T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZAYIF KAYA MALZEMESİNİN DOĞRUDAN VE DOLAYLI ÇEKME DAYANIMLARI ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Fatih Mehmet DEMİRBAĞ

Yüksek Lisans Tezi

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Uygulamalı Jeoloji Bilim Dalı

NİSAN 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

ZAYIF KAYA MALZEMESİNİN DOĞRUDAN VE DOLAYLI ÇEKME DAYANIMLARI ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Tez Yazarı
Fatih Mehmet DEMİRBAĞ

Danışman
Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK

NİSAN 2021
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Zayıf Kaya Malzemesinin Doğrudan ve Dolaylı Çekme Dayanımları Arasındaki İlişkiler
Yazarı:	Fatih Mehmet DEMİRBAĞ
İlk Teslim Tarihi:	25.02.2021
Savunma Tarihi:	09.04.2021

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

	İmza	
Danışman:	Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Mesut GÖR Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım "Zayıf Kaya Malzemesinin Doğrudan ve Dolaylı Çekme Dayanımları Arasındaki İlişkiler" Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

09.04.2021

Fatih Mehmet DEMİRBAĞ

ÖNSÖZ

Çekme dayanımının mühendislik uygulamaları tasarımında sıkışma dayanımı kadar önemli bir yere sahip olduğu günümüze değin yapılan birçok çalışmada vurgulanmıştır. Kaya mekaniği çalışmalarında kayanın sıkışma etkisi altında kaldığı ilkesinden yola çıkılarak genellikle tek eksenli sıkışma dayanımlarına odaklanılmasına rağmen, bu alandaki çalışmalara ait sonuçlar çekme dayanımının da kaya malzemesinin veya kaya kütlesinin yenilmeye karşı direncinin çok önemli bir bileşeni olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, kaya malzemesinin çekme dayanımının sağlıklı bir şekilde belirlenmesi, yapılan tasarımın güvenilirliği ve maliyeti açısından önem taşımaktadır.

Kaya mekaniği çalışmaları sırasında, kaya malzemesinin çekme dayanımı belirlenirken doğrudan veya dolaylı yöntemler kullanılmaktadır. Ancak, doğrudan çekme yönteminin zor uygulanması ve zaman alıcı olması nedeniyle tasarımcılar dolaylı yöntemleri tercih etmektedirler. Çekme dayanımının dolaylı olarak belirlenebildiği birkaç yöntem arasında Brazilian deney yöntemi en çok tercih edilen yöntemdir. Kolay yapılabilen ve kısa sürede sonuç elde edilebilen bu yöntem ile belirlenen çekme dayanımı değeri, mühendislik tasarımlarında kaya malzemesinin çekme dayanımı olarak kullanılmaktadır. Ancak, çekme dayanımı konusunda yapılan çalışmalar, kaya malzemesinin dolaylı olarak belirlenen çekme dayanımının doğrudan belirlenen çekme dayanımını tam olarak karşılamadığını, dolaylı olarak belirlenen değerlerin doğrudan belirlenen çekme dayanımı değerlerinden genellikle daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalara ait sonuçlar dikkate alındığında, kaya malzemesinin doğrudan ve dolaylı çekme dayanımları arasındaki ilişkilerin belirlenmesi ve bu ilişki dikkate alınarak dolaylı olarak belirlenen çekme dayanımı değerlerinde düzeltmelerin yapılarak tasarımda kullanılması, tasarımın güvenirliği açısından önem taşımaktadır. Dolayısıyla, kaya malzemesinin doğrudan ve dolaylı çekme dayanımları arasındaki ilişkilerin araştırıldığı çalışmalardan elde edilecek sonuçlar bu konuda önemli bir veri tabanı oluşturacaktır.

"Zayıf Kaya Malzemesinin Doğrudan ve Dolaylı Çekme Dayanımları Arasındaki İlişkiler" başlıklı bu çalışmada, düşük dayanımlı zayıf kaya malzemesinin doğrudan çekme dayanımı ile Brazilian deneyi ile belirlenen dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve tasarımcıların Brazilian deneyinden elde ettiği çekme dayanımını kullanarak kayanın doğrudan çekme dayanımını tahmin edebileceği bir eşitlik önerilmiştir.

Bu tez çalışmalarımda değerli görüş ve yönlendirmeleriyle doğrudan katkı sağlayan danışman hocam Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK'a ve katkılarından dolayı Jüride yer alan Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ ve Dr. Öğr. Üyesi Mesut GÖR'e, laboratuvar çalışmalarında desteğini esirgemeyen Dr. Arş. Gör. Mustafa KANIK'a, örnek alımında ve laboratuvar deneylerinde yardımcı olan DSİ 9. Bölge Müdürlüğü mesai arkadaşlarıma ve her kararımda beni destekleyerek yanımda olan eşime ve aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **MF.19.21** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir

Fatih Mehmet DEMİRBAĞ
ELAZIĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ iv
İÇİNDEKİLER v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
ŞEKİLLER LİSTESİ viii
TABLOLAR LİSTESİ ix
SİMGELER x
KISALTMALAR xi

1. GİRİŞ 1

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 4

3. KAYA MALZEMESİNİN DAYANIMI 12

3.1. Kaya Malzemesinin Sıkışma Dayanımı 13
3.2. Kaya Malzemesinin Makaslama Dayanımı 13
3.3. Kaya Malzemesinin Burulma Dayanımı 15
3.4. Kaya Malzemesinin Çekme Dayanımı 15
3.4.1. Çekme Dayanımın Doğrudan Belirlenmesi 16
3.4.2. Çekme Dayanımın Dolaylı Olarak Belirlenmesi 18
Brazilian Deneyi 18
Üç ve Dört Nokta Eğilme Dayanımı Deneyi 19
Halka (Ring) Deneyi 20
Luong Deneyi 21
Üç Eksenli Sınırlandırılmış (Confinied) Çekme Deneyi 22

4. MATERYAL VE METOT 23

4.1. Örneklerin Derlenmesi ve Hazırlanması 23
4.2. Doğrudan Çekme Deneyi 26
4.3. Brazilian Deneyi 30
4.4. Doğrudan Çekme ve Brazilian Deneylerine Ait Sonuçlar 31

5. BULGULAR VE TARTIŞMA 33

5.1. Regresyon Analizleri 33
5.1.1. A Grubu Örneklere ait Basit Regresyon Analizi 33
5.1.2. B Grubu Örneklere ait Basit Regresyon Analizi 34
5.1.3. C Grubu Örneklere ait Basit Regresyon Analizi 35
5.1.4. D Grubu Örneklere ait Basit Regresyon Analizi 36
5.1.5. E Grubu Örneklere Ait Basit Regresyon Analizi 36
5.1.6. Tüm Örnek Gruplarına Ait Basit Regresyon Analizi 37

6. SONUÇLAR 39

KAYNAKLAR 41
ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Zayıf Kaya Malzemesinin Doğrudan ve Dolaylı Çekme Dayanımları Arasındaki İlişkiler

Fatih Mehmet DEMİRBAĞ

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan 2021, Sayfa: xi + 47

Kaya malzemesinin çekme dayanımı, yenilme kriterleri, yeraltı kazılarının duraylılığı, kazılabilirlik ve kırılma mekaniği gibi kaya mekaniği uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Ancak, jeoteknik tasarımlarda sıkışma dayanımına göre daha az kullanılır. Bu parametre, doğrudan ve dolaylı yöntemler kullanılarak belirlenebilmektedir. Doğrudan çekme deneyi daha sağlıklı sonuç vermesine karşın yöntemin zorluğu kullanım alanını sınırlamaktadır. Doğrudan çekme deneyinde standart boyda örnek hazırlama, örnek içerisinde yer alan süreksizlikler, deney esnasında örneğin alt-üst yüzeyinin birbirine tam paralel olması koşulu, örnek üzerine yapıştırılan başlıkların hassasiyeti, yapıştırıcı kür süresi ve çekme makinesinin bulunamaması vb. zorluklar nedeniyle yöntem yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu nedenlerden dolayı, daha basit ve uygulanması kolay olan Brazilian, üç ve dört nokta eğilmede çekme ve Loung deneyi gibi dolaylı yöntemler tercih edilmektedir. Ancak, çekme dayanımı konusunda yapılan çalışmalar, dolaylı yöntemler kullanılarak belirlenen çekme dayanımı değerlerinin kaya malzemesinin gerçek çekme dayanımını temsil etmediğini göstermektedir. Bu nedenle, kaya malzemesinin doğrudan ve dolaylı olarak belirlenen çekme dayanımları arasındaki ilişkilerin ortaya konulması önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, düşük dayanıma sahip zayıf kaya malzemesinin doğrudan ve Brazilian çekme dayanımları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla, andezit, granodiyorit, tüf, marn ve killi kireçtaşı olmak üzere farklı litolojiye sahip formasyonlardan derlenen toplam 152 karot örneğinde doğrudan ve Brazilian çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar genel olarak kaya malzemesinin doğrudan çekme dayanımı değerlerinin, Brazilian çekme dayanımına göre daha düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca, doğrudan ve dolaylı çekme dayanımı değerleri, basit regresyon analizleri ile değerlendirilmiş ve kaya malzemesinin doğrudan ve Brazilian çekme dayanımları arasındaki ilişki belirlenmiştir. Regresyon analizi sonuçlarına göre, bu iki çekme dayanımı arasında çok kuvvetli pozitif bir korelasyon ($r = 0.89$) mevcuttur. Bu korelasyonu ifade eden eşitlik ile çekme dayanımı yaklaşık 12 MPa'dan daha düşük olan kaya malzemesinin Brazilian çekme dayanımı kullanılarak kaya malzemesinin doğrudan çekme dayanımını tahmin edilebilir.

Anahtar Kelimeler: Çekme dayanımı, Brazilian deneyi, kaya malzemesi, regresyon analizi

ABSTRACT

Relationships Between Direct and Indirect Tensile Strength of Weak Rock Material

Fatih Mehmet DEMİRBAĞ

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geological Engineering

April 2021, Pages: xi + 47

The tensile strength has an important place in rock mechanics applications such as failure criteria, stability of underground excavations, excavation and failure mechanics. However, it is used less considering the compressive strength in geotechnical designs. This parameter can be determined using direct and indirect methods. Despite the fact that the direct tensile test gives more reliable results, the difficulty of the testing requirements limits its extensive usage. The method is not widely used due to the difficulties like; difficulty of standard size sample preparation, the existing discontinuities in the sample, the requirement that the upper and lower surfaces of the sample should exactly be parallel to each other during the test, the sensitivity of the heads attached to the surface of the sample, the curing time of the epoxy and absence of pulling machine etc. For these reasons, indirect methods such as Brazilian, three- and four-point bending tensile and Loung tests, which are simpler and easier to carry out, are widely preferred. However, previous studies focused on the tensile strength showed that the tensile strength values determined using the indirect methods do not represent the true tensile strength of the rock material. Accordingly, it has significant importance to reveal the relations between the direct and indirect tensile strengths of the rock material.

In this study, the relationship between the direct and Brazilian tensile strengths of weak rock material was investigated. For this purpose, the direct and Brazilian tensile tests were carried out on a total of 152 core samples collected from different lithologies, including andesites, granodiorites, tuffs, marls and clayey limestones.

The results indicated that the direct tensile strength values of the rock material in general are lower than the Brazilian tensile strength. Likewise, the direct and indirect tensile strength values were evaluated by simple regression analysis and the relationship between the direct and Brazilian tensile strengths of the rock material was determined. According to the regression analysis results, there is a very strong positive correlation (r=0.89) between these two tensile strengths. With the equation expressing this correlation, the direct tensile strength of the rock material can be estimated by using the Brazilian tensile strength of the rock material with a tensile strength lower than about 12 MPa.

