

Suda dağılmaya karşı duraylılık deney sonuçları ile agregaların fraktal boyutu arasındaki ilişkiler

Relationships between results of slake durability test and fractal dimension of aggregates

KIVANÇ ZORLU^{1*}, SAFFET YAĞIZ²

¹Mersin Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çiftlikköy, Mersin, Türkiye

²Pamukkale Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kınıklı, Denizli, Türkiye

Geliş (received) : 31 Temmuz (July) 2017

Kabul (accepted) : 25 Temmuz (July) 2018

ÖZ

Ekonomik değere sahip karbonatlı kayaların bozunmaya karşı duraylılıkları, kullanılabilir olmaları bakımından oldukça önemlidir. Bu tür kayaların, bozunmaya karşı dirençleri laboratuvar koşullarında suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (SDI) ile belirlenebilmektedir. SDI deneyleri iki çevrim olarak yürütülmekle birlikte, literatürde çoklu çevrim deneylerine de rastlanmaktadır. Bu çalışmada, SDI çevrim sayısının, kaya tane şekli üzerindeki etkisinin fraktal geometri yaklaşımı kullanılarak araştırılması amaçlanmaktadır. Çalışmada, kökenleri, yapısal ve dokusal özellikleri birbirinden farklı yedi çeşit kaya örneği kullanılmıştır. SDI deneyleri toplam 10 çevrim olarak yürütülmüş ve her çevrim sonrasında tanelerin geometrik değişimleri fraktal boyut değerleri (D) ile ortaya konmuştur. Sonuç olarak, her çevrim sonunda SDI değeri azalırken, tanelerin ortalama, D, değeri de azalmaktadır. Fraktal boyutlardaki en belirgin değişim 4. çevrim sonuna kadar elde edilmiş olup, diğer çevrim sonlarındaki değişim ihmal edilebilir düzeydedir.

Keywords: Fraktal boyut, kireçtaşı, suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (SDI), traverten.

ABSTRACT

Durability of carbonate rocks in terms of weathering is very important for their usability. Resistance of these types of rocks against weathering could be measured in laboratory conditions by slake durability index (SDI) tests. Although SDI tests are commonly carried out by application of two cycles, studies concerning application more than two cycles are encountered in literature. In this study it is aimed to evaluate the number of SDI cycles on grain shape using fractal geometry approach. During the study, seven different rock types which have various origins, textures and structural features were used. SDI tests were carried out within ten cycles for each rock and geometrical differences in grain shape after application of certain number of cycles were determined by fractal dimension (D) approach. As a result, while SDI was decreased after each cycle, average fractal dimension is also decreased. While, decreases in fractal dimensions were more drastic up to end of fourth cycle, insignificant changes were observed beyond the cycle.

Anahtar Kelimeler: Fractal dimension, Limestone, slake durability indices, travertine.

* K. Zorlu
e-posta: kivancgeo@mersin.edu.tr

GİRİŞ

Bozunma, kimyasal bozunma ve fiziksel parçalanma ile kaya ve toprak malzemelerinin atmosferik şartlara açık yüzeylerdeki bozulma ve parçalanması sürecidir (Anon, 1995). Bozunma, yerden yere ve zamana göre değişen hava koşulları (iklim, bitki büyümesi vb.) ile tetiklenen dış çevresel etkenlere ve kaya malzemesi ile kaya kütlesi özelliklerine bağlıdır. Kaya malzemesi için, bozunmaya karşı hassasiyeti (veya direnci) belirleyen özellikler, mineraloji, (çözünürlük ve kimyasal bozunmaya karşı direnç), tane boyu, gözeneklilik ve geçirgenliktir (Martin 1986, Price, 1995). Kimyasal bozunma genellikle çözümlenir ve bu çözeltinin derecesi, çözelti yüzeyinden geçen suyun miktarına, çözülmüş malzemeye ve suyun pH'ına bağlıdır. Elementlerin çözünürlüğü değişkenlik göstermekte olup, en sık rastlanan mineral oluşturan elementler için çözünürlük sırası yüksekten düşüğe göre; Ca, Na, Mg, K, Si, Al ve Fe (Price, 1995)'dir. Bununla birlikte, mevcut bozunma sınıflandırmaları, çözünme tipini yeterince açıklamamaktadır. (Anon, 1995)'e göre, farklı durumlar ve ölçekler için çeşitli yaklaşımlar gerekmektedir. Kayaçların bozunabilirliğe karşı duyarlılığı, suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (SDI) gibi duraylılık parametreleri ile belirlenmektedir. SDI, özellikle çimentolu veya zayıf kayalarda kullanılmakla birlikte, her tür kaya için uygulama örnekleri mevcuttur (Kahraman vd., 2016, Predrag and Goran, 2011, Kolay ve Kayabalı 2006, Kayabalı vd., 2006, Czerewko and Cripps 2001, Singh vd., 2004, Erguler and Ulusay 2009, Santi, 1998). ISRM (1979) ve ASTM (2004) suda dağılmaya karşı duraylılık deneylerinin iki çevrim olarak yürütülmesini önermiş olmakla birlikte, bazı araştırmacılar iki çevrimlik deneyin çimentolu ve killi kayaların duraylılığını belirlemede yeterli olmayacağını savunmuşlardır (Koncagül ve Santi, 1999, Gökçeoğlu vd., 2000). Deneye tabi tutulan kayaların ikinci döngü sonunda parçalanmış olmalarına rağmen, yüksek SDI değeri gösterdiklerini söyleyen araştırmacılar, döngü sayısının artırılmasının daha doğru sonuçlara ulaşılmasında önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çimentolu ve killi kayaların dayanımlarının düşmesinde önemli bir rol oynayan ıslanma-kuruma döngüsü, özellikle bu tür kayaların mineralojilerine bağlı yapısal özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. SDI; porozite, permeabilite, deney çözeltisinin özellikleri, kayanın direnci, deney tamburu içerisine konan tanenin şekli ve kalitesi, örneğin depolanma koşulları gibi pek çok parametre tarafından kontrol edilmektedir (Franklin

ve Chandara, 1972). Literatürde, suda dağılmaya karşı duraylılık deneyi ile; kayanın dayanım özellikleri, mineralojik bileşimi, deneyde kullanılan çözelti ve kayanın porozitesi arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı amaçlayan çalışmaların yanı sıra, kaya tane şeklinin deney öncesi ve sonrasındaki değişimini inceleyen araştırmalara rastlamak mümkündür (Vallejo, 1994, Gökçeoğlu vd., 2000, Yılmaz ve Karacan 2005, Kolay ve Kayabalı 2006, Kayabalı vd., 2006, Miscevic ve Vlastelica, 2011, Yağız 2011, Kahraman vd., 2016).

