

Kayaçların direkt çekme dayanımlarının indirekt çekme dayanımlarından elde edilmesi için alternatif bir yaklaşım

An alternative approach to obtaining the direct tensile strength of the rocks from the indirect tensile strength

Kenan TÜFEKÇİ¹, Servet DEMİRDAĞ^{2*}, Nazmi ŞENGÜN³, Tamer EFE⁴, Raşit ALTINDAĞ⁵

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi Bursa, Türkiye.

kenantufekci@uludag.edu.tr

^{2,3,5}Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Isparta, Türkiye.

servetdemirdag@sdu.edu.tr, nazmisengun@sdu.edu.tr, rasitaltindag@sdu.edu.tr

⁴Burdur İl Özel İdaresi, Burdur, Türkiye.

⁵Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

tamer.efe@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 12.12.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 13.04.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.98479

Kabul Tarihi/Accepted: 19.04.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Son yıllarda yapılan çalışmalar, kayaçların çekme dayanımlarının, üretim yöntemi ve kazı ekipmanı seçimi, patlatma geometrisinin tasarımı, şev stabilitesi ve yeraltı açıklıklarının boyutlandırılması gibi konularda tasarım parametresi olarak etkin bir şekilde kullanılabilirliğini göstermiştir. Kaya malzemelerinin çekme dayanımının belirlenmesine yönelik farklı deney yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, doğrudan ve dolaylı yöntemler olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Farklı araştırmacılar tarafından raporlanan deney sonuçları doğrudan ve dolaylı çekme dayanımı değerleri arasında ve hatta dolaylı yöntemlerle elde edilen çekme dayanımı değerlerinde kendi aralarında oldukça farklılık olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada doğrudan ve yaygın kullanılan dolaylı yöntemlerden Brezilya testi, 3 ve 4 nokta eğilme deneyleri yapılarak, dolaylı yöntemlerden direkt çekme dayanımını tahmin edecek deneysel katsayılar elde edilmiştir. Ayrıca bu farklılığın nedenini açıklamak için geometrik bir yaklaşım da önerilmiştir. Bu yaklaşıma göre; çekme hasarının oluşması için, numunenin belli bir bölgede aldığı maksimum değer değil, numunenin çekme gerilmesine maruz kalan hacmindeki ortalama gerilme değerinin etkili olduğu benimsenmiştir. Farklı deney yöntemlerinde farklı boyutlarda numuneler kullanıldığından numunedeki ortalama gerilme, birim hacim başına düşen gerilme şeklinde ifade edilmiş ve her bir dolaylı yöntemdeki ortalama gerilmeyi kolayca hesaplayabilmek için; numunedeki gerilme dağılımını temsil eden ve "karakteristik birim hacim" diye adlandırılan geometrik şekil belirlenmiştir. Bu geometrik şeklin hacmi o deney yöntemi için teorik katsayı olarak önerilmiştir. Karbonat ve magmatik kökenli kayaçlar için sırasıyla deneysel katsayılar; Brezilya testi için 0.47/0.55, 3 nokta eğilme deneyi (3NED) için 0.29/0.37, 4 nokta eğilme (4NED) deneyi için 0.37/0.43, teorik katsayılar ise; Brezilya testi için 0.5, 3NED deneyi için 0.33, 4NED deneyi için 0.39-0.42 olarak bulunmuştur. Elde edilen deneysel ve teorik katsayıların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Çekme dayanımı, Dolaylı çekme dayanımı, Brezilya testi, Eğilme dayanımı, Karakteristik birim hacim.

Abstract

Recent studies have demonstrated that the tensile strength of rocks can effectively be used as a design parameter in some subjects such as production method and excavation equipment selection, design of blasting geometry, slope stability, and dimensioning of underground openings. Different testing methods are used for determining the tensile strength of rocks. These methods can be divided into two groups that are direct and indirect methods. According to test results reported by different researchers, the tensile strength of rocks is varying in relation to testing methods. By conducting direct and indirect tests, experimental coefficients which will estimate direct tensile strength from indirect tensile testing methods such as Brazilian, 3-4 point bending tests, are presented in this study. Besides, a geometric approach has been proposed to explain the reason for this difference. This approach claims that it is more important the average stress per unit volume in the tensile zone of the specimen than the maximum stress in the specimen to develop damage. Average stress in the specimen has been expressed as stress per unit volume because each specimen has a different size in different testing methods. To calculate the average stress in a simply way, a geometric shape, which is related to the stress distribution of the specimen and called "characteristic unit volume" has been defined. The volume of the geometric shape has been defined as the theoretical coefficient of the related testing method. For carbonate and igneous rocks, the experimental coefficient was 0.47/0.55 for the Brazilian test, 0.29/0.37 for the 3 point bending test, 0.37/0.43 for the 4 point bending test, respectively. The theoretical coefficient was found to be 0.5 for the Brazilian test, 0.33 for the 3 point bending test, and 0.39-0.42 for the 4 point bending test. Experimental and theoretical coefficients obtained in this study are in accordance with each other.

Keywords: Tensile strength, Indirect tensile strength, Brazilian test, Flexural strength, Characteristic unit volume.

1 Giriş

Kaya malzemesinde çekme dayanımının (ÇD) belirlenmesine yönelik yöntemler, doğrudan ve dolaylı yöntemler olarak ayrılmaktadır. Genelde doğrudan yöntemler, deney numunesi

hazırlanması ve deneyin uygulanışı bakımından hem zaman alıcı, hem de maliyetlidir. Ayrıca doğrudan yöntemlerle yapılan deneylerde başarı oranı düşüktür. Dolaylı yöntemler ise daha basit, ucuz, uygulanması kolay ve genellikle az miktarda deney numunesine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle de dolaylı yöntemler tüm Dünya'da doğrudan yöntemlere göre daha çok

*Yazışılan yazar/Corresponding author

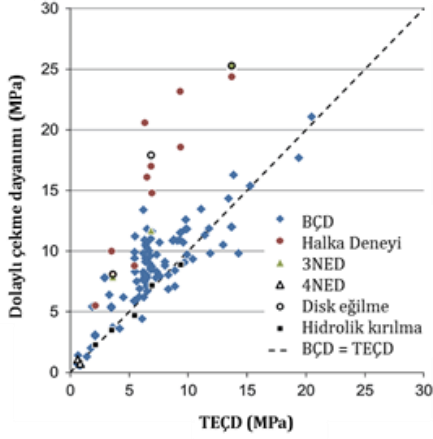
tercih edilmektedir. Bununla birlikte dolaylı yöntemlerden elde edilen sonuçların tek eksenli çekme dayanımını temsil edip etmediği bilim dünyası tarafından halen tartışılan bir konudur. Bu nedenle hangi deney yönteminin daha uygun olduğu veya elde edilen değerlerin gerçekten kaya malzemesinin çekme dayanım değerini temsil edip etmediği yaklaşık 70 yıldır yapılan araştırmalarda soru işareti olarak durmaktadır. Kaya malzemesinin çekme dayanımı, birçok kaya mühendisliği uygulamasında önceden bilinmesi gerekli olan önemli bir tasarım parametresi olmasına rağmen yakın bir geçmişe kadar tek eksenli basınç dayanımına nazaran daha az araştırılmış bir mekanik özelliktir [1]. Bununla birlikte; kayaçların tek eksenli basınç dayanımı deneyleri ÇD deneylerine göre daha kolay yapılabilir olmasına rağmen, zaman tasarrufu ve maliyet nedeniyle kayacın sertlik değerinden tek eksenli basınç dayanımını tahmin eden çalışmalar da mevcuttur [2]. Farklı mühendislik malzemeleri için geçerli olmasa da kayaçlar için ÇD en küçük dayanım özelliğidir. Basınç dayanımı değerleri benzer özellik gösteren bazı kayaçların ÇD değerleri arasında ciddi farklılıklar olduğu geçmişte yapılmış çalışmalarda rapor edilmiştir. Bu nedenle de ölçülmesi ve tasarımlarda kullanılması konusunda çok daha hassas davranılması gerekmektedir. Bu kapsamda farklı araştırmacılar tarafından yayımlanan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

