

Araştırma Makalesi / Research Article

## Süreksizliklerde İkinci Derece Düzensizlik Açılarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

*A Comparative Assessment of the Second Degree Asperity Angles of Discontinuities*

Kamil KAYABALI<sup>1</sup>, Emre PINARCI<sup>2</sup>, Farhad HABIBZADEH<sup>3</sup>, Muhammet BEYHAN<sup>4</sup>

Aylin FİDAN ÜZGÜN<sup>5</sup>, Mehmet YAKUT<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı/Ankara

<sup>2</sup> Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Sarıçam/Adana

<sup>3</sup> National Iranian Copper Industries Company, NICICO, Tahran Province, Iran

<sup>4</sup> Mitto Consultancy, Ankara

<sup>5</sup> Yenimahalle Belediyesi, Ankara

<sup>6</sup> DSİ Genel Müdürlüğü, TAKK Daire Başkanlığı, Ankara

Geliş (Received): 6 Mayıs (May) 2024 / Düzeltme (Revised): 22 Mayıs (May) 2024 / Kabul (Accepted): 25 Mayıs (May) 2024

### ÖZ

Kaya kütlelerinin mühendislik davranışı, sağlam kayanın dayanımından daha çok süreksizlik yüzeylerinin dayanımı tarafından kontrol edilir. Süreksizlik yüzeylerinin kesme dayanımı üzerinde de pürüzlülük açılarının çok önemli rolü vardır. Süreksizlik yüzeylerinin dayanımı laboratuvarında doğrudan kesme deneyi ile belirlenebilmektedir. Ancak, arazideki doğal süreksizliklerden laboratuvarında kesme deneyi için uygun süreksizlik yüzeyleri elde etmek ve kesme deney cihazına yerleştirmek her zaman mümkün olamamaktadır. Bu çalışmada 9 farklı kaya üzerinde doğrudan kesme deneylerinin yanı sıra tiltmetre düzeneği ile temel sürtünme açıları ( $\phi_b$ ), elektromekanik profilometre cihazıyla da süreksizlik yüzeylerindeki ikinci derece pürüzlülük açıları ( $i$ ) belirlenmiştir. Bu iki değerden de toplam sürtünme açıları elde edilmiştir ( $\phi_t = \phi_b + i$ ). Bu değerler farklı normal gerilmeler altında doğrudan kesme deneyleri yapılarak, Patton çift eğrili yenilme zarfından elde edilen  $\phi_b$  ve  $\phi_t$  sonuçları ile karşılaştırılmış ve ne derece uyumlu oldukları değerlendirilmiştir. Farklı normal gerilme seviyelerinde gerçekleştirilen doğrudan kesme deneylerinden elde edilen yenilme zarflarının 9 numune için de Patton çift eğrili yenilme modeline uyduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre doğrudan kesme deneylerinden elde edilen temel sürtünme açıları ve toplam sürtünme açıları profilometre ve tiltmetre deneylerinden elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında; temel sürtünme açılarının toplam test edilen 9 kaya için oldukça yüksek bir uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir ( $R^2= 0,91$ ). Toplam sürtünme açılarının ise yüksek dayanıma sahip iki kaya hariç yine yüksek doğruluk seviyesinde elde edilebileceği görülmüştür ( $R^2= 0,86$ ). Doğrudan kesme deneyinin yapılmasına olanak olmadığı durumlarda profilometre ve tiltmetre deneyleri ile de temel sürtünme açısı ve toplam sürtünme açısı değerlerine bir yaklaşımda bulunulabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Süreksizlik, ikinci derece düzensizlik, Patton çift eğrili yenilme modeli, doğrudan kesme deneyi, tiltmetre, profilometre.

**ABSTRACT**

The engineering behavior of rock masses is controlled more by the strength of the discontinuity surfaces than by the strength of the intact rock. Asperity angles play a very important role in the shear strength of discontinuity surfaces. The strength of discontinuity surfaces can be determined by direct shear tests in the laboratory. However, it is not always possible to obtain suitable discontinuity surfaces from natural discontinuities in the field and place them in the shear test device. In this study, in addition to direct shear tests on 9 different rocks, basic friction angles ( $\phi_b$ ) were determined with a tiltmeter device and the second degree asperity angles ( $i$ ) on the discontinuity surfaces were determined with an electromechanical profilometer device. From these two values, the total friction angles were obtained ( $\phi_t = \phi_b + i$ ). These values were compared with the results of  $\phi_b$  and  $\phi_t$  obtained from Patton's bi-linear failure envelope by direct shear tests under different normal stresses and their compatibility was evaluated. It was determined that the failure envelopes obtained from direct shear tests performed at different normal stress levels comply with the Patton bi-linear failure model for all 9 specimens. According to the results obtained, when the basic friction angles and total friction angles obtained from direct shear tests were compared with the values obtained from profilometer and tiltmeter tests; it was determined that the basic friction angles were in a very high level of agreement for all 9 rocks tested ( $R^2 = 0.91$ ). Total friction angles can be obtained with high accuracy except for two rocks (granodiorite and marble) with high strength ( $R^2 = 0.86$ ). It was concluded that basic friction angles and total friction angles can also be obtained by profilometer and tiltmeter tests whenever it is not possible to direct shear tests.

**Keywords:** Discontinuity, second-degree asperities, Patton bi-linear failure model, direct shear test, tiltmeter, profilometer.

**GİRİŞ**

Kaya kütlelerinin mühendislik davranışları süreksizlik dayanımından büyük ölçüde etkilenir çünkü süreksizlik yüzeylerinin dayanımı genellikle kırıksız kayanın dayanımından oldukça düşüktür. Kaya ortamında gerçekleştirilecek bir mühendislik projesi için süreksizlik dayanımlarının doğru bir şekilde karakterize edilmesi hayati önem taşır. Dolgusuz bir süreksizliğin kayma dayanımını etkileyen başlıca faktörler; kaya türü, süreksizlik üzerindeki normal gerilmenin büyüklüğü, süreksizliğin pürüzlülüğü ve boyutu, bozuşma derecesi, süreksizlik yüzeyi dayanımı, nem ve su basıncıdır. Üzerindeki dalgalanmalar ve düzensizliklerin doğal süreksizlik yüzeylerinin kayma davranışı üzerinde etkisi oldukça büyüktür. Patton (1966), düzensizliklerin birincil ve ikincil olarak iki sınıfa ayrılabilceğini öne sürmüştür. Birincil dereceden düzensizlikler tabakalanma yüzeylerindeki büyük dalgalanmalara karşılık gelirken, ikinci dereceden düzensizlikler

yüzeydeki küçük çıkıntılar ve dalgalanmalardır ve daha yüksek pürüzlük açısı ( $i$ ) değerlerine sahiptir.

Kaya mühendisliği projelerinde düz ve düzlemsel süreksizliklerin kesme mukavemetinin kohezyon ( $c$ ) ve sürtünme açısı ( $\phi$ ) cinsinden ifade edildiği bir Mohr-Coulomb malzemesi olduğu varsayılır ve aşağıdaki doğrusal eşitlikle ifade edilir (Coulomb, 1776; Mohr, 1900).

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

Süreksizliklerin pürüzlü olduğu durumda pürüzlülük yüzeyin kesme dayanımını artırır ve bu artış kayada yapılan kazıların duraylılığını önemli ölçüde etkiler. Patton (1966) duraysız kireçtaşı şevlerinde tabakalanma düzlemi izlerinin fotoğraflarından pürüzlülük açısının ( $i$ ) ortalama değerini ölçerek tabakalanma düzlemi izinin eğiminin yaklaşık olarak düzlemsel yüzeyler üzerindeki laboratuvar testlerinden elde edilen kayanın sürtünme açısı  $\phi_b$  ile ortalama  $i$  açısının toplamına eşit olduğunu bulmuştur.