Keywords: Tensile strength, Brazilian test, Rock material, Regression analysis

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Kayaçlarda gerilme türleri (a) Sıkışma gerilmesi, (b) Çekme gerilmesi, (c) Kesme gerilmesi, (d) Burulma gerilmesi 12

Şekil 3.2. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi 13

Şekil 3.3. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneyindeki basınç hücresi 14

Şekil 3.4. Mohr daireleri, Mohr yenilme zarfı ve kohezyon (c) ile içsel sürtünme açısının (φ) belirlenmesi 15

Şekil 3.5. Doğrudan çekme deneyi yöntemleri (a) Hoek, 1964; (b) Brace, 1964; (c) ISRM, 2007 ve ASTM D2936, 2008a; (d) Gorski, 1993 ve Klanphumeesri, 2010 16

Şekil 3.6. Doğrudan çekme deneyi için önerilen farklı kavrama tipleri (a) Obert vd., (1946), (b) Fairhurst (1961), (c) Hawkes ve Mellor (1970) 17

Şekil 3.7. Brazilian deneyinde kullanılan yükleme levhaları (a) Düz yükleme levhası, (b) Tamponlu yükleme levhası, (c) Çelik çubuklu yükleme levhası, (d) Yükleme çenesi 19

Şekil 3.8. Üç (a) ve dört (b) nokta eğilme deneyleri 19

Şekil 3.9. Halka (ring) deneyinin uygulanışı 20

Şekil 3.10. Luong deneyinde örnek ve yükleme 21

Şekil 3.11. Üç eksenli sınırlandırılmış çekme deney düzeneği 22

Şekil 4.1. Örnekleme yapılan karot sandıkları 23

Şekil 4.2. Karot örneklerin kesim için hazırlanması (a) ve kesilmesi (b) 25

Şekil 4.3. Kesilerek deneylere hazır hale getirilmiş örnekler 26

Şekil 4.4. Örneklerin deneye hazır hale getirilmesi. Etüvde (a) ve havasız ortamda (b) bekletme 27

Şekil 4.5. Deneye hazır örneğin şematik gösterimi 28

Şekil 4.6. Doğrudan çekme deneyinin gerçekleştirilmesi 28

Şekil 4.7. Deneyin geçerli kabul edildiği yenilmiş örnekler 29

Şekil 4.8. Deneyin geçerli kabul edilmediği yenilmiş örnekler: (a) Yenilmenin bağlantı yerlerine yakın meydana geldiği örnek, (b) Yenilmenin süreksizlikten meydana geldiği örnek 29

Şekil 4.9. Brazilian deneyinin şematik gösterimi (a) ve deneyin gerçekleştirilmesi (b) 31

Şekil 4.10. Brazilian deneyinde standartlara uygun olarak yenilen (a) ve standart dışı yenilen (b) örnekler 31

Şekil 5.1. A Grubu örneklere ait dağılım grafiği 34

Şekil 5.2. B Grubu örneklere ait dağılım grafiği 35

Şekil 5.3. C Grubu örneklere ait dağılım grafiği 35

Şekil 5.4. D Grubu örneklere ait dağılım grafiği 36

Şekil 5.5. E Grubu örneklere ait dağılım grafiği 37

Şekil 5.6. Tüm örneklere ait dağılım grafiği 38

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. Laboratuvar çalışmaları için derlenen örneklere ait bilgiler 24

Tablo 4.2. Doğrudan çekme ve Brazilian deneyleri için hazırlanan örnek sayıları..... 25

Tablo 4.3. Doğrudan çekme deneylerine ait sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilmesi 32

SİMGELER

A	: Yüzey alanı
α	: Regresyon sabiti
b	: Örneğin eni
β	: Regresyon katsayısı
c	: Kohezyon
D	: Örneğin çapı
d_1	: Örneğin en büyük yarıçapı
d_2	: Örneğin en küçük yarıçapı
F	: Yenilme anındaki kuvvet
φ	: İçsel sürtünme açısı
h	: Örneğin yüksekliği
l	: Alt mesnetler arası açıklık
L	: Örneğin boyu
M_c	: Örneğe etkiyen moment
P	: Hidrolik basınç
r	: Korelasyon katsayısı
S_o	: Kayanın kesme dayanımı
σ	: Normal Gerilme
σ_1	: En büyük asal normal gerilme
σ_2	: Orta asal normal gerilme
σ_3	: En küçük asal normal gerilme
t	: Örneğin kalınlığı
τ	: Kesme gerilmesi
X	: Bağımsız değişken
Y	: Bağımlı değişken

KISALTMALAR

ASTM : American Society for Testing and Materials
BÇD : Brazilian çekme dayanımı
BD : Brazilian deneyi
BEM : Sınırlı elemanlar yöntemi
BS : British standard
ÇD : Çekme dayanımı
$ÇD_{Halka}$: Dolaylı çekme dayanımı
DÇD : Doğrudan çekme dayanımı
EÇD : Eğilmede çekme dayanımı
$EÇD_{3nokta}$: Üç nokta eğilmede çekme dayanımı
$EÇD_{4nokta}$: Dört nokta eğilmede çekme dayanımı
EN : Avrupa norm
FDM : Sonlu farklar yöntemi
FEM : Sonlu elemanlar yöntemi
ISRM : International Society for Rock Mechanics
MD : Makaslama dayanımı
SD : Sıkışma dayanımı
TEÇD : Tek eksenli çekme dayanımı
TESD : Tek eksenli sıkışma dayanımı
TSE : Türk Standartları Enstitüsü

1. GİRİŞ

Kaya malzemesinin dayanımı, jeoteknik tasarımlarda en sık kullanılan ve en önemli girdi parametrelerinden birisidir. Dolayısıyla, dayanımın doğru ve gerçeğe en yakın olarak belirlenmesi, yapılan tasarımın güvenirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Dayanımın kaya malzemesine etkiyen gerilmenin türüne bağlı olarak sıkışma, çekme ve makaslama gerilmesi gibi farklı türleri bulunmaktadır. Kaya malzemesine sıkışma gerilmesi uygulanması durumunda yenilme anındaki gerilme değeri kaya malzemesinin sıkışma dayanımı (SD), çekme gerilmesi uygulanması durumunda yenilme anındaki gerilme değeri kaya malzemesinin çekme dayanımı (ÇD), makaslama gerilmesi uygulanması durumunda yenilme anındaki gerilme değeri ise kaya malzemesinin makaslama dayanımı (MD)'dır. Dolayısıyla, kaya malzemesinin hangi dayanımı belirlenmek isteniyorsa, uygulanacak olan gerilmenin buna göre seçilmesi gereklidir. Bir kaya malzemesine ait her bir dayanımın değeri farklı olduğu gibi bu dayanımları belirlemek için kullanılan deneysel yöntemler de farklıdır. Günümüzde, kaya malzemesinin dayanımının belirlenmesine yönelik olarak TSE (Türk Standartları Enstitüsü), BS (British Standard), ASTM (American Society for Testing and Materials), ISRM (International Society for Rock Mechanics) gibi ulusal ve uluslararası kurum veya topluluklar tarafından önerilmiş birçok standart ve yöntem mevcuttur. Araştırmacılar, bu standartları veya yöntemleri kullanarak kaya malzemesinin dayanımını laboratuvarlarda belirleyebilmektedirler.

Aynı doğrultuda birbirlerinden uzaklaşan zıt yönlerdeki kuvvetlerin oluşturduğu çekme gerilmesi altında kalan kaya malzemesinin yenilme anındaki gerilme değeri olarak tanımlanan ÇD, ISRM (1975) tarafından çekme gerilmesi altındaki kaya malzemesinin yenilmeden dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesi değeri olarak tanımlanmaktadır.

Bu parametre, mühendislik tasarımında SD'ye göre daha az kullanılmasına karşın, bazı kaya mekaniği uygulamalarında önemli bir rol oynar. Özellikle, yenilme kriterleri (Grifitth, 1924; McClintock ve Walsh, 1963; Hoek-Brown, 1980), yeraltı kazılarının duraylılığı (Diederichs, 1999; Diederichs ve Kaiser, 1999), kazılabilirlik (Hucka ve Das, 1974; Altındağ, 2000, 2008; Kahraman vd, 2003; Bilgin vd, 2006; Yaralı ve Kahraman, 2011) ve kırılma mekaniği (Whittaker vd., 1992; Zhang vd., 1998; Zhang, 2002; Wang vd., 2007) konusunda günümüze değin yapılan çalışmalar çekme dayanımının önemine dikkat çekmektedir. Örneğin, kazı ve patlatma tasarımında önemli bir girdi parametresi olan ve kaya kütlelerinin parçalanma özelliğini kontrol eden, SD/ÇD oranı ile ifade edilen "Patlatılabilirlik Katsayısı"nın hesaplanabilmesi için bu parametre gereklidir (Arıoğlu ve Tokgöz, 1993). Bu katsayı, 10-100 arasında değişen değerler alır ve bu oran genel olarak kayalarda oldukça yüksektir. Bunun nedeni ise kayaların büyük çoğunluğunun çekme dayanımının sıkışma dayanımına göre daha düşük olmasıdır. Patlatılabilirlik Katsayısı'nın sayısal değeri ne kadar büyükse, kaya o kadar kolay

parçalanabilmektedir. Diğer bir deyişle, katsayının büyük olması, kayanın çekmeye karşı o denli zayıf olduğunu, dolayısıyla yansıma kuramına göre daha kolay yenilebileceğini göstermektedir (Özdoğan, 1986). Bu nedenle kayanın çekme dayanımının güvenilir sonuçlar elde edilecek şekilde belirlenmesi önem taşımaktadır.

Kaya malzemesinin ÇD'sinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki ana gruptan oluşmaktadır. Tercih edilen standarda göre, kullanılan ekipman ve hesaplamalarda farklılıkların gözlendiği bu yöntemlerden en önemlisi, "tek eksenli çekme dayanımı deneyi" adı da verilen doğrudan çekme yöntemidir. ISRM (2007) tarafından önerilen ve ASTM D2936 (2008a) tarafından standartlaştırılmış olan bu deneyde, kaya malzemesi zıt yönlü çekme kuvvetleri ile yenilinceye kadar doğrudan çekilir ve yenilme anındaki gerilme değeri kaya malzemesinin ÇD'si olarak kabul edilir.

Brazilian deneyi, üç ve dört nokta eğilme deneyi, halka deneyi, Loung deneyi ve sınırlandırılmış (confinied) çekme deneyi gibi birden fazla türü bulunan dolaylı çekme yöntemlerinden en çok tercih edilen ve en yaygın olarak kullanılanı Brazilian deneyidir. ISRM (1978) ve ASTM D3967 (2008b) tarafından önerilen yöntemlere göre gerçekleştirilen bu deneyde, silindirik karot örneğine çapsal sıkışma kuvveti uygulanmakta, sıkışma kuvvetlerinin uygulandığı yüzeye dik yönde eksenel olarak çekme kuvvetlerinin oluştuğu varsayılmaktadır. Kaya malzemesi yenilinceye kadar sıkışma kuvvetleri uygulanmakta ve yenilme anındaki sıkışma kuvveti değeri standartlarda önerilen formüller ile değerlendirilerek kaya malzemesinin ÇD'si dolaylı bir şekilde belirlenebilmektedir.

Belli boyutlara sahip prizmatik örneklerin kullanıldığı, ASTM C293/C293M (2010a) ve ASTM C78/C78M (2010b) standardına göre yapılabilen üç ve dört nokta eğilme dayanımı deneyi elastisite modülü ve çekme dayanımının ölçülmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Üç ve dört noktadan uygulanan bir yükleme ile örneğin belli alanlarında hem çekme gerilmesi hem de sıkışma gerilmesi oluşturulabilmektedir. Bu yöntemde yer değiştirme dağılımı ve gerilmeler temel kiriş teorisi ile bulunmaktadır (Jaeger vd., 2007).

Silindirik kaya karotları kullanılarak gerçekleştirilebilen ama yaygın olarak kullanılmayan diğer bir dolaylı yöntem ise Luong deneyidir. Bu deney ilk kez Luong (1988, 1990) tarafından önerilmiştir. Bu deneyde karotiyer kullanılarak silindirik bir kaya karotunun alt ve üst yüzeylerinden, boyları ve çapları karotun boy ve çapından daha küçük olan eş merkezli silindirik yarıklar açılmaktadır. Dışta kalan silindir ile iç kesimdeki silindire eksenel olarak sıkışma kuvvetleri uygulanmakta, böylece iç kesimdeki silindirik kaya örneği çekme kuvvetleri etkisi altında kalmaktadır. Yenilme anındaki sıkışma kuvveti değeri kullanılarak kaya malzemesinin ÇD'si dolaylı olarak hesaplanabilmektedir.

Hobbs (1965) tarafından ilk kez önerilen ve sonraki yıllarda farklı araştırmacılar (Chen ve Hsu, 2001; Zhu vd., 2004; You vd., 2011; Kourkoulis ve Markides, 2014; Li DY vd., 2016; Li X

vd., 2016; Li X vd., 2018) tarafından geliştirilen diğer bir yöntem ise halka (ring) deneyidir. Brazilian yöntemine benzerlik sunan bu deneyde, merkez kısmında delik bulunan disk şeklindeki örneklere eksenel olarak sıkışma kuvvetleri uygulanmakta ve yenilme anındaki kuvvet, önerilen eşitliklerde değerlendirilerek kaya malzemesinin ÇD değeri dolaylı olarak belirlenmektedir.

Dolaylı yöntemler arasında yer alan ama çok fazla kullanım alanı bulamayan diğer bir yöntem ise Hoek ve Brown (1980) tarafından önerilen üç eksenli sınırlandırılmış (confined) çekme deneyidir. Bu yöntem, sonraki yıllarda farklı araştırmacılar (Aimone-Martin vd., 1997; Ramsey ve Chester, 2004; Bobich 2005; Lan vd., 2019) tarafından yapılan çalışmalar ve önerilen deney ekipmanları ile geliştirilmiştir. Silindirik kaya örneklerinin kullanıldığı bu deneyde, sabit bir σ_1 gerilmesi altında σ_3 çekme gerilmesi oluşturulmakta ve örnek yenilinceye kadar çekme gerilmesi artırılarak yenilme anındaki σ_3 değeri kaya malzemesinin üç eksenli sınırlandırılmış ÇD'si olarak kabul edilmektedir.