[3] Kaya malzemelerinin tek eksenli çekme dayanımını (TEÇD) belirlemek için kullanılacak en uygun numune geometrisinin dambıl (dog bone) şeklinde olması gerektiğini belirtmiştir. [4] üç eksenli hücre içinde dambıl şekilli numunelerin eksenel çekme dayanımlarını belirlemiştir. Bu numunede boy/çap oranını 2-3 olması gerektiği sonucuna varmıştır. Çalışmada, direkt çekme deney numunesinin dambıl şeklinde olmadığı durumlarda silindirik numunenin üst noktasında (epoksi veya çimento bağlantı noktalarında veya yandan sıkıştırma ile bağlantı yapılan noktalarda) gerilme yığılması olduğuna, bunun sonucunda numune üst noktaya yakın bir yerden yenilerek geçersiz deney sonucu elde edildiğine işaret edilmiştir. [5] bazı araştırmalarda direkt çekme deneylerinde kullanılan numunelerin hazırlanmasındaki zorluklardan dolayı, uygun numunenin hazırlanamadığını ve kırılmanın numunenin merkezinin dışında gerçekleştiğini ve böylece geçersiz sonuçlar elde edildiğini belirtmiştir. Bu konudaki çalışmaların arttırılabilmesi için Brezilya yöntemini kabul edilebilir bir çözüm olarak düşünmüştür. [6] yaptıkları çalışmada silindirik kayaçların direkt çekme dayanımını belirlemek için ISRM tarafından önerilen yöntemlere uygun yeni bir deney düzeneği tasarlamışlardır. Bu düzeneği kullanarak direkt ÇD deneyleri yapmışlardır. Elde ettikleri değerlerin kayaçlarda TEÇD değerleri yerine kullanılabileceğini ve Brezilya çekme dayanımı (BÇD) deneylerine göre daha güvenilir olduğunu belirtmişlerdir. Daha sonra sayısal çözümler yaparak numune çevresindeki maksimum asal çekme gerilmesi, örnek kesit alanından hesaplanan ortalama asal gerilmeden 1.5 kat daha büyük olduğundan, gerçek dayanım değerinin bu katsayı ile çarpılarak düzeltilmesi gerektiğini önermişlerdir. [7] yaptıkları çalışmada TEÇD'ni belirlemek için yeni bir çene kavrama mekanizması geliştirmişler ve dambıl şekilli numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları ile BÇD sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla numerik modelleme çalışmaları yapılarak gerilme dağılımını ve yoğunluğunu belirlemişlerdir. [8] tarafından direkt çekme deneyinde dambıl şekilli numunelerde numunenin ve numuneyi kavrayacak çelik aparatın geometrisinin çekme deneyi üzerindeki etkilerinin

belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile numerik modelleme çalışmaları yapılmıştır. Brezilya deneyi, kayaçların ÇD'ni belirlemede yıllardır kullanılan en yaygın dolaylı yöntemdir. Bu konuda birçok araştırmacı bu yöntemin doğruluğu, direkt çekme değerini temsil edip etmediği ve pratikte kullanılabilirliği ile ilgili birçok çalışma yapmış ve elde ettikleri sonuçları tartışmışlardır. [9] ilk yükleme noktalarındaki deformasyonu azaltmak için kavisli çeneleri tasarlamışlardır. Yaptıkları araştırmalarda ÇD değerini belirlemek için Brezilya testinin uygun bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. ISRM, kayaçların ÇD'nin belirlenmesi için Brezilya yöntemini önerdikten sonra 1979-1991 yılları arasında oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yıllarda anizotropi, basma ve çekme gerilmeleri altında lineer olmayan deformasyon karakteristikleri, boyut etkisi gibi konularda birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır [10]-[14]. [11] çekme gerilmelerindeki deformasyon karakteristiğini analiz etmişler ve Brezilya testinden elde edilen çekme gerilmelerinin direkt yöntemden elde edilen değerlerden 2 kat daha fazla olduğunu bulmuşlardır. [15] Brezilya testinde malzemelerin ÇD'ni belirlemek için tek eksenli basma ve çekme gerilmeleri arasındaki oranı kullanarak mevcut formülü revize etmiştir. Yaygın olarak kullanılan Brezilya test yönteminin geliştirilmesi ve kullanılan eşitliğin modifiye edilmesi konusundaki çalışmalar 1992 yılından günümüze kadar devam etmektedir. Bu konuda birçok araştırmacı deneysel, analitik ve numerik çalışmalar yapmışlardır. Örneğin, bazı araştırmacılar Brezilya deneyinde asal gerilmelerin etkisini 3D numerik model tekniklerini kullanarak analiz etmişler [16]-[18], bazıları ise anizotropinin etkisini deneysel, analitik ve numerik olarak incelemişlerdir [19]-[25]. Bazı araştırmacılar ise, yükleme plakaları ile deney numunesi arasındaki sürtünme kuvvetinin gerilme dağılımı ve numunenin yenilme modu üzerindeki etkisini deneysel, analitik ve numerik olarak incelemişlerdir [26]-[29]. [30] yaptığı 3 boyutlu sonlu elemanlar (FEM) analizlerine göre kaya gibi malzemelerin çekme gerilmelerinin belirlenmesinde en büyük eşdeğer gerilmelerin numunenin merkezinde değil de yükleme noktalarında meydana geldiği için Brezilya testinin uygun olmadığını belirtmiştir. [31] yaptıkları çalışmada Brezilya deneyinde kırılmanın numunenin merkezinden başlaması gerektiğine ve yenilmeye maksimum gerilmenin neden olduğuna dikkat çekmişlerdir. Ayrıca Brezilya testinde, tek eksenli çekme gerilmesi yerine iki eksenli gerilmeden dolayı kayaçların çekme gerilmelerinin değerinden fazla tahmin edilebildiğini, bu nedenle de Brezilya deneyinin kayaçların tek eksenli çekme gerilmesi yerine geçemeyeceği belirtmişlerdir. [1] yaptıkları çalışmada TEÇD ile BÇD arasındaki ilişkiyi ve diğer yöntemlerden (çatlak başlangıcı gibi) ÇD'nin tahmin edilebilirliğini incelemişlerdir. Literatür incelemelerinde gerçek ÇD değerlerinin, diğer laboratuvar testlerinden tahmin edilebilmesinin zor olduğu görülmüştür. ÇD'nin tek eksenli basınç dayanımı değerinden tahmin etmeye yönelik çalışmalarda hatalı sonuçlar sunulduğunu vurgulamışlardır. [32] eğilme testlerinde yenilme noktasında oluşan çekme gerilmelerinin, sadece tek eksenli gerilmeler olmasına rağmen diğer dolaylı yöntemlerde yenilme noktasında oluşan çekme gerilmelerinin iki eksenli gerilmeler olduğunu ve bu nedenle malzemelerin çekme gerilmelerinin belirlenmesinde eğilme testlerinin daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. [33] karma mod çatlak davranışını önceden çatlattırılmış granit numuneleri üzerinde asimetric 4 nokta eğilme deneyleri uygulayarak deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. [34] üç farklı tipte granit üzerinde ve farklı