Genel jeoloji ve mühendislik jeolojisi literatüründe fraktal geometriyi çeşitli amaçlar için bir araç olarak kullanan bazı çalışmalar bulmak mümkündür. Vallejo (1994), fraktal boyut ile tane şekli arasındaki nicel ilişkiyi ortaya koymak amacıyla suda dağılmaya karşı duraylılık deneyi çevrimlerinden sonraki tane şekillerine dikkat çeken ilk araştırmacılarından biridir. Kruhl ve Nega (1996), kuvars tanelerinin fraktal şeklini araştırmış ve dokanak oluşumu sırasında fraktal boyutun artan sıcaklıkla düştüğünü bulmuşlardır. Bernal ve Lopez (2000) gözenek yüzeyinin fraktal boyutunu bozunma tanımlayıcısı olarak araştırmışlardır. Araştırmacıların bulgularına göre, aşınma süreçleri yüzey fraktal boyutunda bir artışa neden olmaktadır. Gulbin ve Evangulova (2003), granitlerdeki kuvars agregalarının morfometrisi üzerine çalışmışlar ve kuvars agregalarının fraktal boyutlarının granit türüne bağlı olarak farklı olduğunu göstermişlerdir. Kolay ve Kayabalı (2006), agrega şeklinin ve yüzey pürüzlülüğünün fraktal boyuta göre suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi üzerindeki etkilerini ve yüzey pürüzlülüğü ile suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi arasındaki ampirik ilişkileri araştırmıştır. Zorlu (2008), antik şehir yapı taşlarındaki bozunmayı görsel bir bozunma sınıflamasıyla tanımlamış ve duvarların fraktal boyutlarını bozunma ile ilişkilendirmiştir. Navarre-Sitchler ve Brandley (2007), bazalttaki bozunmanın fraktal boyut yaklaşımı ile belirlenebileceğini ve bozunmanın ilerleme hızının yüzey fraktal boyutu ile ilişkili olabileceğini vurgulamışlardır.

Bu çalışmada, kökenleri, yapısal ve dokusal özellikleri birbirinden farklı yedi çeşit karbonatlı kaya örneğine ait tanelerinin suda dağılmaya karşı duraylılık deneyinde, bozunma sonucu değişen tane şekillerinin geometrik bir yaklaşım olan fraktal analizi amaçlanmaktadır.

MATERYAL YÖNTEM

Bu çalışmada, laboratuvar deneyleri ve analizler, Denizli ve Antalya ili çevresinde işletilen traverten ve

kireçtaşı ocaklarından elde edilen kayaç örnekleri üzerinde yürütülmüştür (Şekil 1). Denizli ili çevresinde işletilen traverten, içerisinde bulundurdukları kil miktarı, dokusal farklılıklar, bitki köklerinin oluşturduğu boşluklar ve laminalı doku özellikleri bakımından farklılıklar göstermektedir (Çizelge 1). Sahadan alınan traverten örnekleri fiziksel ve dokusal özelliklerine göre; çalı tipi, kamış tipi, oniks tipi ve noçe tipi travertenler olarak sınıflandırılabilir. Çalı tipi açık krem-açık kahve renkli, birkaç mm ile cm kalınlığında düzensiz laminalı yapıya sahiptir. Kamış tipi olarak adlandırılan traverten, bataklık ortamında depolanmış ve depolanma sırasında bitki köklerine tutunarak çökmesi nedeniyle boşluklu, gözenekli bir doku sergilemektedir. Noçe tipi olarak bilinen kahve renkli travertenin yoğunluğu, dayanımı ve sertliği kamış türü travertenlerden daha yüksektir. Oniks tipi olarak adlandırılan yoğun, açık renkli, çökme yüzeyine dik olarak gelişen kalsit kristalleri içeren traverten tipleri, kamış ve noçe tipi travertenlere oranla daha yüksek dayanımlıdır. Bu çalışma kapsamında, traverten tiplerine ek olarak, Denizli ili Bozkurt ilçesinde işletilmesi düşünülen siyah renkli dolomitik kireçtaşları, Antalya ili çevresinde işletilen yumuşak beyaz kireçtaşı ve bej renkli kireçtaşları da kullanılmıştır (Şekil 2). Antalya ili çevresinde üretilen dolomitik kireçtaşları, orta dayanımlı kayaçlar sınıfında yer almakta olup, dokusal olarak kompakt olmakla birlikte homojenlik

göstermemektedirler. Antalya Korkuteli ilçesinde işletilmekte olan bej kireçtaşları, orta dayanımlı, homojen ve mikro çatlaklı bir yapıya sahiptirler. Antalya ili, Elmalı ilçesinde işletilen beyaz kireçtaşları ise, kil içeriği yüksek, dayanımı düşük fakat su emme oranı göreceli olarak yüksek bir kaya olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada kullanılan yedi farklı tip kayanın fiziksel ve jeomekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yürütülen laboratuvar deneylerinin sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

Petrografik incelemelerde kullanılan kaya tiplerinin her birinin farklı dokular sergilediği gözlenmiştir. Örneğin, kamış tipi travertenlerin gözeneklilik derecesinin diğer örneklerle göre daha yüksek olduğu, mikrit spartit çimentolu içerdiği ve kalsit kristallerinin varlığı belirlenmiştir. Ancak çalışmaya konu olan kayalarda gözlenen kalsit kristallerinin boyutları oldukça değişken bir aralık sergilemekte, ince taneli kristallerden (beyaz kireçtaşı), kaba tanelilere (dolomitik kireçtaşı) kadar farklı tane boyutlarına rastlanmaktadır (Şekil 3).

Suda Dağılmaya Karşı Duraylılık (SDI) Deneyleri

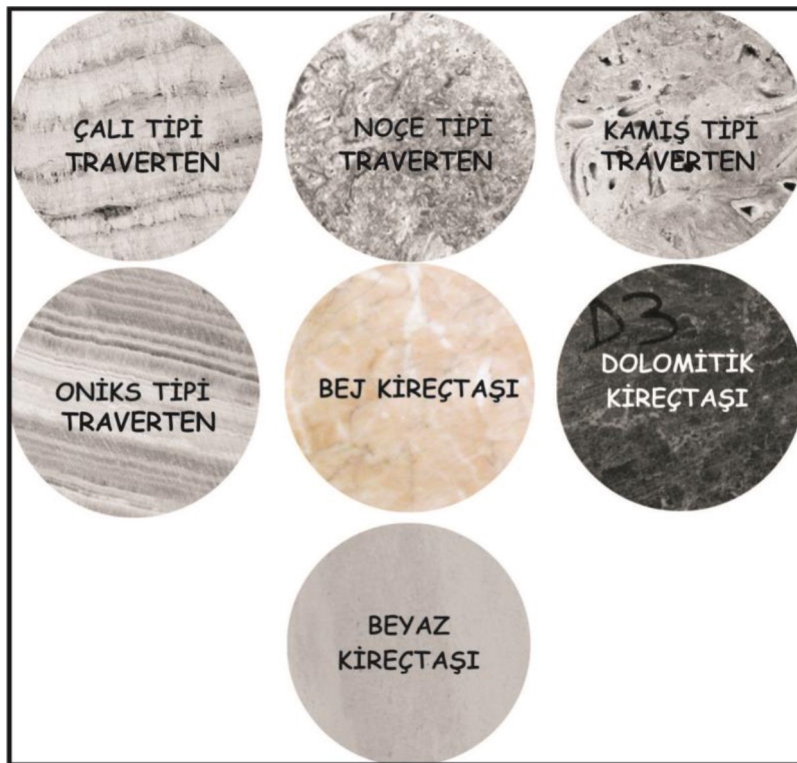
Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (SDI) deneyi, ilk olarak Franklin ve Chandra (1972) tarafından ortaya konmuştur. Daha sonra, ISRM (1981) tarafından kabul görmüş ve standart hale getirilmiştir. Suda dağılmaya karşı duraylılık, kaya malzemesi ve kaya



Şekil 1. Örnekleme lokasyonlarının haritası.
Figure 1. Location map of sampling sites.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan kayaç tiplerinin örnekleme sahaları ve mikroskopik/makroskopik özellikleri.
Table 1. Sampling locations and microscopic / macroscopic properties of rock types used in the study.