Doğrudan çekme deneyi daha sağlıklı sonuç vermesine karşın yöntemin zorluğu kullanım alanını sınırlamaktadır. Doğrudan çekme deneyinde standart örnek boyu, örnek içerisinde yer alan süreksizlikler, deney esnasında örneğin alt-üst yüzeyinin birbirine tam paralel olmaması, örnek üzerine yapıştırılan başlıkların hassasiyeti, kür süresi, uygun çekme makinesinin sınırlı olması vb. zorluklar nedeniyle yöntem yaygın olarak kullanılamamaktadır. Dolaylı çekme yöntemlerinden Brazilian, üç ve dört nokta eğilme ve disk deneyleri daha pratik olduğundan doğrudan çekme deney yöntemine göre daha çok tercih edilmektedir. Ancak, dolaylı çekme deneyinden elde edilen ÇD değeri ile doğrudan çekme deneyinden elde edilen ÇD değeri farklılıklar sunmaktadır. Kullanılan yönteme bağlı olarak oluşan bu farklılık, projelerin güvenirliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilmektedir. Bu nedenle, doğrudan ve dolaylı yöntemler ile belirlenen çekme dayanımı değerleri arasındaki ilişkinin bilinmesi önem taşımaktadır.

Bu çalışma, zayıf kaya malzemesinin Doğrudan Çekme Dayanımı (DÇD) ile dolaylı bir yöntem olan Brazilian deneyi ile belirlenen Brazilian Çekme Dayanımı (BÇD) arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, laboratuvar çalışmaları için karot örnekler derlenmiş, bu örnekler ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre boyutlandırılarak toplam 152 karot örnek hazırlanmıştır. Bu karot örnekleri üzerinde doğrudan çekme ve Brazilian deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda geçerli olan deneylere ait sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiş, kaya malzemesinin DÇD ve BÇD değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kaya malzemesinin ÇD'si konusunda günümüze değin birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların daha çok; kaya malzemesinin ÇD'sinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler, örnek boyut ve tipleri ile bunların ÇD'sine etkisi, ÇD'nin dolaylı olarak belirlemeye yönelik yöntemler ile dolaylı yöntemlerin doğrudan yöntemlerle karşılaştırılması, kaya malzemesinin doğrudan ve dolaylı çekme dayanımları arasındaki ilişkilerin incelendiği çalışmalar olduğunu görmek mümkündür. Bu çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Akazawa (1943) yaptığı çalışmada, malzemenin dolaylı ÇD'sini belirlemek amacıyla Carneiro (1943) tarafından önerilen Brazilian deneyine benzer bir deney yöntemi önermiştir.

Carneiro (1943) yaptığı çalışma ile betonların ÇD'sini belirlemek için Brazilian yöntemini önermiştir. Bu deney yöntemi sonraki yıllarda ISRM (1978) tarafından revize edilerek kaya malzemesinin dolaylı ÇD'sini belirlemek amacıyla önerilmiştir.

Obert vd. (1946) tarafından yapılan çalışma, doğrudan çekme konusunda yapılmış olan ilk çalışmalardan birisidir ve bu çalışmada araştırmacılar malzemelerin DÇD'sini belirlemek amacıyla çekme aparatları tasarlamış ve bu aparatların doğrudan çekme deneylerinde kullanılmasını önermişlerdir.

Berrenbaum ve Brodie (1959), yaptıkları çalışmada, Carneiro (1943) tarafından beton örnekleri için önerilen Brazilian deneyinde ilk defa kaya malzemesi kullanmışlardır.

Brace (1964) doğrudan çekme deneyine en uygun örnek şeklini belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada, dambıl (dog-bone) şekilli örneklerin en uygun örnek şekli olduğunu belirtmiştir.

Hoek (1964) ise üç eksenli hücre içindeki dambıl şekilli örneklerde oluşan örneklerin eksenel çekme gerilmelerini incelemiş ve yaptığı çalışma sonucunda en ideal örnek boyutunda boy/çap oranın 2-3 olması gerektiğini belirtmiştir. Doğrudan çekme deneylerinde dambıl şekilli olmayan silindirik örneklerin kullanılması durumunda, örneklerin çekme başlıklarına epoksi veya çimento ile yapıştırıldığı noktalarda meydana gelen gerilme birikimleri nedeniyle yenilemelerin bu noktalardan olduğunu ve böylece elde edilecek sonuçların geçersiz olacağını ifade etmiştir.

Fairhurst (1964) yaptığı çalışmada, genelleştirilmiş Griffith (1924) yenilme kriterini Brazilian deneyine uygulamış, gevrek malzemelerde yapılan Brazilian deneyinde, yükleme plakalarının örneklere temas alanının az olması nedeniyle yenilemelerin örnek merkezinden uzakta oluştuğunu ve elde edilen değerlerin gerçek BÇD değerlerinden daha düşük olduğunu belirlemiştir.

Hobbs (1964; 1965 ve 1967) ise kayanın dolaylı çekme dayanımını belirleyebilmek için kullanılan halka deneyi (ring test) üzerinde araştırmalar yapmış, yaptığı deneylere ait sonuçları Brazilian deney sonuçları ile karşılaştırmıştır.

Colback (1966) çalışmasında, doğrudan çekme deneylerinde kullanılan örneklerin hazırlanmasının zor olduğunu, uygun örneklerin hazırlanamadığını ve hazırlanabilen örneklerde gerçekleştirilen deneylerde ise yenilmelerin örneğin orta kesiminde değil de başlıklara yakın kısımlarda oluştuğu için doğru sonuçlar elde edilemediğini belirterek, bu zorlukların üstesinden gelebilmek için Brazilian yönteminin kullanılabileceğini belirtmiştir. Araştırmacı, Brazilian deneyi ile ilgili olarak yaptığı çalışmalarda çatlağın görünümünü göstermek için düzeltilmiş Griffith (1924) yenilme kriterini kullanmıştır. Yapılan deneyden elde edilen sonuçların geçerli olabilmesinin yenilme sırasında oluşan çatlağın, örneğin merkezinde başlaması gerektiğini, aksi durumda deneyin geçersiz olduğunu ifade etmiştir.

Jaeger ve Hoskins (1966) ve Jaeger (1967) sıkışma gerilmelerini kullanarak kayanın çekme dayanımını dolaylı olarak belirleyebilmek için üç farklı ölçüm yöntemini karşılaştırdıkları çalışmalarında, malzemenin dolaylı ÇD değerleri ile DÇD değerleri arasında anlamlı bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir.

Hudson (1969) yaptığı çalışmada, malzemenin çekme dayanımının dolaylı olarak belirlendiği Brazilian ve halka deneylerini karşılaştırmıştır. Araştırmacı, sonuçların kullanılan deney yönteminden oldukça fazla etkilendiğini belirtmiştir.

Mellor ve Hawkes (1971) çekme dayanımını dolaylı olarak belirleyebilmek için Brazilian deneyinin uygun bir deney yöntemi olduğunu ifade ederek, Brazilian deneyinde yükleme plakaları ile örneğin temas ettiği ilk yükleme noktalarındaki deformasyonu azaltmak için kavisli çeneleri tasarlamışlardır.

Vutukuri vd. (1974) kireçtaşlarının ÇD'sini halka deneyini kullanılarak belirlenmeye çalışmış ve sıvıların kireçtaşlarının dolaylı ÇD'sine etkisini araştırmıştır. Araştırmacı, dielektrik sabitinin ve sıvının yüzey geriliminin artmasıyla ÇD'nin azaldığını ifade etmiştir.

Yanagidani vd. (1978) Brazilian deneyinde kullanılan örneklerde çatlak başlangıcını belirleyebilmek için yaptıkları çalışmada, çatlağın yükleme noktasından başlamadığını, çekme gerilmesi zonundan başladığını belirlemişlerdir.

Andreev (1991a, 1991b) iki bölüm halinde sunduğu çalışmasında siyenit, jips ve polietilen örnekleri kullanarak doğrudan çekme ile belirlediği DÇD değerlerini, farklı koşullarda (deney aleti çeşidi, deney aletinin örneğe temas yüzeylerini ayrı ayrı hesaba katarak) yaptığı Brazilian deneylerinden elde ettiği BÇD sonuçları ile karşılaştırmıştır. Araştırmacı, DÇD değerlerinin BÇD değerlerinden daha düşük olduğunu belirlemiştir.

Gorksi (1993) gevrek malzemelerde yapılacak doğrudan çekme deneylerinde kullanılmak üzere eksantrik yük altında kendiliğinden merkezlenen, sıkışma gerilmesi altındaki dambıl şekilli örneklerin çekme gerilmesine maruz kalacağı şekilde bir aparat tasarlamıştır.

Guo vd. (1993) tarafından yapılan çalışmada, Brazilian deneyinde kaya örneğinde çatlak oluşum mekaniği analiz edilmiş, bu analiz yardımıyla kayaçların kırılma tokluğunu ölçmek için yeni bir eşitlik ve deney yöntemi önerilmiştir.

Chen ve Hsu (2001) halka yöntemini (ring test) kullanarak anizotropik özellik gösteren kayaçlarda yaptıkları deneylerde, delik çapı ve anizotropiye neden olan foliasyon eğim açısının kaya malzemesinin dolaylı ÇD değerlerine etkisini incelemişlerdir.

Gomez vd. (2001) granit ve beton örnekleri üzerinde statik ve dinamik dolaylı çekme deneyleri yaparak, statik şartlardaki deneyde dayanımın, yükleme doğrultusunda oluşan hasarla ilişkili olduğunu belirlemişlerdir.

Coviello vd. (2005) dolaylı yöntemleri karşılaştırdığı çalışmalarında, sadece 3 ve 4 nokta eğilme deneylerinde yenilme noktasında oluşan çekme gerilmelerinin tek eksenli gerilmeler olduğunu, buna karşın diğer dolaylı yöntemlerdeki gerilme durumunun 2 eksenli olduğunu, bu nedenle kayanın dolaylı ÇD'si belirlenirken eğilme deneylerinin kullanılmasının daha sağlıklı olacağını belirtmişlerdir.

Yu vd. (2006) yaptıkları çalışmada, Brazilian deneyinde kullanılan örneğin kalınlığı dikkate alınmadığında, BÇD için kullanılan eşitlikten hesaplanan değerin hatalı olduğunu yaptıkları 3D Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, örnek kalınlığının artması durumunda boyut/şekil etkisinin ortaya çıktığını ifade etmişlerdir.

Zhu ve Tang (2006) tarafından yapılan çalışmada, Brazilian deneyi sırasında heterojen kaya örneğinin deformasyon ve yenilme süreci açıklanmaya çalışılmıştır. Çalışmada malzeme özelliklerinin Weibull dağılımına uyduğu farz edilerek kayanın heterojenliği göz önünde bulundurulmuştur.

Gorski vd. (2007) yaklaşık 400 m derinlikteki bir sondaj kuyusundan elde ettikleri granit örneklerinde yaptıkları doğrudan çekme ve Brazilian deneyleri sonucunda, örneklerin DÇD değerlerinin BÇD değerlerinden daha düşük olduğunu belirlemişlerdir.

Nott (2009) çalışmasında, yapay kaya örnekleri kullanmış ve bu örneklerin DÇD ile BÇD değerlerini belirleyerek sayısal modellemeler ile sonuçları değerlendirmiştir. Araştırmacı, dambıl şekilli örneklere ait DÇD değerlerinin, yenilmelerin örneklerin bağlantı noktalarından veya yakınında gerçekleştiği için geçersiz olduğunu belirtmiştir.

Lanaro vd. (2009) Sınırlı Elemanlar Yöntemi (BEM) kullanarak Brazilian deneyinde kullanılan örnekteki gerilme dağılımlılarını ve başlangıç çatlaklarının etkisini incelemişlerdir.

Ye vd. (2009) kaya malzemesinin çekme elastisite modülü için analitik bir formül ve deneysel bir yöntem sundukları çalışmalarında, çekme elastisite modülünün sıkışma elastisite modülüne oranının mermer, kumtaşı, kireçtaşı ve granit için yaklaşık %60-90 arasında değiştiğini belirtmişlerdir.

Yu ve Zhang (2009) yaptıkları çalışmada, Brazilian deneyi yaparken kaya malzemesi örneğinde oluşan gerilme yığılmalarını incelemiş ve bu yığılmaları en aza indirgeyebilmek amacıyla modifiye edilmiş bir Brazilian deney yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemle Brazilian deneyi yapılması durumunda elde edilen sonuçların, geleneksel Brazilian deneyinden elde edilen değerlere göre önemli ölçüde düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Alzo'ubi vd. (2010) devrilme tipi yenilemelerin meydana geldiği kaya şevlerinde, kayanın çekme dayanımının devrilme tipi yenilme üzerindeki etkisini incelemişler ve kayanın DÇD'sinin yenilme mekanizmasında kilit rol oynadığını ifade etmişlerdir.

