğrisidir (Şekil 1). Eğrinin her bir aşamasının oluşturulmasında, orijinal parçanın merkezinde, kenar uzunluğunun üçte birine eşit üçgenler oluşturulur. Birinci aşamada parçaların sayısı  $N_0=4$ , uzunluğu  $r_0=1/3$  ve ikinci aşamada  $N_1=16$ ,  $r_1=1/9$  olur. Bu durumda (2) denkleminden  $D=\ln 4/\ln 3=1.26186$  değeri bulunur. Fraktal boyut bir (doğrunun Öklidiyen boyutu bir) ve iki (yüzeyin Öklidiyen boyutu iki) arasındadır. Bu işlem sonsuz kere sürdürülürse, bir fotoğraftaki kenarın bütün ölçeklerde aynı veya benzer kalması gibi kenarların ölçekle değişmediği görülür. Koch eğrisi sahil kıyısı uzunluğunun ölçülmesinde bir model olarak düşünülebilir. Burada  $N$  sahil kenarlarını örtmek için gereken birim uzunlukların sayısıdır.  $N$ , bu birimlerin uzunluklarının ( $r$ ) bir fonksiyonudur ve  $D$  sahil çizgisinin fraktal boyutudur. Bu nedenle, fraktal boyut düz bir çizginin topolojik boyutundan daha büyüktür ve eğrinin uzaysal doluluğunun hangi boyutlarda olduğunu gösterir. Fraktal kavramı iki boyutlu şekillere de uygulanır. Bunun en genel örneği Sierpinski halısıdır (Şekil 2). Bu örnekte, bir kare dokuz eşit parçaya bölünür ve merkezde olan atılır ( $r_1=1/3$ ,  $N_1=1/8$ ). Sonra, kalan her bir kare tekrar bölünür ( $r_2=1/9$ ,  $N_2=64$ ) ve merkezde kalan parça atılır. Bu işlemin sürmesiyle meydana gelen fraktal bir cisimin boyutu (2) denkleminden  $D=\ln 8/\ln 3=1.8928$  olarak bulunur.



Şekil 1: Koch eğrisi, dört küçük parçanın herbiri orijinalin üçte bir uzunluğunda gösterilmesiyle oluşturulan eğri.

Figure 1: The Koch curve, a fractal figure formed by replacing each straight line segment by four smaller ones, each with length one third of the original.



Şekil 2: Sierpinski halısı, daha küçük boyutlar için iterasyonun herbir aşamasında merkez karenin elemine edilmesiyle oluşturulan fraktal eğri.

Figure 2: The Sierpinsky carpet, a fractal figure formed by eliminating the central square at each level of iteration to smaller sizes.

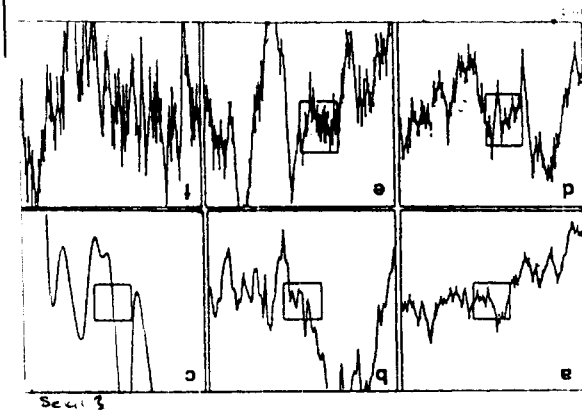
### FRAKTAL KAVRAMININ DOĞAL BİLİMLERDEKİ ANLAMI

Fraktal geometri kavramı doğal bilimlerde oldukça büyük bir ilgi uyandırmış ve yaygın biçimde kullanılmaktadır. Artık Öklidiyen cisimlerden çok doğal cisimlerin fraktal yaklaşımla tanımlanmasının çok daha faydalı olduğu görüşü ağırlık kazanmaktadır. Doğada fraktal olarak ifade edilebilen yapılara, sahil çizgileri, nehirlerin dallanma özellikleri, faylar, topografya ve bulutlar gibi pek çok örnekler verilebilir.