Daha sonra “testere dişi” şeklindeki örnekler üzerinde yaptığı doğrudan kesme deneyleri ile çift eğrili yenilme modelini geliştirmiştir (Patton, 1966; Wyllie & Mah, 2005; Hoek, 2023; Şekil 1). Başlangıçta bozulumamış ve birbirine kenetlenmiş pürüzlü bir yüzey ( $\phi_b + i$ ) toplam sürtünme açısına sahiptir. Artan normal gerilme ve yer değiştirme ile pürüzlülükler tıraşlanır ve sürtünme açısı, kayanın temel ( $\phi_b$ ) veya rezidüel ( $\phi_r$ ) sürtünme açısının minimum değerine kadar giderek azalır. Bu genişleme-kayma durumu Mohr diyagramında, başlangıç eğimi ( $\phi + i$ )’ye eşit olan ve daha yüksek normal gerilmelerde  $\phi_b$ ’ye düşen çift eğrili bir dayanım zarfı olarak temsil edilir (Patton, 1966; Wylie & Mah, 2005).

Patton testere dişli numunelerin kesme mukavemetini şu şekilde ifade etmiştir:

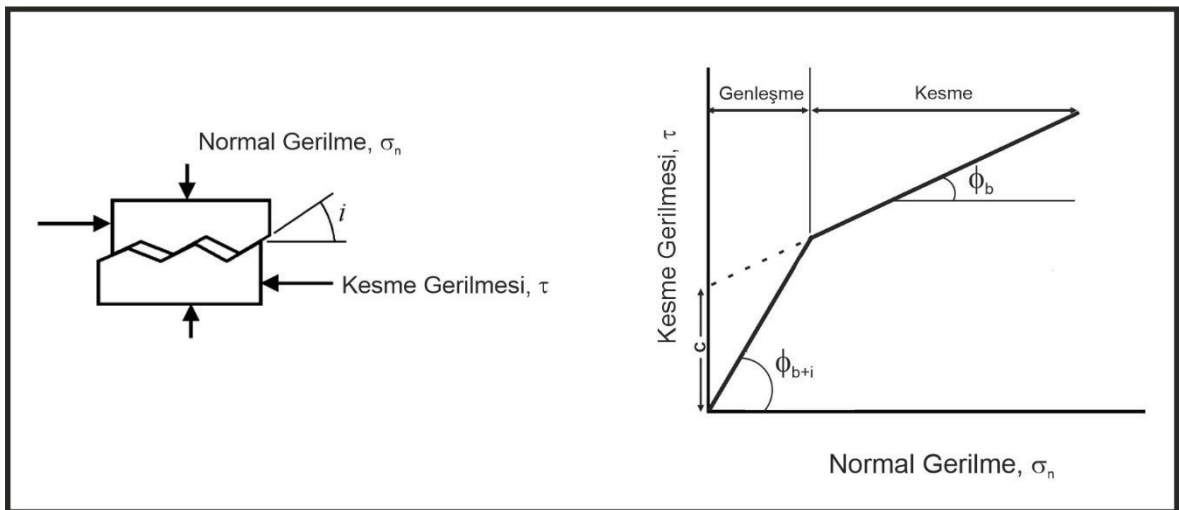
$$\tau = \sigma_n + \tan(\phi_b + i) \quad (2)$$

Burada;

$\phi_b$ : süreksizlik yüzeyinin temel sürtünme açısı

$i$ : testere dişi yüzeyinin açısıdır.

Brady ve Brown (2005) pürüzlülüğü bir süreksizliğin ortalama düzlemine göre doğal yüzey dalgalılığı ve düzensizliğinin bir ölçüsü olarak tanımlamıştır. Doğrusal profillerden süreksizlik pürüzlülüğünün tahmin edilmesi, ölçümün yapılacağı ölçek üzerinde bazı fiziksel araçlarla düz bir çizgiye yüzeyden olan mesafenin belirlenmesini gerektirir. Laboratuvar ortamında bu işlem profil ölçüm aletleri kullanılarak gerçekleştirilebilir (Poropat, 2008). Doğrusal süreksizlik profillerini daha kolay ve hızlı bir şekilde elde etmek için, doğruluk derecesi düşük olan profil tarakları ve cetveller küçük ölçekli düzensizlik ve büyük ölçekli dalgalılık bileşenlerini ölçmek için yaygın biçimde kullanılmaktadır. Laboratuvar ortamında süreksizliklerin pürüzlülük açıları elektromekanik profilometreler aracılığıyla yüksek hassasiyet derecesi ile ölçülebilmektedir. Profilometreler yüksek çözünürlük ve doğrulukta veri elde etme kapasitesine sahiptir.



Şekil 1. Patton (1966)’ın pürüzlü bir eklem için  $\sigma - \tau$  ilişkisini temsil eden modeli.

Figure 1. Patton's (1966) model representing the  $\sigma - \tau$  relationship for a rough joint.

Kayabalı, Pınarcı, Habibzadeh, Beyhan, Fidan Üzgün, Yakut

Temel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) düz bir yüzeyde ölçülen sürtünme açısı olup, malzemenin mineral bileşimi ve dokusu tarafından belirlenen kayanın içsel bir özelliğidir (Patton 1966; Barton 1973; Jang vd., 2018).  $\phi_b$  değerleri önceden kesilmiş düzleme sahip numuneler kullanılarak yapılan doğrudan kesme deneyleri, üç eksenli sıkışma deneyleri ve tiltmetre deneyleri ile de elde edilebilmektedir.  $\phi_b$  değerinin ölçümünü için henüz standart bir yöntem önerilmese de doğrudan kesme deneyinin en doğru sonucu verdiği düşünülmektedir. Tiltmetre deneyinde bir düzlem üzerinde eğilen numunenin kaydığı andaki açı ölçülerek  $\phi_b$  değeri belirlenir. Basit bir yöntemdir ve kolayca uygulanır ve bu nedenle temel sürtünme açısı ölçümleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ölçümler için testere ile kesilmiş yüzeyler veya zımparalanmış yüzeyler kullanılabilir (Horn & Deere, 1962; Stimpson, 1981; Cruden & Hu, 1988; Bruce vd., 1989; Wines & Lilly, 2003; Alejano vd., 2012; Ruiz & Li, 2014; González vd. 2014 Jang vd., 2018, Zhang vd., 2019).

Süreksizlik yüzeyleri üzerinde araziden alınan numuneler üzerinde doğrudan kesme deneyleri yapılarak  $c$  ve  $\phi$  değerlerini tespit edebilmek her ne kadar mümkün olsa da araziden kesme cihazı hücrelerine uygun süreksizlik yüzeyi bulmak, cihaz hücrelerine yerleştirilecek

boyutlara getirmek mümkün ise de çok zordur. Proje kısıtları, zaman ve bütçe yetersizlikleri bu deneylerin yapılabilmesini oldukça güçleştirebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı çok sayıda farklı türdeki kayada yapay olarak oluşturulmuş süreksizlikler üzerinde doğrudan kesme deneyleri yapılarak elde edilen  $\phi_b$  ve  $\phi_t$  değerlerinin, tiltmetre deneyinden bulunan  $\phi_b$  değerleri ve profilometre kullanılarak ölçülmüş  $i$  değerleri ile birlikte değerlendirerek toplam sürtünme açısının ( $\phi_t = \phi_b + i$ ) karşılaştırmalı analizini yapmaktır.

## MALZEME VE YÖNTEM

Çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerinden elde edilmiş ve farklı petrografik özelliklere sahip 9 adet kaya örneği kullanılmıştır (Çizelge 1). Mermer firmalarından 15 cm'lik küpler şeklinde temin edilen kayalar laboratuvarında özel bir düzeneğe ile (Şekil 2) ortadan ikiye ayrılarak yapay süreksizlik düzlemleri elde edilmiştir. Tek eksenli deney cihazının alt ve üst başlıkları yerine balta ağzı şekilli uzun kesme aparatları monte edilmiştir. Bu kesme aparatları arasına tam ortasından yerleştirilen küp şekilli numune üzerine baskı yapılarak yük uygulanmış ve eş düzlemsel yapay süreksizler elde edilmesi sağlanmıştır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan numunelerin petrografik tanımlamaları.