çentik uzunluklarında üç nokta eğilme testlerini kullanarak ÇD'nı ve kırılma tokluğunu hesaplamaya yarayan yeni bir metod önermişlerdir. [35] tarafından yapılan çalışmada, 3 nokta eğilme dayanımı (3NED) deneyinde boyut etkisi incelenmiş ve eğilme dayanımı ile BÇD arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Literatür incelendiğinde TEÇD ile alternatif dolaylı çekme dayanımlarının karşılaştırıldığı birçok çalışma olduğu görülmektedir. Bunlar içerisinde [32]'in çalışmasında yer alan birçok alternatif test sonucu kullanılarak [1] tarafından yeniden düzenlenen grafik (Şekil 1) TEÇD ile alternatif dolaylı test yöntemlerinin karşılaştırılması açısından önemlidir.



Şekil 1. TEÇD ile alternatif dolaylı test yöntemlerinin karşılaştırılması [1].

Figure 1. Comparison of UTS and alternative indirect test methods [1].

Şekil 1'den anlaşılacağı üzere TEÇD ile en yakın ilişki BÇD sonuçları ile görülmüştür. Ancak laboratuvar testleri yapılırken seçilen numunelerin aynı kayadan üretilmiş olup olmadığı, deney cihazlarının farklılıkları ve deneyleri gerçekleştirilenlerin hassasiyetlerinin aynı olamayacağı da göz ardı edilmemelidir.

Bu çalışmada 1940'lı yıllardan günümüze kadar yapılan çalışmalar incelenmiş ve birçok araştırmacının belirttiği en önemli noktalar belirlenerek aşağıda özetlenmiştir.

- Farklı proje ve tasarımlar için malzemelerin ÇD değerlerinin çok önemli bir girdi parametresi olması,
- Direkt ÇD deney numunesinin hazırlama ve deney zorluğu,
- Brezilya yönteminin en yaygın kullanılan dolaylı yöntem olması,
- Brezilya yönteminin bazı bilim adamları tarafından uygun olmadığı belirtilmesi,
- Bu yöntemlerin modifiye edilmesi veya düzeltme katsayılarının belirlenmesi gerekliliği.

Yapılan birçok çalışmanın sonuç veya öneri bölümlerinde bu ifadeler görülmektedir. Yani bilimsel çalışmalarda aradan yaklaşık 70 yıl geçmesine rağmen ÇD belirleme yöntemleri konusunda hala fikir birliğinin olmadığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada literatürde araştırmacıların işaret ettikleri bazı eksikliklerin giderilmesi amaçlanmış olup bu kapsamda kayalarda ÇD değerlerinin doğru olarak nasıl belirlenmesi gerektiği konusu üzerinde odaklanılmıştır. Kayaların ÇD

değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılacak en uygun dolaylı yöntemler belirlenerek, teoride ve pratikte kullanılacak yaklaşımlar ve katsayılar önerilmiştir.

2 Materyal ve yöntem

Çalışma kapsamında sedimanter, magmatik ve metamorfik olmak üzere 3 farklı jeolojik kökene sahip 9 farklı kayaç türü seçilmiştir. Kayaçlar kendi içlerinde karbonat kökenli (K, KK, DK, İNM, İRM) ve magmatik kökenli (T, A, G, D) olmak üzere ikiye ayrılarak değerlendirilmiştir. Deneylerde kullanılan kayaçların kökenleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kayaçların kökenleri, kodları ve bölgeleri.

Table 1. Origins, codes and regions of rocks.

No	Kodu	Kayaç Türü	Köken	Bölge
1	K	Kireçtaşı	Sedimanter	Eğirdir/Isparta
2	KK	Killi Kireçtaşı (Limra)	Sedimanter	Finike/Antalya
3	DK	Dolomitik Kireçtaşı	Sedimanter	Burdur
4	İNM	Mermer (İnce Kristalli)	Metamorfik	Afyonkarahisar
5	İRM	Mermer (İri Kristalli)	Metamorfik	Manyas/Balıkesir
6	T	Tüf	Magmatik	Afyonkarahisar
7	A	Andezit	Magmatik	Isparta
8	G	Granit	Magmatik	Yaylak/Aksaray
9	D	Diyabaz	Magmatik	Alanya/Antalya

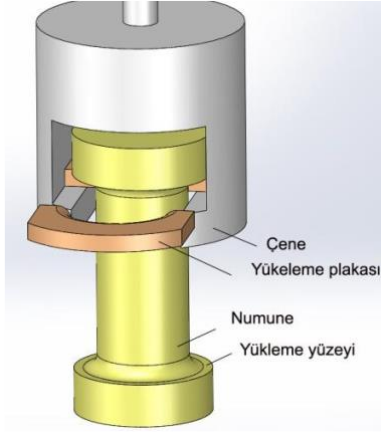
Malzemelerin mekanik özellikleri belirlenirken kullanılan cihazların farklılığı, deney sonuçlarının birbiri ile karşılaştırılmasının yapılacağı çalışmalarda önemli hatalara neden olabilmektedir. Doğru verilerin elde edilebilmesi için tüm deneylerin aynı cihazda yapılması sonuçların güvenilirliği açısından daha uygun olmaktadır. Kayaç gibi düşük çekme dayanımına sahip malzemeler yüksek kapasiteli (40-200 ton) ve analog göstergeli (veri toplama ve kaydetme özelliği olmayan) cihazlar kullanarak test edildiğinde tutarlı verilerin elde edilemediği görülmektedir. Bu çalışma kapsamında alınan hassas veri toplama özelliklerine sahip üniversal test makinası ile bu tarz hataların önüne geçilmesi hedeflenmiştir. UTEST marka Elektromekanik Üniversal Test Cihazı, tam otomatik PC kontrollü, 100 kN kapasiteli, basma, çekme, üç ve dört nokta eğilme testlerini yapmaya uygundur (Şekil 2). Böylece bütün doğrudan ve dolaylı çekme deneyleri aynı cihazda yapılarak hassas bir şekilde deneysel veriler elde edilmiştir.



Şekil 2. Elektromekanik üniversal test cihazı ve aparatları.

Figure 2. Electromechanical universal test device and apparatus.