#### Kendine benzerlik

Kendine-benzerlik, bir cismin bütünle aynı olan parçalardan oluşması veya parçasal düzensizliğinin bütünün düzensizliği ile benzer olmasıdır. Bu kavramın kolaylıkla anlaşılmasına sahil kıyıları güzel bir örnektir. Bilindiği gibi sahil kıyısının herhangi bir parçası bütününde olduğu kadar girintilidir. Fraktal kavramını daha iyi açıklamak için Şekil 3a'da görülen karmaşık

bir eğri düşünülün. Bu bir fraktal eğridir. Bunun nedeni, eğrinin büyütülen parçasının, eğri bütünündeki kadar karmaşık olmasıdır (Şekil 3f).



Şekil 3: Fraktal olmayan bir eğri (a-c) ve olan bir eğrinin (d-f) büyütülmüş şekilleri görülmektedir.

Figure 3: Zooming of a differentiable graph (from a to c) and a fractal graph (from d to f).

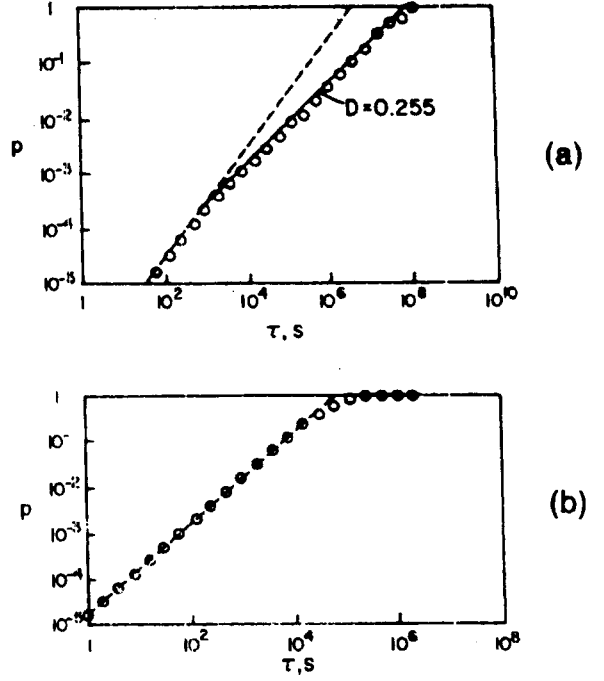
### Depremselliğin fraktal özelliği

Depremlerin litosferdeki dağılımları rastgele olmayıp kabuğun sismojenik kısmının kalınlığı ile ilişkilidir. Bununla birlikte depremler güç yasasına uygun bir uzay dağılımı veya yığılma özelliği gösterirler:

$$P(R \leq r) = r^{D_2} \quad (3)$$

Burada  $P$ , bir deprem odağının iki odak arasında bir  $r$  uzaklığında olma olasılığıdır ve  $D_2$  korelasyon boyutudur. Bu tür dağılımların varlığı laboratuvar ölçeğinde (Harita ve diğ., 1987a) ve kabuk ölçeğinde (Kagan ve Knopoff, 1980) belirlenmiştir. Yığılma derecesi  $D_2$  üstü (exponent) ile belirlenir. Bu üst sistemin fraktal boyutlarından biridir (Mandelbrot, 1982; Turcotte, 1992).

Depremler zaman içinde de yığılma göstermektedirler. Smalley ve diğ., (1987) depremlerin zaman içinde yığılma özelliklerini inceleyerek, bir  $\tau$  zaman aralığında bir depremin bulunma olasılığı  $P(\tau)$  nun  $\tau$  ile arttığını göstermiştir (Şekil 4).



Şekil 4: Depremlerin fraktal yığılma analizine (Efafe adası ve New Hebrides yakınlarında 1978-1984 yıllarında oluşmuş 49 depremin) bir örneği göstermektedir.