Table 1. Petrographic descriptions of the samples used in the study.

No.	Kayaç adı	Mineral bileşimi
1	Diyabaz	Plajiolklas, piroksen, amfibol, opak mineraller
2	İgnimbrit-1	Plajiolklas (oligoklas ve andezin türünde), piroksen, sanidin, biyotit, opak mineraller
3	İnce kristalen diyabaz	Plajiolklas, piroksen, opak mineraller
4	İgnimbrit-2	Plajiolklas, kuvars, opak mineraller, bazalt, andezit, dasit, trakit ve pomza kaya parçaları
5	Trakit	Plajiolklas, sanidin, piroksen, amfibol, opak mineraller
6	Litik Tüf	Plajiolklas, kalsit, opak mineraller, bazalt, trakibazalt, kuvarsit, andezit kaya parçaları
7	Granodiyorit	Ortoklaz, plajiyoklas, mikroklin, kuvars, amfibol, biyotit, titanit, opak mineraller
8	Mermer	Kalsit, ankerit, az aragonit
9	İgnimbrit-3	Kuvars, plajiyoklas, sanidin, biyotit (piroklastik), opak mineraller



Şekil 2. Yapay süreksizlik elde etmede kullanılan düzenek.

*Figure 2. Apparatus used to obtain artificial discontinuities.*

Özel düzenek ile ikiye ayrılan numuneler göz ile incelenmiş ve bazı numunelerin kırılma yüzeylerinin konkav olduğu, eş düzlemsel yüzeyler oluşturacak şekilde ikiye ayrılmadığı görülmüştür. Bu numuneler, doğrudan kesme deneylerinde doğru sonuçları vermeyeceğinden dolayı kullanılmamıştır.

### Doğrudan kesme deneyi

Doğrudan kesme deneylerini gerçekleştirmek amacıyla eş düzlemsel süreksizlik yüzeylerine sahip olacak şekilde ikiye ayrılan numuneler kesme kutusu hücresine

yerleştirilmiş ve örneği kutuya sabitlemek amacıyla kalıp ve numunenin arası uygun kıvamda hazırlanan alçı ile doldurulmuştur. Alçının kurumması için 24 saat beklenmiştir. Deney öncesinde kesme kutusu hücresinin iç kısımları gres ile yağlanarak deney sonunda alçının metal yüzeyden kolay ayrılması sağlanmıştır. Bu sayede numunelerin kesme hücresinden kolay bir şekilde çıkarılabilmesi sağlanmıştır. Hazırlanmış olan numuneler kesme kutusu içerisine yerleştirilerek, hücre üzerinde bulunan vidalar yardımıyla süreksizlik düzlemlerinin yatay düzleme paralel olması sağlanmıştır

Çalışmada kullanılan servo kontrollü doğrudan kesme cihazı “Wille Geotechnik” markasıyla tasarlanmış ve üretilmiştir. Normal ve kesme yükleri, iki hidrolik pompa tarafından uygulanmaktadır. Hidrolik pompalar maksimum 300 kN normal ve kesme yükü uygulayabilme kapasitesine sahiptir. Kesme cihazı hem statik hem de dinamik kesme kuvvetleri uygulayabilmektedir. Deney sırasında yatay ve dikey yer değiştirmeler 25 mm ölçüm kapasitesine ve 0,001 mm ölçüm hassasiyetine sahip deformasyon ölçerler ile ölçülmektedir. Cihaz motorlarının ısınmasını önlemek için şebeke suyundan soğutma suyu sağlanmaktadır (Şekil 3). Elde edilen verileri kaydetmek için veri toplayıcı ve incelemek için yüksek çözünürlüklü dönüştürücüler kullanılmaktadır. Cihazda kullanılan tüm sensörler ve ölçüm üniteleri bilgisayar üzerinden GEOSys yazılımı ile kontrol edilmektedir.

Numune kalıbının içerisine daha önce bahsedildiği gibi yerleştirilen numune alçı donduktan sonra cihaz içerisine kesme düzlemine paralel olacak şekilde yerleştirilir, ayarları yapıldıktan sonra başlık kapakları kapatılarak vidaları sıkılır ve gerekli bağlantıları yapılır. Numunelere normal gerilme uygulanırken

Kayabalı, Pınarcı, Habibzadeh, Beyhan, Fidan Üzgün, Yakut

çelik numune kalıbı ve başlığın ağırlığı da dikkate alınarak normal yükler tatbik edilmiştir. Deneysel 1 mm/dk sabit kesme hızı altında gerçekleştirilmiştir.

### Profilometre Deneyi

Özel düzener ile elde edilen taze yüzeylerin pürüzlülük açısı ölçümleri profilometre cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Kaya süreksizliklerin pürüzlülükleri genellikle pürüzlülük tarağı kullanılarak belirlenir, ancak pürüzlülüklerin ölçümleri daha hassas ölçüm yapabilen farklı amaçlar için tasarlanmış elektromekanik pürüzlülük ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Profilometre cihazı yatay yönde 100 mm ve düşey yönde 50 mm ölçüm yapabilmektedir. Cihazın ölçüm hızı kapasitesi 0,02-5 mm/s arasında olup, bu çalışma kapsamında ölçme hızı 1 mm/s olarak belirlenmiştir. Ölçümler Mitutoyo marka CV-2100 model cihazla farklı yönlerde (kesme yönünü, kesme yönüne dik ve çapraz) 0,1 mikron hassasiyetinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4).

Kenar uzunluğu küçük olan numunelerde (10 cm) tek seferde ölçüm yapılabilirken, daha büyük olan numunelerde (15–20 cm) manevra yetersizliğinden dolayı ölçümler iki seferde tamamlanmıştır. Taranan yüzeyin görseli bilgisayar yazılımına aktarıldıktan sonra pürüzlülük hattı kontrol edilerek belirlenen sabit aralıklarla düzlem üzerine teğet çizilerek bu çizginin yatayla yapmış olduğu açı belirlenmiştir. Her bir kaya için yapay süreksizlikler üzerinde en az 20 adet ölçüm alınmış ve bunların aritmetik ortalamaları süreksizliğin pürüzlülük açısı ( $i$ ) olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5).



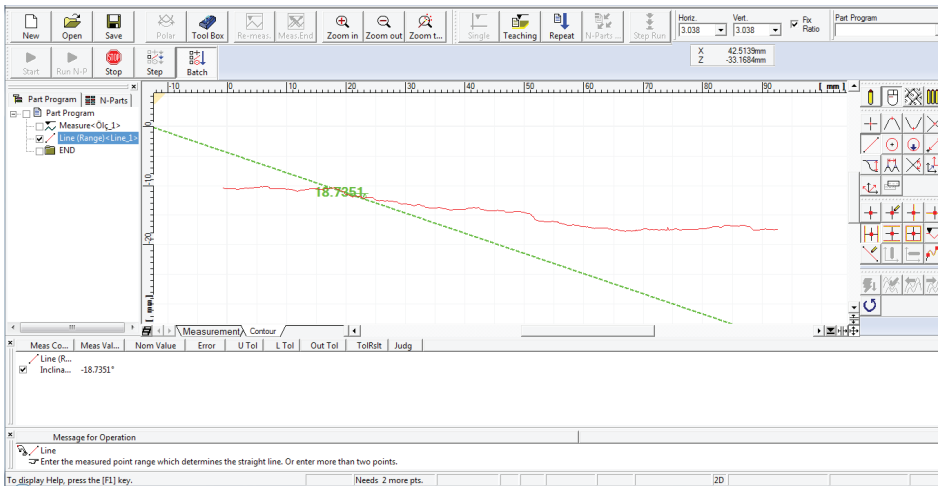
Şekil 3. Doğrudan kesme cihazı.