Örnek sahası	Kaya tipi	Mikroskopik/makroskopik özellikler
Denizli-Kocabaş1	Çalı tipi traverten	3-16 mm kalınlığında laminalar, açık krem renkli, düşük gözenekli, az boşluklu, sparit-mikrit çimentolu, ince/orta taneli
Denizli-Kocabaş2	Noçe tipi traverten	Sparit-mikrit çimentolu, siyah-kahve renkli, göreceli olarak kompakt, laminalanma yok, orta ve kaba taneli, düşük gözenekli
Denizli Kaklık	Kamış tipi traverten	Sparit-mikrit çimentolu, siyah-kahve renkli, organik malzeme içerikli, göreceli olarak yüksek gözenekli
Denizli-Honaz	Oniks tipi traverten	1-3 mm laminaya sahip, açık renklerden kahve rengine kadar farklı renklerde olabilen, sparit-mikrit çimentolu, kalsit kristalli ve organik malzeme
Antalya-Korkuteli	Bej kireçtaşı	Sparit-kalsit çimentolu, mikro çatlaklar ve kapanmış çatlaklar içeren ikincil kalsit dolgululu orta dayanımlı
Denizli-Bozkurt	Dolomitik kireçtaşı	Koyu siyah-mavimsi renkli, sahada yer yer breşik görünümlü, sparit-mikrit çimentolu, orta dereceden kaba dereceye doğru farklı tane boyutları
Antalya-Elmalı	Beyaz kireçtaşı	Sparit çimentolu, ince taneli, beyaz renkli, homojen, mikro çatlak içermeyen, çakı ile kolayca çizilebilen yumuşak dokulu



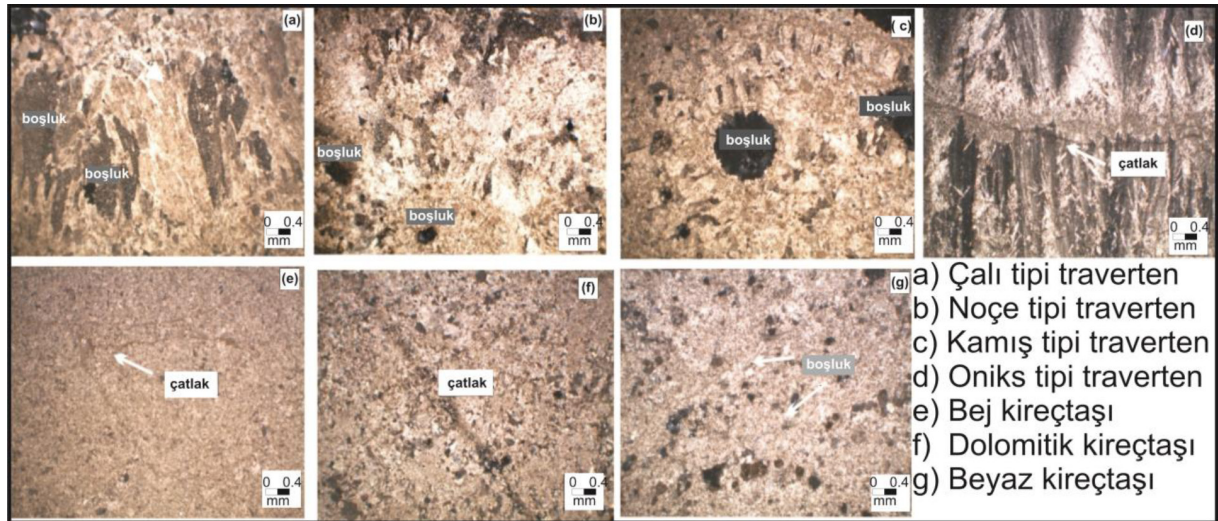
Şekil 2. SDI deneylerinde kullanılan kayaçların makroskopik görüntüsü
Figure 2. Macroscopic view of samples using SDI tests.

kütleleri için önemli bir özelliktir. Kaya kütlelerinin bozunmaya karşı duyarlılığı ve bozunma dereceleri, suda dağılmaya karşı duraylılık deneyleri ile belirlenmektedir. Genellikle şeyl, kiltası, kumtaşı, marn,

kireçtaşı ve traverten gibi karbonat ve kil içeriği yüksek kayaların suda dağılmaya karşı göstermiş oldukları duraylılık değerinin tayin edilmesi için SDI deneyi kullanılmaktadır. Kayalar için önemli bir mühendislik

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan kayaç tiplerinin laboratuvar deney sonuçları
Table 2. Laboratory test results for studied rocks types.

Kaya Tipi	g_{dry} (kN/m ³)	g_{sat} (kN/m ³)	UCS (MPa)	V _p (km/s)	E (GPa)	n' (%)	W (%)
Çalı tipi traverten	24,27±0,22	24,40±0,25	61±20	4,8±0,12	43±7	1,35±0,46	0,55±0,19
Oniks tipi traverten	26,63±0,46	26,84±0,38	61±20	4,7±0,19	44±5	2,05±0,88	0,76±0,34
Kamış tipi traverten	23,18±0,56	23,36±0,54	41±17	4,5±0,11	35±6	1,89±0,50	0,80±0,22
Noçe tipi traverten	23,73±0,48	23,88±0,42	64±11	5±0,08	44±3	1,59±0,89	0,66±0,38
Dolomitik kireçtaşı	27,26±0,34	27,32±0,32	92±33	4,9±0,29	52±12	0,60±0,27	0,22±0,10
Beyaz kireçtaşı	22,67±0,98	23,62±0,78	32±4	3,8±0,41	22±5	9,70±2,20	4,24±1,14
Bej kireçtaşı	26,31±0,08	26,32±0,08	82±28	5,0±0,17	46±4	0,16±0,10	0,06±0,04



Şekil 3. Çalışmada kullanılan kayaların polarize mikroskop altında çift nikol görüntüleri (x10).
Figure 3. Studied rocks, cross polarized under microscope (x10).

özelliği olan suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (I_{d2}), bozunma çalışmalarının yanı sıra, modifiye kaya kütle sınıflama sistemi (M-RMR) ve tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesine yönelik yaklaşımlar gibi çalışmalarda da yaygın olarak kullanılan parametrelerden biridir. Bir kayanın suda dağılılabileme özelliği pek çok faktöre bağlıdır. Özellikle kaya tipi, mineralojik bileşimi, bozunma derecesi, yapısı ve dokusu suda dağılılabileme özelliği ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, standartlara göre hazırlanması gereken örneklerin, yeteri kadar dikkatle hazırlanmaması durumunda, sonuçlar gerçek değerinden fazla çıkmakta ve duraylılık sınıfları değişmektedir (Kolay ve Kaya-bali, 2006).

SDI deneyinin amacı, belirli boyutlarda hazırlanmış olan kaya örneklerin, standart iki çevrim süresince kurumaya ve ıslanmaya bırakılması durumunda, parçalanmaya ve zayıflamaya karşı gösterdiği duraylılık değerinin belirlenmesidir (Martin, 1986). Bazı araştırmacılar (Ulusay vd., 1995, Gökçeoğlu ve Aksoy, 2000), SDI deneyinde iki yerine dört veya daha fazla döngünün uygulanması ile daha anlamlı sonuçlara ulaşabileceğini vurgulamışlar. Ancak her çevrim sonrasında izlenecek standart yöntem düşünüldüğünde bunun oldukça uzun bir zaman alacağı da oldukça açıktır.

