

Yüzey pürüzlülüğünün sayısal tanımı ve süreksizliğin kesme dayanımına etkisi

Kayhan DEVELİ*, Mahir VARDAR

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Jeolojisi Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, süreksizliklerin yüzey pürüzlülüğünün sayısal olarak tanımlanması amaçlanmıştır. Yüzeylerin sayısallaştırılması için tamamen bilgisayar kontrollü yeni bir yüzey tarama cihazı ile kesme dayanımlarının belirlenmesi için yeni bir laboratuvar doğrudan (direkt) kesme deney cihazı özel olarak geliştirilmiştir. Doğal süreksizlik örneklerinin yüzeyleri sayısallaştırılarak 2-boyutlu veri setleri elde edilmiştir. Bu örnekler $\sigma_n=300$ kPa sabit normal gerilme altında kesilerek en büyük kesme dayanımları (τ_p) bulunmuştur. 2-boyutlu veri setlerine, güç spektrum yoğunluğu analizi ile üçgen prizma yüzey alanı yöntemleri uygulanmış ve yüzeyler için fraktal boyutlar (D_{psd} ve D_{ipsam}) iki farklı yöntemle hesaplanmıştır. Kesme deneylerindeki değme alanlarının önceden hesaplanması için yeni bir yaklaşım geliştirilmiş ve 2-boyutlu veri setlerine uygulanmıştır. Böylece literatürde daha önce de tanımlanmış olan ve bir süreksizlik yüzeyi üzerinde kesme yönündeki geometriyi tanımlayan parametreler; "maksimum olası değme alanı (A_0), toplam potansiyel değme alanı (A_θ^), en büyük görünür eğim açısı (θ_{max}^*), şekil parametresi (C) ve yüzeydeki açısallığın değişimini tanımlayan θ_{max}^*/C oranı" bu yeni yaklaşım ile de hesaplanmıştır. Yeni bir parametre olarak, A_0/C oranı tanımlanmıştır. D_{ipsam} değerleri ile yöne bağlı C , θ_{max}^*/C , A_0/C değerleri arasında önemli ilişkiler bulunmuştur. θ_{max}^*/C ve A_0/C oranları arasında yüksek korelasyon izlenmiştir. D_{ipsam} , C , θ_{max}^*/C ve A_0/C değerleri ile en büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) arasında önemli ilişkiler elde edilmiştir. D_{psd} değerleri ile diğer yüzey parametreleri ve τ_p/σ_n oranları arasında önemli bir ilişki gözlenmemiştir. τ_p/σ_n oranı ile en iyi ilişkiyi A_0/C oranı sunmuştur.*

Anahtar Kelimeler: Yüzey pürüzlülüğü, sayısallaştırma, fraktal boyut, kontak alanları, yöne bağımlı yüzey parametreleri, kesme dayanımı.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Kayhan DEVELİ. develi@hotmail.com; Tel: (216) 474 17 35.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Jeolojisi Programında tamamlanmış olan "Süreksizlik içeren ortamların mekanik modellemesi için pürüzlülüğün kuramsal ve deneysel yöntemler ile sayısal tanımı" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 20.01.2006 tarihinde dergiye ulaşılmış, 10.04.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Quantification of surface roughness and its effect on the shear strength of a discontinuity

Extended abstract

In this study, quantification of surface roughness is aimed. Samples taken from the discontinuities of a volcanic tuff outcrop were selected as a material. A new computer-controlled surface scanning device has been specially developed for this study in order to digitize discontinuity surfaces. Depending on a specified sampling interval, elevations in each coordinates on a discontinuity surface are automatically measured and recorded by this device. Also, a new direct shear test device has been specially developed for this study in order to define frictional properties of discontinuities. Upper and lower surfaces of all samples were scanned with a sampling interval of 1 mm in the horizontal axes by using the developed scanning device. Thus, 2-D data sets with the size of 65x65 were obtained for these surfaces. After that, all samples were sheared at the laboratory under the constant normal stress (σ_n) level of 300 kPa by using the developed direct shear test device. So, maximum shear strengths (τ_p) of the samples were obtained.

Fractal geometry concept was used for quantitative definition of the surface roughness. Note that higher values of fractal dimensions correspond to rougher surfaces in the fractal theory. Two different fractal methods were chosen. These are "power spectral density analysis" suitable for self-affine 2-D data sets and "triangular prism surface area method" suitable for self-similar 2-D data sets. These two methods were applied to the 2-D surface data sets obtained by digitizing process. Fractal dimensions (D_{psd} and D_{tpsam}) with two different methods were calculated.

A new approach has been developed which enables calculating of contact areas occurring in shearing process depending on the specified shear direction. Algorithm of this method is based on the main algorithm of triangular prism surface area method which is used to calculate fractal dimensions of surfaces. This new approach was applied to the 2-D data sets obtained by a digitizing process. So, surface parameters, previously defined in the literature, were calculated in this study with this new approach. These parameters define the surface geometry in a specified shear direction on a discontinuity surface. These are maximum possible contact area (A_0), total

potential contact area (A_θ^*), maximum apparent dip angle (θ_{max}^*), shape parameter (C) and the ratio θ_{max}^*/C describing angularity of the surface in the shear direction. The shape parameter (C) and the ratio θ_{max}^*/C is directly related to surface roughness. Higher values of shape parameter (C) correspond to smoother surfaces while higher values of the ratio θ_{max}^*/C correspond to rougher surfaces in a specified direction on a surface. Additionally, the ratio A_0/C as a new direction-depended parameter has been defined. The notations given previously for these parameters were used in this study without any change to keep the literature same. All of these parameters were calculated in the shear direction.

The values of the parameters C , θ_{max}^*/C and A_0/C calculated in the shear direction for upper and lower parts of all samples were compared with the fractal dimensions (D_{psd} and D_{tpsam}) which characterize roughness of whole surface. Good agreements were obtained between D_{tpsam} and the parameters C , θ_{max}^*/C and A_0/C . D_{tpsam} was found to be proportional to the ratios θ_{max}^*/C and A_0/C . Also, a high correlation between the ratios θ_{max}^*/C and A_0/C was obtained and these two parameters are proportional to each other. On the other hand no correlation was found between D_{psd} and the parameters C , θ_{max}^*/C and A_0/C . Additionally, calculated values of both fractal dimensions (D_{psd} and D_{tpsam}) and the parameters C , θ_{max}^*/C and A_0/C for both sides of the discontinuity samples were compared to maximum shear strengths of these samples obtained from laboratory shear tests. Maximum shear strength ratios (τ_p/σ_n) were used in these comparisons. It was found that D_{tpsam} and the parameters C , θ_{max}^*/C and A_0/C show good correlations with the maximum shear strength ratios (τ_p/σ_n). D_{tpsam} , θ_{max}^*/C and A_0/C were found to be proportional to the ratio τ_p/σ_n . The best agreement was observed between the ratio A_0/C and the ratio τ_p/σ_n . But no correlation was found between D_{psd} and the ratio τ_p/σ_n . D_{tpsam} is a useful tool to describe the geometry of whole surface. The developed new approach is successful for calculation of directional surface parameters. The parameters θ_{max}^*/C , A_0/C and C are also useful for characterization of direction-depended surface geometry. The data acquired by the developed surface scanning device are reliable.

Keywords: Surface roughness, scanning, fractal dimension, contact areas, directional surface parameters, shear strength.