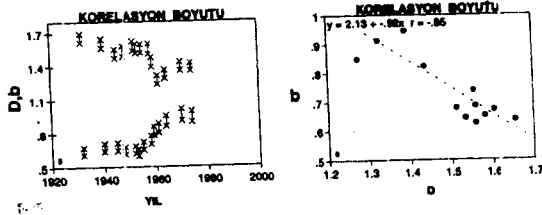
Figure 4: Fractal cluster analysis of 49 earthquakes that occurred near Efafe Island, New Hebrides in the period 1978-1984 (Smalley et al., 1987).

$$P(\tau) = \tau^{-D_0} \quad (4)$$

Burada  $D_0$  ( $0 < D_0 < 1$ ) zaman serisinin kapasite boyutudur. Smalley ve arkadaşlarının çalışması rastgele veya Poission davranıştan beklenenden farklı olarak, deprem yığılmasının zaman içindeki dağılımının fraktal olduğunu göstermiştir. Değinilen çalışmada, bir kaç dakikadan yaklaşık bir kaç aya kadar olan zaman aralığında deprem yığılmalarından bulunan fraktal boyut değerlerinin incelenen bölgelerde 0.126 ila 0.255 arasında değiştiği gözlenmiştir. Şekil 4'de  $P(\tau)$ 'nin  $\tau$  ile değişimi gösterilmiştir. Düz çizgi (3) bağıntısıyla verilen fraktal korelasyonu ( $D=0.255$ ) gösterir. Kesik çizgi ise düzgün olarak dağılmış depremleri göstermektedir. Şekil 4 (b) incelenen zaman aralığında (1978-1984) 49 depremin rastgele simülasyonunu göstermektedir. Rastgele simülasyonun gerçek deprem dağılımından önemli ölçüde farklı olması, deprem dağılımının düzgün dağılıma yakın olduğunu göstermekte olup depremlerin oluşumunu birbirinden tamamen ilişkisiz olmadığı anlaşılmaktadır.

Japonya depremlerinin episantr dağılımlarının fraktal boyutu Hirata (1989c) tarafından belirlenmiştir. Bu çalışmada yaklaşık 40 yıllık bir periyodu kapsayan deprem verilerinden farklı zaman aralıklarını temsil eden veri grupları için hesaplanan fraktal boyutun 1.5 ila 1.8 arasında değiştiği ve aynı verilerden hesaplanan

$b$  değerleri ile fraktal boyut değerleri arasında negatif bir ilişki olduğu (korelasyon katsayısı  $r = -0.76$ ) bulunmuştur. Buna benzer bir çalışma da Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun  $31^{\circ}\text{D}$ - $41^{\circ}\text{D}$  arasındaki bölümünde 1900-1992 yılları arasında oluşan depremlerin episantr dağılımlarından fraktal boyut değerleri hesaplanmıştır (Öncel ve diğ., 1994). Bu bölgede deprem episantrlarından hesaplanan fraktal boyut değerinin 0.6 ila 1.6 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte deprem büyüklük dağılımlarından hesaplanan sismik  $b$  değeri ile deprem episantr dağılımlarından hesaplanan fraktal "korelasyon" boyutu arasında bir negatif korelasyon ( $\alpha = -0.85$ ) olduğu bulunmuştur (Şekil 5). Negatif korelasyonun nedeni, büyük depremlerin oluş zamanlarında (küçük  $b$  değeri) anaşok episantrı civarında büyük bir yığılmanın (büyük fraktal boyut) oluşudur. Ölçülen fraktal boyutlar deprenselliğin farklı özelliklerinin ölçüsüdür. Örneğin, bir fay izinin fraktal boyutu, fay sisteminin bütün tarihi boyunca oluşmuş bir sürecin sonuçlarını temsil etmektedir. Halbuki  $b$ -değeri göreceli olarak oluşan depremlerin büyüklük dağılımını temsil etmektedir. Deprem episantrlarının fraktal boyutları ise, deprenselliğin belirli bir dönemini temsil eden bir fay sistemindeki parçaların dağılımıyla ilişkilidir. Deprem oluş sayısının magnitüde göre dağılımının log-lineer olduğu ve Gutenberg-Richter yasasına uyduğu uzun yıllardır bilinmektedir.