Klanphumeesri (2010) kumtaşı, mermer ve kireçtaşı örnekleri kullanarak doğrudan çekme ve Brazilian deneyleri yapmıştır. Araştırmacı, DÇD değerlerinin BÇD değerlerinden daha düşük olduğunu belirterek, karşılaştırılabilir fiziksel özelliklere sahip diğer kayaçlar için de bu durumun geçerli olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, araştırmacı bu çalışmada kaya malzemesi üzerine etkiyen çekme kuvvetinin artan örnek büyüklüğü ile azaldığını ve örnek büyüklüğündeki bu farklılıktan dolayı DÇD ile BÇD değerleri arasında doğrudan bir karşılaştırma yapılamayacağını öne sürmüştür.

Erarslan ve Williams (2011) çevrimsel olarak yüklenen ve çapsal gerilme altındaki tüf örneklerinin gerilme-deformasyon özelliklerini araştırmışlar ve çevrimsel yükleme sonucunda tüfün BÇD değerlerinde % 33-37'lik bir azalmanın oluştuğunu belirlemişlerdir.

Erarslan vd. (2011) yaptıkları çalışmada, Brazilian deneyinde kullanılan standart çeneler ile farklı yay açılarına sahip çenelerin kullanılması durumunda elde edilen sonuçların ÇD değerleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, yaptıkları çalışma sonucunda en iyi yükleme geometrisinin $2\alpha=20° - 30°$ olduğunu belirtmişlerdir.

Fuenkajorn ve Klanphumeesri (2011), öncelikle doğrudan çekme deneyinde kullanılacak örnekler için en uygun örnek geometrisini Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) ile belirlemişler, daha sonra hazırladıkları kumtaşı, kireçtaşı ve mermer örneklerinin DÇD ve BÇD değerlerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar, kaya malzemesinin DÇD değerlerinin Brazilian deneyi ile belirlenen BÇD değerlerinden daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır.

Markides vd. (2011) Brazilian deneyinde yükleme bölgelerinde sürtünme geriliminin üniform dağılımının etkisini araştırdıkları çalışmalarında, yenilme sırasında oluşan çatlağın örneğin merkezinden değil, yük temas noktalarının yanından başlayabileceğini belirtmişlerdir.

Li ve Wong (2013) Brazilian deneyinde çatlak başlangıcı ve gelişiminin önemli olduğunu belirterek, Brazilian deneyinde çatlak oluşumunun örneğin merkezinden başlaması gerektiğini ve bu durumda yenilmenin maksimum gerilme ile mümkün olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, Brazilian deneyi sırasında mevcut gerilme durumunun tek eksenli değil iki eksenli olduğunu ve

bu durumda kaya malzemesinin BÇD değerinin olması gerekenden fazla belirlendiğini, bu nedenle de BÇD değerinin DÇD değeri olarak kabul edilemeyeceğine dikkat çekmişlerdir.

Liu vd. (2014) potansiyel radyoaktif atık depolama sahası olarak kullanılabilecek Beishan granitleri üzerinde doğrudan çekme deneyleri ile Çin Standartları ve ISRM'ye göre Brazilian deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar, ISRM ve Çin Standardına göre yapılan Brazilian deneylerinden elde edilen BÇD sonuçlarının doğrudan çekme yöntemi ile elde edilen DÇD sonuçlarına göre yaklaşık %20 daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Perras ve Diederichs (2014) DÇD ile BÇD arasındaki ilişkiyi inceledikleri çalışmalarında, kaya malzemesinin gerçek ÇD değerinin, dolaylı olarak tahmin edilebilmesinin zor olduğunu, BÇD değerinin kaya malzemesinin DÇD olarak kabul edilmesinin hatalı olacağını belirtmişlerdir.

Ünlü ve Yılmaz (2014) silindirik kaya örneklerinin DÇD'sinin belirlenebildiği ISRM standartlarına uygun, yeni bir deney düzeneği tasarlamışlar. Araştırmacılar, bu deney aletinde yaptıkları deneyler sonucunda, elde ettikleri dayanım değerlerinin BÇD değerlerine göre daha güvenilir olduğunu ve bu değerin kaya malzemesinin DÇD değeri olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, yaptıkları sayısal analizler sonucunda örnek çevresindeki maksimum asal çekme gerilmesinin, örnek kesit alanından hesaplanan ortalama asal gerilmeden 1,5 kat daha büyük olduğunu ve deney sonunda elde edilen değerin bu katsayı ile çarpılarak düzeltme yapılması gerektiğini önermişlerdir.

Briševac vd. (2015) malzemelerin DÇD değerinin belirlenmesi ve Brazilian deneyi ile ilgili yapılan çalışmaların pratik yaklaşımlardan uzak olduğunu, daha gerçekçi ÇD değerlerinin belirlenebilmesi için Brazilian deneyinden elde edilen BÇD değerlerinin düzeltilmesi ve bu amaçla daha fazla çalışma yapılarak doğru katsayıların belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Kömürlü ve Kesimal (2015) 17 farklı kayaç türü üzerinde 4 tür yükleme levhası (düz, standart çene, $2\alpha=15°$, $2\alpha=30°$) kullanarak BÇD üzerinde yükleme tipinin etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, genel olarak yükleme levhası ile örnek arasındaki kontak açısı arttığında, ilk çatlak başlaması için gereken gerilme ile yenilme gerilmesi arasındaki farkın arttığını gözlemlemişlerdir. Yenilme gerilmesi ve diskte meydana gelen deformasyonun yükleme tipine bağlı olduğu ve yükleme çenesinin açısı arttığında, gerilme değerinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre tek bir yükleme aparatı kullanılmaması gerektiği, bunun yerine kayaç türüne ve özelliklerine bağlı olarak yükleme aparatının seçilmesinin uygun olacağı önerilmiştir.

Jensen (2016) ASTM standartlarına göre sedimanter kayaçların ÇD'lerini belirlemiş ve farklı deney yöntemleri kullanarak örnek boyutunun ÇD üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmacı DÇD değerlerinin BÇD değerlerinden daha düşük ve daha doğru olduğunu ifade etmiştir.

Tüfekci vd. (2016) doğrudan çekme deneyinde örnekleri kavrayan yeni bir çene tasarımını da yaptıkları çalışmalarında, dambıl şekilli örneklerin DÇD değerleri ile BÇD değerlerini karşılaştırmışlardır. Ayrıca, deney sırasında örneklerde oluşan gerilme dağılım ve yoğunluğunu belirlemek amacıyla sayısal modellemeler yapmışlardır.

Erarslan (2017) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmada, v-çentikli kaya ve beton örnekleri üzerinde yaptığı Brazilian deneylerinde kayanın çatlak gelişimine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanan kırılma tokluğunu incelemiştir. Araştırmacı, statik koşullarda örneklerin mod-I, mod-II ve mod I-II kırılma tokluğu değerlerini araştırmıştır.

Han vd. (2017) yaptıkları sayısal analiziler ile doğrudan ve dolaylı çekme gerilmeleri altındaki örneklerde çatlak oluşum sürecini (başlangıç, mod-I çatlak ilerlemesi gibi) incelemişlerdir.

Hua vd. (2017), merkezinde çatlak oluşturulmuş ve çatlaksız kumtaşı örneklerinde gerçekleştirdiği Brazilian deneylerinde mod-II kırılma tokluğu ile ÇD arasındaki ilişkileri incelemişler ve araştırmacılar bu iki parametre arasında güçlü doğrusal ilişkilerin olduğunu belirlemişlerdir.

Jianbing vd. (2017) yaptıkları çalışmada, tabakalı kireçtaşı örneklerinin BÇD değerlerini ve tabaka eğimine bağlı olarak meydana gelen yenilme tiplerini incelemişlerdir.

Kömürlü vd. (2017) doğrudan çekme deneyi sırasında dambıl şekilli örnekleri kavrayan aparatın geometrisinin ÇD üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmada, minimum çapın 3,2 cm ve dambıl örneğin ise çap geçiş bölgesinde 63°lik açı yapacak şekilde incelmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Kundu vd. (2017) şiztozite gösteren kuru ve suya doygun kayaların Brazilian deneyi sırasındaki deformasyon davranışları ve yenilme biçimlerini incelemişlerdir.

Malik vd. (2017) bazalt örneklerinin farklı yükleme hızları ile statik ve dinamik koşullarda dolaylı ÇD değerlerinin nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Araştırmacılar, düşük yükleme hızlarında örnek boyutu etkisinin ÇD üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Minaeian ve Ahangari (2017) yaptıkları çalışmada, kaya malzemesinin nokta yükü dayanımı ile DÇD ve BÇD'si arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Araştırmacılar, nokta yük dayanımı ile DÇD arasında BÇD'ye göre daha kuvvetli bir ilişkinin var olduğunu belirlemişlerdir.

Plangklang vd. (2017) tuz örnekleri kullanarak yaptığı 4 nokta eğilme dayanımı deneyleri sonucunda, tuz örneklerinin çekme gerilmesi altında elastik davrandığını ve zamana bağlı olarak deformasyonların meydana geldiğini belirlemiştir.

Wang vd. (2017) yaptıkları Brazilian deneyleri ile şeyl örneklerinin anizotropik çekme davranışını incelemişler, deney sırasında sistematik olarak gerinim hızının değiştirilmesi ve

tabakalanma düzlemlerinin yükleme doğrultusu ile yaptıkları açıya bağlı olarak BÇD değerlerinin nasıl değiştiğini araştırmışlardır.

Zhang vd. (2017) Brazilian ve akustik emisyon deneylerinde anizotropik şist örneklerini kullanarak, yükleme yönüne bağlı olarak BÇD değerlerinin nasıl değiştiğini incelemişlerdir.

Han vd. (2018), Brazilian deneyi sırasında deformasyon ölçerler kullanarak örneklerin elastisite modülü ve Poisson oranlarını belirlemişler, ayrıca elastik özellikleri tahmin etmede kullanılabilecek ampirik formüller önermişlerdir.

Li X vd. (2018) sayısal modellemeler yardımıyla, statik ve dinamik koşullarda halka deneyinde sert kayanın yenilme sürecini araştırmışlardır. Bu çalışmada ilk olarak Brazilian deneyindeki örnek sayısal olarak modellenmiş, daha sonra statik ve dinamik yükleme koşullarında farklı iç çap/dış çap oranlarına sahip örnekler modellenerek yenilme süreçleri araştırılmıştır.

Ma ve Huang (2018) tarafından Brazilian deneyinin geçerliliğinin araştırdığı çalışmada, deneyin geçerli olabilmesi için yenilmeye örneğin merkezinde başlayan çekme çatlağının neden olması ve yükleme bölgesinde meydana gelen kırılma zonunda oluşan çatlakların gelişmesiyle yenilmenin gerçekleşmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Wang ve Cao (2018) düz yükleme levhası, küçük çaplı çelik çubuklar, kavisli çeneler ve düzleştirilmiş örneklerin kullanıldığı 4 farklı Brazilian deney yöntemi kullanarak kumtaşı ve granit örneklerinin BÇD değerlerini ve bu örneklerin DÇD değerlerini belirlemişler ve elde ettikleri değerleri karşılaştırarak hangi Brazilian deney yönteminin daha sağlıklı olduğunu belirlemeye çalışmışlardır. Araştırmacılar, düz yükleme levhası kullanılan yöntem ile küçük çaplı çelik çubukların kullanıldığı yöntemlerden elde edilen değerlerin ÇD için uygun olduğunu belirlemişlerdir. Çalışmada, kavisli çenelerin kullanıldığı deney yönteminde ÇD değerinin olduğundan yüksek bulunduğu, bu nedenle kullanırken çok dikkatli olunması gerektiği, düzleştirilmiş Brazilian örneği ile yapılan deney yönteminin ise uygun olmadığı ifade edilmiştir.

Wei vd. (2018) deneysel ve modelleme çalışmalar yaparak, Brazilian deneyinde v-çentikli örneklerin mod I ve mod II kırılma tokluğu ve çatlak oluşum sürecini akustik emisyon tekniği ile izlemişlerdir.

Wu vd. (2018) çelik donatı ve reçine ile güçlendirilmiş kaya örneklerinin çekme davranışını incelemek için kumtaşı, granit, mermer ve şist örnekleri üzerinde çekme deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar bu çalışma ile güçlendirme işleminin çekme dayanımı üzerindeki etkisini belirlemeye çalışmışlardır.