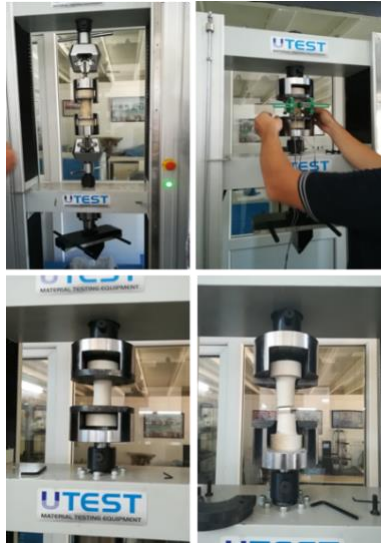
Kayaçların TEÇD'nı belirleyebilmek için dambıl şekilli numune geometrisi (**sürekli değişken kesitli**) kullanılmıştır (Şekil 2). ASTM D 2936 [36] standardında, numunenin 5 ile 15 dk. arasında yenilmesi sağlanacak şekilde yük uygulanması gerektiği belirtilmektedir. Bu nedenle TEÇD deneylerinde yükleme hızı ön deneme çalışmaları için 20 N/sn. daha sonraki çalışmalarda numune türüne göre değişmekle beraber 5-15 N/sn. aralığında seçilmiştir. Deneylerde kullanılan çekme aparatının çizimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan çekme çenesi ve numune montajı.

Figure 3. Jaw used in the experiments and its mounting to the sample.

Doğrudan çekme aparatı bir çene ve iki parçalı simetrik yükleme plakasından oluşmaktadır. Çekme kuvveti, numune yüzeyi ile temasta bulunan yükleme plakalarıyla uygulanmaktadır. TEÇD değeri, yenilme anında uygulanan yükün (F), yük uygulanan kesit alanına (A) bölünmesi ile hesaplanmıştır. Şekil 4'te deneylerin genel görünümüne ait fotoğraflar Tablo 2'de ise tek eksenli çekme deneyinden elde edilen sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 4. TEÇD (dambıl şekilli numune) deneylerine ait bazı görüntüler.

Figure 4. Some images of the UTS (dumbbell shape sample) experiments.

Tablo 2. TEÇD deney sonuçları.

Table 2. UTS test results.

Num. Kodu	Num. Adedi	σ_t (MPa)		DK (%)	Yükleme Hızı (N/s)
		Ort.	SS		
K	8	1.559	0.15	9.32	10
KK	10	3.448	0.90	26.17	10
DK	8	3.289	0.96	29.24	10
İNM	9	3.194	0.61	18.98	10
İRM	9	2.845	0.57	19.88	10
T	5	1.360	0.32	23.31	5
A	7	4.880	1.07	21.85	15
G	7	5.271	1.11	20.98	15
D	7	8.870	2.89	32.65	15

DK: Değişim katsayısı.

3 Deneysel çalışmalar

3.1 Brezilya çekme dayanımı

Brezilya çekme dayanımı (BÇD) deneyinde, TS 7654 standardına göre yükleme hızının 3.5 ile 20 MPa/dk. arasında, kalınlığın çapa oranının (t/D) 0.5 ile 1.0 arasında olması gerektiği belirtilmektedir. ASTM D 3967 [37] Standardına göre ise yükleme hızı 0.05 ile 0.35 MPa/s arasında, (t/D) oranının 0.2 ile 0.75 arasında olması önerilmektedir. ISRM [3] tarafından önerilen metoda göre kalınlığın yarıçapa eşit olması ve yükleme hızının 200 N/s olması gerekmektedir. Bu çalışmada deneyler t/D=0.5 ve yükleme hızı 200 N/sn. olarak seçilmiştir. Brezilya çekme deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Brezilya dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Table 3. Brazilian indirect tensile strength test results.

Num. Kodu	σ_{tBrez} (MPa)		
	Ort.	SS	DK (%)
K	7.678	0.84	10.98
KK	5.343	0.73	13.72
DK	8.594	2.08	24.24
İNM	7.685	0.87	11.34
İRM	5.235	0.60	11.47
T	2.049	0.24	11.96
A	9.405	0.89	9.45
G	9.541	0.68	7.12
D	15.871	1.26	7.92

DK: Değişim katsayısı.

3.2 Üç nokta eğilme dayanımı

Kayaçların 3 Nokta Eğilme Dayanımı (3NED) deneyleri TS EN 12372 [39] (Yoğun yük altında bükülme dayanımı tayini) standardına ve ASTM C 99 [40] standardına göre yapılmıştır. TS EN 12372 nolu standartta kalınlığın (h) 25 mm ile 100 mm arasında olması, uzunluğun (L) kalınlığın 6 katı olması ve genişliğin (b) $50\text{mm} \leq b \leq 3h$ olması önerilmektedir. Mesnetler arası mesafenin ise kalınlığın 5 katı olması gerekmektedir. Bu çalışmada 3NED deneyleri TS EN 12372 standardına göre ve yukarıda belirtilen numune geometrisi koşullarına uymak kaydıyla $50*50*300$ mm ve $25*50*150$ mm boyutlarında olmak üzere 2 farklı şekilde yapılmıştır. Yükleme hızının standartta 0.25 ± 0.05 MPa/s olması önerildiğinden $50*50*300$ mm boyutlarında yapılan deneyler için 66 N/s, $25*50*150$ mm boyutlarında yapılan deneyler için 41 N/s seçilmiştir. ASTM C 99 [40] standardına göre ise önerilen numune geometrisi $101.6*203.2*57.2$ mm olduğu için aynı şekilde deneyler yapılmış yükleme hızı 4450 N/dak önerildiği için 74 N/s seçilmiştir. Mesnetler arası mesafe 177.8 mm olarak belirlenmiştir. Bu bölümde yapılan tüm deneyler için en az 12

adet numune kullanılmış olup hatalı olanlar, en yüksek ve en düşük değerler çıkarılarak kalanların aritmetik ortalaması alınmıştır. 3NED değerleri hem TS EN, hem de ASTM standardına göre yapılan deneyler için aşağıdaki formüle (Eşitlik 1) göre hesaplanmıştır. 3NED deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

$$\sigma_{3Neğ} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (1)$$

- $\sigma_{3Neğ}$ = Numunenin üç nokta eğilme dayanımı, MPa
 F = Kırılma yükü, N
 l = Alt mesnetler arası açıklık, mm
 b = Numunenin eni (genişliği), mm
 h = Numunenin yüksekliği (kalınlığı), mm

Tablo 4. Üç nokta eğilme dayanımı deney sonuçları.

Table 4. Three point flexural strength test results.

Num. Kodu	3N_EN_50 (MPa)		DK (%)	3N_EN_25 (MPa)		DK (%)	3N_ASTM (MPa)		DK (%)
	Ort.	SS		Ort.	SS		Ort.	SS	
K	8.73	1.54	17.64	10.49	1.53	14.58	8.66	1.60	18.50
KK	9.57	1.21	12.61	10.40	0.89	8.55	8.91	0.88	9.93
DK	10.38	2.51	24.15	10.71	1.91	17.87	9.59	3.05	31.78
İNM	15.80	4.04	25.55	12.94	1.17	9.01	14.26	1.69	11.86
İRM	8.81	0.71	8.03	10.04	0.42	4.23	9.24	1.03	11.15
T	3.81	0.29	7.64	3.73	0.33	8.77	3.72	0.35	9.45
A	16.78	1.04	6.20	15.42	1.39	9.03	12.60	1.26	10.04
G	16.63	1.15	6.94	13.55	1.59	11.74	13.34	1.10	8.28
D	21.64	1.34	6.19	22.71	2.14	9.42	20.38	2.17	10.62

DK: Değişim katsayısı.