Figure 3. Direct shear device.



Şekil 4. Profilometre cihazı.

Figure 4. Profilometer device.



Şekil 5. Pürüzlük açısı ölçümüne ait örnek bir ekran görüntüsü.

Figure 5. An example screenshot of roughness angle measurement.

### Tiltmetre deneyi

Tiltmetre (eğdirme) deneyi, düz süreksizlik yüzeylerinin temel içsel sürtünme açılarını ( $\phi_b$ ) belirlemek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Kaya numunelerinin  $\phi_b$  değerlerinin belirlenmesi amacıyla özel olarak tasarlanmış taşınabilir bir tiltmetre düzeneği yapılmıştır (Şekil 6).

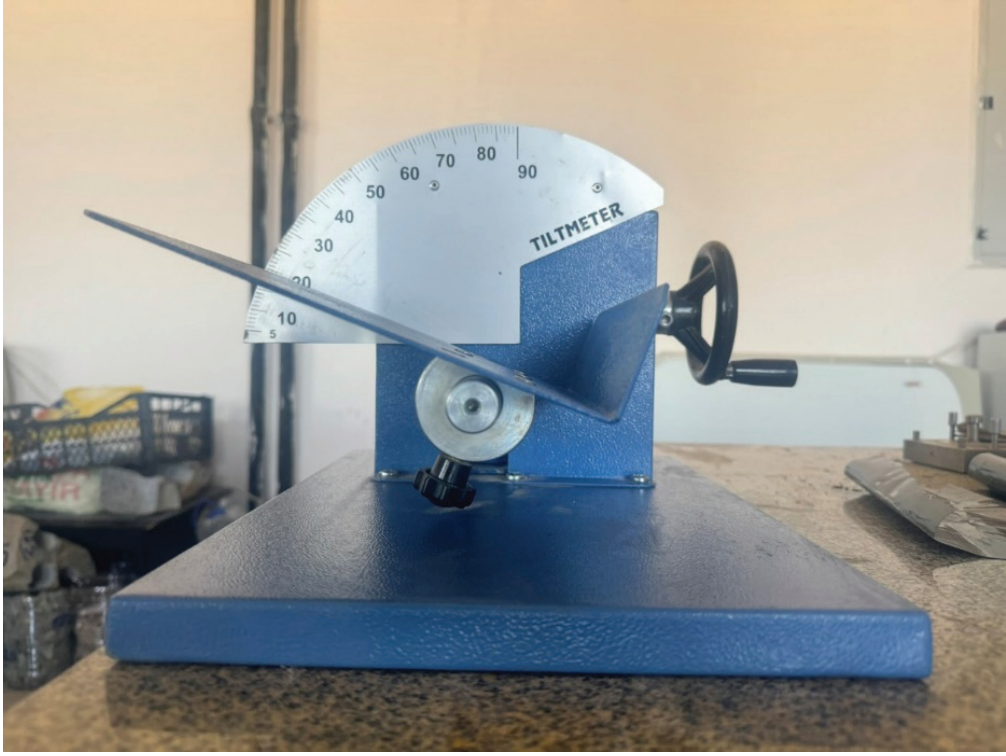
Laboratuvara getirilen ve iki parçaya ayrılmış olan numunelerden deney çiftleri oluşturulmuştur. Tiltmetre tablası yatay düzleme paralel konuma getirildikten sonra deney çiftinin taze kırılma yüzeyi dışa gelecek, testere ile kesilen yüzeyi içe gelecek şekilde deney tablasına yerleştirilmiştir. Daha sonra düzenek kolu dikkatli bir şekilde çevrilerek üstte yer alan numune hareket etmeye başladığı anda deney bitirilip düzlemin açısı kaydedilmiştir. Daha sonra örnek 90° çevrilerek aynı şekilde ikinci bir açı daha belirlenmiştir.

Dört hat için elde edilen süreksizlik kayma açılarının ortalaması temel içsel sürtünme açısını verir. Bu deneyden elde edilen  $\phi_b$  açıları, çift eğrili Patton yenilme eğrisinden elde edilen  $\phi_b$

ve profilometre deneyinden elde edilen  $i$  açıları ile birlikte  $\phi_t$  değerlerinin karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

### BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışma kapsamında kullanılan 9 farklı kayanın temel içsel sürtünme açısı değerlerini belirlemek amacıyla tiltmetre cihazında deneyler yapılmıştır. Deneyler taş testeresi ile kesilmiş yüzeyler ve karot yüzeyleri üzerinde her bir numune için 15 kez tekrar edilmiş ve bu sonuçların ortalaması kayacın  $\phi_b$  değeri olarak alınmıştır. Ölçüm sonuçlarına ilişkin veriler Çizelge 2’de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre  $\phi_b$  değeri en yüksek 9 No.’lu kaya en düşük ise 4 No.’lu kayadır. Her bir kaya türü için elde edilen verilerin değişim aralığının bir ifadesi olan ve standart sapmanın ortalamaya oranı olarak tanımlanan değişim katsayısı (COV) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler incelendiğinde verilerin dar bir aralıkta değişim gösterdiği gözlenmiştir. En yüksek COV değerinin %4,9 ile 7 No.’lu kayaya ait olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Tiltmetre deney cihazı.

Figure 6. Tiltmeter test device.

Doğrudan kesme deneylerinde yapay süreksizlik düzlemleri üzerinde  $i$  açılarını belirlemek amacıyla çok sayıda profilometre ölçümü gerçekleştirilmiştir. Her bir farklı blok üzerinde farklı yönlerde 3 ya da 4 adet yüzey taraması yapılmıştır. Yüzey taramaları doğrudan kesme deneyindeki kesme yönüne dik, paralel ve köşeden köşeye çapraz olacak şekilde ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Ölçümler profilometre cihazında yapıldıktan sonra elde edilen süreksizlik yüzey geometrileri bilgisayara aktarılmıştır. Elde edilen profiller üzerinde cihaza ait yazılım aracılığı ile her bir profil üzerinde çok sayıda  $i$  açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Görülen

pürüzlüklerin seçilerek  $i$  açılarının ölçüldüğü durumda veri dağılımının her bir profil için daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu sebeple ölçümler yapılırken profil üzerinde yakınlştırma yapılarak eşit aralıklarla ilerlemeye dikkat edilmiştir. Bu sayede her bir profil üzerinde en az 20 ölçüm alınması sağlanmıştır.

Çizelge 3'de 1 No.'lu kayaya ait 6 farklı örnek üzerinde yapılan profilometre ölçüm sonuçları sunulmuştur. Elde edilen  $i$  açıları incelendiğinde süreksizlik yüzeylerinin doğal yapısı gereği değerlerin çok geniş bir aralıkta yayılım gösterdiği gözlenmiştir.



Çizelge 2. Tiltmetre deneylerinden elde edilen  $\phi_b$  değerleri.