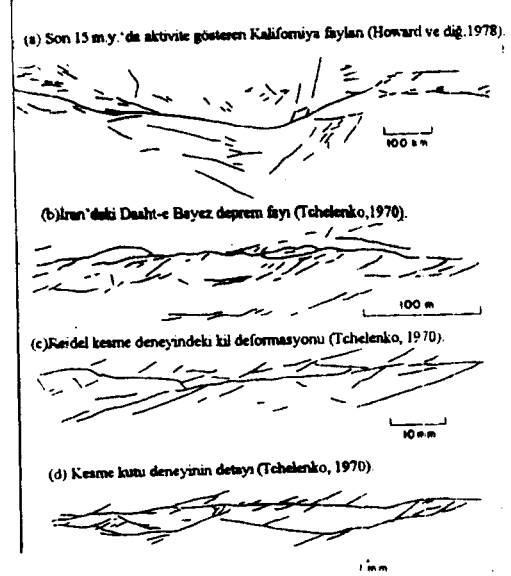


Şekil 5: Sismik  $b$  değeri ve fraktal boyut  $D$  arasındaki ilişki gösterilmektedir. (Öncel ve diğ., 1994).

Figure 5: The relation between seismic  $b$  value and fractal dimension  $D$  is shown (Öncel et al., 1994).

$$\log N(M \geq m) = a - bM \quad (5)$$

Burada  $N$ , verilen bir zaman aralığında  $m$  magnitüdüne eşit veya büyük depremlerin sayısı,  $a$  ve  $b$  ise sabitlerdir. Bu ilişkinin laboratuvardaki kırılma deneylerinden (Scholz, 1968) levha sınırlarındaki faylanmalara (Şekil 6) (Main ve Burton, 1984, 1986) kadar olan bütün ölçeklerde geçerli olduğu bulunmuştur. Magnitüd, sismik momentin veya açığa çıkan enerjinin logaritmik bir ölçüsüdür. Bu nedenle, (5) bağıntısı  $l$  uzunluklu deprem kaynağının güç yasasına uygun bir dağılımının sonucudur.



Şekil 6: Farklı ölçülerde fay sisteminin benzerliği.

Figure 6: Similarity of fault systems in different scales.

$$N(L \geq l) = l^{-D} \quad (6)$$

Aki (1981),  $N(L \geq l) = l^{-D}$  olması halinde depremlerde standart frekans-magnitüd bağıntısının (6) bağıntısına eşdeğer olduğunu göstermiştir. Bu halde  $D = 2b$  olup genel halde  $D \approx 2$  dir. Buradaki fraktal boyutun, özel haller dışında, kapasite boyutundan ve korelasyon boyutundan farklı olduğuna dikkat edilmelidir.

### FAYLANMA İLE DEPREMSELLİK ARASINDAKİ İLİŞKİ

Hemen hemen bütün depremler faylar üzerindeki kaymadan ileri gelmektedir ve bu nedenle fay sistemlerinin ölçekle değişmezlik veya kendine benzerlik özelliği göstermeleri şartıdır değildir (Şekil 6). Şekil 6'daki gibi bir tek fay boyunca  $D=1$  dir (Main ve diğ., 1990).  $D$  nin alt değeri, sismojenik tabakanın gevrek kırılma kısmının kalınlığının tamamını kırmak için yeterince büyük her bir fayın deprenselliğini yansıtır. Bu nedenle, ölçekle değişmezlik özelliğinin, kabuğun gevrek kırılma kısmını kırabilen depremden daha büyük depremler için geçersiz olduğu anlaşılmaktadır (Pacheco ve diğ., 1992). Normal ve bindirme fayları için önerildiği gibi fay zonu genişliği yaklaşık olarak fay zonu boyuyla ölçekli ise (Purcaru ve Berckhemer, 1982) ve verilen bir sismojenik zon için sabit ise ancak belirli bir büyüklük ölçeğindeki karakteristik depremlerin oluşması beklenir (Schwartz ve Coppersmith, 1984; Main, 1993). Farklı sismojenik genişliklere sahip daha büyük bir alan için  $b$  değerinde bir değişme beklenir. Küresel ölçekte  $b$  değerinde bir artma gözlenir (Pacheco ve diğ., 1992) fakat bir tek fay boyu ölçeğinde  $b$  değeri genellikle bu uzunluk ölçeğinin üstünde azalır (Main, 1992). Özet olarak,