3.3 Dört Nokta eğilme dayanımı

Kayaçların 4 Nokta Eğilme Dayanımı (4NED) deneyleri TS EN 13161 [41] (Sabit moment altında eğilme dayanımı tayini) standardına ve ASTM C 880-98[42] standardına göre yapılmıştır. TS EN 13161 No.lu Standartta kalınlığın (h) 25 mm ile 100 mm arasında olması, uzunluğun (L) kalınlığın 6 katı olması ve genişliğin (b) 50 mm \leq b \leq 3h olması önerilmektedir. Mesnetler arası mesafe ise kalınlığın 5 katı olması gerekmektedir. 4NED deneyleri TS EN 13161 standardına göre ve yukarıda belirtilen numune geometrisi koşullarına uymak kaydıyla 50*50*300 mm ve 25*50*150 mm boyutlarında olmak üzere 2 farklı şekilde yapılmıştır. Yükleme hızının standartta 0.25 \pm 0.05 MPa/s olması önerildiğinden 50*50*300 mm boyutlarında yapılan deneyler için 66 N/s, 25*50*150 mm boyutlarında yapılan deneyler için 41 N/s seçilmiştir. ASTM C 880-98 standardına göre ise önerilen numune geometrisi 102*32*381 mm olduğu için aynı şekilde deneyler yapılmış ve yükleme hızı 4.14 MPa/dak önerildiği için 70 kPa/s seçilmiştir. Mesnetler arası mesafe 318 mm olarak belirlenmiştir. Bu bölümde yapılan tüm deneyler için en az 12 adet numune kullanılmış olup hatalı olanlar, en yüksek ve en düşük değerler çıkarılarak kalanların aritmetik ortalaması alınmıştır. 4NED değerleri; TS EN standardına göre yapılan deneylerde Eşitlik 2'deki formüle göre, ASTM standardına göre yapılan deneylerde ise Eşitlik 3'teki formüle göre hesaplanmıştır. 4NED deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

$$\sigma_{4Neğ} = \frac{Fl}{bh^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{4Neğ} = \frac{3Fl}{4bh^2} \quad (3)$$

- $\sigma_{4Neğ}$ = Numunenin dört nokta eğilme dayanımı, MPa
 F = Kırılma yükü, N
 l = Alt mesnetler arası açıklık, mm
 b = Numunenin eni (genişliği), mm
 h = Numunenin yüksekliği (kalınlığı), mm

Tablo 5. Dört nokta eğilme dayanımı deney sonuçları.

Table 5. Four point flexural strength test results.

Num. Kodu	4N_EN_50 (MPa)		DK (%)	4N_EN_25 (MPa)		DK (%)	4N_ASTM (MPa)		DK (%)
	Ort.	SS		Ort.	SS		Ort.	SS	
K	7.90	1.83	23.2	7.34	1.48	20.15	7.50	1.13	15.09
KK	8.75	1.18	13.5	7.85	0.92	11.69	8.27	0.49	5.95
DK	8.19	0.99	12.1	7.88	1.32	16.70	7.58	2.20	29.02
İNM	10.68	0.93	8.7	8.33	0.93	11.15	13.38	0.98	7.33
İRM	7.32	0.72	9.8	8.19	0.88	10.74	8.35	0.78	9.34
T	2.52	0.50	19.9	2.77	0.14	5.11	2.89	0.32	11.02
A	13.95	1.12	8.0	13.82	1.48	10.74	12.12	0.79	6.52
G	11.60	1.56	13.4	13.20	1.43	10.84	14.15	1.36	9.61
D	18.98	2.12	11.1	18.20	2.30	12.66	19.26	1.48	7.70

4 Direkt ve indirekt çekme dayanımı deney sonuçlarının yorumlanmasında farklı bir yaklaşım

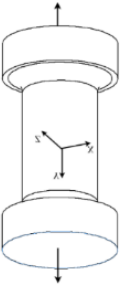
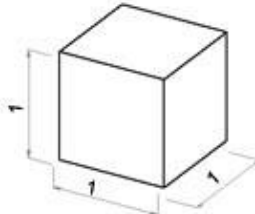
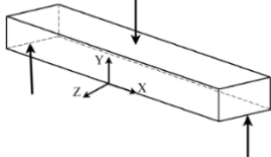
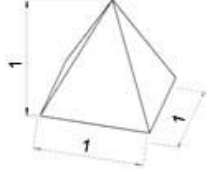
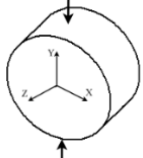

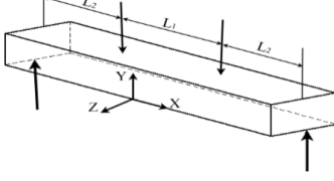
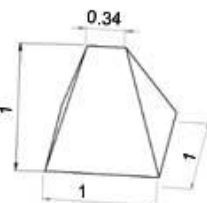
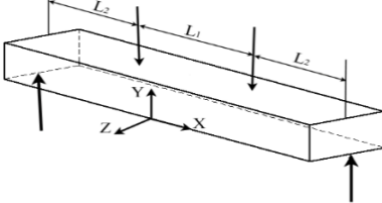
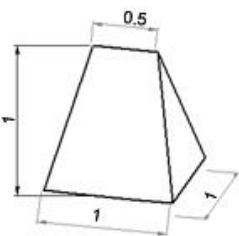
Kaya numunelerinin direkt ve indirekt çekme dayanımları; numunede hasar meydana geldiği anda gerilmenin maksimum olduğu yerdeki değerler kullanılarak belirlenmektedir. Bununla birlikte farklı deney yöntemlerinde farklı gerilme dağılımları mevcut olup, farklı çekme dayanımı sonuçları elde edilmektedir. Genel olarak; indirekt çekme yöntemlerinden elde edilen dayanım değerleri doğrudan çekme yönteminden elde edilen değerlerden yüksek çıkmaktadır. Bu çalışmada; dolaylı çekme yöntemlerinde hasarın olabilmesi için numunenin çekme etkisi altında kalan bölgesindeki birim hacim başına düşen gerilmenin doğrudan çekme deneyinde birim hacim başına düşen gerilmeye eşit olması gerektiği yaklaşımı benimsenmektedir. Böylece farklı deney yöntemleri için birim hacim başına düşen gerilme değerlerinin hesaplanması gerekecektir. Dolaylı çekme yöntemlerinden elde edilen değerlerin doğrudan çekme yönteminden elde edilen değere oranı (k_d) dönüşüm katsayısını gösterecektir. Bu katsayı, numunedeki çekme gerilmesi dağılımı ile doğrudan ilgili olduğundan; numune üzerinde gerilme dağılımını temsil eden birim uzunluğa sahip üç boyutlu geometrik şekil (karakteristik birim hacim) belirlenerek kolaylıkla hesaplanabilir. Örneğin direkt çekme deneyinde 1 MPa'lık gerilme oluşturulduğunda X,Y ve Z eksenleri boyunca gerilme değişmediği ve numunenin her noktasında 1 MPa'lık gerilme oluşacağından birim hacim başına düşen ortalama gerilme de