Giriş

Doğada kaya ortamı tek parçalı bir ortam niteliğinde olmayıp, genel bir ifade ile süreksizlik düzlemleri olarak adlandırılan yapısal kusurlara sahiptir. Çok parçalı nitelikteki bu ortamın mekanik davranışı; bir yandan kayanın malzeme özellikleri, diğer yandan da süreksizliklerin mekanik parametreleri tarafından belirlenmektedir. Kayanın malzemesine oranla daha düşük dayanım değerlerine sahip olan süreksizlikler, kaya ortamın mekanik dayanım ve davranışını belirleyen ana etmendir. Süreksizlikler için değişik kesme dayanımı ölçütleri önerilmiştir (Patton, 1966; Ladanyi ve Archambault, 1969; Barton, 1973). Bu ölçütlerin tümünde, süreksizlik düzlemlerinin yüzey geometrisi, bir başka deyişle pürüzlülük, süreksizliğin kesme dayanım ve davranışını önemli ölçüde etkileyen bir parametre olarak ele alındığı için, yüzey pürüzlülüğünün tanımına yönelik olan çalışmalar artmıştır. Görsel karşılaştırmaya dayanan tanımlamalarda (Barton ve Choubey, 1977; ISRM, 1981), süreksizlik yüzeyi görsel olarak incelenerek geometrisi standart profiller ile karşılaştırılmakta, en çok benzediği standart profile ait olan tanımlama incelenen yüzey için de kabul edilmektedir. Ancak bu tür tanımlamalar uygulamacının kişisel değerlendirmesine bağlı olmakta, aynı süreksizlik yüzeyi için farklı uygulayıcılar tarafından farklı değerlendirmeler yapılabilmektedir. Nitel tanımlamaların yanı sıra nicel tanımlamalar zaman içinde ağırlık kazanmış, pürüzlülüğün sayısal tanımında istatistiksel (Tse ve Cruden, 1979) ve fraktal analiz yöntemleri kullanılmıştır. Türk ve diğerleri (1987), Carr ve Warriner (1989), Lee ve diğerleri (1990) pergel (divider) yöntemi ile 10 standart pürüzlülük profilinin (Barton ve Choubey, 1977) fraktal analizini yapmışlar, fraktal boyut (D) değerleri ile bu profillere ait JRC (süreksizlik pürüzlülük katsayısı) değerleri arasında orantılı bir ilişki bulmuşlardır. Adı geçen araştırmacılar, yaptıkları çalışmalar ile kişisel JRC değerlendirmesini objektif bir hale getirdiklerinden, bu çalışmalar son derece önemlidir. Ancak bu çalışmalarda pürüzlülük çizgisel olarak ele alınmakta, hesaplamalarda yüzey profillerini temsil eden 1-boyutlu veri setleri kullanılmaktadır. Diğer taraftan, aynı çatlak yüzeyi üzerinden birbirine paralel olarak alınan

profil geometrileri çoğu kez birbirinden farklı olabilmektedir (Mc Williams vd., 1991, Develi ve Babadağlı, 1998). Aynı süreksizlik yüzeyi üzerinden farklı yönlerde alınan çizgisel profil geometrilerinin birbirinden farklılık sunarak anizotrop bir özellik sergilediği de bildirilmiştir (Huang ve Doong, 1990; Aydan vd., 1996; Develi ve Babadağlı, 1998; Babadağlı ve Develi, 2000, 2001 ve 2003). Bu nedenle, yüzeyin genelini yansıtan 2-boyutlu analizlerin yapılması, mekanik parametreler ile yapılacak ilişkilendirmelerde ise bu şekilde tanımlanmış pürüzlülük değerlerinin kullanılması son derece önemlidir.

Bu çalışmada, süreksizliklerin yüzey pürüzlülüğünün 2-boyutlu analizlerle sayısal olarak tanımlanması amaçlanmıştır. Süreksizlik yüzeylerinin alansal olarak sayısallaştırılması için tamamen bilgisayar kontrollü yeni bir yüzey tarama cihazı ile bu yüzeylerin kesme dayanımlarının laboratuvarında deneysel olarak belirlenmesi için yeni bir doğrudan kesme deney cihazı bu çalışma kapsamında özel olarak geliştirilmiştir. Litolojisi volkanik tüf olan doğal süreksizliklerden alınan örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri sayısallaştırılmış, bu yüzeyler için 2-boyutlu veri setleri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün sayısal olarak tanımlanmasında fraktal geometri konsepti kullanılmıştır. Doğal süreksizlik yüzeylerinin alansal olarak sayısallaştırılması ile elde edilen 2-boyutlu yüzey verilerine, 2-boyutlu güç spektrum yoğunluğu analizi Develi (1996), Develi ve Vardar (1998), Develi ve Babadağlı (1998), Babadağlı ve Develi (2000, 2001 ve 2003) tarafından uygulanmıştır. 2-boyutlu analiz yöntemi olan üçgen prizma yüzey alanı yönteminin uygulandığı çalışmalar ise kısıtlıdır (Develi ve Babadağlı, 1998). Bu çalışmalar ile; ilki kendine yakınsal (self-affine), ikincisi ise kendine benzer (self-similar) yöntem olarak değerlendirilen, sırasıyla güç spektrum yoğunluğu analizi ve üçgen prizma yüzey alanı yöntemleri kuramsal anlamda değerlendirilmiştir. Kendine yakınsal ve kendine benzer kavramları burada açıklanmamakla birlikte, Develi ve Babadağlı (1998) tarafından ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Bu yöntemlerin yüzey geometrisini tanımlamadaki başarılarını mekanik anlamda da değerlendirmek için, her iki yöntem 2-boyutlu

veri setlerine uygulanmış, fraktal boyutlar (D_{psd} ve D_{tpsam}) iki farklı yöntem ile hesaplanmıştır. Süreksizlik örnekleri üzerinde mekanik kesme deneyleri yapılmış en büyük kesme dayanımları belirlenmiştir. Deneyler sırasında oluşan değme alanlarının kesme yönüne bağlı olarak önceden hesaplanmasına olanak sağlayan yeni bir yaklaşım geliştirilmiş, kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayan sayısal parametreler (Graselli vd., 2002) bu yaklaşım ile de hesaplanmıştır. Yüzey fraktal boyutları ve kesme yönündeki geometriyi tanımlayan yüzey parametreleri hem birbirleri ile hem de en büyük kesme dayanımı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece yüzey pürüzlülüğünü alansal olarak tanımlamadaki güvenilirlik ve doğrulukları, ayrıca dayanım değerleri ile de ilişki kurabilme yetenekleri sınanmıştır.

Ölçümsel ve deneysel çalışmalar

Materyal

Çalışmada kullanılan doğal süreksizlik örneklerinin litolojisi volkanik tüftür. Kayaç; plajitoklaz, piroksen ve az miktarda amfibol kristalleri şeklinde izlenen serbest mineral parçacıkları ile genellikle bazalt, nadiren andezitik bazalt şeklinde izlenen volkanik kayaç parçacıklarından oluşmakta olup, piroklastik kayaç dokusu sunmaktadır.

Geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı ve yüzeylerin ölçülmesi

Süreksizlik yüzeylerinin sayısallaştırılması için yeni bir bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı bu çalışma için özel olarak geliştirilmiştir (Şekil 1). Bu cihaz literatürde daha önce tanımlan (Develi, 1996; Develi ve Vardar, 1998; Develi vd., 2001) bilgisayar kontrollü prototip cihazın ölçüm alanı ve hassasiyeti artırılmış yeni bir versiyonudur. Bu cihaz ile yüzey üzerindeki yükselti değerleri (z) insan eli değmeksizin ölçülmekte ve ait oldukları noktaların koordinatları $[P(x,y)]$ ile birlikte, ölçümle eş zamanlı olarak, kontrol yazılımı tarafından veri dosyasına kayıt edilmektedir.

Taranabilir maksimum yüzey alanı 256x256 mm'dir. x ve y eksenlerindeki maksimum çö-

zünürlük (Δ) 0.1 mm'dir. Yükselti düşey ekseninde (z) 1/10 mm'lik bir duyarlılık ile ölçülebilmektedir. Örneklerin birbirleriyle iyi derecede örtüşen alt ve üst blok yüzeyleri kare kesitli olup, boyutları 70x70 mm'dir. Çalışmada kullanılan 2-boyutlu fraktal analiz yöntemlerinin uygulanmasındaki sınır koşulları nedeniyle, sayısallaştırma işlemi bu yüzeyler üzerinde seçilen ve geometrik merkezi asıl yüzeyin merkezi ile özdeş olan 65x65 mm boyutundaki kare kesitli alan sınırları içinde yapılmıştır. 30 adet süreksizlik örneğinin alt ve üst blok yüzeyleri 1 mm veri örnekleme aralığı (Δ) ile sayısallaştırılmış, böylece bu yüzeyler için 2-boyutlu veri setleri elde edilmiştir.