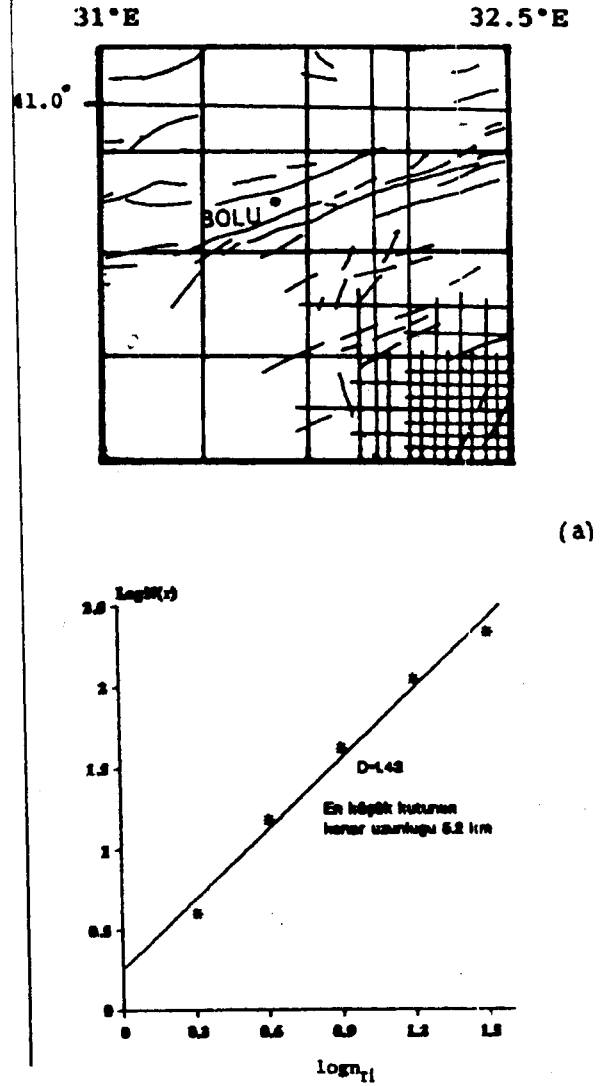
deprenselliğin zaman ve uzay ortamlarında dağılımları ve büyüklük dağılımları rastgele değildir ve bütün ölçeklerde yapısal özelliklere bağlı olarak düzenli bir dağılım gösterirler.

### FAY SİSTEMLERİNİN FRAKTAL ÖZELLİĞİ

Fay sistemlerinin fraktal özellikleriyle ilgili ilk çalışmalar 1987 yılında San Andreas Fayı üzerindeki incelemelerle başlamıştır. San Andreas fayının fraktal boyutu Okubo ve Aki (1987), Aviles ve diğ. (1987) tarafından ölçülmüştür. Aviles ve diğ. (1987), ana fay üzerinde fay izinin 1 ila 100 km uzunluk ölçeğindeki fraktal boyutunun 1.001 civarında ve daha küçük ölçeklerde daha büyük (1.01) olduğunu bulmuşlardır. Okubo ve Aki (1987), ana faya bağlı olarak gelişen tali fayları da dikkate almışlar ve fraktal boyutu 1.3 civarında bulmuşlardır. Hirata ve diğ. (1989b), Japonya'da yüzeydeki fay izlerinin fraktal boyutunu ölçmüş ve fayların uzay dağılımının 2km ile 20km ölçekler arasında fraktal dağılıma uyduğunu bulmuştur. Fraktal boyut değerlerinin, Japon yayının merkezinde 1.5 civarında olduğunu ve merkezden uzaklaştıkça 1.05'e kadar değiştiğini bulmuştur. Alptekin ve diğ. (1993), Kuzey Anadolu Fay zonu'nun 31°D-41°D arasındaki kesiminde kutu sayma yöntemiyle bulunan fraktal boyutun 1.17 ila 1.43 arasında değiştiğini ve 5 km ile 40 km ölçeklerde fay sisteminin fraktal dağılıma uyduğunu belirlemişlerdir (Şekil 7). Çizelde 1'de küresel ölçekdeki fay sistemlerinden bulunan fraktal boyut dağılımı verilmiştir.