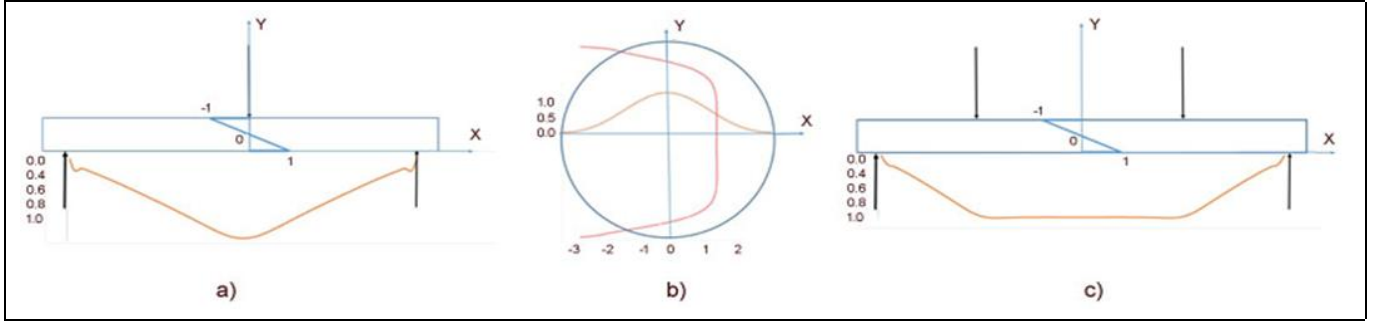
1MPa olacaktır. Bu değer Tablo 6'da görüldüğü gibi direk çekme deneyini temsil eden karakteristik birim küp şeklinde olup, küpün hacmi (=1MPa) birim hacim başına düşen gerilmeye eşittir. Dolaylı yöntemler için dönüşüm katsayısını elde etmek diğer bir ifadeyle ilgili yöntemle karşılık gelen karakteristik birim hacmi belirleyebilmek için bu yöntemlerde kullanılan numunelerdeki gerilme dağılımlarının bilinmesi gerekmektedir. Dolaylı yöntemler için gerilme dağılımları numunelerde maksimum gerilmenin 1MPa olduğu kabul edilerek hesaplanmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir. 3NED deneyinde alt-orta noktadaki maksimum 1 MPa'lık çekme

gerilmesi X ve Y eksenı boyunca lineer olarak azalmakta, Z eksenı boyunca değişmemektedir. Böylece bu deney yöntemi için birim hacime düşen ortalama gerilme, birim taban uzunluğuna sahip X ve Y eksenı boyunca lineer azalan ve Z eksenı boyunca sabit kalan ve Tablo 6'da gösterilen kare piramidin hacim ($k_d = 0.33$) değerine sahip olacaktır. Buradan şöyle bir sonuç çıkarılabilir: 3NED deneyinde 3 MPa'lık gerilme oluşturulursa birim hacim başına gerilme doğrudan çekme yönteminde olduğu gibi 1 MPa olacaktır. 3NED deneylerinde elde edilen dayanım değeri dönüşüm katsayısı ($k_d = 0.33$) ile çarpılarak doğrudan ÇD değerine dönüştürülebilir.

Tablo 6. Çekme deneyleri için karakteristik birim hacim ve dönüşüm katsayıları.

Table 6. Characteristic unit volume and conversion coefficients for tensile tests.

Deney Türü	Karakteristik Birim Hacim	Hacim Hesabı	Dönüşüm Katsayısı (k_d)
 Direkt Çekme		(1)(1)(1)	1
 3NED		$(\frac{1}{3})(1)(1)(1)$	0.33
 Brezilya		$(\frac{1}{2})(1)(1)(1)$	0.5
 4NED TS EN standardı $L_1=L_2$		$(\frac{1}{2})(1)(1)(0.34)$ + $(\frac{1}{3})(1)(1)(1)(0.66)$	0.39
 4NED ASTM standardı $L_1=2L_2$		$(\frac{1}{2})(1)(1)(0.5)$ + $(\frac{1}{3})(1)(1)(1)(0.5)$	0.42



Şekil 5. Dolaylı çekme dayanımı yöntemlerinde numunelerdeki asal gerilme dağılımları (a) 3NED (b) Brezilya diski (c) 4NED.

Figure 5. Principal stress distributions in samples in indirect tensile strength methods (a) 3 point bending (b) Brazilian disc (c) 4 point bending.

4NED deneylerinde ise ilgili formüllerle hesaplanan maksimum gerilme; uygulanan yükler arasında kalan alt yüzeyinde oluşmaktadır. Çekme gerilmesi Z eksenı boyunca ve iki kuvvetin arasında kalan X eksenı boyunca sabit kalmaktadır. Y eksenı ve yük-mesnet noktaları arasındaki X eksenı boyunca ise lineer olarak azalmaktadır (Şekil 5.c). Böylece 4NED deneyi için karakteristik birim hacim kare tabanlı eğik piramit şeklinde olacaktır (Tablo 6). İki kuvvet arasında kalan uzunluk TS-EN standartlarında toplam uzunluğun üçte biri, ASTM standartlarında ise yarısı kadar olduğundan TS EN standardı için ($k_d=0.39$) ve ASTM standardı için ($k_d=0.42$) olarak belirlenmiştir (Tablo 6).

Brezilya deneyinde numunedeki gerilme dağılımı analitik olarak [43] denklemleri ile belirlenebileceği gibi sonlu elemanlar yöntemleri gibi sayısal yöntemlerle de belirlenebilir. Bu çalışmada Ansys R18 yazılımı kullanılarak Brezilya disk numunesine maksimum 1 MPa'lık gerilme oluşturacak şekilde bir yükleme yapılmış ve numunede oluşan gerilme dağılımı merkezden geçen yatay ve dikey eksen boyunca Şekil 5(b)'de gösterilmiştir. Brezilya numunesinde çekme gerilmesi X eksenı boyunca lineer olarak azalmakta, Y eksenı boyunca (kuvvet uygulama bölgesine yakın kısımlar hariç) yaklaşık olarak sabit kalmakta ve Z eksenı boyunca yine sabit kalmaktadır. Bu durumda iki eksen boyunca gerilmenin sabit diğer eksen boyunca lineer azalan gerilme durumunu temsil eden geometrik şekil üçgen prizma şeklinde olup, tabanı birim uzunluğa sahip üçgen prizmanın hacmi $k_d=0.5$ olarak hesaplanabilir (Tablo 6). Deneysel ve teorik olarak elde edilen katsayılar Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Deneysel ve teorik katsayılar.

Table 7. Experimental and theoretical coefficients.

Deney	Deneysel Belirlenen Katsayı (Karbonat)	Deneysel Belirlenen Katsayı (Magmatik)	Teorik Önerilen Katsayı (k_d)
Brezilya	0.47	0.55	0.50
3NED	0.29	0.37	0.33
4NED	0.37	0.43	0.39-0.42

Herbir deney gurubu için 9 kayacın ortalama değerlerinin teorik katsayı ile düzeltildikten sonra yine 9 kayacın ortalama TEÇD değeri ile karşılaştırması ve fark yüzdesi Tablo 8'de gösterilmiştir. Önerilen teorik dönüşüm katsayısının hata yüzdesi en az %0.94 ile 4N_EN_50 kodlu deneyde, en çok %13.05 ile 4N_ASTM kodlu deneyde olduğu görülmektedir.