Şekil 1. Geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı

Geliştirilen laboratuvar doğrudan kesme deney cihazı ve kesme deneyleri

Süreksizliklerin kesme dayanımlarının laboratuvarında belirlenebilmesi için bir doğrudan (direkt) kesme deney cihazı, bu çalışma kapsamında özel olarak geliştirilmiştir (Şekil 2). Sayısallaştırma işleminin ardından, örnekler doğrudan kesme deney cihazı ile $\sigma_n=300$ kPa sabit normal gerilme değeri altında laboratuvarında kesilmiş ve en büyük kesme dayanımları (τ_p) bulunmuştur. Normal yükün kesme kutusuna uygulanmasında döküm külçeler kullanılmıştır. Bu sayede normal yük deney süresince sabit tutulmuştur. Kesme deplasmanı oranı, ISRM (1981)'e uygun olarak yaklaşık 0.1 mm/dak'dır. 10 mm kesme yerdeğiştirmesi süresince deneylere devam edilmiştir.



Şekil 2. Geliştirilen laboratuvar doğrudan kesme deney cihazı

Yüzeylerin fraktal analizi

Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemi

Topolojik olarak 1-boyutlu olan bir yüzey profilinin fraktal boyutu, $\log(S(k))-\log(k)$ diyagramındaki nokta dağılımına ait regresyon doğrusunun eğiminden hesaplanabilmektedir. Bu iki parametre arasındaki fonksiyonel ilişki

$$S(k) \propto k^{-\beta} \quad (1)$$

şeklindedir (Brown ve Scholz, 1985; Berry ve Lewis, 1980). Burada, $S(k)$: Güç, k : Dalga sayısı, β : Regresyon doğrusunun eğimidir. Fraktal boyut (D_{psd}) ile regresyon doğrusu eğimi (β) arasındaki ilişki ise,

$$D_{psd} = (5+\beta) / 2 \quad (2)$$

şeklindedir. Çizgisel bir yüzey profilinin güç spektrum yoğunluğu, 1-boyutlu Fourier dönüşümü (transform) ile hesaplanabilmektedir. Topolojik olarak 2-boyutlu bir yüzeyinin güç

spektrum yoğunluğu ise, 2-boyutlu Fourier dönüşümü ile hesaplanmaktadır. Dönüşümün yapılabilmesi için, yüzeye ait sayısallaştırılmış yükselti verileri eş (üniform) aralıklı bir kare ağı (grid) düğüm noktaları üzerinde yer almalı, kare ağı boyutları, n bir tamsayı olmak üzere, 2^n olmalıdır. İki boyutlu bir ağ üzerinde tanımlanmış olan $z(p_1, p_2)$ fonksiyonunun iki boyutlu Fourier dönüşümü, yine aynı ağ üzerinde aşağıdaki eşitlik ile hesaplanılır (Press ve Teukolsky, 1992; Brigham, 1974; Saupe, 1988).

$$z(n_1, n_2) = \sum_{p_1=0}^{N_1-1} \sum_{p_2=0}^{N_2-1} z(p_1, p_2) e^{-i2\pi(\frac{p_1 n_1}{N_1} + \frac{p_2 n_2}{N_2})} \quad (3)$$

Burada; N_1 ve N_2 sırasıyla x ve y eksenleri boyunca örneklenmiş olan veri sayısıdır. $N_1=N_2$ dir ve ikinin tam sayı katları (2^n) olmak zorundadır. p_1 ve p_2 , $0 \leq p_1 \leq N_1 - 1$ ve $0 \leq p_2 \leq N_2 - 1$ olmak üzere, uzamsal (spatial) ortamda, sırasıyla x ve y eksenleri boyunca, veri örneklemeinde kullanılan indeks değerleridir. n_1 ve n_2 ise, $0 \leq n_1 \leq N_1 - 1$ ve $0 \leq n_2 \leq N_2 - 1$ olmak üzere, dalga sayısı ortamında, sırasıyla x ve y eksenleri boyunca, dalgasayısı örneklemeinde kullanılan indeks değerleridir. Bu eşitlik ile, uzamsal ortamda örneklenmiş olan 2-boyutlu veri dalga sayısı ortamına aktarılır. Bu dönüşüm sonrası, güç spektrum yoğunluğu ise

$$|z(n_1, n_2)|^2 = R^2 z(n_1, n_2) + I^2 z(n_1, n_2) \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanılır. Burada; $Rz(n_1, n_2)$ ve $Iz(n_1, n_2)$ Fourier dönüşümünün sırasıyla gerçek (real) ve sanal (imaginary) kısımlarıdır. Dalgasayısı vektörünün (k) x ve y bileşenleri, Fourier uzayında k_{n1} ve k_{n2} 'dir ve

$$k_{n1} = n_1 / N_1 \Delta \quad (5)$$

$$k_{n2} = n_2 / N_2 \Delta \quad (6)$$

eşitlikleri ile tanımlanır. Δ ise x ve y eksenleri boyunca veri örnekleme aralığıdır. İzotropik bir yüzey için, güç spektrum yoğunluğu $[S(k)]$ sadece dalgasayısı (k) vektörüne bağlıdır (Wang

vd., 1988; Saupe, 1988) ve k'nın bir fonksiyonudur.

$$k = \sqrt{(k_{n_1})^2 + (k_{n_2})^2} = \sqrt{\left(\frac{n_1}{N_1\Delta}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{N_2\Delta}\right)^2} \quad (7)$$

Yüzey fraktal boyutu (D) ile güç spektrum yoğunluğu diyagramındaki $[\log S(k) - \log k]$ nokta dağılımına çizilen regresyon doğrusunun eğimi (β) arasındaki ilişki (1) bağıntısındaki gibidir. Yüzey fraktal boyutu ise,

$$D_{psd} = (8 + \beta) / 2 \quad (8)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır (La Pointe ve Barton, 1995).

Üçgen prizma yüzey alanı yöntemi

Bu yöntem, topolojik olarak 2-boyutlu süreksizlik yüzeylerinin fraktal boyutunu hesaplamak için Clarke (1986) tarafından önerilmiştir. Analiz edilecek süreksizlik yüzeyine ait sayısallaştırılmış yükselti verileri, n bir tamsayı olmak üzere, boyutu 2^n+1 olan eş aralıklı bir kare ağız düğüm noktaları üzerinde yer almalıdır. Eğer a, b, c, ve d ağ içindeki bir kare hücrenin (piksel) köşe noktalarındaki yükselti değerleri ve e bu karenin geometrik merkezinde yer alan ortalama yükseklik değeri ise, sırasıyla; a, e ve b; b, e ve c; c, e ve d; d, e ve a noktaları birleştirilerek kare hücre içerisinde dört üçgen çizilebilir. Burada her bir üçgen, birer üçgen prizma olarak düşünülebilir. Bu üçgen prizmaların her birinin tavanını oluşturan üçgenlerin alanları bilinirse, kare hücrenin tavanının toplam alanı hesaplanabilir. Bu hesaplamalar için kullanılan eşitlikler Clarke (1986)'tan alınmış olup, üçgenlerin yüzey alanları (A, B, C, ve D);

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{sa(sa-w)(sa-p)(sa-o)} \\ B &= \sqrt{sb(sb-x)(sb-p)(sb-q)} \\ C &= \sqrt{sc(sc-y)(sc-q)(sc-r)} \\ D &= \sqrt{sd(sd-z)(sd-o)(sd-r)} \end{aligned} \quad (9)$$

ifadeleriyle verilir. Buradaki "sa, sb, sc ve sd" parametreleri Heron denklemi ile;

$$\begin{aligned} sa &= \frac{1}{2}(w+p+o) & sb &= \frac{1}{2}(x+p+q) \\ sc &= \frac{1}{2}(y+q+r) & sd &= \frac{1}{2}(z+o+r) \end{aligned} \quad (10)$$