Efe (2019) farklı litolojiye sahip kaya örneklerinde doğrudan çekme deneyleri ile Brazilian, 3 ve 4 nokta eğilme deneyleri gerçekleştirdiği çalışmasında, DÇD ile dolaylı olarak belirlenen ÇD değerleri arasındaki ilişkiyi ve deneylerde kullanılan örneklerin boyutunun ÇD üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmacı, hiçbir dolaylı yöntemin doğrudan çekme ile elde edilen değeri temsil

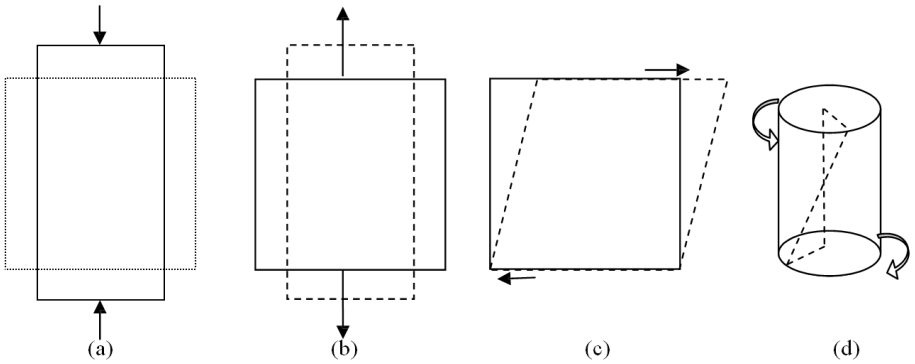
etmediğini, Brazilian deneyinde örnek boy/çap oranının sonuca herhangi bir etkisinin olmadığını ifade ederek, kaya malzemesinin DÇD değerini dolaylı yöntemlerden tahmin edebilmek için katsayılar önermiştir.

Fan vd. (2019) granit örnekleri kullanarak yaptığı 3 noktalı eğilme deneylerinde, kullanılan örnek boyutunun ÇD değerine etkisini ve eğilme dayanımı ile BÇD arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Araştırmacılar, eğilme dayanımının BÇD'ye oranının dikdörtgen kesitli örneklerde 3.81-4.26 arasında, silindirik kesitli örneklerde ise 3.14-3.48 arasında olduğunu belirlemişlerdir.

Liao vd. (2019) doğrudan çekme deneyi sonuçlarını Brazilian ve 3 nokta eğilme deneylerine ait sonuçlar ile karşılaştırmış ve sayısal analizlerle ortaya çıkan veri farklılıklarının sebeplerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, BÇD değerlerinin DÇD değerlerinden daha yüksek olduğunu, bu farklılığın ise doğrudan çekme deneylerinde kullanılan örneklerin heterojenlik derecesi ile ilgili olduğunu öne sürmüşlerdir. Ayrıca kalınlığın etkisini 50 mm örnek kalınlığına kadar inceleyen araştırmacılar, kalınlığın BÇD değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

3. KAYA MALZEMESİNİN DAYANIMI

Kaya malzemesi, insanoğlunun varoluşundan itibaren farklı amaçlarla kullanmaya başladığı ve kullanım amaçları kısmen değişse de hala kullanmaya devam ettiği doğal bir malzemedir. Bu doğal malzemenin mühendislik amaçlı olarak kullanılabilmesi, belli fiziksel, mekanik, deformasyon ve teknolojik özelliklere sahip olmasını gerektirir. Mühendislik özellik olarak tanımlanan bu özelliklerin en önemlilerinden birisi dayanımdır. Malzemeye etkiyen gerilmeye karşı malzemenin yenilmeden önce gösterdiği direnç dayanım olarak tanımlanmaktadır. Bu dayanım, kayayı oluşturan tane ve minerallerin türüne, içyapılarına ve bunların dizilişlerine bağlı olduğu kadar kayanın maruz kaldığı gerilme koşulları, zaman ve deformasyonla da yakından ilişkilidir. Mühendislikte birim alana düşen kuvvet olarak tanımlanan gerilmenin, normal (sıkışma ve çekme), kesme ve burulma gerilmesi olmak üzere üç türü bulunmaktadır (Şekil 3.1).

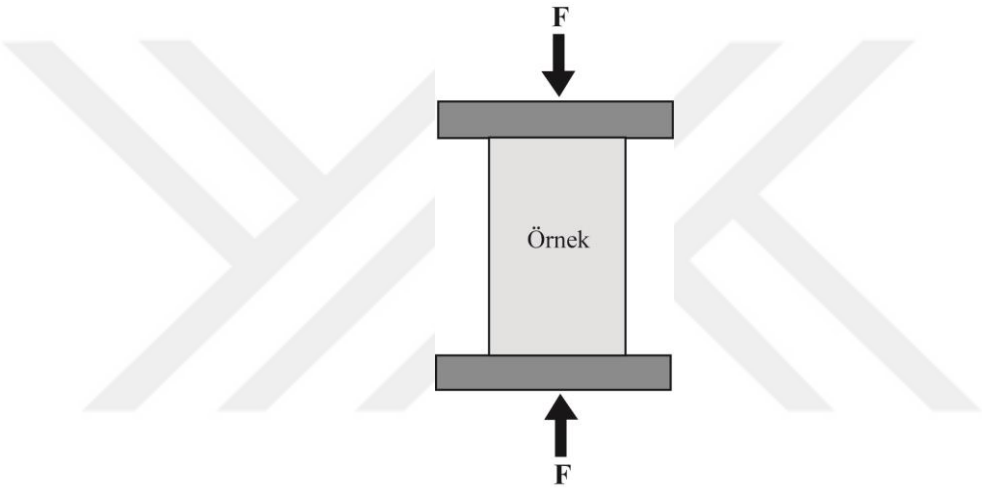


Şekil 3.1. Kayaçlarda gerilme türleri (a) Sıkışma gerilmesi, (b) Çekme gerilmesi, (c) Kesme gerilmesi, (d) Burulma gerilmesi

Kaya malzemesi, bu gerilmeler altında şekil ve hacim değişimlerine uğramakta, yani deforme olmakta, uygulanan gerilmenin kayanın dayanım değerini aştığı anda ise yenilmektedir. Yenilme anındaki gerilme değeri ise kaya malzemesinin dayanımıdır ve hangi tür gerilme koşulu söz konusu ise dayanım o gerilme koşulu dikkate alınarak sıkışma dayanımı (SD), çekme dayanımı (ÇD), makaslama dayanımı (MD) ve burulma dayanımı (BD) olarak adlandırılmaktadır. Bu dayanım değerlerini belirlemek amacıyla kaya malzemesi üzerinde farklı laboratuvar deneylerinin yapılması gerekmektedir. Kaya malzemesinin bu dayanımlardan başka, nokta yükü dayanımı, suda dağılma dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı ve aşınma dayanımı gibi diğer dayanım özellikleri de vardır.

3.1. Kaya Malzemesinin Sıkışma Dayanımı

Kaya malzemesinin SD'si laboratuvarda gerçekleştirilen tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi ile belirlenir. Tek eksenli sıkışma dayanımı (TESD) olarak tanımlanan bu dayanım türü, yeraltı ve yerüstü kaya mühendisliği projelerinin tasarımında yaygın olarak kullanılan en önemli parametrelerden birisidir. ISRM (2007), ASTM (2000) ve TS EN 12372 (2007) gibi ulusal ve birçok uluslararası kuruluş tarafından standartlaştırılmış olan tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi, belirli boyutlardaki küp veya silindirik örnekler kullanılarak yapılır ve bu deneyde silindirik veya kübik kaya örneklerine hidrolik preste örnek yenilinceye kadar sıkışma kuvvetleri uygulanır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi

Yenilme anındaki kuvvet değeri aşağıda verilen eşitlikte yerine yazılarak kaya malzemesinin TESD'si hesaplanır;

$$\mathrm{TESD} = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{A}} \tag{3.1}$$

Eşitlikte;

TESD = Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)

F = Yenilme anındaki kuvvet (N)

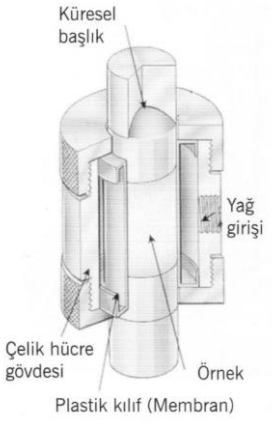
A = Yüzey alanı (mm^2)'dır.

3.2. Kaya Malzemesinin Makaslama Dayanımı

Makaslama dayanımı (MD), kaya malzemesinin kesme kuvvetleri altında yenilme ve deformasyona karşı gösterdiği dayanıklılık olarak tanımlanır ve laboratuvarda üç eksenli sıkışma

dayanımı veya kesme kutusu deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bu deneylerin ana amacı aslında kaya malzemesinin yenilme zarfının belirlenmesi, yenilme anındaki normal (σ) ve kesme (τ) gerilmeleri arasındaki ilişkinin ortaya konulması, ayrıca dayanım parametreleri olarak adlandırılan kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (φ) değerlerinin belirlenmesidir.

Silindirik kaya örnekleri üzerinde gerçekleştirilen bu deney ISRM (2007) ve ASTM D2664 (2004) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmaktadır. Bu deneyde, hazırlanan örnekler basınç hücresi (Şekil 3.3) içerine yerleştirildikten sonra belli değerde sabit yanal gerilme (σ_3) uygulanmakta ve her bir yanal gerilme kademesinde, örnek yenilinceye kadar düşey gerilme (σ_1) uygulanmaktadır.



Şekil 3.3. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneyindeki basınç hücresi

Aynı deney diğer bir örnek üzerinde yanal gerilme değeri 2 kat artırılarak tekrarlanmakta ve bu en az üç farklı σ_3 değerindeki σ_1 değerleri belirlendikten sonra, yatay eksenin normal gerilmeyi (σ), düşey eksenin ise kesme gerilmesini (τ) ifade eden grafikte her bir deneye ait Mohr daireleri çizilmektedir (Şekil 3.4). Bu Mohr dairelerine teğet geçen "Mohr Yenilme Zarfı" çizildikten sonra, bu zarfın yatayla olan açısı kaya malzemesinin içsel sürtünme açısı (φ), düşey ekseni kestiği noktanın değeri ise kaya malzemesinin kohezyonu (c)'dur. Kaya malzemesinin ve zeminleri kesme dayanımı ile dayanım parametreleri arasındaki ilişki Coulomb (1776) tarafından

$$\tau = c + \sigma.\tan\varphi \tag{3.2}$$

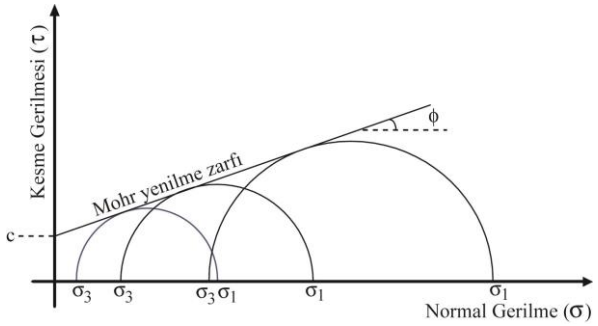
eşitliği ile ifade edilmiştir. Bu eşitlikte;

τ = Kesme gerilmesi

σ = Normal gerilme

c = kohezyon

φ =İçsel sürtünme açısıdır.



Şekil 3.4. Mohr daireleri, Mohr yenilme zarfı ve kohezyon (c) ile içsel sürtünme açısının (φ) belirlenmesi

3.3. Kaya Malzemesinin Burulma Dayanımı

Kaya malzemesinin burulma dayanımı (BD), kayanın üzerine etkiyen burulma kuvvetlerine karşı gösterdikleri dayanım olarak tanımlanmaktadır. Burulma dayanımını belirlemek için dolaylı kesme deneyi yapılmakta ve deney sırasında silindirik kaya örneği bir moment çifti etkisi altında deformasyona uğratılarak, kayada kesme gerilmeleri oluşturulmakta ve örnek üzerine etkiyen bu gerilmeler kayanın dayanımını aştığı anda kaya yenilmektedir. Kaya malzemesinin burulma kuvvetleri altında iken yenilme anındaki kesme gerilmesi Eşitlik (3.3) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S_o = \frac{16.M_c}{\pi.D^3}.100 \tag{3.3}$$

Bu eşitlikte;

S_o = Kaya malzemesinin kesme dayanımı (kg/cm^2)

M_c = Örneğe etkiyen moment (kg.cm)

D = Örneğin çapı (cm)'dır.

3.4. Kaya Malzemesinin Çekme Dayanımı

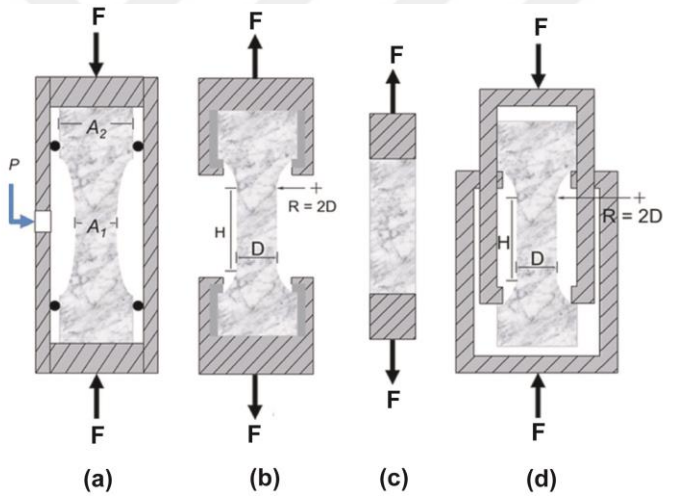
Çekme dayanımı (ÇD), aynı doğrultuda birbirlerinden uzaklaşan kuvvetlerin oluşturduğu çekme gerilmesine maruz kalan kaya malzemesinin yenildiği andaki gerilme değeridir. Başka bir ifade ile kaya malzemesinin yenilmeden dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesidir (ISRM, 1975) ve kaya malzemesinin en küçük değere sahip dayanımıdır. Perras ve Diederichs (2014), kaya malzemesinin ÇD'sinin birçok kaya mühendisliği uygulamasında gerekli olan önemli bir tasarım parametresi olmasına karşın, yakın bir geçmişe kadar SD'sine göre daha az araştırılmış bir mekanik özellik olduğunu vurgulamaktadırlar. Ancak, son yıllarda ÇD'ye artan ilginin sonucu

olarak çok sayıda araştırmacının kaya malzemesinin çekme dayanımı hakkında araştırma yaptığı görülmektedir.