Tablo 8. Teorik katsayı ile düzeltilmiş dolaylı çekme dayanımı değerlerinin TEÇD değerleri ile kıyaslanması.

Table 8. Comparison of indirect tensile strength values corrected with theoretical coefficient with UTS values.

Test	Ortalama Dolaylı ÇD (MPa)	Önerilen Teorik Katsayı (k_d)	Dönüştürülmüş Dolaylı ÇD	Ortalama TEÇD (MPa)	Fark (%)
Brezilya (t/D=0.5)	7.93	0.50	3.97		2.72
3N_EN_50	12.46	0.33	4.11		6.52
3N_EN_25	12.22	0.33	4.03		4.47
3N_ASTM	11.19	0.33	3.69	3.86	-4.33
4N_EN_25	9,73	0.39	3.79		-1.69
4N_EN_50	9.99	0.39	3.90		0.94
4N_ASTM	10.39	0.42	4.36		13.05

5 Tartışma

Çekme deneylerinde anizotropinin etkisi, yani kayaçtaki inklüzyonlar, kaolinize zonlar ve mikro çatlakların değişik doğrultuları farklı çekme dayanımı değerleri elde edilmesine sebep olabilmektedir. Bu nedenle, disk şeklindeki numunelere farklı doğrultularda yük uygulanması daha doğru sonuçlar elde edilmesine imkân sağlayacaktır. Bazı araştırmacılar litolojik özelliklerin dolaylı ÇD'na etkisi konularında çalışmalar yapmışlardır. Örneğin [44], anizotropik özellik gösteren kayaçların dolaylı ÇD'nı belirleyebilmek için halka yöntemini (ring test) kullanmışlardır. [45] tarafından yapılan çalışmada, heterojen kayada statik ve dinamik yükleme koşullarında kaya yenilme proses analizine (RFPA) bağlı olarak Brezilya diskinin deformasyon ve yenilme süreci açıklanmaya çalışılmıştır. Çalışmada malzeme özelliklerinin Weibull dağılımına uyduğu farz edilerek kayanın heterojenliği göz önünde bulundurulmuştur. [24] BÇD'nda izotropinin ve yenilme paterninin etkisini incelemişlerdir. Mikro ölçek parametrelerinin makro ölçek davranışa etkisinin tartışıldığı çalışmada belirgin tabakalı kumtaşında üç farklı çatlak türü (tabaka aktivasyonu, merkezi çatlaklar ve merkezi olmayan çatlaklar) gözlemlenmiştir. [46] tarafından yapılan çalışmada kireçtaşı numunelerinde tabakalanma eğimlerine göre BÇD değerleri belirlenmiş ve açılara bağlı olarak yenilme tipleri bulunmuştur. [47] tarafından çalışmada BÇD ve akustik emisyon deneylerinde yükleme yönüne bağlı olarak farklı tabaka yönelme durumlarında (farklı açılarda) anizotropik şist numunelerinin karakteristikleri incelenmiştir. [48] şeyl numuneleri üzerinde anizotropik çekme davranışını inceledikleri çalışmalarında Brezilya testinde sistematik olarak gerinim hızlarını değiştirmişler ve tabakalanma düzlemlerinin yükleme doğrultusu ile yaptıkları açıya bağlı olarak dolaylı ÇD'nın değişimini araştırmışlardır. Bu çalışmaların sonuçları, kayaçların litolojik özelliklerinin dayanım değeri üzerinde etkili olduğuna örnek olarak gösterilebilir. Ancak bu çalışmada kullanılan kayaç türleri belirlenirken mümkün olduğu kadar farklı mineralojik yapının temsil edilmesi amaçlanmıştır. Kayaçların mekanik özellikleri incelendiğinde ise sonuçlar geniş bir aralıkta karşımıza çıkmıştır. Numuneler olabildiğince homojene yakın seçilmiştir. Bariz tabakalanma gösteren kayaç türü çalışmada kullanılmamıştır. Deney çeşitliliği ve kullanılan numune sayısı düşünüldüğünde; çalışmanın kapsamının dışına çıkılmaması için litolojik özelliklerin etkisi incelenmemiştir.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, kayaçların direkt ÇD'nı indirekt yöntemlerden elde edilen veriler kullanarak tahmin eden deneysel katsayılar elde edilmiştir. Ayrıca, indirekt yöntemlerde kullanılan numunelerdeki çekme gerilmesi etkisinde kalan bölgelerdeki gerilme dağılımının geometrik şekli kullanılarak, her bir dolaylı çekme deneyi yöntemi için, kayaç türünden bağımsız, teorik bir katsayı elde edilmiştir. Karbonat ve magmatik kökenli kayaçlar için sırasıyla deneysel katsayılar; Brezilya testi için 0.47/0.55, 3NED deneyi için 0.29/0.37, 4NED deneyi için 0.37/0.43, teorik katsayılar ise; Brezilya testi için 0.5, 3NED deneyi için 0.33, 4NED deneyi için 0.39-0.42 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada önerilen yaklaşımla karbonat ve magmatik kökenli kayaçlar için ortak tek bir katsayı belirlenmiş olsa da bu katsayının deneysel katsayılar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Aradaki küçük farkların ise kayaç türüne bağlı anizotropi ve dokusal farklılıklar gibi malzeme özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

7 Conclusion

In this study, experimental coefficients that estimate the direct tensile strength using the indirect testing methods was obtained. Also, by using the stress distribution under the tensile zone of the indirect test specimen, regardless of the types of rocks, theoretical coefficients were obtained for each indirect testing method. For carbonate and igneous rocks, the experimental coefficient was 0.47/0.55 for the Brazilian test, 0.29/0.37 for the 3 point bending test, 0.37 / 0.43 for the 4 point bending test, respectively. The theoretical coefficient was found to be 0.5 for the Brazilian test, 0.33 for the 3 point bending test, and 0.39-0.42 for the 4 point bending test. Although a single theoretical coefficient was determined for carbonate and igneous rocks with the approach suggested in this study, it is seen that this coefficient is compatible with the experimental coefficients. The minor differences between them are thought to be due to material properties depending on the rock type.

8 Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında, TÜBİTAK 116M724 No'lu Proje tarafından desteklenmiştir. Kuruma, katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

9 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Kenan TÜFEKÇİ sonlu elemanlar analizinin yapılması, teorisinin geliştirilmesi ve makalenin yazımında; Servet DEMİRDAĞ makalenin yazımı, literatür çalışması, deneylerde kullanılan malzemelerin seçimi, numunelerin işlenmesi ve deney sonuçlarının analizinde; Nazmi ŞENGÜN deneylerin yapılması ve tablolara aktarılmasında; Tamer EFE literatür çalışması, makalenin yazımı ve deneysel çalışmalarda; Raşit ALTINDAĞ makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

10 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

11 Kaynaklar

- [1] Perras MA, Diederichs MS. "A review of the tensile strength of rock: Concepts and testing". *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(2), 525-546, 2014.
- [2] Çelik SB, Çobanoğlu İ, Koralay T. "Leeb sertliğinin kaya malzemesinin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin tahmininde kullanılması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(8), 1385-1392, 2020.
- [3] Brace WF. "Brittle fracture of rocks". *Proceedings of the International Conference on State of Stress in the Earth's Crust*, Elsevier, New York, USA, 13-14 June 1963.
- [4] Hoek E. "Fracture of anisotropic rock". *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 64(10), 501-518, 1964.
- [5] Colback PSB. "An analysis of brittle fracture initiation and propagation in the brazilian test". *1st ISRM Congress*, Lisbon, Portugal, 25 September-1 October 1966.
- [6] Ünlü T, Yılmaz Ö. "Kaya malzemelerinin direkt çekme dayanımının belirlenmesi için geliştirilen yeni bir deney düzeneği". *11. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Afyonkarahisar, Türkiye, 7-9 Mayıs 2014.