Çizelge 1: Çeşitli ölçeklerdeki kırık sistemleri için belirlenen fraktal boyutlar.

Kırık sistemi	Fraktal Boyut
Kuzey Anadolu fay sistemi (Alptekin ve diğ., 1993)	$1.16 \leq D \leq 1.43$
Japonya fay sistemleri (Hirata, 1989b)	$1.05 \leq D \leq 1.60$
San Andreas Fayı (Scholz ve Aviles, 1986)	$1.10 \leq D \leq 1.5$
Kuzey Izu fay grubu (Hirata, 1989)	$D = 1.49$
Yucca Mountain kırık sistemi (10 <sup>1</sup> ) mertebesinde (Watanabe, 1985)	$1.12 \leq D \leq 1.16$
Doğal kayalık yüzeyinin topografyası (Brown ve Scholz, 1985)	$1.00 \leq D \leq 1.68$



Şekil 7: Kutu sayma yöntemiyle fraktal boyutun bulunmasına KAFZ'nun incelenen bölgelerinden bir örnek (Alptekin ve diğ., 1983).

Figure 7: An example of finding fractal dimension by box-counting method from a studied area on the NAFZ (North Anatolian Fault Zone) (Alptekin et.al., 1993).

Küresel ölçeklerdeki kırık sistemleriyle ilgili çalışmalar, kırık geometrisini belirleyen fraktal boyutun 1.6 civarında bir üst sınırı olduğunu göstermiştir. Yani, kayaların kırılma geometrisinin fraktal boyutu 1.6 civarındadır. Fraktal boyutun daha küçük olması gözlemlerde tali fayların eksik olmasından ileri gelmektedir. Gerçek fay sistemleri için fraktal boyutun bir üst değerinin bulunması (Hirata, 1989) faylanmanın modellenmesinde bazı sınırlamalar getirebilir. Kabuktaki veya kayalar içindeki bariyerler veya asperiteler kayaların kırılma geometrisini belirleyen fraktal boyutu kontrol eden faktörler olabilirler.

## SONUÇLAR

Fayların arazideki dağılımlarının fraktal yaklaşımla incelenmesiyle, faylanmadaki düzensizliğin özellikleri sayısal olarak ifade edilebilecek ve kayaçların mekanik davranış özellikleri daha iyi anlaşılacaktır. Depremlerin zaman ve uzay ortamlarındaki dağılımları ile oluş sayılarına göre büyüklüklerinin dağılımından bulunacak fraktal boyutlar, yer kabuğunda deprem oluşumunu kontrol eden asperite veya bariyerlerin tanınmasında ve dolayısıyla büyük depremlerin önceden belirlenmesinde bir belirteç olabilirler. Fraktal kavramının bu amaçlarla etkin bir şekilde kullanılabilmesi için çok sayıda ve duyarlı aletlerle donatılmış sismograf şebekelerinden sağlanan deprem verilerine ve ayrıntılı fay haritalarına ihtiyaç vardır.