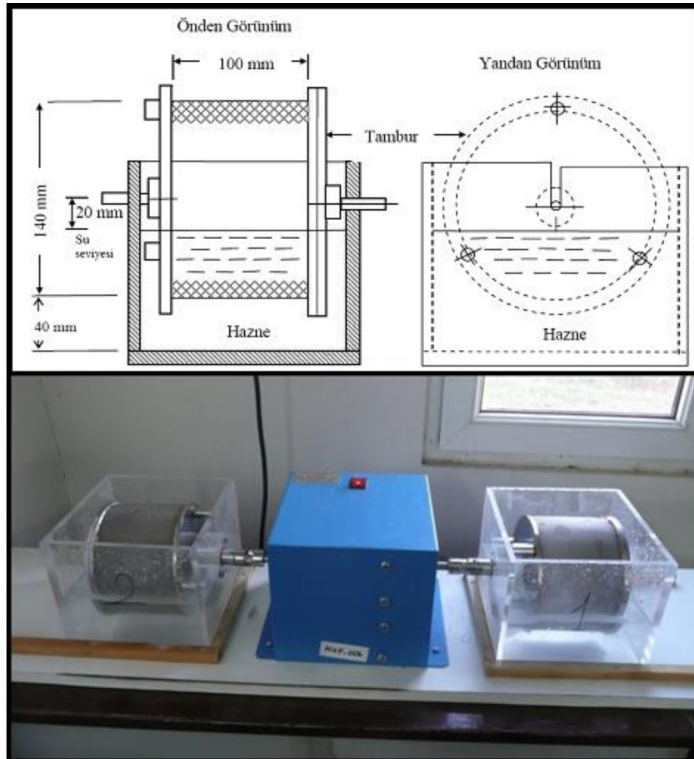
Bu çalışmada suda dağılmaya karşı duraylılık deneyleri 10 çevrim olarak yürütülmüş olup, her bir

litolojiden 10 set deney numunesi hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan örnekler yaklaşık aynı boyutlarda, 45-55 gr ağırlığında ve 10 parça olacak şekilde hazırlanmıştır. Deney cihazındaki tamburun elek açıklığı 2 mm standart açıklık olup, çevrim süresi 20 rpm hızla 10 dakika olarak ayarlanmıştır. Fırında 105 C°'ye kurutulmuş olan örnekler, tambur ile birlikte 20 C° su ile yarıya kadar doldurulmuş olan hazne içerisine konulmuştur (Şekil 4). Her bir çevrim sonrasında örnekler ve tambur fırında kurutulurken ağırlıkları ölçülmüştür. Herhangi bir çevrim sonrasında ait kuru ağırlığın, o çevrim öncesine ait olan kuru ağırlığa oranı, ilgili çevrim için suda dağılmaya karşı duraylılık indeksini (Id) vermektedir. SDI deneylerine ait sonuçlar Çizelge 3'de ve çevrim sayılarına göre SDI sonuçları ise Şekil 5'de sunulmuştur.

Fraktal Boyut Analizleri

Fraktal kelimesi literatüre ilk kez Mandelbrot (1967) ile girmiş ve oldukça geniş kullanım alanları bulmuştur. Doğada çoğu nesnenin düzenli bir geometrik şekli olmamasından yola çıkılarak ortaya atılmış olan bu kavramda, düzensizliklerin ve parçalılığın

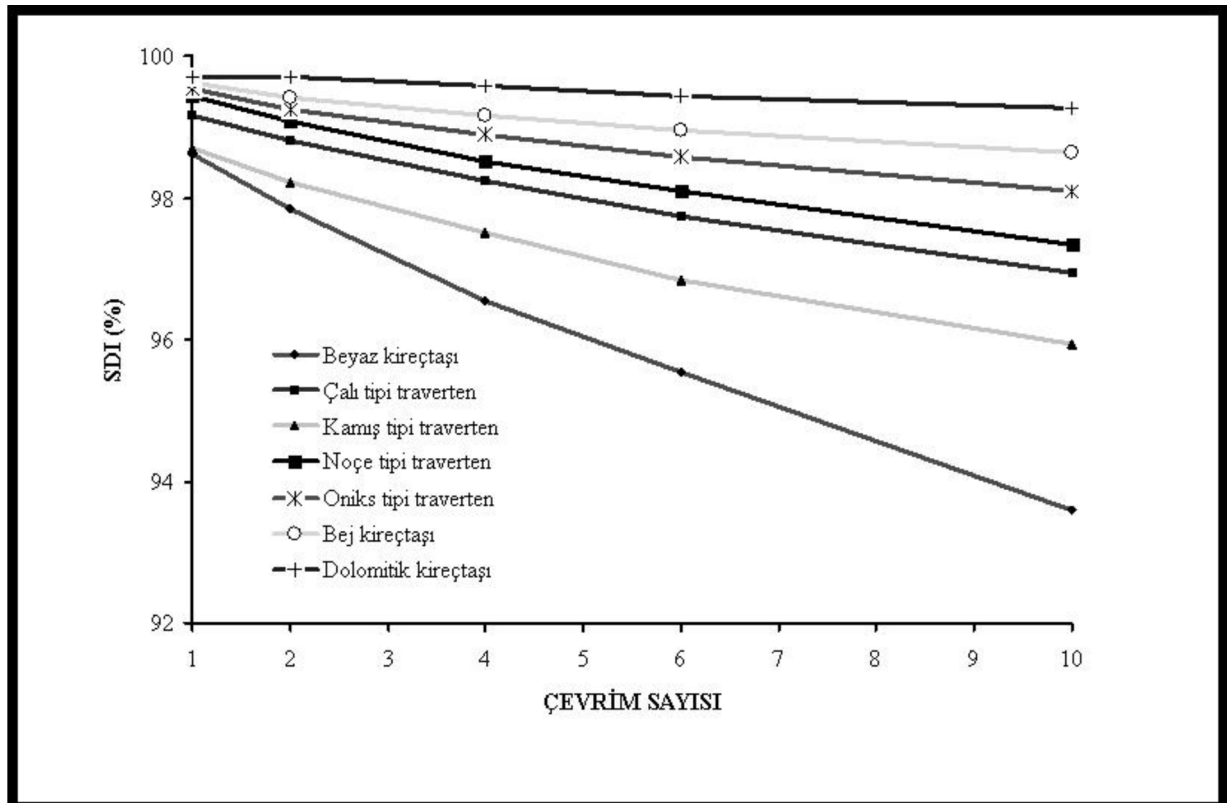
matematiksel olarak ölçeklendirme özellikleri analiz edilmektedir. Doğadaki geometrik şekiller genellikle Öklid geometrisi kullanılarak analiz edilmektedir. Buna göre, düz çizgiler mükemmel düz çizgiler ve eğriler mükemmel dairelerin yayları olarak tanımlanır. Ancak, doğada bu tür mükemmel geometrilere rastlamak oldukça zordur. Çünkü doğal nesnelerin şekilleri çoğu zaman düzensiz bir yapı sergilemektedir. Fraktal geometri, düzensiz şekilli nesnelerin geometrisini tanımlamak amacıyla geliştirilmiş matematiksel bir kavramdır (Vallejo, 1994). Mükemmel geometrik şekillerin (doğru parçası, daire, prizma vb.) tanımlanmasında formüller kullanılırken, fraktal şekillerin tanımlanmasında yineleme (iterasyon) kullanılmaktadır. Bu nedenle basit geometrik şekillere ait boyut değerlendirmesi ile fraktal şekillere ait değerlendirmeler birbirinden oldukça farklıdır. Örneğin, fraktal ölçekleme özelliği taşımayan basit bir doğru parçasının topolojik boyutu $D_T=1$ iken, fraktal ölçekleme özelliğine sahip çizgisel bir nesnenin fraktal boyutu $1 < D < 2$ arasında değişebilen, özel ondalık değerlere sahiptir. Benzer şekilde; bir düzlem için topolojik boyut $D_T=2$ iken, fraktal ölçekleme özelliğine sahip topografik bir yüzey için $2 < D < 3$ aralığında değişebilen



Şekil 4. Suda dağılmaya karşı duraylılık deney düzeneği
Figure 4. Testing apparatus of slake durability test.