- [7] Tufekci K, Demirdag S, Sengun N, Altindag R, Akbay D. "A new design test apparatus for determining direct tensile strength of rocks". *EUROCK 2016 Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future*, Cappadocia, Turkey, 29-31 August 2016.
- [8] Komurlu E, Kesimal A, Durmus AD. "Dog bone shaped specimen testing method to evaluate tensile strength of rock materials". *Geomechanics and Engineering*, 12(6), 883-898, 2017.
- [9] Mellor M, Hawkes I. "Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli". *Engineering Geology*, 5(3), 173-225, 1971.
- [10] Lajtai EZ. "Tensile strength and its anisotropy measured by point and line-loading of sandstone". *Engineering Geology*, 15(3-4), 163-171, 1980.
- [11] Pandey P, Singh DP. "Deformation of a rock in different tensile tests". *Engineering Geology*, 22(3), 281-292, 1986.
- [12] Satoh Y. "Position and load of failure in brazilian test; a numerical analysis by griffith criterion". *Journal of the Society of Materials Science*, 36(410), 1219-1224, 1987.
- [13] Newman DA, Bennett DG. "The effect of specimen size and stress rate for the brazilian test-A statistical analysis". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 23(2), 123-134, 1990.
- [14] Bazant ZP, Kazemi MT, Hasegawa T, Mazars J. "Size effect in brazilian split-cylinder tests. Measurements and fracture analysis". *ACI Materials Journal*, 88(3), 325-332, 1991.
- [15] Andreev GE. "A review of the brazilian test for rock tensile strength determination. part I: Calculation formula". *Mining Science and Technology*, 13(3), 445-456, 1991.
- [16] Yu Y, Meng C. "3-D distribution of tensile stress in rock specimens for the brazilian test". *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 12(6), 495-499, 2005.
- [17] Yu Y, Yin J, Zhong Z. "Shape effects in the brazilian tensile strength test and a 3D FEM correction". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(4), 623-627, 2006.
- [18] Yu Y, Zhang J. "A modified brazilian disk tension test". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2), 421-425, 2009.
- [19] Chen CS, Pan E, Amadei B. "Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using brazilian tests". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(1), 43-61, 1998.
- [20] Exadaktylos GE, Kaklis KN. "Applications of an explicit solution for the transversely isotropic circular disc compressed diametrically". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(2), 227-243, 2001.
- [21] Claesson J, Bohloli B. "Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(8), 991-1004, 2002.
- [22] Cai M, Kaiser PK. "Numerical simulation of the brazilian test and the tensile strength of anisotropic rocks and rocks with preexisting cracks". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(3), 1-6, 2004.
- [23] Chou YC, Chen CS. "Determining elastic constants of transversely isotropic rocks using brazilian test and iterative procedure". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(3), 219-234, 2008.
- [24] Tavallali A, Vervoort A. "Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under brazilian test conditions". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(2), 313-322, 2010a.
- [25] Tavallali A, Vervoort A. "Failure of layered sandstone under brazilian test conditions: Effect of micro-scale parameters on macro-scale behaviour". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(5), 641-653, 2010b.
- [26] Lavrov A, Vervoort A. "Theoretical treatment of tangential loading effects on the brazilian test stress distribution". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2), 275-283, 2002.
- [27] Xu G, Chen F, Xiao JQ. "Influence of load contact condition on rock tensile strength". *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(1), 168-173, 2006.
- [28] Markides CF, Pazis DN, Kourkoulis SK. "Influence of friction on the stress field of the brazilian tensile test". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(1), 113-119, 2011.
- [29] Dorogoy A, Banks-Sills L. "Effect of crack face contact and friction on brazilian disk specimens-a finite difference solution". *Engineering Fracture Mechanics*, 72(18), 2758-2773, 2005.
- [30] Yu Y. "Questioning the validity of the brazilian test for determining tensile strength of rocks". *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(7), 1150-1157, 2005.
- [31] Li D, Wong LNY. "The brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 269-287, 2013.
- [32] Coviello A, Lagioia R, Nova R. "On the measurement of the tensile strength of soft rocks". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(4), 251-273, 2005.
- [33] Razavi SMJ, Aliha MRM, Berto F. "Application of an average strain energy density criterion to obtain the mixed mode fracture load of granite rock tested with the cracked asymmetric four-point bend specimens". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 97, 419-425, 2018.
- [34] Yu M, Wei C, Niu L, Li S, Yu Y. "Calculation for tensile strength and fracture toughness of granite with three kinds of grain sizes using three-point-bending test". *Plos One*, 13(3), 1-20, 2018.
- [35] Fan X, Lin H, Cao R. "Bending properties of granite beams with various section-sizes in three-point bending tests". *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(1), 1-11, 2019.
- [36] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method Direct Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens". ASTM International, West Conshohocken, USA, ASTM D 2936-08, 2008.
- [37] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method For Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens". ASTM International, West Conshohocken, USA, ASTM D 3967-08, 2008.
- [38] International Society for Rock Mechanics. *The complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. Editors: Ulusay R and Hudson JA. Ankara, Turkey, 2007.
- [39] Türk Standartları Enstitüsü. "Doğal Taşlar-Deney Metotları-Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı Tayini". Ankara, Türkiye, TS EN 12372, 2007.

- [40] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method for Modulus of Rupture of Dimension Stone". ASTM International, West Conshohocken, USA, ASTM C99/C99M-15, 2015.
- [41] Türk Standartları Enstitüsü. "Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımının Tayini". Ankara, Türkiye, TS EN 13161, 2014.
- [42] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method for Flexural Strength of Dimension Stone". ASTM International, West Conshohocken, USA, ASTM C880/C880M-15, 2015.
- [43] Hondros G. "The evaluation of poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete". *Australian Journal of Applied Science*, 10(3), 243-268, 1959.
- [44] Chen CS, Hsu SC. "Measurement of indirect tensile strength of anisotropic rocks by the ring test". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 34(4), 293-321, 2001
- [45] Zhu WC, Tang CA. "Numerical simulation of brazilian disk rock failure under static and dynamic loading". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 236-252, 2006.
- [46] Jianbing L, Zhancheng X, Yingmei Y, Miao Y, Zhitao Y, "Study on brazilian splitting test of bedding limestone slope deformation failure". *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(16), 1-8, 2017.
- [47] Zhang SW, Shou KJ, Xian XF, Zhou JP, Liu GJ. "Fractal characteristics and acoustic emission of anisotropic shale in brazilian tests". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 298-308, 2017.
- [48] Wang Y, Li C, Hu Y, Mao T. "Brazilian test for tensile failure of anisotropic shale under different strain rates at quasi-static loading". *Energies*, 10(9), 1-11, 2017.