şeklinde tanımlanır. (9) ve (10) eşitlik takımlarında yer alan "w, z, x, y ve o, p, r, q" parametreleri, üçgen prizmaların tavanını oluşturan üçgenlerin kenar uzunluklarıdır. Hücrenin tabanını oluşturan karenin kenar uzunluğu s olduğundan, tabana iz düşürülmüş üçgenlerin uzun kenarlarının uzunluğu da s'dir. Dolayısıyla bu iz düşüm üçgenlerinin diğer iki kısa kenarının uzunlukları ise $(\sqrt{2}/2)s$ olacaktır. Bu durumda; iz düşüm üçgenlerin kenar uzunlukları ile hücrenin köşe noktaları arasındaki yükseklik farkları kullanılarak, üçgen prizmaların tavanını oluşturan üçgenlerin kenar uzunlukları "w, z, x, y" ve "o, p, r, q", Pisagor (Pythagoras) teoremine göre;

$$\begin{aligned} w &= \sqrt{(b-a)^2 + s^2} & x &= \sqrt{(c-b)^2 + s^2} \\ y &= \sqrt{(d-c)^2 + s^2} & z &= \sqrt{(a-d)^2 + s^2} \\ o &= \sqrt{(a-e)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}s\right)^2} & p &= \sqrt{(b-e)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}s\right)^2} \\ q &= \sqrt{(c-e)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}s\right)^2} & r &= \sqrt{(d-e)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}s\right)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

ifadeleri ile hesaplanır. (9) eşitlik takımı ile tanımlanan alanların toplamı sxs boyutundaki kare hücre yüzeyinin toplam alanını ($S_{i,j}$) verir.

$$S_{i,j} = A + B + C + D \quad (12)$$

Süreksizlik yüzeyinin toplam alanı ise, ağ içindeki tüm hücrelerin alanlarının toplamına eşittir.

$$S(s) = \sum_{i,j=1}^{N(s)} S_{i,j} \quad (13)$$

Burada, $N(s)$: süreksizlik yüzeyine ait ağ içindeki $s \times s$ boyutundaki toplam hücre sayısıdır. Artan hücre boyutları için hesaplamalar tekrarlanır ve her hücre boyutuna ($s \times s$) karşılık gelen ağ, başka bir deyişle süreksizlik toplam yüzey alanı $[S(s)]$ hesaplanır. Hesaplanan toplam yüzey alanı hücre boyutunun bir fonksiyonudur. Her defasında artırılan hücre boyutlarına karşılık, hesaplanan ağ toplam yüzey alanlarında bir düşüş gerçekleşir ve bu ilişki $\ln [S(s)] - \ln (s \times s)$ grafiğinden izlenir. Yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam});

$$D_{\text{tpsam}} = 2 - b \quad (14)$$

eşitliği ile tanımlanır. Bu eşitlikteki b , $\ln [S(s)] - \ln (s \times s)$ grafiğindeki ilişkiyi temsil eden regresyon doğrusunun eğimidir.

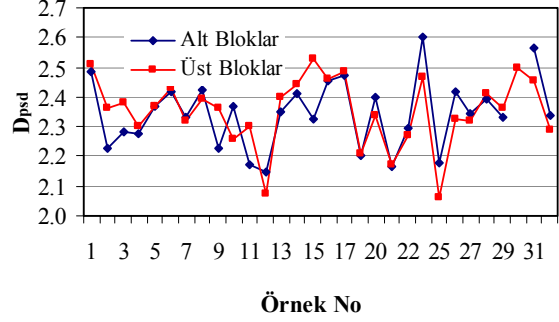
Çalışmada kullanılan örneklerin alt ve üst blok yüzeylerinin sayısallaştırması ile elde edilen topolojik olarak 2-boyutlu veri setlerine, güç spektrum yoğunluğu analizi ve üçgen prizma yüzey alanı yöntemleri uygulanmış, bu yüzeyler için fraktal boyutlar (sırasıyla D_{psd} ve D_{tpsam}) farklı iki yöntem ile hesaplanmıştır. Alt ve üst blok yüzeyleri için her iki yöntem ile hesaplanan fraktal boyutların örneklere göre değişimi Şekil 3a ve 3b’de sunulmuştur. Örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri birbirleri ile iyi örtüşür geometridedir. Her iki yöntem ile de, aynı örneğe ait alt ve üst blok yüzeyleri için birbirine çok yakın boyut değerleri hesaplanmıştır. Bu durum geliştirilen yüzey tarama cihazının ölçüm doğruluğunun güvenilir olduğu anlamına gelmektedir.

Doğrudan kesme deneylerinde değme alanlarının gelişimi

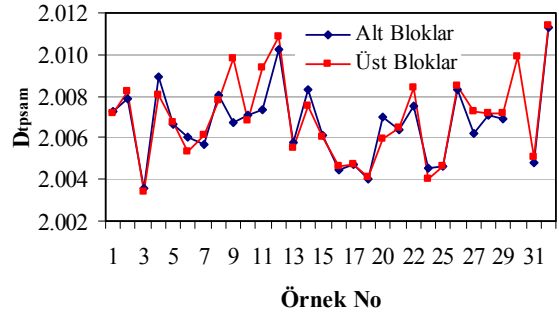
Kesme deneyleri sırasında yapılan gözlemlerde; hareketin gerçekleştiği süreksizlik düzleminin altında ve üstünde yer alan blokların belirli alanlarda birbirlerine değmekte olduğu, bu değme alanlarında ezilme ve/veya kesilme olayının gerçekleştiği izlenmiştir. Gentier ve diğerleri (1997), Yeo ve diğerleri (1998), Gentier ve diğerleri (2000), Graselli ve diğerleri (2002)’nin bulgularına da koşut olarak, değme alanlarının rasgele gelişmediği, boyut, şekil ve uzamsal da-

ğılımlarının yüzey geometrisi tarafından denetlendiği, çoğunlukla kesme yönünde kesme vektörüne karşı görünür eğimli olan en dik yersel bölgelerde geliştiği gözlenmiştir.

a)



b)



Şekil 3. Alt ve üst blok yüzeyleri için hesaplanan fraktal boyut değerlerinin örneklere göre değişimi (a) güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemi için (b) üçgen prizma yüzey alanı yöntemi için

Graselli ve diğerleri (2002) kesilme sırasında değme alanlarının gelişeceği yerleri saptamak için ilk önce kesme yönünün tanımlanmasının gerekli olduğunu bildirmiş ve değme alanlarının kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı görünür eğimli olan ya da kesme vektörüne paralel olan yersel alanların üzerinde gelişebileceğini varsaymıştır. Bir süreksizlik yüzeyi üzerinde görünür eğim açıları 0° ile θ_{max}^* arasında değişen bu alanların toplamı kesme yönündeki maksimum olası değme alanı (A_0) olarak tanımlanmıştır. θ_{max}^* kesme yönündeki en büyük görünür eğim açısını ifade etmektedir. Kesme mekanizması; “uygulanacak farklı normal yükler için farklı değerler alacak görünür bir eşik eğim