Table 2.  $\phi_b$  values obtained from tiltmeter tests.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	44,1	37,4	38,4	29,8	34,3	35,3	35,6	33,4	41,3
2	43,2	38,1	38,7	28,7	33,2	35,1	34,5	32,3	42,3
3	43,5	37,8	39,2	29,1	32,84	35,0	31,2	31,5	43,1
4	42,6	38,5	39,5	30,2	33,6	35,3	32,3	32,1	43,3
5	41,5	39,2	39,8	29,4	33,5	34,6	31,2	31,4	43,1
6	41,3	38,3	39,6	27,7	33,6	36,5	30,5	31,7	43,4
7	41,5	38,6	40,2	27,5	34,0	36,0	30,9	32,1	42,1
8	42,9	38,4	40,6	28,2	34,5	35,1	30,	32,5	41,2
9	41,7	38,9	38,6	27,4	33,4	35,0	30,5	33,1	43,3
10	43,4	38,4	40,5	28,1	32,8	36,4	31,9	33,4	42,2
11	42,6	38,8	39,8	27,8	32,6	35,1	30,7	33,3	42,6
12	42,8	37,8	40,5	28,0	33,7	36,0	30,9	33,9	43,9
13	43,1	38,9	39,7	27,2	33,0	35,7	31,2	32,3	43,0
14	42,5	38,3	40,9	27,5	33,3	35,1	31,1	32,4	42,5
15	42,6	37,7	40,8	28,4	33,0	36,0	30,8	32,6	43,2
<b>Ortalama <math>\phi_b</math></b>	<b>42,6</b>	<b>38,3</b>	<b>39,8</b>	<b>28,3</b>	<b>33,4</b>	<b>35,5</b>	<b>31,5</b>	<b>32,5</b>	<b>42,7</b>
<b>Standart sapma</b>	<b>0,82</b>	<b>0,51</b>	<b>0,81</b>	<b>0,92</b>	<b>0,56</b>	<b>0,58</b>	<b>1,53</b>	<b>0,76</b>	<b>0,77</b>
<b>Değişim katsayısı COV, %</b>	<b>1,92</b>	<b>1,33</b>	<b>2,03</b>	<b>3,24</b>	<b>1,67</b>	<b>1,64</b>	<b>4,86</b>	<b>2,32</b>	<b>1,81</b>

9 kaya için yapılan profilometre deney sonuçlarına ait özet sonuçlar Çizelge 4'te sunulmuştur. Bu sonuçlara göre en yüksek  $i$  açısının 7 No.'lu kayaya; en düşük  $i$  açısının ise 3 No.'lu kayaya ait olduğu görülmektedir. Aynı kayadaki farklı ölçüm yönlerinin ortalamalarının kendi aralarındaki standart sapmaları incelendiğinde 9 kayada en yüksek standart sapmanın  $0,89^\circ$  ile 1 No.'lu kayaya ait olduğu belirlenmiştir.  $1^\circ$ 'den küçük olan bu sapma, ölçümlerin yüksek doğrulukta ve hassasiyette yapılabildiğini göstermektedir.

Çalışmada  $\phi_b$  ve  $\phi_t$  değerlerini elde edebilmek amacıyla 9 farklı kaya üzerinde 6 farklı normal gerilme altında doğrudan kesme deneyleri yapılarak yenilme zarfları elde edilmiştir. Deneylerde kesme hızı 1mm/dk olacak şekilde sabit tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda

her bir kaya için gerilme-deformasyon eğrileri elde edilmiştir. 1 No.'lu kayaya ait örnek gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 7'de verilmiştir. Elde edilen gerilme deformasyon eğrilerinin pik noktaları o numune için yenilme yükü olarak kabul edilmiştir. Uygulanan normal gerilme ( $\sigma_n$ ) ve o normal gerilmelerde elde edilen yenilme yükleri ( $\tau$ ) kullanılarak yenilme zarfları çizilmiştir. Elde edilen yenilme zarflarının Patton çift eğrili yenilme modeline uyumlu olduğu gözlenmiştir. Düşük normal gerilmelerde kohezyon değeri sıfır olarak elde edilirken normal gerilmeler artırıldığında pürüzlülüklerin tıraşlanması sonrasında çizilen yenilme zarfında kohezyon değerinin yükseldiği görülmektedir. Elde edilen iki ayrı yenilme zarfının genellikle 2 MPa normal gerilme seviyesinde birbirleriyle kesiştiği görülmüştür. (Şekil 8).

Kayabalı, Pınarcı, Habibzadeh, Beyhan, Fidan Üzgün, Yakut

Çizelge 3. 1 No.'lu kayaya ait profilometre ölçüm sonuçları.

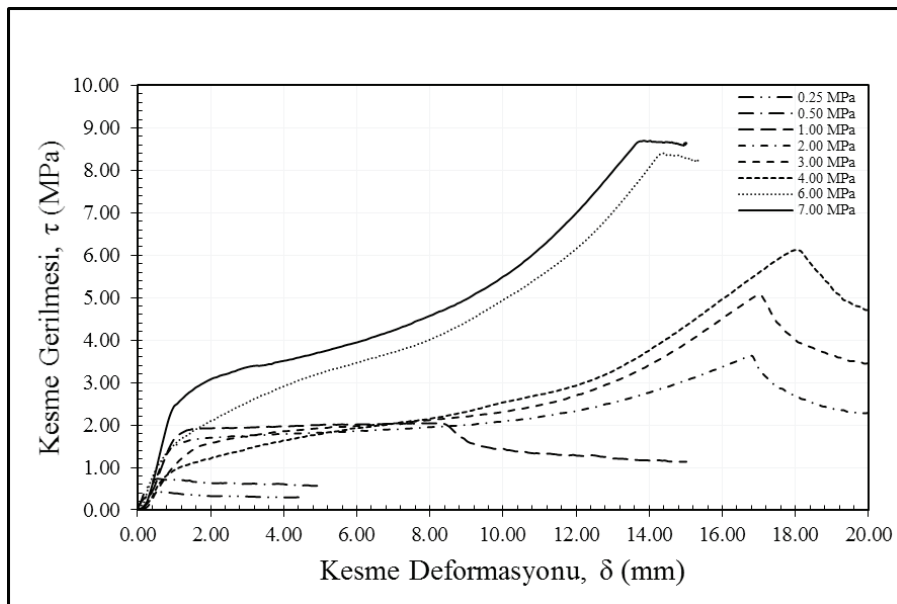
Table 3. Profilometer measurement results of sample No. 1.