Çizelge 3. Standart sapma değerleri ile birlikte ortalama SDI deney sonuçları. (Yağız, 2011'den)
 Table 3. Summary of averaged SDI with standard deviation (from Yağız, 2011).

Çevrim Sayısı	Çalı tipi traverten	Noçe tipi traverten	Kamış tipi traverten	Oniks tipi Traverten	Bej kireçtaşı	Dolomitik kireçtaşı	Beyaz kireçtaşı
Id1	99.23±0.08	99.25±0.11	98.94±0.12	99.53±0.04	99.62±0.03	99.73±0.06	99.00±0.15
Id2	98.91±0.10	98.87±0.12	98.55±0.14	99.24±0.07	99.43±0.04	99.65±0.06	98.49±0.25
Id3	98.57±0.11	98.59±0.13	98.23±0.16	99.05±0.09	99.29±0.07	99.56±0.06	98.03±0.33
Id4	98.34±0.12	98.32±0.16	97.95±0.19	98.86±0.10	99.13±0.05	99.50±0.07	97.62±0.40
Id5	98.09±0.13	98.09±0.17	97.66±0.23	98.69±0.13	99.00±0.06	99.43±0.07	97.26±0.45
Id6	97.89±0.15	97.88±0.19	97.44±0.25	98.55±0.15	98.89±0.08	99.36±0.08	96.97±0.52
Id7	97.71±0.18	97.69±0.17	97.24±0.26	98.41±0.16	98.80±0.08	99.31±0.08	96.63±0.61
Id8	97.54±0.19	97.51±0.17	97.05±0.28	98.28±0.17	98.70±0.11	99.24±0.08	96.36±0.68
Id9	97.36±0.20	97.37±0.18	96.86±0.29	98.15±0.19	98.60±0.12	99.19±0.09	96.06±0.74
Id10	97.20±0.22	97.18±0.19	96.67±0.30	98.05±0.21	98.53±0.13	99.15±0.09	95.79±0.80



Şekil 5. Kayaç tiplerinin çevrim sayılarına göre SDI deney sonuçları.

Figure 5. SDI test results based on wetting-drying cycles of studied rock types.

fraktal boyut değerleri söz konusu olacaktır. Fraktal özellik gösteren doğal nesnelerin fraktal boyutlarının hesaplanmasında, nesneye ait veri setinin, tıpkı kıyı şeritlerinde ya da süreksizlik yüzeyi pürüzlülük profillerinde olduğu gibi topolojik olarak 1-Boyutlu (1-D), veya süreksizlik yüzeyleri gibi topografik yüzeylerde olduğu gibi topolojik olarak 2-Boyutlu (2-D) olmasına bağlı olarak seçilebilecek başlıca kutu sayma, pergel (ya da cetvel) yöntemi, variogram analizi, alan/çevre metodu, güç spektrum yoğunluğu analizi gibi çeşitli yöntemler literatürde önerilmiştir. Yöntemlere ve bunların geçerli oldukları veri seti tiplerine ait detaylı değerlendirmeler Klinckenberg (1994) ve Develi ve Babadağılı (1998)'de mevcuttur.

SDI deneylerinin ıslanma ve kuruma döngüsünde, aşınma süreci ile tanelerin şeklindeki düzensizliklerin yanı sıra, keskin köşeleri yontulmakta ve profillerinde geometrik değişiklikler meydana gelmektedir (Şekil 6). Bu çalışmada, deneyin her bir çevrimi sonrasında, agrega tanelerinde meydana gelen geometrik değişimleri değerlendirmek amacıyla fraktal geometriden yararlanılmış, agrega profilleri fraktal boyut (D) değerleri ile tanımlanmıştır.

Bir nesnenin fraktal boyutunu hesaplamak için farklı yöntemler olmakla birlikte, grid hücre yöntemi sıklıkla tercih edilen bir yöntem olarak literatürde yer almaktadır. Çalışmada kullanılan kaya tanelerinin fraktal boyutları, laboratuvarında yürütülen SDI deneylerinin her bir çevrimi sonrası çekilmiş olan fotoğrafların JAVA dilinde yazılmış bir bilgisayar programı olan (FRACEK 1.0) yardımıyla sayısallaştırılması ile hesaplanmıştır (Sezer, 2007) (Şekil 7). Şekil 7'de görüldüğü gibi tanelerin alansal olarak yüzeyleri değil dört farklı açıdan çevreleri sayısallaştırılmıştır. Bu işlemi yapmaktaki amaç, açısız olarak yüzey değişiminin fraktal boyut değerini nasıl etkilediğini görmek ve ortalama fraktal boyutu kullanarak taneyi daha iyi temsil edecek bir değere ulaşmaktır. Fraktal boyutların hesaplanmasında grid-hücre yöntemi kullanılmıştır. Sayısallaştırma aşamasından sonra, her bir grid hücresinin boyutları (s), kare hücrelerinin sayıları (N(s)) ve çevre tahmini (sxN(s)) parametreleri otomatik olarak hesaplanmış ve bir Excel dosyası haline dönüştürülmüştür. Fraktal boyut (D) ve benzerlik katsayıları (b) kullanıcı tarafından çizilen grafiklerden hesaplanmıştır (Şekil 8). Grid hücre yöntemi için kullanılan genel matematiksel ifade aşağıda verilmiştir.

$$D = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\text{Log}N(s)/\text{Log}(s)}{\quad} \quad (1)$$

7 farklı kaya tipi üzerinde yapılan deneylerde, toplam 70 adet tanenin 1., 2., 4., 6., 10. çevrimler sonundaki fraktal boyutları bir tanenin dört yüzeyinin ortalaması alınarak belirlenmiştir (Çizelge 4).