açısından (θ_{cr}^*) daha yüksek eğim açılarına sahip olan ve kesme yönünde sadece kesme vektörüne bakan yersel bölgeler kesme işleminde rol alır” kuramı ile basitleştirilmiştir. Seçilecek herhangi bir görünür eşik eğim açısı (θ_{cr}^*) ve bu açıdan daha yüksek diğer tüm görünür eğim açıları ile tanımlı ve kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı eğimli olan alanların toplamı, toplam potansiyel değme alanı (A_{θ}^*) olarak tanımlanmıştır. Kesme yönünde, sadece kesme vektörüne karşı eğimli olan yersel bölgeler içinde, tam olarak θ_{cr}^* açısı ile eğimli olan alanların değme zonlarını oluşturacağı, θ_{cr}^* açısından daha yüksek açı değerleri ile eğimli olan alanların ise uygulanan normal yükün dağılımına bağlı olarak deforme olacağı, kesileceği ya da ezileceği belirtilmiştir. A_{θ}^* , görünür bir eşik eğim açısına bağlı olarak, kesme sırasında üzerinde değme oluşması mümkün olan tüm alanların toplamını ifade etmektedir. Görünür eşik eğim açısı (θ_{cr}^*) kesme işleminde uygulanan farklı normal yükler için farklı değerler alabildiğinden, toplam potansiyel değme alanının (A_{θ}^*) değeri doğal olarak normal yük miktarına da bağlıdır. Graselli ve diğerleri (2002), 0^0 ile θ_{max}^* arasında değişen farklı görünür eğim açıları (θ^*) için A_{θ}^* değerleri hesaplanarak $A_{\theta}^* - \theta^*$ ilişkisi çizildiğinde içbükey (konkav) bir eğrinin elde edileceğini belirtmişler ve bu eğrinin içbükeylik derecesini şekil parametresi (C) olarak adlandırmışlardır. Bu araştırmacılara göre, eğrinin içbükeyliği arttıkça C parametresinin değeri de artmaktadır. Daha yüksek içbükeylik; maksimum değerle karşılaştırıldığında, daha düşük görünür eğim değerine sahip olan daha çok alan olduğu anlamına gelmektedir. Daha yüksek C değerleri daha az pürüzlü yüzeyleri tanımladığından, şekil parametresi (C) yüzey pürüzlülüğü ile ters orantılı bir değerdir. Aynı araştırmacılar, pürüzlülüğün sayısal ifadesi için θ_{max}^*/C oranını kullanmışlar, bu oranın kesme yönünde yüzey üzerindeki açısallığın değişimini ifade edeceğini bildirmişlerdir. Bu araştırmacılar, θ_{max}^*/C oranının daha düşük değerlerinin daha az pürüzlü yüzeyleri işaret edeceğini, kesme yönündeki pürüzlülük derecesi arttıkça θ_{max}^*/C oranının değerinin de artacağını ifade etmişlerdir.

Değme alanlarının hesaplanması için yeni bir yaklaşım

Bu çalışmada, süreksizliklerin kesilmesi sırasında gelişebilecek değme alanlarının kesme yönüne bağlı olarak önceden hesaplanmasına olanak sağlayan yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yeni yaklaşım, topolojik olarak 2-boyutlu süreksizlik yüzeylerinin fraktal boyutunu hesaplamak için önerilen (Clarke, 1986) üçgen prizma yüzey alanı yönteminin temel algoritması üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşım, daha önce değinilen diğer araştırmacıların da görüş ve bulgularına uygun olarak; “I) olası değme alanlarının, kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı görünür eğimli olan ve/veya kesme vektörüne paralel olan yersel alanlar üzerinde gelişebileceği, II) görünür eğim yönü kesme vektörünün yönüne doğru olan alanlarda ise değme oluşamayacağı ve de bu alanların birbirinden uzaklaşacağı ve, III) yüzey üzerinde kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı görünür eğimli olup, uygulanan farklı normal yükler için farklı değerler alan görünür bir eşik eğim açısından (θ_{cr}^*) daha yüksek eğim açılarına sahip olan yersel bölgelerin kesme işleminde rol alacağı” varsayımlarına dayanmaktadır. Eğer a, b, c, ve d eş aralıklı kare bir ağ içindeki herhangi bir kare hücrenin köşe noktalarındaki yükselti değerleri ve e, $e=(a+b+c+d)/4$ olmak üzere, bu karenin geometrik merkezinde yer alan ortalama yükseklik değeri ise, sırasıyla; a, e ve b; b, e ve c; c, e ve d; d, e ve a noktaları birleştirilerek kare hücre içerisinde dört adet üçgen oluşturmak mümkündür (Şekil 4). Bu üçgenlerin herbiri birer üçgen prizmanın tavanını oluşturur. Daha önce verilmiş olan (9), (10) ve (11) eşitlik takımları ile her bir üçgenin alanını hesaplamak mümkündür. Bu dört üçgenin alanlarının toplamı hücrenin toplam alanını verir. Benzer şekilde, ağ içindeki tüm hücrelerin alanlarının toplamı ise toplam yüzey alanını (A_T) tanımlar. Şekil 4’e dikkat edilirse kesme vektörünün yönü sağa doğrudur. Buradaki kare hücre süreksizliğin alt bloğuymuş gibi düşünülürse, süreksizliğin üst bloğu alt bloğa nazaran sağa doğru hareket etmektedir. Laboratuvar doğrudan kesme deneyleri ile de uyumlu olan bu konfigürasyon içinde hareket “sağa doğru kesme” olarak adlandırılmıştır. Kesme yönün-

de, görünür eğim yönü kesme vektörüne karşı olan üçgenler pozitif, kesme vektörünün yönüne doğru olan üçgenler ise negatif eğimli üçgenler olarak ele alınmıştır. I. ve II. varsayımlara bağlı olarak değme alanları pozitif eğimli ve/veya kesme vektörüne paralel olan yatay konumlu üçgenler üzerinde gelişebilecektir. Negatif eğimli üçgenler üzerinde ise herhangi bir değme gelişmeyecektir. Üçgenlerin kesme yönündeki görünür eğimleri,

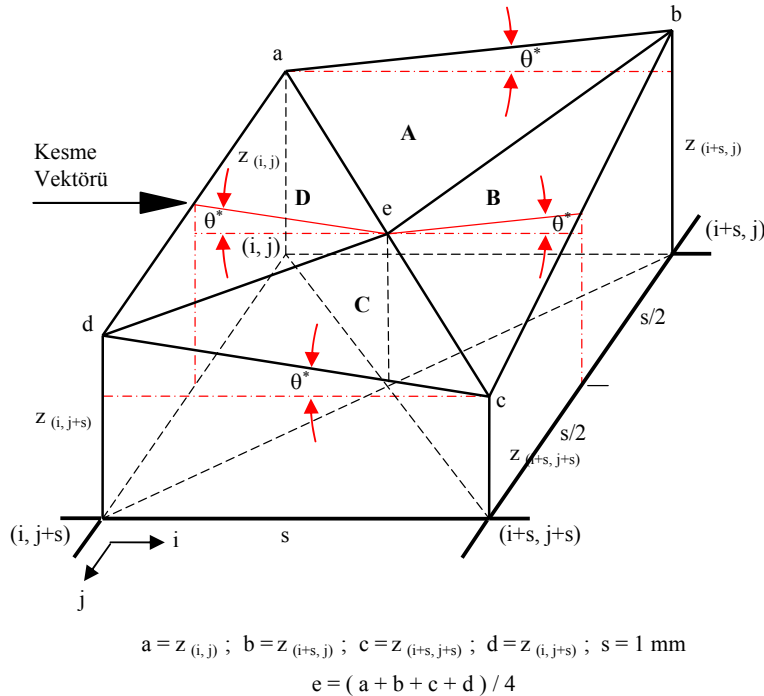
$$\text{A üçgeni için; } \tan \theta^* = \frac{(b - a)}{s} \quad (15)$$

$$\text{B üçgeni için; } \tan \theta^* = \frac{\left(\frac{b + c}{2} - e\right)}{s/2} \quad (16)$$

$$\text{C üçgeni için; } \tan \theta^* = \frac{(c - d)}{s} \quad (17)$$

$$\text{D üçgeni için; } \tan \theta^* = \frac{\left(e - \frac{a + d}{2}\right)}{s/2} \quad (18)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Dikkat edilirse bu eşitlikler, üçgenlerin kesme yönündeki görünür eğimleri sanki hep kesme vektörüne karşıymış gibi yazılmıştır. Oysa Şekil 4'ten de açıkça izleneceği üzere, kesme yönünde sadece A ve B üçgenlerinin görünür eğimleri kesme vektörüne karşı olup, C ve D üçgenlerinin görünür eğimleri ise kesme vektörünün yönüne doğrudur. Dolayısıyla yukarıdaki eşitlikler hesaplandığında bulunan görünür eğim ($\tan \theta^*$) değerleri A ve B üçgenleri için pozitif (+), C ve D üçgenleri için negatif (-) işaretli olacaktır. Anlaşılabacağı üzere bu eşitlikler algoritmik olup, yazımında işaret kontrolü esas alınmıştır. I. ve II. varsayımlara koşul olarak; görünür eğimi pozitif (+) işaretli olan A ve B üçgenleri üzerinde değme gelişebilecek, görünür eğimi negatif (-) işaretli olan C ve D üçgenleri üzerinde ise değme gelişemeyecektir. A ve B üçgenlerinin alanlarının toplamı, hücre içindeki olası değme alanının sayısal değerini tanımlayacaktır. Sayısallaştırılmış süreksizlik yüzeyi verilerinden oluşturulmuş eş aralıklı kare ağ içinde bulunan her kare hücre için