Kaya malzemesinin ÇD'si, özellikle ISRM (2007) ve ASTM D2936 (2008a) tarafından önerilen yöntemlere laboratuvarda yapılan deneyler ile belirlenmektedir. Bu deneyler incelendiğinde, çekme deneylerinin doğrudan ve dolaylı yöntemler olarak iki ana gruba ayrıldığını görmek mümkündür.

3.4.1. Çekme Dayanımın Doğrudan Belirlenmesi

Kaya malzemesinin ÇD'sinin doğrudan belirlenmesi konusunda farklı araştırmacı veya kuruluşlar (Hoek, 1964; Gorski, 1993; Brace, 1964; ISRM, 2007; ASTM D2936, 2008a; Klanphumeesri, 2010; Perras ve Diederichs, 2014) tarafından önerilmiş yöntemler mevcuttur (Şekil 3.5).

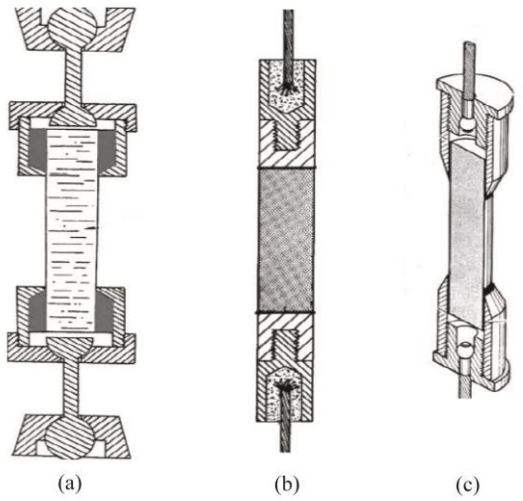


Şekil 3.5. Doğrudan çekme deneyi yöntemleri (a) Hoek, 1964; (b) Brace, 1964; (c) ISRM, 2007 ve ASTM D2936, 2008a; (d) Gorski, 1993 ve Klanphumeesri, 2010

Bu yöntemlerden uygulama olarak birbirine çok benzeyen ve yaygın olarak kabul görmüş doğrudan çekme yöntemi ISRM (2007) ve ASTM D2936 (2008a) tarafından önerilen deney yöntemidir (Şekil 3.5c). Bu deneyde, çapı 54 mm'den büyük ve boy/çap oranı 2,5-3,0 olan, çatlak içermeyen karot örnekleri kullanılmaktadır. Örneklerin alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel olarak kesilmekte, bu yüzeylere çapı karot örneği ile aynı olan metal diskler çimento veya epoksi ile yapıştırılmakta ve örnek 5 dakika içerisinde yenilecek şekilde veya yükleme hızı saniyede 5-10 kgf/cm^2 olacak şekilde hidrolik preste çekme kuvveti uygulanmaktadır. Kaya örneğinin yenilme anındaki kuvvet (F), örneğin yüzey alanına (A) bölünerek (Eşitlik 3.4) kaya malzemesinin DÇD'si veya tek eksenli çekme dayanımı (TEÇD) hesaplanmaktadır.

$$\text{DÇD (TEÇD)} = \frac{F}{A} \tag{3.4}$$

Ulusay vd. (2011) bu yöntemde, örnek ile metal disklerin çimento veya epoksi ile birbirine yapıştırıldığı yerlerde gerilme birikimlerinin olduğunu ve bunun sonucu olarak da yenilmenin bağlantı yerlerinde meydana geldiğini, böylece erken yenilme gerçekleştiğini ifade etmektedirler. Ayrıca, çekme sırasında eksenel çekme kuvvetlerinin tam olarak örneğin eksenine paralel uygulanamaması, eğilme momentlerinin oluşması ve yenilmenin tabakalanma (laminasyon) yüzeyi, yeniden çimentolanmış eklem yüzeyi vb. gibi zayıflık düzlemleri boyunca gelişebilmesi nedeniyle elde edilen değerlerin kaya malzemesinin gerçek ÇD değerinden farklı olabileceğini belirten araştırmacılar, bu problemleri gidermek amacıyla birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda önerilen farklı kavrama mekanizmaları (Şekil 3.6) ve örnek şekillerinin kullanılabileceğini önermişlerdir.



Şekil 3.6. Doğrudan çekme deneyi için önerilen farklı kavrama tipleri (a) Obert vd., (1946), (b) Fairhurst (1961), (c) Hawkes ve Mellor (1970)

Silindirik örnekler kullanılarak yapılan deneylerde ortaya çıkan bu olumsuzlukların üstesinden gelebilmek için farklı araştırmacılar (Brace, 1964; Gorski, 1993; Klanphumeesri, 2010) tarafından dambıl (dog-bone) şekilli örneklerin kullanıldığı ve ÇD'nin doğrudan belirlenebildiği çekme deneyleri önerilmiştir. Dambıl şekilli örnekler ile yapılan deneylerde, örnek deney aparatına yapıştırılmamakta, örneğin şekli sayesinde deney düzeneğine örnek tutturulmakta (Şekil 3.5a, b ve d) ve deney gerçekleştirilmektedir. Epoksi veya çimento ile yapıştırılan silindirik örneklerde gözlenen ve uygulayıcı için en büyük problem olan bağlantı yerinden meydana gelen yenilmelerin meydana gelmemesi bu yöntemin en önemli avantajıdır. Ancak, yenilmenin örneğin orta kısmında oluşması için örnek uç kesimlerinde gerilme

birikimlerinin oluşmaması gerekmektedir. Örnekte meydana gelebilecek gerilme birikimlerinin azaltılması ise örneğe en uygun dambıl şeklinin verilmesi ile mümkündür. Bu nedenle, doğrudan çekme deneylerine en uygun alet ve dambıl şeklinin belirlenebilmesi için farklı araştırmacılar (Brace, 1964; Hoek, 1964; Gorksi, 1993; Nott, 2009; Klanphumeesri, 2010; Tüfekci vd., 2016; Kömürlü vd., 2017; Efe, 2019) tarafından çalışmalar yapılmıştır.

3.4.2. Çekme Dayanımın Dolaylı Olarak Belirlenmesi

Doğrudan yöntemler kullanılarak kaya malzemesinin ÇD'sinin belirlenmesinde ortaya çıkan güçlükler, araştırmacıların daha pratik ve sorunsuz bir şekilde ÇD'nin dolaylı olarak belirlenebildiği yöntemler üzerinde çalışmasına neden olmuştur. Farklı araştırmacı veya kuruluşlar tarafından yapılan çalışmalar sonucunda ise kaya malzemesinin ÇD'nin dolaylı olarak belirlenebildiği birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerden en yaygın olanları Brazilian deneyi, üç ve dört nokta eğilme deneyi, halka deneyi, Luong deneyi ve üç eksenli sınırlandırılmış (confinied) çekme deneyidir.

Brazilian Deneyi

İlk defa Akazawa (1943) ve Carneiro (1943) tarafından yapılan farklı çalışmalarda malzemenin dolaylı ÇD'sini belirlemek amacıyla önerilen ve daha sonra geliştirilen Brazilian deneyi, kolay örnek hazırlanması, basit ve ucuz bir deney olması nedeniyle en fazla tercih edilen yöntemdir. Önerilmesinden sonra geçen süre içerisinde farklı çalışmalarla revize edilen ve en son ISRM (2007) ve ASTM D3967 (2008b) tarafından standartlaştırılan Brazilian deneyinde silindirik örnekler kullanılmaktadır. Örnek, herhangi bir aparat veya yastık kullanmadan veya farklı yastık ve çeneler arasına yerleştirildikten sonra (Şekil 3.7), çapsal olarak örnek yenilinceye kadar yüklenir. Çapsal olarak yüklenen kaya örneğinin düşey ekseni boyunca sıkışma, yatay eksen boyunca da çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Deney sonunda Eşitlik (3.5) kullanılarak kaya malzemesinin BÇD'si hesaplanmaktadır.

$$\text{BÇD} = \frac{0.636\text{F}}{\text{Dt}} \tag{3.5}$$

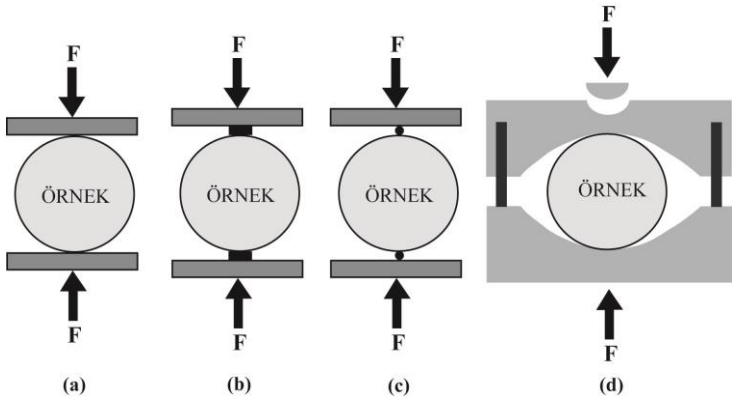
Bu eşitlikte;

BÇD = Kaya malzemesinin Brazilian çekme dayanımı (MPa)

F = Yenilme anındaki kuvvet (N)

D = Örneğin çapı (mm)

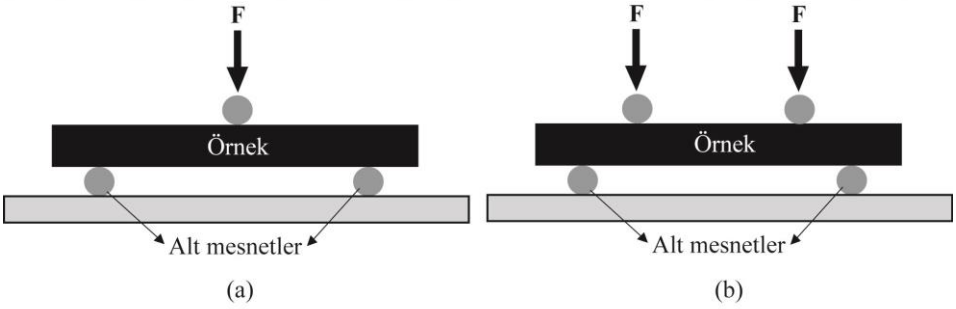
t = Örneğin kalınlığı (mm)'dır.



Şekil 3.7. Brazilian deneyinde kullanılan yükleme levhaları (a) Düz yükleme levhası, (b) Tamponlu yükleme levhası, (c) Çelik çubuklu yükleme levhası, (d) Yükleme çenesi

Üç ve Dört Nokta Eğilme Dayanımı Deneyi

Bu deneyler, kaya malzemesinin ÇD'sinin dolaylı olarak belirlenmesinde Brazilian deneyinden sonra en fazla tercih edilen yöntemdir. Aslında, kaya malzemesinin eğilme dayanımının belirlendiği bu deneylerde dolaylı olarak ÇD'si ve elastisite modülü de belirlenebilmektedir. Deneyde, üç ve dört noktada prizmatik örnekler üzerine uygulanan yükleme (Şekil 3.8) ile hem çekme hem de sıkışma gerilmeleri oluşturulmaktadır.