2.3 Hesaplanan Fraktal Boyutların İstatistiksel Değerlendirmesi

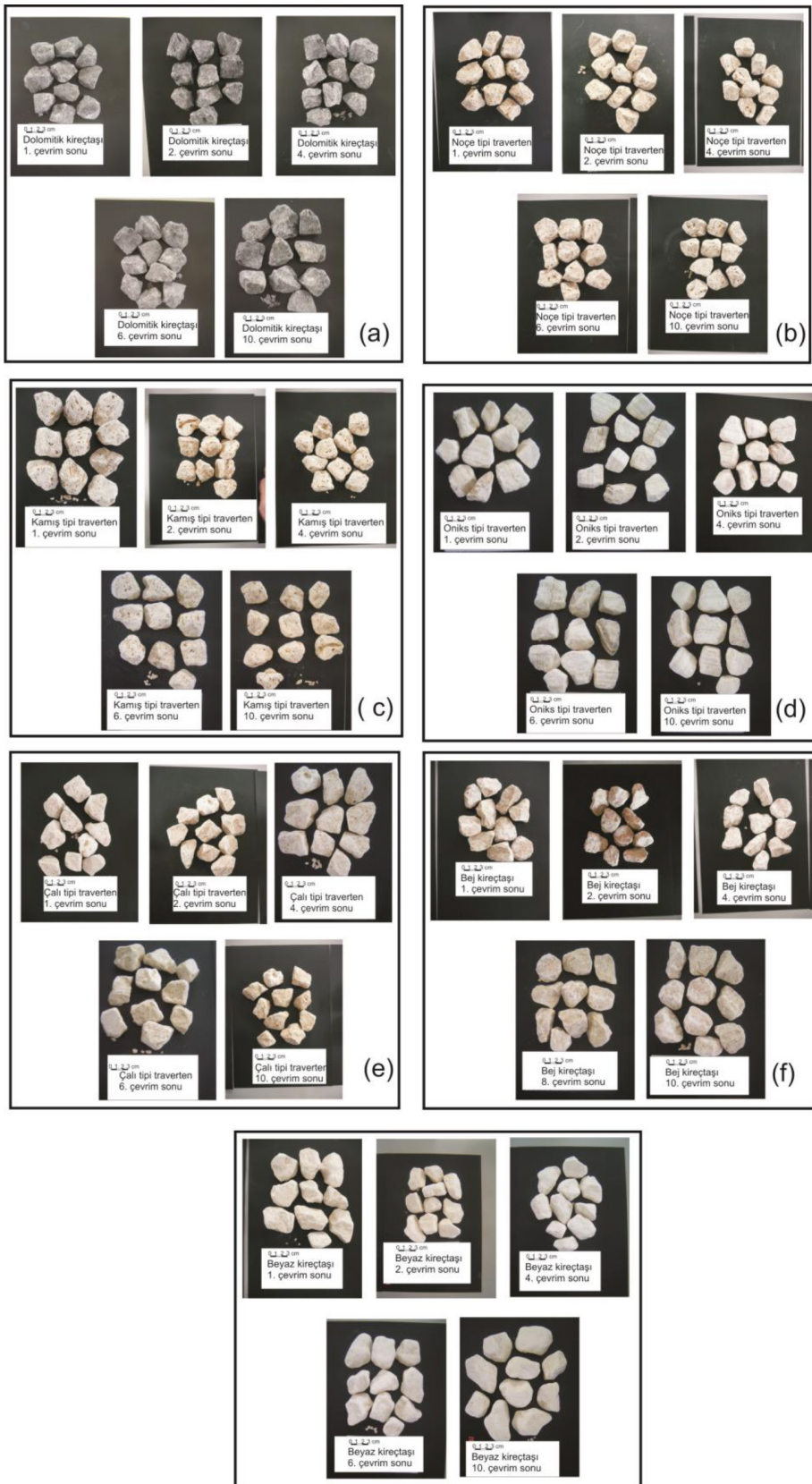
Bu çalışmada, her birinden 10 set olmak üzere 7 farklı kaya üzerinde 10 çevrimlik SDI deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyin her çevrimi sonunda, ayrışma sonucu tanelerin geometrik değişimini belirlemek amacıyla, tanelerin çevresi (FRACEK 1.0) yazılımı kullanılarak 2 boyutta sayısallaştırılmıştır. Sayısallaştırma sonrasında, fraktal boyutları belirlenen agrega tanelerinin, SDI deney çevrimleri ile geometrik değişimleri ortaya konmuştur.

SDI deneyleri ile kaya tanelerinin fraktal boyutları arasındaki ilişkiler belirlenirken her bir kayaç grubu kendi içinde değerlendirilmiştir. Yapılan istatistiksel değerlendirmeler sonucunda, çevrim sayısının artması ile fraktal boyutun (D) azaldığı gözlenmiştir. Çevrimler sonunda agrega tanelerinin birbirine çarpmalarından kaynaklanan ve tanelerin yuvarlaklaşmasına neden olan döngü, fraktal boyutun azalmasına neden olmaktadır (Şekil 7). Ayrıca SDI-D ilişkisinin de oldukça yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 9). İstatistiksel değerlendirmelerde, Id_1 , Id_2 , Id_4 , Id_6 , Id_{10} çevrimleri kullanılmıştır. Id_3 , Id_5 , Id_7 , Id_8 , Id_9 çevrim sonunda elde edilen sonuçlar, verilerin üst üste binmeleri ve istatistiksel analizlerde, yaşanacak yorumlama güçlükleri dikkate alınarak istatistiksel değerlendirmeye alınmamıştır.

Kaya tipleri mineralojik ve yapısal özelliklerine göre, her bir çevrim sonunda farklı davranış sergilenmekte, buna göre SDI değerlerinde de değişimler gözlenmektedir. Çalışmada kullanılan tüm kaya tiplerinin SDI değerleri ile fraktal boyutları birlikte değerlendirildiğinde anlamlı bir ilişki sunmamaktadır (Şekil 10). Bu nedenle, her bir kayaca ait SDI ve fraktal boyut değerlendirmelerinin kendi içinde yapılması daha anlamlı sonuçlara ulaşmak için önemlidir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, suda dağılmaya karşı duraylılık deneyinde kullanılan örneklerin aşınmanın yanı sıra, tane şekli üzerinde meydana gelen geometrik değişimler fraktal analiz modellemesi ile nicel olarak ifade edilmiştir. Çalışma kapsamında, 7 farklı kaya örneğinin



Şekil 6. 1., 2., 4., 6., ve 10. çevrimler sonunda tanelerin şekli.
 Figure 6. Rock grain shapes after 1., 2., 4., 6., and 10. cycles.

Çizelge 4. SDI deneyi çevrimleri sonunda elde edilen fraktal boyutları.
Table 4. Summary of the fractal dimensions obtained from SDI wetting-drying cycles.

Kayaç Tipi	D (en yüksek)					D (en düşük)					D (ortalama)				
	Id ₁	Id ₂	Id ₄	Id ₆	Id ₁₀	Id ₁	Id ₂	Id ₄	Id ₆	Id ₁₀	Id ₁	Id ₂	Id ₄	Id ₆	Id ₁₀
Çalı tipi traverten	1,9131	1,9085	1,903	1,889	1,887	1,8532	1,8346	1,7532	1,7641	1,7279	1,883	1,872	1,828	1,827	1,807
Noçe tipi traverten	1,8869	1,8827	1,877	1,872	1,8717	1,6489	1,6248	1,5816	1,5335	1,531	1,768	1,754	1,729	1,703	1,701
Kamış tipi traverten	1,925	1,8962	1,883	1,8233	1,8198	1,7521	1,722	1,6468	1,4287	1,4118	1,839	1,809	1,765	1,626	1,616
Onix tipi traverten	1,8245	1,7923	1,7545	1,7312	1,7311	1,7896	1,6754	1,5246	1,4834	1,4822	1,807	1,734	1,640	1,607	1,607
Bej kireçtaşı	1,9086	1,8846	1,8814	1,7622	1,7588	1,8651	1,8478	1,7617	1,7334	1,7318	1,887	1,866	1,822	1,748	1,745
Dolomitik kireçtaşı	1,9422	1,9231	1,8955	1,8742	1,8654	1,8948	1,8614	1,6742	1,5233	1,5186	1,919	1,892	1,78	1,699	1,692
Beyaz kireçtaşı	1,8747	1,8533	1,8416	1,8211	1,8188	1,7552	1,7148	1,5415	1,4718	1,4369	1,815	1,784	1,692	1,646	1,628