Şekil 4. $s \times s$ boyutundaki kare ağ (grid) hücresi içinde oluşturulan üçgenlerin kesme yönündeki görünür eğim açıları (θ^*)

bu üçgenleştirme işlemi yapılır ve anlatılan algoritma uygulanırsa, her hücre içindeki kesme yönünde kesme vektörüne karşı görünür eğimli olan alanlar bulunmuş olur. Bu alanların tüm süreksizlik yüzeyi genelindeki toplamı, kesme yönündeki maksimum olası değme alanını (A_0) verir. III. varsayım kapsamında; seçilecek herhangi bir görünür eşik eğim açısı (θ_{cr}^*) ve bu açıdan daha yüksek olan diğer tüm görünür eğim açıları ile tanımlı ve kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı eğimli olan alanların toplamı ise toplam potansiyel değme alanını (A_{θ}^*) verecektir. Yaklaşımın uygulanması sırasında, yüzey üzerinde değeri sıfırdan büyük olan hesaplanabilir en küçük görünür eğim açısı (θ_{min}^*), bu çalışmada yüzeylerin sayısallaştırılmasında kullanılan çözünürlük değerlerine bağlı olarak 2.86° 'dir. 2.86 derecelik artışlar ile $0^\circ - \theta_{max}^*$ arasında değişen farklı görünür eğim açıları (θ^*) için A_{θ}^* değerleri hesaplanarak $A_{\theta}^* - \theta^*$ ilişkisi çizildiğinde, elde edilen eğrinin şekli içbükey olup, bu ilişkiyi en iyi kübik regresyon modeli tanımlamaktadır. “ $Y=b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3$ ” denklemi ile ifade edilen kübik regresyon eğrisinin içbükeylik derecesi, bu denklemdeki “ b_2 ” sabiti tarafından denetlenmekte olup, bu sabit Graselli ve diğerleri (2002) tarafından tanımlanan şekil parametresine (C) karşılık gelmektedir.

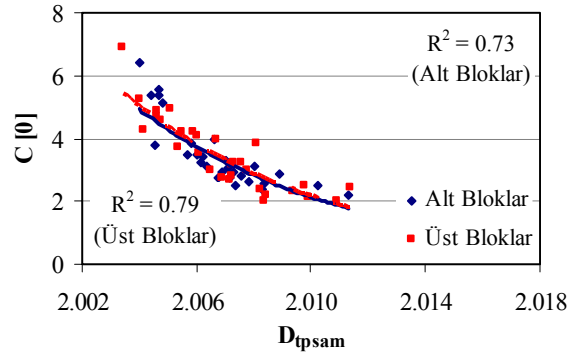
Sayısallaştırma işlemi ile elde edilen 2-boyutlu veri setlerine değme alanları yaklaşımı uygulanmış, bu sayede araştırmada kullanılan süreksizlik örneklerinin alt ve üst blok yüzeyleri için kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler (Graselli vd., 2002); maksimum olası değme alanı (A_0), toplam potansiyel değme alanı (A_{θ}^*), en büyük görünür eğim açısı (θ_{max}^*), şekil parametresi (C) ve kesme yönünde yüzeydeki açısallığın değişimini tanımlayan θ_{max}^*/C oranı değerleri hesaplanmıştır.

Yüzey pürüzlülük parametrelerinin birbirleri ve kesme dayanımı oranları ile ilişkisi

Şekil parametresi C ve θ_{max}^*/C oranının değerleri yön bağımlıdır. Bu parametreler doğrudan kesme deneylerindeki kesme yönünde hesaplanmıştır. Diğer taraftan, fraktal boyutlar olan D_{psd} ve D_{tpsam} yönden bağımsız olarak tüm yü-

zeyin pürüzlülüğünü tanımlayan parametrelerdir. Bununla birlikte, yönden bağımsız olan fraktal boyut değerleri (D_{psd} ve D_{tpsam}) ile kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler (C ve θ_{max}^*/C) birbirleri ile karşılaştırılmış ve aralarındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Daha yüksek C değerleri daha az pürüzlü yüzeyleri tanımlamaktadır. C değerlerinin aksine daha yüksek fraktal boyut değerleri daha pürüzlü yüzeyleri işaret etmektedir. Bu durumda, C parametresi ile D_{tpsam} değerleri arasında ters orantılı bir ilişki beklenecektir. Şekil 5'te görüldüğü gibi üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri arttıkça, bir başka deyişle pürüzlülük arttıkça, C parametresinin değerleri azalmaktadır. Söz konusu iki parametre arasındaki ilişki üsteldir.

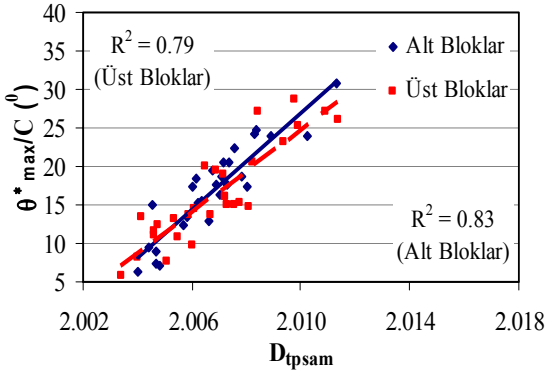


Şekil 5. Kesme yönündeki şekil parametresi (C) ile yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) arasındaki ilişki

Diğer taraftan, kesme yönünde yüzeydeki açısallığın değişimini tanımlayan θ_{max}^*/C oranı değerleri ile aynı yüzeyler için hesaplanan D_{tpsam} değerleri arasında orantılı bir ilişki bulunmuştur (Şekil 6). D_{tpsam} değerleri arttıkça bir başka deyişle, pürüzlülük arttıkça kesme yönündeki θ_{max}^*/C oranının değerleri de artmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğünün sayısal tanımı üzerine olan çalışmaların çoğunda, geliştirilecek kesme dayanımı ölçütlerinde kullanılabilir nitelikte pürüzlülük parametrelerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle, hem fraktal boyutların (D_{tpsam} ve D_{psd}) hem de kesme yönünde hesaplanan yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametrelerin (C ve θ_{max}^*/C), kesme dayanımları