## KAYNAKÇA

- Aki, K., 1981,** *A probabilistic synthesis of precursory phenomena. in Earthquake Prediction* Simpson, D.W., and Richards, P.G. eds.), American Geophysical Union, Washington, D.C., 556-574.
- Alptekin, Ö. Öncel, A.O. ve Nalbant, S. 1993.** Kuzey Anadolu fayının fraktal özelliklerinin incelenmesi-Bir ön çalışma, TUJJB Genel Kurulu Bildiriler Kitabı, 609-627.
- Barton, C. C. and Larsen, E. 1985,** *Fractal geometry of two-Dimensional fracture networks at Yucca Mountain, South-west Nevada, in Fundamentals of Rock Joints, Proc. Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints (ed. Stephansson, O.), 77-84.*
- Brown, S.R. and Scholz, C.H., 1985.** *Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, J. Geophys. Res. 90, 12575-12582.*
- Gutenberg, B. and Richter C.F.1954,** *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, 2nd ed., 310p., Princeton University Press, Princeton.*
- Hirata, T. 1987a,** *Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock, Geophys.Journal. Roy. Astr. Soc. 90, 369-374.*
- Hirata, T. 1989b,** *Fractal dimension of fault systems in Japan. Fractal structure in rock fracture geometry at various scales, Pageoph 131, 157-170.*
- Hirata, T. 1989c,** *A correlation between the b-value and the fractal dimension of earthquakes, Geophys. Journal.Roy.Astr.Soc.107, 353-362.*
- Howard,K.A., Aaron, J.M., Brabb, E.E. and Brock, M.R1978,** *Preliminary map of young faults in the U.S. as possible guide to fault activity, USGS field studies map MF-916.*
- Kagan, Y. Y. and Knopoff, L. 1980,** *Spatial distribution of earthquakes: the two point correlation function, Geophys. Journal.Roy.Astr.Soc. 62, 303-320.*
- Mandelbrot, B.B. 1982,** *The Fractal Geometry of Nature, W.H. Freeman and Company, New York, 468p.*
- Main, I.G. and Burton, P.W. 1984,** *Information theory and the earthquake recurrence constrained by tectonic seismic moment release rates, Bull. Seism. Soc. Am. 74,1409-1426.*
- Main, I.G. and Burton, P.W. 1986,** *Long-term earthquake recurrence constrained by tectonic seismic moment release rates, Bull.Seism. Soc. Am. 76, 297-304.*
- Main, I. G. Peacock S. and Meredith P.G. 1990.** *Scattering Attenuation and the Fractal geometry of Fracture Systems. Pageoph 133, 283-304.*
- Main, I.G.,1992,** *Earthquake scaling, Nature, 357, 27-28.*
- Main, I.G., 1993,** *The new physics and earthquake prediction, Proceeding of the Symposium on Natural Disasters, 239-251.*
- Pacheco J. F. Scholz C. H. and Sykes L.R 1992.** *Changes in the frequency-size relationship from small to large earthquakes, Nature, 355, 71-73.*
- Purcaru G, and Berckhemer H. 1982,** *Quantitative relations of seismic source parameters and the classification of earthquakes, Tectonophysics 84, 57-128.*
- Okubo, P. G, and Aki, K. 1987,** *Fractal geometry in the San Andreas fault system, J. Geophys. Res. 92, 58-59.*
- Öncel, A.O., Main, I.G. Alptekin, Ö and Cowie, P.A. 1994,** *Temporal variations in the fractal properties of seismicity in the north Anatolian fault zone., 1st Turkish International Symposium on Deformations, İstanbul, Abstracts p.70.*
- Sadovskiy M.A. Golubeva, T.V. Pisarenko, V.F and Shnirman, G. 1984,** *Characteristic dimensions of rock and hierarchy properties of seismicity, Izv. Ac. Sci. USSR, Phys. Solid Earth, Engl. Transl. 20, 87-96.*
- Scholz C.H. 1968,** *The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes, Bull.Seism.Soc.Am. 74, 1409-1426.*
- Scholz C.H., and Aviles, C.A., 1986.** *The fractal geometry of faults and faulting, in Earthquake Source Mechanics (Das.S., Boatwright, J., and Scholz, C.H. eds.), Geophys.Monogr.37, Maurice Ewing. 6. AGU. Washington D.C.*
- Schwartz D. P. and Coppersmith K J.1984,** *Fault behaviour and characteristics earthquakes, J. Geophys. Res. 89. 5681-5698.*
- Smalley R.F. Chatelain J.L. Turcotte D.L. and Prevot R. 1987,** *A fractal approach to the clustering of earthquakes: Applications to seismicity of the New I-Iberides, Bull. Soc. Am. 77, 1368-1381.*
- Turcotte, D.I. 1992,** *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge..*
- Tchalenko, J.S. 1970,** *Similarities between shear zones of different magnitudes, Bull. Geology. Soc. Am. 81, 1625-1640.*
- Watanabe, K, 1986.** *Stochastic evaluation of two dimensional continuity of fractures in a rock mass., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 23, 431-437.*