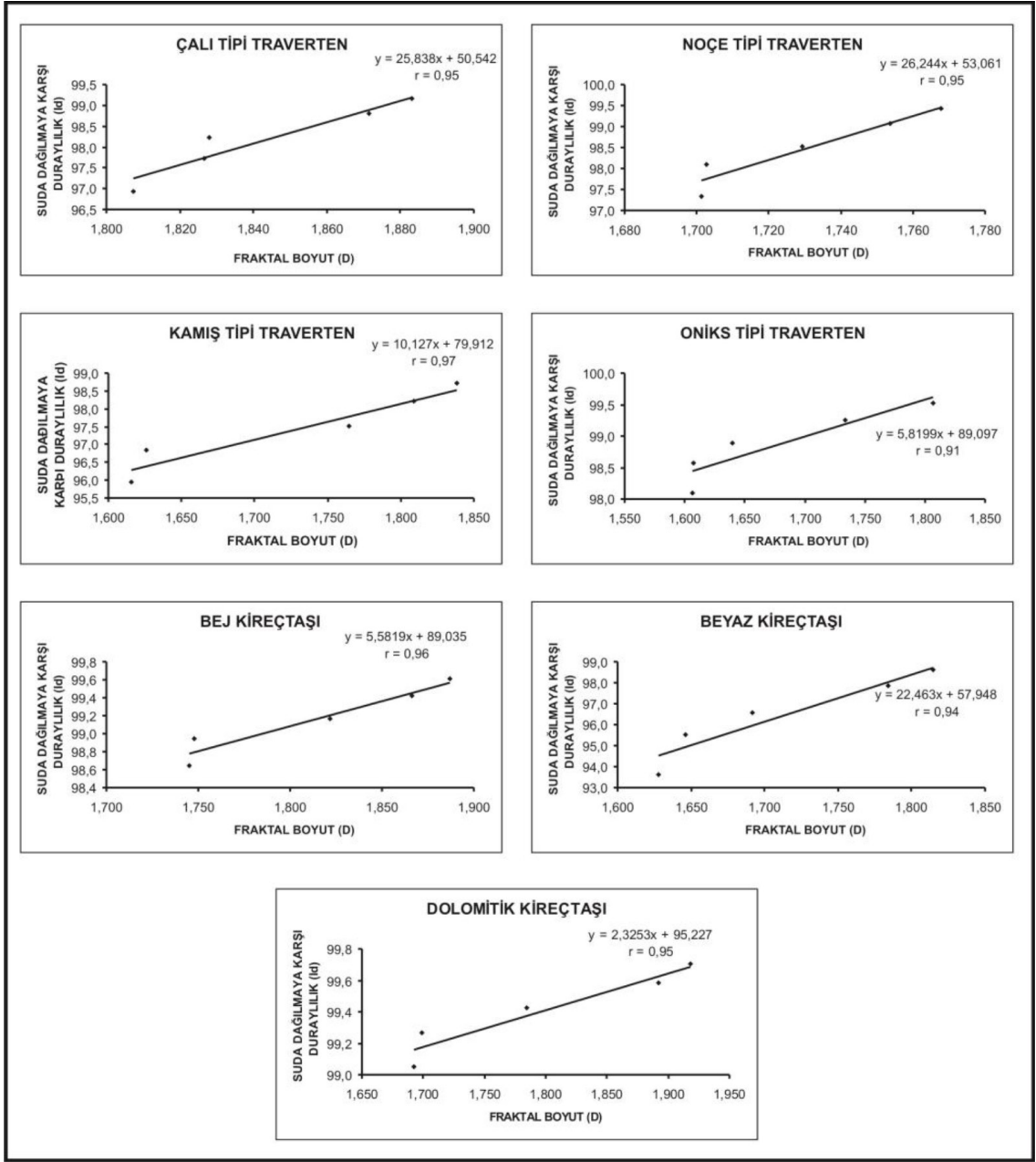
SDI deneyleri ile, 10 çevrim sonundaki geometrik tane şekillerindeki değişim, fraktal boyut analizleri ile belirlenmiştir.

SDI deneyinin her bir çevrimi sonrasında, fraktal boyutta gözlenen azalma, bu çalışma ile benzer çalışmalarda olduğu gibi (Yılmaz ve Karacan 2005, Kolay ve Kayabalı 2006, Kayabalı vd., 2006), tanelerin geometrisindeki düzensizliğin bir artışı olarak ifade edilebilir. Bu şekilde, taneler arasındaki sürtünmeye bağlı makaslama dayanımında da bir azalma olacaktır. Oransal bir sayı ile ifade edilen fraktal boyut kavramı, suda dağılmaya karşı duraylılık deneyinin aşamaları sırasında, kaya parçalarının şekilsel ve geometrik değişimleri yorumlamak için kullanılabilir önemli bir matematiksel araç olarak düşünülebilir.

Kayalara ait fraktal boyut ile SDI arasında oldukça kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır, fakat bu ilişki aynı tip kaya dikkate alındığında geçerlidir. Eğer farklı kaya tiplerinde yapılan deneylerden elde edilen tüm SDI ve fraktal boyut (D) değerleri aynı veritabanı olarak kabul edilse ve ilişkilendirilirse, bu durumda aralarında anlamlı bir ilişki gözlenmemektedir.

SDI deneyinde, özellikle killi ve çimentolu kayalarda, kayanın mineralojik ve yapısal özellikleri önemli bir rol oynamaktadır. Düşük gözeneklilik, iri taneli bir yapı ve özellikle sert dolguluya sahip kayalarda (çalı tipi traverten, noçe tipi traverten ve bej kireçtaşı gibi) göreceli daha yüksek fraktal boyut değerleri, devam eden aşınma süreci ile tanelerin şeklindeki düzensizliklerin tamamen yuvarlaklaşmadığına, aşınmaya ve parçalanmaya karşı direncin daha yüksek olduğuna işaret etmektedir. Bunun tersine, daha yumuşak, organik malzeme içerikli ve gözenekli kaya örneklerinde fraktal boyutlarının daha düşük olduğu gözlenmektedir. Bu da deney sırasında meydana gelen aşındırıcı kuvvetler ile sivri köşelerin daha düzgün ve kolay bir biçimde tıraşlandığını göstermektedir.

Daha önceki çalışmalarda, SDI deneyinin 4. çevrim sonuna kadar devam etmesinin yeterli olduğu, daha sonraki çevrimlerin sonuçları dikkate değer bir biçimde etkilemediği belirtilmiştir (Gökçeoğlu vd., 2000). Çalışma kapsamında, 10 çevrim olarak yürütülen SDI deneylerinde de, 4 çevrimin yeterli olduğu, dördüncü çevrimden sonra çevrim sayısını artırmaya gerek olmadığı, fraktal boyut analizleri ile de doğrulanmıştır. Islanma ve kuruma çevrimleri ile taneler arası bağlar zayıflamakta, ancak bu durum kayanın duraylılık kazanmasına neden olmaktadır (Gökçeoğlu vd., 2000). Başka bir deyişle, elde edilen fraktal boyutlar



Şekil 9. SDI çevrim sayısı ve fraktal boyut ilişkisi.