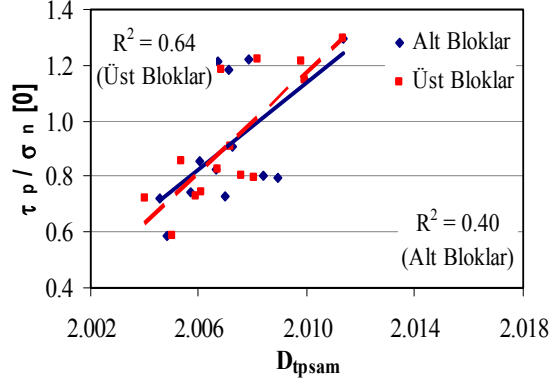
ile ilişki kurabilme yeteneklerinin araştırılması ve anlamlılıklarının sınılanması son derece önemlidir. Örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri için hesaplanan bu parametrelere ait değerler, aynı örneklerin laboratuvarında $\sigma_n = 300$ kPa sabit normal gerilme altında kesilmesiyle elde edilen en büyük kesme dayanımları (τ_p) ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sırasında, kesme yer değiştirmesinin başlaması ile birlikte yüzeyler üzerinde etkili olan kesme vektörlerinin yönünde yer alan ve bu vektörlerin doğrultusuna dik olan kenarlarda yoğunlaşan çekme gerilmeleri, bazı örneklerde, bu kenarlardaki bir miktar malzemeyi kopararak yüzeylerden ayırmıştır. Elde edilen dayanım değerlerinin pürüzlüleri yenmek için gerekli olan gerilmeler olduğundan emin olmak ve olası ilişkilerin güvenilirliğini artırmak için, karşılaştırmalarda kopma olayından etkilenmemiş ya da çok az etkilenmiş örnekler kullanılmıştır. Bulunan en büyük kesme gerilmeleri (τ_p), uygulanan sabit normal gerilme değerine (σ_n) oranlanmış ve karşılaştırmalarda en büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) kullanılmıştır. Üçgen prizma yüzey alanı yöntemi ile hesaplanan fraktal boyutlar (D_{tpsam}) ile en büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) arasındaki ilişki Şekil 7’de sunulmuştur.



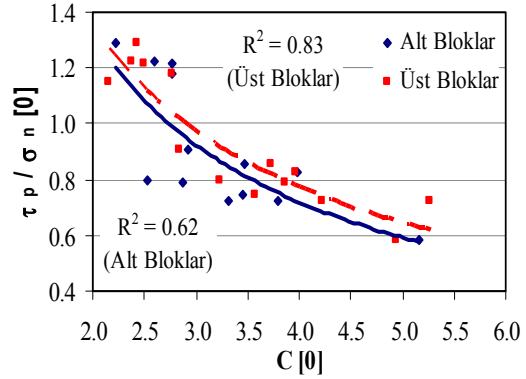
Şekil 6. Kesme yönündeki θ^*_{\max}/C oranı ile yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) arasındaki ilişki

Fraktal boyut değerleri arttıkça bir başka deyişle, yüzey pürüzlülüğü arttıkça en büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) da artış göstermektedir. Pürüzlülük ile ters orantılı olan C değerleri arttıkça, bir başka deyişle, kesme yönündeki yüzey

zey pürüzlülüğü azaldıkça, en büyük kesme dayanımı oranları beklendiği gibi azalış göstermektedir. Bu ilişki üstel olup Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 7. En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) ile yüzey fraktal boyutlarının (D_{tpsam}) karşılaştırılması

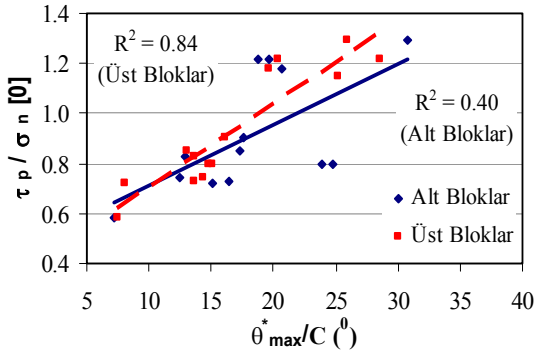


Şekil 8. En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) ile kesme yönündeki şekil parametresinin (C) karşılaştırılması

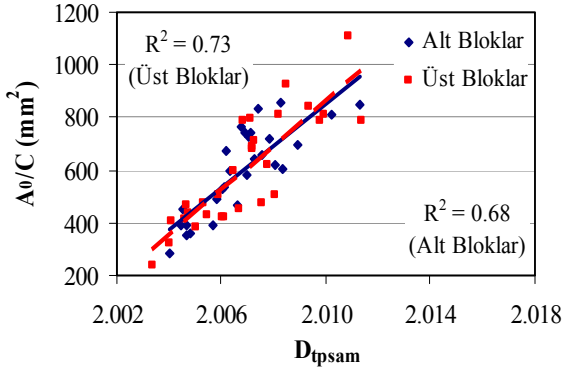
Diğer taraftan, θ^*_{\max}/C oranı değerleri ile en büyük kesme dayanımı oranları arasında orantılı bir ilişki izlenmektedir (Şekil 9). Bu durum daha önce Graselli (2001) tarafından da belirtilmiştir. Her iki bulgu birbiri ile uyumludur. θ^*_{\max}/C oranı arttıkça en büyük kesme dayanımı oranı da artmaktadır.

Daha yüksek A_0 değerleri, kesme yönünde kesmeye karşı koyan daha fazla alan anlamına gelmektedir. A_0 değeri arttıkça kesme dayanımının

da artması beklenmektedir. Diğer taraftan, en büyük kesme dayanımı oranı (τ_p/σ_n), şekil parametresi (C) arttıkça azalmaktadır. Bu çalışmada, alt ve üst blok yüzeyleri için hesaplanan A_0 değerleri, aynı yüzeyler için hesaplanan C değerlerine oranlanmış, yeni bir parametre olarak A_0/C oranı hesaplanmıştır. A_0/C oranının yüzey geometrisini tanımlamadaki başarısını ve kesme dayanımı ile ilişki kurabilme yeteneğini sınamak amacıyla, bu oranın kesme yönündeki değerleri; fraktal boyutlar (D_{tpsam}), kesme yönündeki θ^*_{max}/C oranı değerleri ve ayrıca en büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) ile karşılaştırılmıştır (Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12).



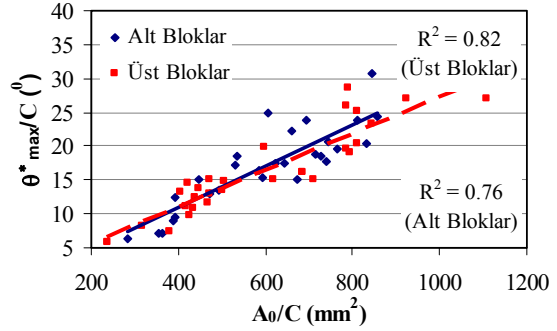
Şekil 9. En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) ile kesme yönündeki θ^*_{max}/C oranlarının karşılaştırılması



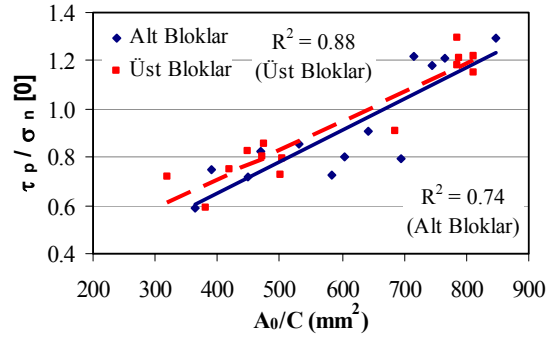
Şekil 10. Kesme yönündeki A_0/C oranı ile yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) arasındaki ilişki

Bu oranın, hem geometrik parametreler ile hem de mekanik dayanım değerleri ile doğru orantılı bir ilişki içinde olduğu tespit edilmiştir. En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) ile en iyi

ilişkiyi A_0/C oranı sunmuştur. Pürüzlülük ile doğru orantılı olan bu oran, yüzey üzerinde herhangi bir yöndeki geometriyi tanımlamak için uygun bir parametredir. D_{psd} ile diğer pürüzlülük parametreleri ve τ_p/σ_n oranları arasında önemli bir ilişki gözlenmemiş ve ilgili analizlere yer verilmemiştir. Yöntemin uygulanmasındaki güçlükler Babadağlı ve Develi (2001)'de tartışılmıştır.