1-1-1		1-1-2		1-1-3		1-1-4		1-1-5		1-1-6					
No.	i (°)	No.	i (°)	No.	i (°)	No.	i (°)	No.	i (°)	No.	i (°)				
1	10,41	42	9	1	1,28	43	8,7	1	0,47	1	9,5	1	0,77	1	14,02
2	7,26	43	12,78	2	1,67	44	12,51	2	15,36	2	7,45	2	13,75	2	9,62
3	4,78	44	10,92	3	11,62	45	5,97	3	4,33	3	14,89	3	2,49	3	13,87
4	3,67	45	12,49	4	5,13	46	7,97	4	10,86	4	8,55	4	7,00	4	6,15
5	0,67	46	2,92	5	8,62	47	13,56	5	11,09	5	4,72	5	12,27	5	8,80
6	18,2	47	9,93	6	14,26	48	8,85	6	5,18	6	4,92	6	5,98	6	1,00
7	11,17	48	11,19	7	7,83	49	11,76	7	11,45	7	7,79	7	5,37	7	0,53
8	28,27	49	16,02	8	9,68	50	3,26	8	1,09	8	13,22	8	7,71	8	16,55
9	5,4	50	12,61	9	10,83	51	14,92	9	14,79	9	2,29	9	11,94	9	5,53
10	7,82	51	9,97	10	6,89	52	17,4	10	11,55	10	20,81	10	17,32	10	6,89
11	1,18	52	4,98	11	16,72	53	3,01	11	13,82	11	4,58	11	8,03	11	4,22
12	3,65	53	11,12	12	10,3	54	15	12	5,68	12	7,65	12	0,79	12	1,59
13	11	54	6,42	13	13,24	55	10,37	13	8,39	13	11,05	13	10,23	13	11,34
14	5,92	55	1,02	14	7,16	56	19,03	14	4,1	14	5,59	14	1,57	14	0,18
15	0,054	56	14,41	15	6,0	57	9,46	15	9,34	15	17,21	15	3,40	15	7,35
16	4,176	57	6,44	16	9,26	58	4,28	16	3,09	16	13,45	16	1,47	16	11,61
17	19,67	58	4,71	17	8,43	59	19,95	17	1,33	17	13,58	17	8,38	17	0,16
18	0,6	59	1,88	18	2,75	60	6,94	18	3,84	18	6,33	18	1,85	18	18,00
19	10,61	60	9,95	19	9,68	61	4,1	19	14,6	19	1,06	19	5,16	19	4,84
20	6	61	25,28	20	26,83	62	19,42	20	13,18	20	12,59	20	5,29	20	11,43
21	17,63	62	18,44	21	4,1	63	4,85	21	3,6	21	1,82	21	8,48	21	6,95
22	0,701	63	5,78	22	9,81	64	1,77	22	13,45	22	14,57	22	2,1	22	11,30
23	2,71	64	18,29	23	17,7	65	18,29	23	10,17	23	3,67	23	13,37	23	12,67
24	15,42	65	15,22	24	9,33	66	2,89	24	6,7	24	25,18	24	5,02	24	9,28
25	27,04	66	5,77	25	7,11	67	12,1	25	8,62	25	6,47	25	6,64	25	3,38
26	3,79	67	4,03	26	5,02	68	23,9	26	9,3	26	8,49	26	11,17	26	5,75
27	8,74	68	6,05	27	12,09	69	10,3	27	15,0	27	6	27	8,67	27	7,96
28	16,71	69	8,03	28	6,76	70	9,54	28	4,2	28	2,55	28	3,85	28	9,20
29	27,28	70	8,9	29	2	71	4,53	29	11,12	29	3,85	29	9,65	29	18,30
30	5,03	71	10,84	30	2,42	72	9,36	30	14,78	30	18,22	30	2,23	30	4,35
31	3,04	72	12,15	31	18,24	73	5,93	31	12,75	31	3,79	31	3,29	31	12,11
32	26,07	73	6,42	32	4,94	74	14,28	32	0,89	32	12,32	32	24,36	32	8,06
33	7,28	74	21,58	33	2,97	75	2,51	33	14,59	33	5,07	33	12,39	33	16,17
34	21,83	75	2,04	34	8,15	76	9,14	34	8,67	34	14,47	34	5,6	34	9,90
35	0,48	76	16,47	35	4,58	77	19,8	35	5,44	35	9,3	35	6,47	35	16,25
36	11,55	77	6,55	36	7,67	78	15,46	36	1,64	36	9,5	36	14,12	36	1,34
37	8,05			37	9,12	79	4,83	37	16,91	37	1,83			37	5,93
38	12,32			38	0,09	80	12,22	38	3,9	38	7,05			38	0,46
39	11,35			39	9,22	81	9,4	39	6,6	39	7,33			39	11,50
40	6,13			40	22,86	82	2,1	40	4,29	40	0,1			40	12,10
41	2,61			41	7,91	83	14,16	41	9,71	41	4,87			41	0,36
				42	7,08	84	17,3	42	10,11	42	10,6			42	5,17
								43	7,22	43	12,57			43	18,96
										44	10,9				
										45	3,6			44	9,02
										46	25,59				
										47	0,74				
										48	23,7				
<b>Ortalama</b>			9,83	<b>Ortalama</b>			9,62	<b>Ortalama</b>	8,45	<b>Ortalama</b>	9,20	<b>Ortalama</b>	7,45	<b>Ortalama</b>	8,41
<b>Minimum</b>			0,05	<b>Minimum</b>			0,09	<b>Minimum</b>	0,47	<b>Minimum</b>	0,10	<b>Minimum</b>	0,77	<b>Minimum</b>	0,16
<b>Maksimum</b>			28,27	<b>Maksimum</b>			26,83	<b>Maksimum</b>	16,91	<b>Maksimum</b>	25,59	<b>Maksimum</b>	24,36	<b>Maksimum</b>	18,96

Çizelge 4. Profilometre deneyi özet sonuçları.

Table 4. Summary of the results of profilometer tests.

Kayaç No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Numune sayısı	6	8	6	6	17	18	4	6	6
Ölçülen Yön sayısı	3	3	3	4	4	4	3	4	4
Ortalama Pürüzlülük Açısı ( $i$ )	9,06	6,84	6,01	8,38	7,82	9,00	9,7	7,04	8,40
Profiller arası standart sapma	0,89	0,55	0,26	0,49	0,33	0,76	0,59	0,66	0,6



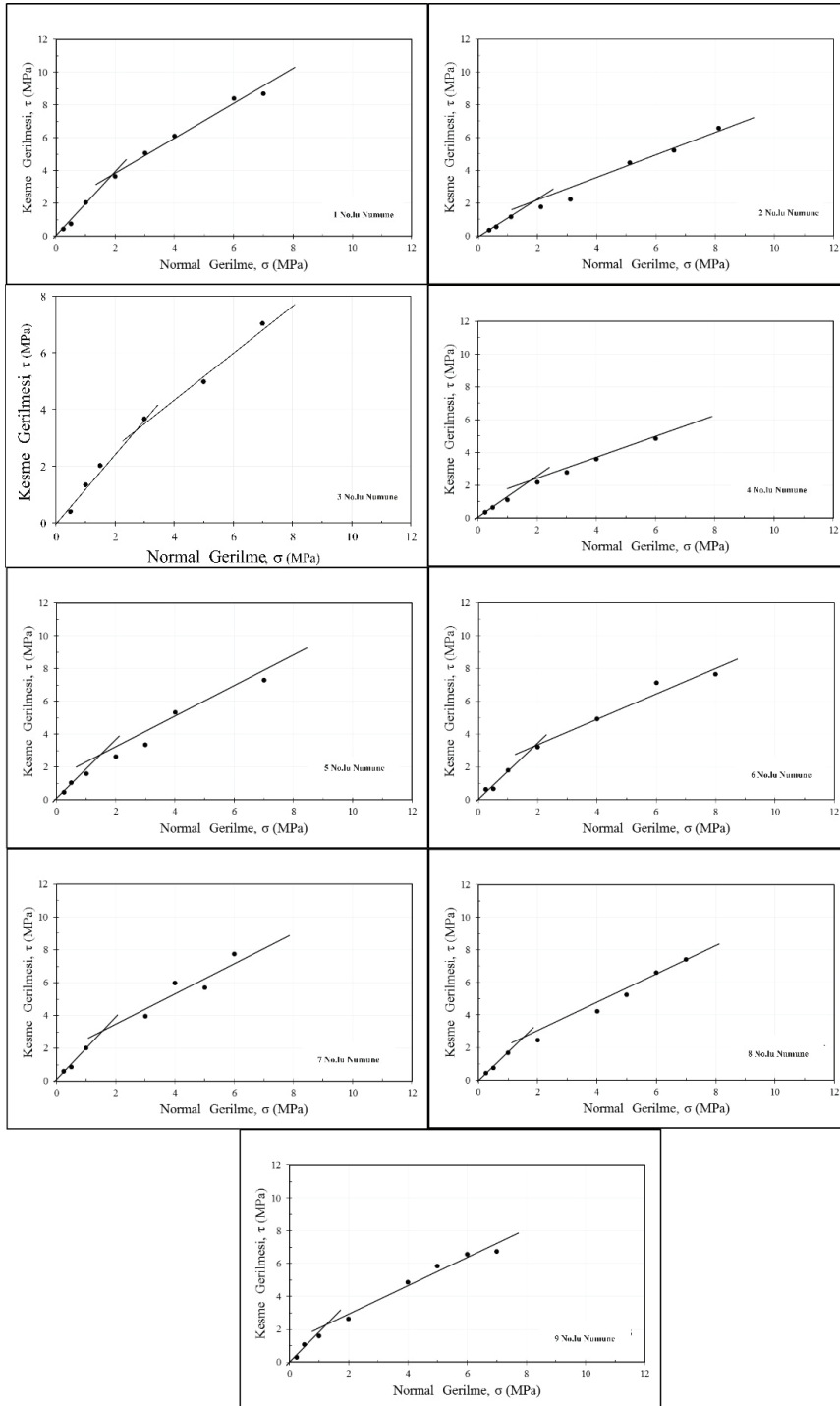
Şekil 7. 1 No'lu kaya için farklı normal gerilmelere ait gerilme - deşformasyonu grafikleri.