Şekil 3.8. Üç (a) ve dört (b) nokta eğilme deneyleri

Yükleme ile örneğin en dış kısmında oluşan çekme gerilmesinin malzemenin ÇD'sine ulaşması anında örnek yenilmektedir. Yenilme sırasındaki bu gerilmeye eğilmede çekme dayanımı (EÇD) adı verilmektedir. Avrupa Norm (EN) ve ASTM C293/C293M (2010a) ve ASTM C78/C78M (2010b) tarafından standartlaştırılmış olan bu deneyler yapıldıktan sonra Eşitlik (3.6) ve (3.7) kullanılarak kaya malzemesinin EÇD değeri hesaplanmaktadır.

$$\text{EÇD}_{\text{3Nokta}} = \frac{3\text{FI}}{2\text{bh}^2} \tag{3.6}$$

$$EÇD_{4Nokta} = \frac{3FI}{4bh^2} \quad (3.7)$$

Eşitliklerde;

$EÇD_{3Nokta}$ = Kaya malzemesinin üç nokta eğilmede çekme dayanımı (MPa)

$EÇD_{4Nokta}$ = Kaya malzemesinin dört nokta eğilmede çekme dayanımı (MPa)

F = Kırılma yükü (N)

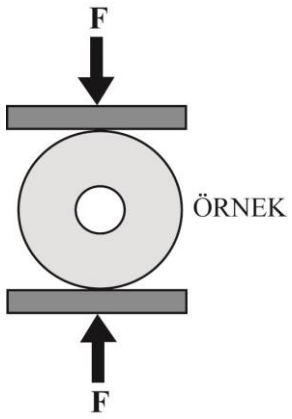
l = Alt mesnetler arası açıklık (mm)

b = Örneğin eni (genişliği) (mm)

h = Örneğin yüksekliği (kalınlığı) (mm)

Halka (Ring) Deneyi

İlk kez Hobbs (1965) tarafından önerilen, daha sonra farklı araştırmacılar (Chen ve Hsu, 2001; Zhu vd., 2004; You ve Su, 2010; You vd., 2011; Kourkoulis ve Markides, 2014; Li DY vd., 2016; Li X vd., 2016; Li X vd., 2018) tarafından yapılan çalışmalarla geliştirilen, uygulanması bakımından Brazilian deneyi ile benzerlik sunan dolaylı bir yöntemdir. Bu deneyde, Brazilian deneyinde olduğu gibi silindirik örnekler kullanılmakta, ancak bu örneklerin ortasında örnek çapından daha küçük çaplı delikler açılmaktadır. Hazırlanan bu örneklere Brazilian deneyinde olduğu gibi örnek yenilinceye kadar çapsal olarak yüklenmektedir (Şekil 3.9). Örneğin dolaylı ÇD değeri Hobbs (1965) tarafından önerilen Eşitlik (3.8) ile hesaplanmaktadır.



Şekil 3.9. Halka (ring) deneyinin uygulanışı

$$ÇD_{Halka} = \frac{2F}{\pi Dt}\left(6 + 38\frac{r^2}{R^2}\right) \quad (3.8)$$

Bu eşitlikte;

$ÇD_{Halka}$ = Kaya malzemesinin dolaylı çekme dayanımı (MPa)

F = Yenilme anındaki yük (N)

D = Örneğin çapı (mm)

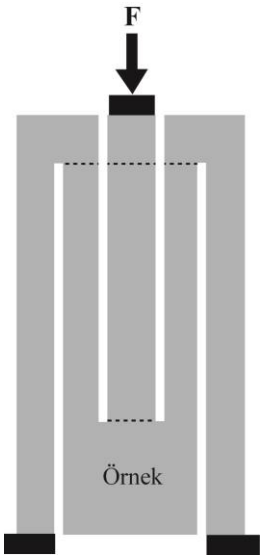
t = Örneğin kalınlığı (mm)

R = Örneğin yarıçapı (mm)

r = Delik yarıçapı (mm)

Luong Deneyi

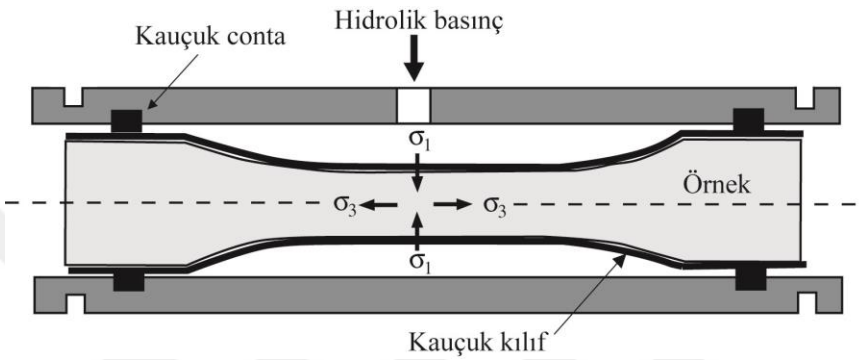
İlk defa Luong (1986) tarafından yapılan çalışmada prensipleri ortaya konan ve önerilen, daha sonra Franklin ve Dusseault (1989) ve Luong (1990) tarafından geliştirilen deney aparatı ile yapılabilen bu deneyde silindirik karot örnekleri kullanılmaktadır. Örneğin alt ve üst yüzeylerinden, boyları örnek boyundan daha küçük eş merkezli ve eş eksenli birer silindirik yarık açılmakta ve ortada kalın duvarlı bir silindir oluşturduktan sonra en dıştaki ve içteki dolu silindir sıkıştırılmaktadır (Şekil 3.10). Böylece, aradaki kalın duvarlı silindir eksenel olarak çekme yükleri etkisinde kalmakta ve yüklemeye örnek yenilinceye kadar devam edilmektedir. Deneyde, ortadaki silindirin, yarıkların uçlarına yakın kısımlarında eğilme momentlerine maruz kalması ve çekme gerilmelerinde düzensizlikler olması ve ölçülen dayanımın boyutlardan etkilenmesi nedeniyle (Gerçek ve Özarslan, 2011; Coviello vd., 2005) bu deney yaygın bir kullanıma sahip değildir.



Şekil 3.10. Luong deneyinde örnek ve yükleme

Üç Eksenli Sınırlandırılmış (Confinied) Çekme Deneyi

Hoek ve Brown (1980) tarafından önerilen ve sonraki yıllarda farklı araştırmacılar (Aimone-Martin, 1997; Ramsey ve Chester, 2004; Bobich 2005; Lan vd., 2019; Zeng vd., 2019) tarafından yapılan çalışmalarla geliştirilen bu yöntemde, dambıl şekilli kaya örnekleri kullanılmaktadır. Örnek özel olarak tasarlanmış bir hücre içerisine yerleştirilmekte (Şekil 3.11), hidrolik basınç ile örnek çevresinde $\sigma_1 = \sigma_2$ gerilmesi ve buna bağlı olarak σ_3 çekme gerilmesi oluşturulmaktadır.



Şekil 3.11. Üç eksenli sınırlandırılmış çekme deney düzeneği

Örnek yenilinceye kadar gerilme artırılarak yenilme anındaki σ_3 değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır. Hesaplanan σ_3 değeri kaya malzemesinin üç eksenli sınırlandırılmış dolaylı ÇD'si olarak kabul edilmektedir.

$$\sigma_3 = -\frac{Pd_2^2 - d_1^2}{d_1^2} \tag{3.9}$$

Eşitlikte;

σ_3 = Kaya malzemesinin sınırlandırılmış çekme dayanımı

P = Hidrolik basınç (kN)

d_1 = Örneğin en büyük yarıçapı (m)

d_2 = Örneğin en küçük yarıçapı (m)

4. MATERYAL VE METOT

Zayıf kaya malzemesinin doğrudan ve dolaylı çekme dayanımları arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar genel olarak üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, çalışma konusunda uygun karot örnekleri derlenmiş ve bu örnekler standartlarda öngörülen boyutlarda kesilerek deneye hazırlanmıştır. İkinci aşamada, hazırlanan örneklerde doğrudan çekme deneyleri ile Brazilian deneyleri gerçekleştirilmiş, son aşamada ise laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilerek, kaya malzemesinin doğrudan ve dolaylı ÇD değerleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmaya çalışılmıştır.

4.1. Örneklerin Derlenmesi ve Hazırlanması

Laboratuvar çalışmalarında kullanılacak olan karot örnekleri derlemek için öncelikle DSİ 9. Bölge Müdürlüğü'ne ait karot deposundaki, farklı bölge ve formasyonlarda yapılmış olan araştırma sondajlarına ait karot sandıkları incelenmiştir (Şekil 4.1). Yapılan inceleme sonucunda, bu çalışmaya uygun özellikteki birimler belirlenmiş ve bu birimlerden laboratuvar çalışmalarında kullanılmak üzere uygun boyutta karot örnekler derlenmiştir. Bu örnekler, Malatya ve Tunceli bölgelerinde DSİ 9. Bölge Müdürlüğü tarafından yapımı planlanmış ve gerçekleştirilmiş baraj ve gölet projelerinin araştırma sondajlarına ait karotlardan derlenen örnekler killi kireçtaşı, marn, tüfit, andezit ve granodiyorit olmak üzere 5 farklı litolojidedir. Örneklemenin yapıldığı birimlerin ait olduğu formasyon, yüzeylediği bölge, karotun ait olduğu proje, deneyler için hazırlanan toplam örnek sayıları ve yapılan kodlamalar Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Örnekleme yapılan karot sandıkları

Tablo 4.1. Laboratuvar çalışmaları için derlenen örneklere ait bilgiler

Grup	Litoloji	Formasyon	Bölge/Proje
A	Granodiyorit	Polat Granitoidi	Malatya/Melet Göleti
B	Tüfit	Yamadağ Volkanitleri	Malatya/Boztepe Barajı
C	Killi Kireçtaşı	Ansurçay Formasyonu	Malatya/Ansur Göleti
D	Marn	Ansurçay Formasyonu	Malatya/Ansur Göleti
E	Andezit	Karabakır	Tunceli/Cevizlidere Göleti

A grubunda yer alan granitoidler, Malatya ili Doğanşehir ilçesinin yaklaşık 12 km kuzeydoğusunda Melet Suyu üzerinde sulama amaçlı olarak inşa edilmiş olan Melet Göleti eksen yerinde yapılan araştırma sondajlarına ait karotlardan derlenmiştir. Bu granitoidler için, bölge ve yakın çevresinde Önal ve Altunbey (1999) Polat Granitoidi, Karaoğlan (2005) ise Doğanşehir Granitoidi ismini kullanmışlardır. Araştırmacılar, bu kayaç topluluğunun granitoidlerden başka, mikrodiyorit, kuvars mikrodiyorit, diyoritporfir, kuvars diyoritporfir ile aplit, lamprofir ve andezit dayklarından oluştuğunu belirterek, oluşum yaşını Üst Kretase olarak vermektedirler.

B grubu olarak kodlanan tüfitler, Malatya İli Yazıhan İlçesi'nin yaklaşık 10 km kuzeyinde sulama amaçlı olarak inşa edilen Boztepe Barajına ait araştırma sondajlarının karotlarından derlenmiştir. Bu tüfitler, bölgede yüzeyleme veren Miyosen yaşlı volkanizmanın ürünleridir. Bölgede yapılan çalışmalarda (Akkuş, 1971; Bozkaya ve Yalçın, 1991; Ercan ve Asutay, 1993; Gürocak, 1999) bu volkanitler Yamadağ Volkanitleri olarak adlandırılmış ve kiltaşı, bazalt tüfit, aglomera üyelerine ayrılarak haritalanmıştır.

C grubu olarak kodlanan killi kireçtaşı ve D grubu olarak kodlanan marnlar ise Malatya İli Yazıhan ilçesi yakınlarında inşa edilen Ansur Göleti projesi kapsamında yapılmış olan araştırma sondajlarından derlenmiştir. Bu kayaçlar, bölgede yapılan çalışmalarda (Örçen, 1986; Sevimli, 2009; Sevimli vd., 2017) Ansurçay Formasyonu olarak tanımlanan, kırıntılı kireçtaşları, gri renkli, az tutturulmuş, masif ya da kalın tabakalanmalı marnlar ile sarımsı beyaz renkli iyi pekişmiş, kalın–çok kalın tabakalanmalı kireçtaşlarından oluşan ve Burdigaliyen yaşlı formasyondan derlenmiştir.

E grubu andezitler ise, Tunceli il sınırları içerisinde inşa edilmiş olan Cevizlidere Göleti projesine ait karotlardan derlenmiştir. Bu andezitler, bölgede çok geniş yayılım sunan ve Elazığ-Tunceli civarında yapılan tüm çalışmalarda (Naz, 1979; Bingöl, 1984; Turan ve Bingöl, 1991; Altunbey, 1996; Gürocak ve Kürüm, 2020) Karabakır Formasyonu olarak adlandırılan, volkanik kayaçlar, piroklastikler ve tüflerden oluşan, Orta-Üst Miyosen yaşlı volkanik kayaçlara aittir.

Laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere karot sandıklarından derlenen örnekler önce kesim için hazırlanmıştır. Örnekler, kesim için hazırlanırken doğrudan ve dolaylı çekme deneylerinde kullanılacak örneklerin aynı karottan kesilmesine (Şekil 4.2) dikkat edilmiş ve örnek boyutlandırılmasında, doğrudan ve dolaylı çekme deneyleri için ISRM (2007) tarafından

öngörülen boyutlar esas alınmıştır (Şekil 4.3). Kesim sırasında dağılmaya karşı hassas olan kaya gruplarında su kullanılmamıştır.