Figure 9. Relationships between SDI wetting-drying cycles and fractal dimensions

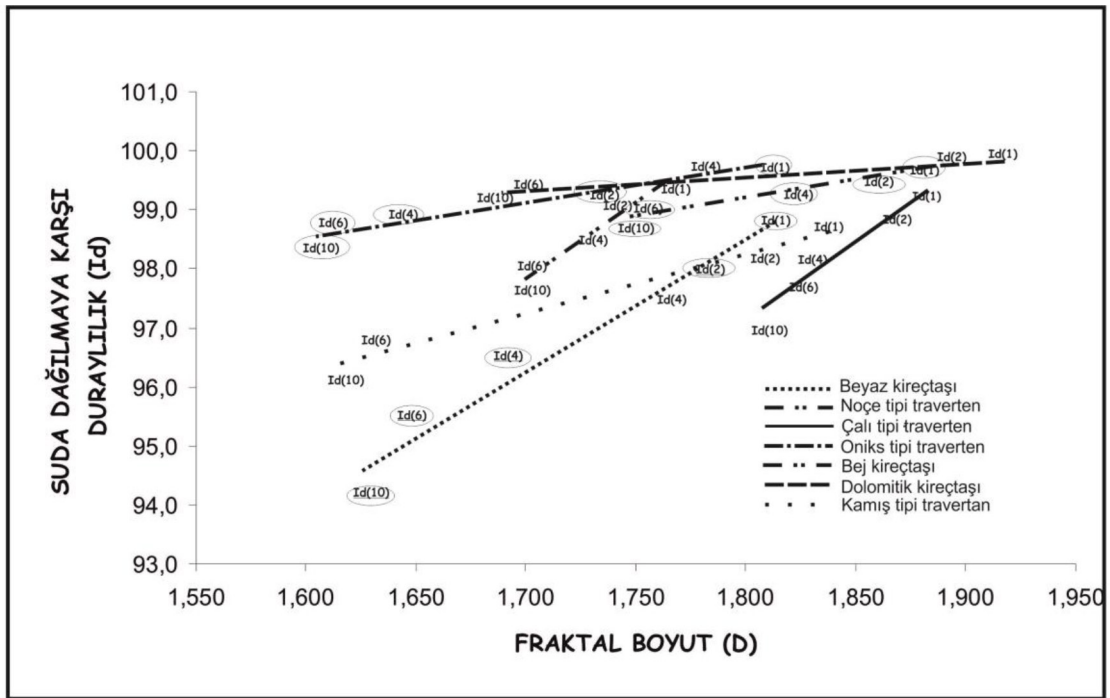
arasındaki ilişkiler ve dördüncü çevrimden sonraki D değerlerindeki değişimin ihmal edilebilir boyutlarda olması, çevrim sayısını 4 ile sınırlandırmanın yeterli olacağını göstermektedir.

Bu çalışma 7 farklı kaya tipi üzerinde yürütülmüş olup, kaya tiplerine ait çeşitlilik bundan sonraki çalışmalarda artırılabilir. SDI deneylerinde, farklı kaya tipleri için belirlenecek olan fraktal boyutlar ile bir kılavuz veya abak hazırlanabilir. Bu şekilde, kaya tanelerinin

geometrik özelliklerini yansıtan fraktal boyutları, SDI değerleri ile birlikte değerlendirilebilir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, makaleye katkıları ile önemli destek sağlayan iki hakemimize teşekkür ederler.



Şekil 10. Tüm kayaç tiplerinin birlikte değerlendirildiği SDI-Fraktal Boyut grafiği.
Figure 10. SDI- fractal dimension graph evaluating all type of rocks.

KAYNAKLAR

- ANON, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Quarterly Journal of Engineering Geology , 28, 207-242.
- ASTM (D4373-02)., 2004. Standard test method for rapid determination of carbonate content of soils.
- Bernal J.L., P Lopez MAB., 2000. The fractal dimension of stone pore surface as weathering descriptor. Applied Surface Surface, 161, 47-53.
- Czerewko M.A., Cripps J.C., 2001, Assessing the durability of mudrocks using the modified jar slake index test. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 34(2):153-163.
- Develi K., Babadağlı T., 1998. Quantification of natural fracture surface using fractal geometry. Mathematical Geology, 30(8), 971-998.
- Erguer Z.A., Ulusay R., 2009. Assessment of physical disintegration characteristics of clay-bearing rocks: disintegration index test and a new durability classification chart. Engineering Geology, 105:11-19.
- Franklin J.A., Chandra R., 1972. The slake durability test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 9,325-341.
- Gökçeoğlu C., Aksoy H., 2000. New approaches to the characterization of clay-bearing, densely jointed and weak rock masses. Engineering Geology, 58, 1-38.
- Gökçeoğlu C., Ulusay R., Sönmez H., 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. Engineering Geology, 57:215-237.
- Gulbin Y.L., Evangulova E.B., 2003. Morphometry of quartz aggregates in granites: fractal images referring to nucleation and growth processes. Mathematical Geology, 35 (7), 819-833.
- ISRM, 1979. Suggested methods for determining water content, porosity, density absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. International Journal of Rock Mechanics and Mining

- Science Geomechanical Abstract 16:141–156.
- ISRM. 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring. E. T. Brown (ed.), Pergamon Press, London.
- Kayabali K., Beyaz T., Kolay E., 2006. The effect of the pH of the testing liquid on the slake durability of gypsum. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 65:65–71.
- Kahraman S., Fener M., Gunaydin O., 2016. Estimating the uniaxial compressive strength of pyroclastic rocks from the slake durability index. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, DOI 10.1007/s10064-016-0893-3.
- Kolay E., Kayabali K., 2006. Investigation of the effect of aggregate shape and surface roughness on the slake durability index using the fractal dimension approach. *Engineering Geology*, 86, 271-294.
- Klimkenberg B., 1994. A review of methods used to determine the fractal dimension of linear feature. *Mathematical Geology*, 36 (1), 23-46.
- Koncagul E.C., Santi P.M., 1999. Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 36:139–153.
- Kruhl J.H., Nega M., 1996. The fractal shape of sutured quartz grain boundaries: application as a geothermometer. *Geologische Rundschau*, 85, 38-43.
- Mandelbrot B.B., 1967. How long is the coast of Great Britain? Statical self similarity and the fractal dimension. *Science*, 156, 636- 638.
- Martin R.P., 1986. Use of index tests for engineering assessment of weathered rocks. In: Proc. 5th. Int. Cong. of IAEG, Buenos Aires, 433–460.
- Miscevic P and Vlastelica G., 2011. Durability Characterization of Marls from the Region of Dalmatia, Croatia. *Geotechnical Geological Engineering*, 29:771–781.
- Navarre-Sitchler A., Brandley S., 2007. Basalt weathering across scales. *Earth and Planetary Science Letters*, 261, 1–2, 321-334..
- Price D.G., 1995. Weathering and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28, 243-252.
- Santi P.M., 1998. Improving the jar slake, slake index, and slake durability tests for shales. *Environmental and Engineering Geoscience*, 4(3):385–396.
- Sezer E., 2007. FRACEK: A computer program for fractal analysis, Version 1.0. Hacettepe University, Department of Computer Engineering.
- Singh T.N., Verma A.K., Singh V., Sahu A., 2005. Slake durability study of shaly rock and its predictions. *Environmental Geology*, 47:246–253.
- Ulusay R., Arikan F., Yoleri M.F., Çağlayan D., 1995. Engineering geological characterization of coal mine waste material and evaluation in the context of back analysis of spoil pile instabilities in a strip mine SW Turkey. *Engineering Geology*, 40, 77–101.
- Vallejo L.E., 1994. Fractal analysis of the slake durability test. *Canadian Geotechnical Journal*, 31:1003–1008.
- Yağız S., 2011. Correlation between slake durability and rock properties for some carbonate rocks. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 70,377–383.
- Yılmaz I., Karacan E., 2005. Slaking durability and its effect on the doline occurrence in the gypsum. *Environmental Geology*, 47(7):1010–1016.
- Zorlu K., 2008. Description of the weathering states of building stones by fractal geometry and fuzzy inference system in the Olba ancient city (Southern Turkey). *Engineering Geology*, 101 (3-4), 124-133.