Figure 7. Stress-deformation graphs under different normal stresses for sample No 1.

Profilometre, tiltmetre ve doğrudan kesme deney sonuçlarına ait veriler Çizelge 5'te sunulmuştur. Bu sonuçlar incelendiğinde tiltmetre deneyinden elde edilmiş olan  $\phi_b$  değerleri doğrudan kesme deneyinden elde edilen Patton çift eğrili yenilme zarfından elde edilen  $\phi_b$  değerleri ile karşılaştırıldığında sonuçların

birbirine oldukça yüksek bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar arasındaki farklar yüzde olarak ifade edildiğinde en düşük değer %0,4 ile 5 No.'lu kayaya, en yüksek değer ise %7,9 ile 7 No.'lu kayaya ait olduğu görülmektedir.

Kayabalı, Pınarcı, Habibzadeh, Beyhan, Fidan Üzgün, Yakut



Şekil 8. Doğrudan kesme deneylerinden elde edilen çift eğrili Patton yenilme zarfları.

Figure 8. Patton bi-linear failure envelopes obtained from direct shear tests.

Toplam sürtünme ( $\phi_t$ ) açılarının değerlendirilmesi için profilometre ve tiltmetre deneyinden bulunan değerlerin toplamı ( $\phi_b + i$ ) ile Patton çift eğrili yenilme zarfının ilk bölümün eğim açısı karşılaştırıldığında 7 ve 8 No.'lu kayalar (granodiyorit ve mermer) hariç geri kalan değerlerin birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir (Çizelge 5).

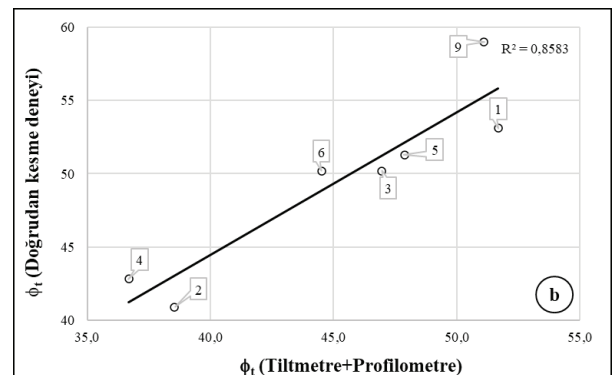
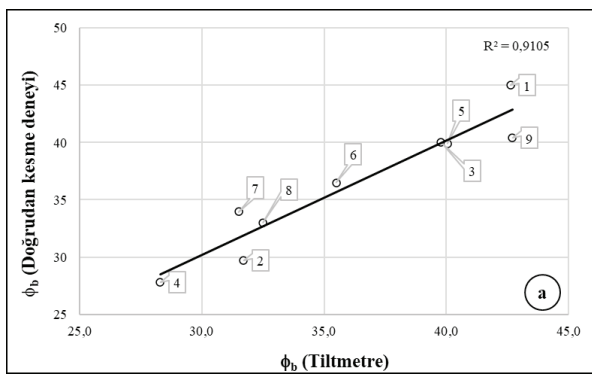
Profilometre ve tiltmetre deneylerinden elde edilen  $\phi_b$  ve  $\phi_t$  değerleri doğrudan kesme

deneylerinde elde edilen sonuçlar ile grafiksel olarak karşılaştırıldığında 9 kaya için  $\phi_b$  değerleri arasında 0,91 gibi oldukça yüksek bir korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) elde edildiği görülmektedir. Ancak,  $\phi_t$  değerleri grafiksel olarak incelendiğinde 7 ve 8 No.'lu kayaların  $\phi_t$  değerlerinin iki farklı yöntemle göre farklı değerler aldığı görülmektedir. Bu iki kaya analiz dışında bırakıldığında geriye kalan 7 kaya arasında korelasyon katsayısının ( $R^2$ ) 0,86 olarak elde edildiği tespit edilmiştir (Şekil 9).

Çizelge 5. Profilometre, tiltmetre ve doğrudan kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar.

Table 5. The results obtained from the profilometer, tiltmeter and direct shear tests.

Numune No.	Pürüzlülük Açısı (Profilmetre) $i$		$\phi_b$ (Doğrudan kesme deneyi)	$\phi_t$ ( $\phi_{b+i}$ ) (Profilmetre+Tiltmetre)	$\phi_t$ (Doğrudan kesme deneyi)	Pürüzlülük Açısı ( $i = \phi_t - \phi_b$ ) (Patton eğrisinden)		Fark $\phi_b$ (%)	Fark $\phi_t$ (%)
		$\phi_b$ (Tiltmetre)							
1	9.1	42.6	45.0	51.7	53.1	8.1	5.6	2.7	
2	6.8	31.7	29.7	38.5	40.9	11.2	6.3	5.8	
3	7.2	39.8	40.0	47.0	50.2	10.2	0.5	6.5	
4	8.4	28.3	27.8	36.7	42.8	15.0	1.8	14.3	
5	7.8	40.1	39.9	47.9	51.3	11.4	0.4	6.7	
6	9.0	35.5	36.5	44.5	50.2	13.7	2.8	11.4	
7	9.7	31.5	34.0	41.2	55.2	21.2	7.9	25.4	
8	7.0	32.5	33.0	39.5	58.9	25.9	1.54	32.9	
9	8.4	42.7	40.4	51.1	59.0	18.6	5.4	13.4	



Şekil 9. Profilometre, tiltmetre ve doğrudan kesme deneylerinden elde edilen a)  $\phi_b$  değerlerinin ve b)  $\phi_t$  değerlerinin karşılaştırılması (7 No.'lu granodiyorit ve 8 No.'lu ve mermer hariç).

Figure 9. Comparison of a)  $\phi_b$  values b)  $\phi_t$  values obtained from profilometer, tiltmeter and direct shear tests (except No.7 granodiorite and No.8 marble).

Patton çift eğrili yenilme zarfından elde edilen farklı eğime sahip iki farklı yenilme zarfının eğim açılarının farkı ( $i = \phi_t - \phi_b$ ) pürüzlülük açısı olarak değerlendirilerek profilometre ölçümleri ile karşılaştırıldığında 1 ve 3 numaralı örnekler hariç tutulduğunda değerlerin birbirinden oldukça farklı olduğu görülmektedir.

## SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Çalışmada farklı köken ve petrografik özelliklere sahip 9 adet kaya üzerinde profilometre, tiltmetre ve doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Profilometre ölçümleri yapılırken yazılıma aktarılan profil üzerinde yakınlaştırma yapılarak eşit aralıklarla ölçümler alınmasına dikkat edilmiştir. Bu yöntem ölçümlerin daha standart ve hassas olmasını sağlamaktadır. Bunun aksine ekranda görülen pürüzlülükler kullanıcı tarafından seçilerek tavan ve taban pik noktaları arası ölçüldüğü durumda kullanıcı etkisi ve çözünürlük etkisinin devreye girebileceği ve ölçüm sonuçlarında yanlılığa neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Eşit aralıklarla ölçümler yapılarak oldukça tutarlı veri setlerinin elde edilebilmesi sağlanmıştır.

$\phi_b$  değerini elde edebilmek amacıyla tiltmetre deneyleri her bir örnek için 15 defa tekrar edilerek bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Ölçümlerin standart sapma ve değişim katsayısı değerlerinin oldukça düşük olması bu deney sonuçlarının oldukça yüksek hassasiyette ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

Ancak, Patton eğrilerinin eğimlerinin farkı kullanılarak elde edilen  $i$  değerlerinin profilometre deneyinden elde edilen değerlerle uyumsuz olduğu görülmüştür. Bu uyumsuzluğun daha fazla örnekle daha çok sayıda deney yapılarak araştırılması önerilmektedir.