Şekil 11. Kesme yönündeki θ^*_{max}/C ile A_0/C oranları arasındaki ilişki



Şekil 12. En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) ile kesme yönündeki A_0/C oranlarının karşılaştırılması

Sonuçlar

Geliştirilen yüzey tarama cihazının ölçüm doğruluğu oldukça güvenilirdir. Üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle hesaplanan fraktal boyutlar (D_{tpsam}) yüzey geometrisini alansal olarak tanımlamada başarılı bulunmuştur. Daha pürüzlü yüzeyler için daha yüksek fraktal boyut değerleri hesaplanmaktadır. Değme alanları yöntemiyle hesaplanan θ^*_{max}/C , A_0/C ve C parametreleri, yön bağımlı pürüzlülüğü başarıyla tanımlamak-

tadır. Olası kayma yönlerinin değerlendirildiği kaya şevi analizlerinde, saha mühendisleri tarafından bu parametrelerin kullanılması yararlı olacaktır. Ancak, θ_{\max}^*/C ve A_0/C parametrelerinin pürüzlülük ile doğru orantılı, C parametresinin ise pürüzlülük ile ters orantılı olduğu unutulmamalıdır. D_{tpsam} değerleri ile C , θ_{\max}^*/C ve A_0/C parametrelerinin birbirleri ve kesme dayanımı değerleriyle önemli ilişkiler sunması, yüzey pürüzlülüğünün sayısal tanımında kullanılabilecekleri anlamına gelmektedir. Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemi daha büyük boyuttaki yüzeylere uygulanarak sonuçları sınanmalı, spektrum grafiklerine filtreleme teknikleri uygulanarak sonuçlar üzerine etkisi araştırılmalıdır.

Semboller

$S(k)$:Güç
k	:Dalga sayısı
β	: $\log S(k)$ - $\log k$ ilişkisinde regresyon doğrusunun eğimi
$S(s)$:Toplam yüzey alanı
sxs	:Hücre boyutu
b	: $\ln [S(s)] - \ln (sxs)$ ilişkisinde regresyon doğrusunun eğimi
D_{psd}	:Güç spektrum yoğunluğu analizi ile hesaplanan fraktal boyutlar
D_{tpsam}	:Üçgen prizma yüzey alanı yöntemi ile hesaplanan fraktal boyutlar
σ_n	:Sabit normal gerilme
τ_p	:Süreksizliğin en büyük kesme dayanımı
A_0	:Maksimum olası değme alanı
A_θ^*	:Toplam potansiyel değme alanı
θ^*	:Görünür eğim açısı
θ_{\max}^*	:En büyük görünür eğim açısı
C	:Şekil parametresi
θ_{\max}^*/C	:Yüzey açısallığının değişimi

Kaynaklar

Aydan, Ö., Shimizu, Y. ve Kawamoto, T., (1996). The anisotropy of surface morphology characteristics of rock discontinuities, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **29**, 1, 47-59.

Babadağlı, T. ve Develi, K., (2000). Fractal analysis of natural and synthetic fracture surfaces of geothermal reservoir rocks, *Proceedings, 2000 World Geothermal Congress*, 2515-2520, Kyushu-Tohoku, Japan.

Babadağlı, T. ve Develi, K., (2001). On the application of methods used to calculate the fractal di-

mension of fracture surfaces, *Fractals*, **9**, 1, 105-128.

Babadağlı, T. ve Develi, K., (2003). Fractal characteristics of rocks fractured under tension, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **39**, 73-88.

Barton N. R., (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, **7**, 287-332.

Barton, N. R. ve Choubey, V., (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, **10**, 1-54.

Berry M. V. ve Lewis Z. V., (1980). On the Weierstrass - Mandelbrot fractal function, *Proceedings, The Royal Society of London, Series A370*, 459-484.

Brigham, O. E., (1974). *The fast Fourier transform*, 252, Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA.

Brown, S. R. ve Scholz, C. H., (1985). Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, *Journal of Geophysical Research*, **90**, 575-582.

Carr J. R. ve Warriner J. B., (1989). Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, **26**, 2, 253-263.

Clarke, K. C., (1986). Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method, *Computers & Geosciences*, **12**, 5, 713-722.

Develi, K., (1996). Harşit vadisi-Kürtün barajı aks yeri kayaçlarında çatlak yüzeylerindeki pürüzlülüğün sayısal tanımı, *Y. Lisans tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Develi, K. ve Babadağlı, T., (1998). Quantification of natural fracture surfaces using fractal geometry. *Mathematical Geology*, **30**, 8, 971-998.

Develi, K., Babadağlı, T. ve Çömlekçi, C., (2001). A new computer controlled surface scanning device for measurement of fracture surface roughness, *Computers & Geosciences*, **27**, 3, 265-277.

Develi, K. ve Vardar, M., (1998). Süreksizliklerin yüzey pürüzlülüğünün fraktal geometri yardımıyla sayısal tanımı, *4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 217-225, 22-23 Ekim, Zonguldak.

Gentier, S., Lamontagne, E., Archambault, G. ve Riss, J., (1997). Anisotropy of flow in a fracture undergoing shear and its relationship to the direction of shearing and injection pressure, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **34**, 3/4, 94, 412.

Gentier, S., Riss, J., Archambault, G., Flamand, R. ve Hopkins, D. L., (2000). Influence of fracture geometry on sheared behaviour, *International*

- Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanical Abstracts*, **37**, 161-174.
- Grasselli, G., (2001). Characterization of the parameters that govern the peak shear strength of rock joints, *Proceedings*, 38th US Rock Mechanics Symposium, DC Rocks 2001, 817-821, Washington DC, USA.
- Grasselli, G., Wirth, J. ve Egger, P., (2002). Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39**, 789-800.
- Huang, T. H. ve Doong, Y. S., (1990). Anisotropic shear strength of rock joints, *Proceedings*, International Symposium on Rock Joints, 211-218, Loen, Norway.
- ISRM (1981). *Suggested method for laboratory determination of direct shear strength*, in Brown, E. T., eds, *Rock characterization testing and monitoring - suggested methods*, Pergamon Press, 135-137, London.
- La Pointe, P. R. ve Barton, C. C., (1995). *Creating reservoir simulations* in Barton, C.C. ve La Pointe, P.R., eds, *Fractals in Petroleum Geology and Earth Process*, Plenum Press, 267-268, New York.
- Ladanyi, B. ve Archambault, G., (1969). Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass, *Proceedings*, 11th US Symposium on Rock Mechanics, 105-25, Berkeley.
- Lee, Y. H., Carr J. R., Barr D. J. ve Haas C. J., (1990). The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles, *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanical Abstracts*, **27**, 6, 453-464.
- Mc Williams, P. C., Miller, S. M. ve Kekering, J. C., (1991). Fractal characterization of rock roughness for estimating shear strength, *Proceedings*, International Conference, Mechanics of Jointed and Faulted Rock, 331-336, Vienna.
- Patton, F. D., (1966). Multiple modes of shear failure in rock., *Proceedings*, 1st Congress of International Society of Rock Mechanics, **1**, 509-513, Lisbon, Portugal.
- Press, W. H. ve Teukolsky, S. A., (1992). *Numerical recipes in C*, 504, Cambridge University Press, USA.
- Saupe, D., (1988). *Algorithms for random fractals*, in Peitgen, H. O. ve Saupe, D., eds, *In The Science of Fractal Images*, Springer-Verlag, 71-113, New York.
- Tse, R. ve Cruden, D. M., (1979). Estimating joint roughness coefficients, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **16**, 303-307.
- Türk, N., Greig, M. J., Dearman, M. R. ve Amin, F. F., (1987). Characterisation of rock joint surfaces by fractal dimension, *Proceedings*, 28th US Symposium on Rock Mechanics, 1223-1236, Tucson, Arizona.
- Wang, J. S. Y., Narasimhan T. N. ve Scholz C. H., (1988). Aperture correlation of a fractal fracture, *Journal of Geophysical Research*, **93**, B3, 2216-2224.
- Yeo, I. W., Freitas M. H. ve Zimmermann R. W., (1998). Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **35**, 1051-1070.