Profilometre deneyi ve tiltmetre deneyinden elde edilen  $\phi_b$  ve  $\phi_t$  değerlerinin doğrudan kesme deneylerinde elde edilen değerlerle uyumlu olduğu;  $\phi_b$  değerinin özellikle 3, 4, 5 ve 8 No.'lu kayalarda,  $\phi_t$  değerlerinin ise 1, 2 ve 5 No.'lu kayalarda oldukça yüksek korelasyon sergilediği gözlenmiştir. Deney yapılan toplam 9 kaya için tiltmetre deneyinden elde edilen  $\phi_b$  değerlerinin %91 doğrulukla doğrudan kesme deneylerinden elde edilenler ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Tiltmetre deneylerinden elde edilen  $\phi_b$  ve profilometre deneylerinden elde edilen  $i$  açılarının toplamıyla ( $\phi_t = \phi_b + i$ ) doğrudan kesme deneyinden elde edilen  $\phi_t$  değerleri karşılaştırıldığında 7 No.'lu granodiyorit ve 8 No.'lu mermer hariç tutulduğunda yüksek bir uyum gözlenmektedir ( $R^2 = 0,86$ ). 7 ve 8 No.'lu kayalardaki sapma derecesinin fazla oluşunun, test edilen diğer kayalara kıyasla bu kayaların tek eksenli sıkışma dayanımlarının hayli yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tek eksenli sıkışma dayanımı yüksek olan kayalarda bu yöntemin uygulanabilirliğinin daha fazla sayıda örnek ve deneyle araştırılması önerilir.

Bu araştırmadan çıkan genel sonuca göre, bir kayaya ait birkaç adet numuneyi laboratuvarında doğrudan kesme deneyine tabi tutmadan Patton çift eğrili yenilme zarfının elde edilebilmesinde bir yaklaşımda bulunulabileceği düşünülmektedir. Geriye, bu eğrilerin kesişim noktasının hangi normal gerilme değerinde kesiştiğinin belirlenmesi kalmaktadır. Habibzadeh (2020)'e göre bu kesişme 2 MPa'da gerçekleşmektedir.

Sınırlı sayıda ve sadece 9 adet kayada gerçekleştirilen bu çalışmanın süreksizliklerin kesme dayanımını pratik yoldan belirlemede profesyonellere yönelik önemli kolaylıklar sağlayacağı düşünülmektedir. Ancak, bu

çalışmada elde edilen sonuçların daha geniş bir veri setiyle teyit edilmesi önerilir.

## KAYNAKLAR

- Alejano, L. R., González, J. & Muralha, J. (2012). Comparison of Different Techniques of Tilt Testing and Basic Friction Angle Variability Assessment. *Rock Mech. Rock Eng.* 45(6):1023-1035. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0265-7>
- Barton, N. (1973). Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints. *Engineering Geology.* 7:287-332. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6)
- Brady, B. H. G. & Brown, E. T. (2005). *Rock Mechanics for Underground Mining*: New York, Kluwer Academic Publishers, 628 p.
- Bruce, I. G., Cruden, D. M. & Eaton, T. M. (1989). Use of a Tilting Table to Determine the Basic Friction Angle of Hard Rock Samples. *Can. Geotech. J.* 26:474-479. <https://doi.org/10.1139/t89-060>
- Coulomb, C. A. (1776). *Essai sur une application des regles de maximis et minimis quelques problemes de statique, relatits a l'architecture*. Memoires de Mathematique de l'Academie Royale de Science 7, Paris.
- Cruden, D. M. & Hu, X. Q. (1988). Basic Friction Angles of Carbonate Rocks from Kananaskis County, Canada. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 38(1):55-59. <https://doi.org/10.1007/BF02590448>
- González, J., González-Pastoriza, N., Castro, U., Alejano, L. R. & Muralha, J. (2014). Considerations on the Laboratory Estimate of the Basic Friction Angle of Rock Joints. In: Alejano R, Perucho A, Olalla C, Jimenez R. (eds) *Rock eng. and rock mech: structures in and on rock masses (EUROCK 2014)*, ISRM Eu Reg. Symp, Vigo, pp 199-204. <https://doi.org/10.1201/b16955-31>
- Goodman, R. E. (1970). The Deformability of Joints. In *Determination of the In Situ Modulus of Deformation of Rock*. Am. Soc. Testing and Materials, Spec. Tech. Publication, No. 477, 174-96. <https://doi.org/10.1520/STP477-EB>
- Habibzadeh, F. (2020). *Süreksizliklerin Statik ve Dinamik Koşullardaki Kesme Dayanımının Yapay Süreksizlikler Yoluyla Karşılaştırılması*. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. 185s.
- Hoek, E. (2023). *Practical Rock Engineering*. (<https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>).
- Horn, H. M. & Deere D. U. (1962). Frictional Characteristics of Minerals. *Géotechnique* 12:319-335. <https://doi.org/10.1680/geot.1962.12.4.319>
- Jang, H. S., Zhang, Q. Z., Kang, S. S. & Jang, B. O. (2018). Determination of the Basic Friction Angle of Rock Surfaces by Tilt Tests. *Rock Mech Rock Eng* 51, 989-1004. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1388-7>
- Mohr, O. (1900). Welche Umstände Bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 44, pp. 1-12.
- Patton, F. D. (1966). *Multiple Modes of Shear Failure in Rock and Related Material*. Ph.D. Thesis, University of Illinois, p 282.
- Paulding, B. W. Jr. (1970). Coefficient of Friction of Natural Rock Surfaces. *Proc. ASCE. Soil Mech. Foundation Div.*, Vol. 96 (SM2), 385-94. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001393>
- Poropat, G. V. (2008). Remote Characterization of Surface Roughness of Rock Discontinuities. In Y. Potvin, J. Carter, A. Dyskin, & R. Jeffery (eds.), *Proceedings 1<sup>st</sup> Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, Perth, Australia, 16-19 September 2008: 447-458. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/808\\_123](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/808_123)
- Rengers, N. (1971). *Roughness and Friction Properties of Separation Planes in Rock*. Thesis, Tech. Hochschule Fredericiana, Karlsruhe, Inst. Bodenmech. Felsmech. Veroff, 47, 129 pp.

Kayabalı, Pınarcı, Habibzadeh, Beyhan, Fidan Üzgün, Yakut

- Ruiz, J. & Li, C. (2014). Measurement of the Basic Friction Angle of Rock by Three Different Tilt Test Methods. In: Alejano R, Perucho A, Olalla C, Jimenez R (eds) Rock eng and rock mech: structures in and on rock masses (EUROCK 2014), ISRM EU reg symp, Vigo, pp 261-266. <https://doi.org/10.1201/b16955-42>
- Stimpson, B. (1981). A Suggested Technique for Determining the Basic Friction Angle of Rock Surface using Core. *Int J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abst.* 18(1):63–65. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90266-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90266-7)
- Wines, D. R. & Lilly, P. A. (2003). Estimates of Rock Joint Shear Strength in Part of the Fimiston Open Pit Operation in Western Australia. *Int J Rock Mech Min Sci* 40(6):929-937. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00020-0)
- Wyllie, C. & Mah, W. (2005). *Rock Slope Engineering, Civil and Mining*, 4<sup>th</sup> Edition. Taylor & Francis Group, London and New York, 431 p.
- Zhang, N., Li, C. C., Lu, A., Chen, X., Liu, D. & Zhu, E. (2019). Experimental Studies on the Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Tilt Test. *ASTM International. J. Test. Eval.* January 2019; 47(1): 256-283. <https://doi.org/10.1520/JTE20170308>