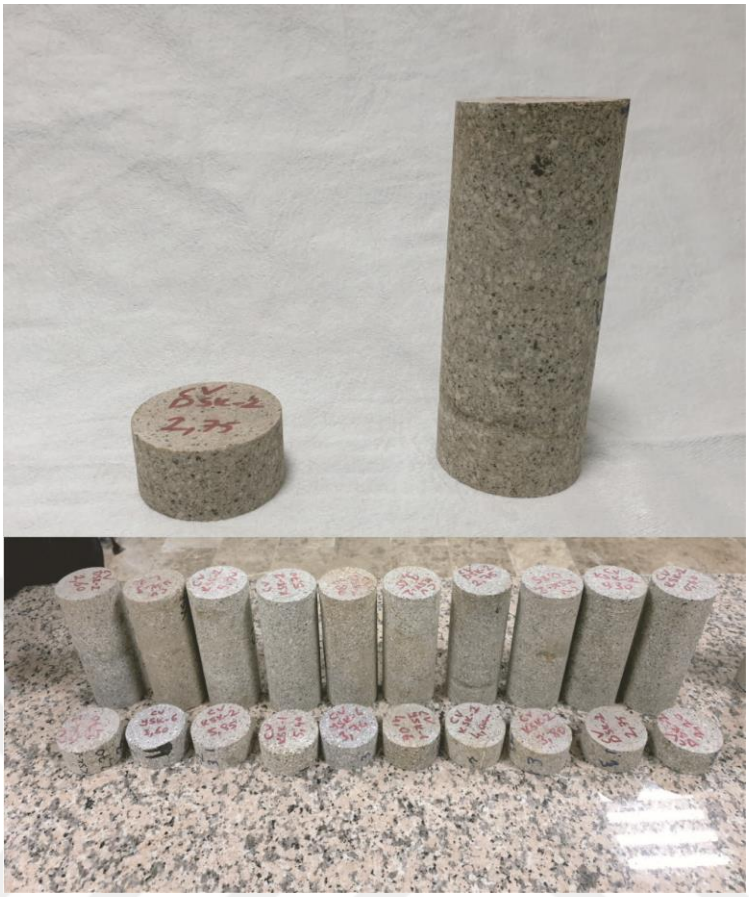


Şekil 4.2. Karot örneklerin kesim için hazırlanması (a) ve kesilmesi (b)

ISRM (2007)'ye göre doğrudan çekme deneylerinde kullanılacak olan örneklerin tercihen 54 mm çapta, boy ve çap oranının ise (L/D) 2.5 ile 3.00 arasında olması önerilmektedir. Brazilian deneyinde kullanılacak örneklerde ise çapı en az 54 mm, boy ve kalınlık oranının (D/t) ise 0.5 olması önerilmektedir. Karot sandıklarından seçilen örneklerden 76 adet doğrudan çekme deneyi, 76 adet de Brazilian deneyinde kullanılmak üzere toplam 152 adet örnek (Tablo 4.2) ISRM (2007)'de önerilen boyutlara göre kesilerek deneylere hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.3).

Tablo 4.2. Doğrudan çekme ve Brazilian deneyleri için hazırlanan örnek sayıları

Grup	Doğrudan Çekme Deneyi	Brazilian Deneyi
A	20	20
B	16	16
C	10	10
D	20	20
E	10	10



Şekil 4.3. Kesilerek deneylere hazır hale getirilmiş örnekler

4.2. Doğrudan Çekme Deneyi

Kaya malzemesinin DÇD'sini belirlenmesi amacıyla yapılan bu deneyde genel olarak birbiriyle benzerlik sunan ISRM (2007) ve ASTM D2936 (2008a) tarafından önerilen yöntemler tercih edilmektedir. Bu çalışmada, daha genel kullanıma sahip olması nedeniyle ISRM (2007) yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem aşağıda kısaca açıklanmıştır;

a) Kaya örnekleri silindir şeklinde hazırlanmalı ve boy (L) / çap (D) oranı 2.5-3.0 arasında olmalıdır. Çapı tercihen 54 mm'den büyük örnekler kullanılmalı ve örneğin alt-üst yüzeyleri birbirine paralel olmalıdır. Ayrıca örnek süreksizlik içermemeli ve yan yüzeyleri düzgün olmalıdır.

b) Başlıklar örneklere çimento ya da epoksi yardımıyla yapıştırılmalıdır. Alt ve üst yüzeylerde kullanılacak yapıştırıcı kalınlığı en fazla 15 mm olmalıdır. Yükleme sırasında örnek yenilmeden önce bağlantılardan kopmaması için deneyin bu aşamasına özen gösterilmelidir.

c) Deney örneği, yapıştırıcının sertleşmesi için 20 ± 2^0C sıcaklığa ve %50 neme sahip bir ortamda, 5-6 gün bekletildikten sonra deneye tabi tutulmalıdır.

d) Yapıştırıcının sertleşmesinden sonra, yükleme işlemine geçmeden önce, başlıkların yeterince düzgün biçimde yapıştırıldığından emin olunmalıdır.
e) Deney başladıktan sonra örnek 5 dk içerisinde yenilecek şekilde, yükleme hızı ayarlanmalıdır.
f) Her kayaç türü için en az beş örnek deneye tutulmalıdır.

Yukarıda sıralanan öneriler dikkate alınarak gerçekleştirilen deney sonucunda kaya malzemesinin DÇD'si (veya TEÇD) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$\text{DÇD (TEÇD)} = \frac{F}{A} \tag{4.1}$$

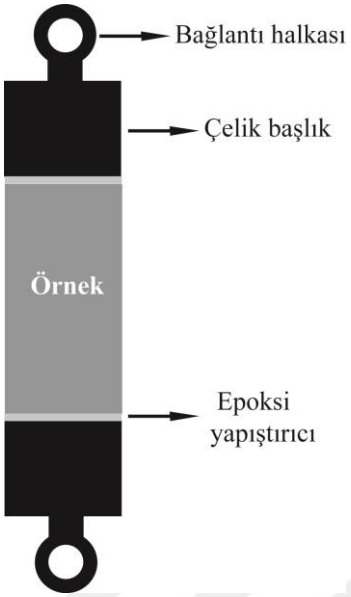
Bu eşitlikte,
DÇD = Kaya malzemesinin doğrudan çekme dayanımı (MPa)
F = Yenilme anındaki kuvvet (N),
A = Yüzey alanı (mm^2)'dır.

ISRM (2007) dikkate alınarak doğrudan çekme deneyi için hazırlanan örnekler çekme başlıkları yapıştırılmadan önce 24 saat 60^0C sıcaklıkta etüvde bekletilmiş, daha sonra etüvden çıkarılan örnekler epoksi yapıştırıcı Loctite EA340 kullanılarak çelik çekme başlıklarına yapıştırılmıştır (Şekil 4.4). Bu işlemden sonra çekme başlıklarının hareket etmesini önlemek amacıyla örnek ve çelik başlıklar kağıt koli bandı ile sarılmış ve havası alınmış ortamda 5 gün bekletilerek, epoksinin tam olarak kuruması ve yeterli çekme dayanımına ulaşması sağlanmıştır.



Şekil 4.4. Örneklerin deneye hazır hale getirilmesi. Etüvde (a) ve havasız ortamda (b) bekletme

Çelik başlıkların örneklere yapıştırılma işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 4.5'de şematik olarak görüldüğü gibi bağlantı halkaları başlıklara takılarak örnek deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.5. Deneye hazır örneğin şematik gösterimi

Deneye hazır hale getirilen örnek çekme deneyi aletine yerleştirildikten sonra bağlantı halkalarına geçirilen çelik aparatlar yardımıyla alt-üst yüzey tam paralel olacak şekilde konumlandırılmış (Şekil 4.6) ve örnek 5 dk içerisinde yenilecek şekilde yüklenmeye başlanmıştır. Tüm örneklerde yapılan bu işlemler sonucunda örneklerde doğudan çekme deneyleri tamamlanmıştır.



Şekil 4.6. Doğrudan çekme deneyinin gerçekleştirilmesi

Deneyler sırasında, bazı örnekler epoksi yapıştırıcıdan yenilmiş, bu örnekler yeniden yapıştırılarak deneye tabi tutulmuşlardır. ISRM (2007) de önerildiği gibi yenilmenin herhangi bir

süreksizliğe bağlı olmadığı ve örnek ortasından olduğu deneyler (Şekil 4.7) geçerli olarak kabul edilmiştir. Yenilmenin başlıklara yakın yerlerden (Şekil 4.8a) veya örnekte mevcut olan ama deney öncesinde belirlenememiş süreksizliklerden (Şekil 4.8b) olduğu deneyler ise geçersiz sayılmıştır.



Şekil 4.7. Deneyin geçerli kabul edildiği yenilmiş örnekler



Şekil 4.8. Deneyin geçerli kabul edilmediği yenilmiş örnekler: (a) Yenilmenin bağlantı yerlerine yakın meydana geldiği örnek, (b) Yenilmenin süreksizlikten meydana geldiği örnek

4.3. Brazilian Deneyi

Bu çalışmada, kaya malzemesinin dolaylı ÇD'sini belirlemek amacıyla Brazilian deneyleri gerçekleştirilmiş ve kaya malzemesinin BÇD'si belirlenmiştir. İlk defa Akazawa (1943) ve Carneiro (1943) tarafından yapılan farklı çalışmalar ile önerilen bu deney, sonraki yıllarda hem ISRM (2007), hem de ASTM D3967 (2008b) tarafından standartlaştırılmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen Brazilian deneylerinde ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem dikkate alınmış ve deneyin nasıl gerçekleştirildiği maddeler halinde aşağıda sunulmuştur. ISRM (2007)'ye göre;

a) Örneklerin çapı en az 54 mm, kalınlığı da yarıçapına eşit olmalı ve süreksizlik içermemelidir.
b) Deneyde kullanılacak olan çenelerin yarıçapı, örneğin yarıçapının 1.5 katı, çenelerin genişliği ise örnek kalınlığının 1.1 katı olmalıdır.
c) Üst çene, 25 mm çapında yarı küresel bir elemandan oluşan küresel bir başlık içermelidir.
d) Örnekte yenilmenin yaklaşık 15-30 sn aralığında gerçekleşeceği şekilde yükleme yapılmalıdır.
e) Deney, her bir kaya türünden en az 10 adet örnekte gerçekleştirilmelidir.

Yukarıda sıralanan öneriler dikkate alınarak gerçekleştirilen Brazilian deneyleri sonucunda kaya malzemesinin BÇD'si Eşitlik 4.2 kullanılarak hesaplanır.

$$\text{BÇD} = \frac{0.636\ \text{F}}{\text{D}\ \text{t}} \tag{4.2}$$

Bu eşitlikte;

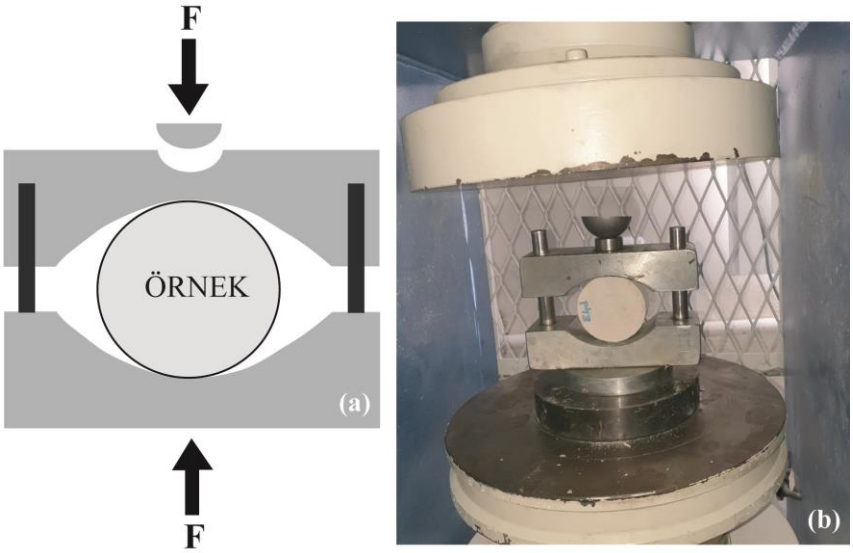
BÇD = Kaya malzemesinin Brazilian çekme dayanımı (MPa)

F = Örnekte ilk yenilme çatlağının oluştuğu andaki kuvvet (N),

D = Örneğin çapı (mm),

T = Örneğin kalınlığı (mm)'dır.

Şekil 4.9a'da şematik olarak gösterildiği gibi, daha önce hazırlanmış olan örnekler çeneler arasına yerleştirilmiş ve örnek yenilinceye kadar yüklenmiştir (Şekil 4.9b). Böylece tüm örnekler için Brazilian deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyin geçerli olabilmesi için örneğin Şekil 4.10a'da görüldüğü gibi tam ortadan ve eksen boyunca yenilmesi gerekmektedir. Yapılan Brazilian deneylerinde standarda uygun şekilde yenilmeyen örneklere (Şekil 4.10b) ait deney sonuçları geçersiz sayılmış ve yeniden örnek hazırlanarak deney tekrarlanmıştır.



Şekil 4.9. Brazilian deneyinin şematik gösterimi (a) ve deneyin gerçekleştirilmesi (b)



Şekil 4.10. Brazilian deneyinde standartlara uygun olarak yenilen (a) ve standart dışı yenilen (b) örnekler

4.4. Doğrudan Çekme ve Brazilian Deneylerine Ait Sonuçlar

ISRM (2007) kriterleri dikkate alınarak bu çalışma için hazırlanmış olan 5 grup kaya malzemesinde gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen ham değerler Eşitlik 4.1 ve 4.2 kullanılarak örneklerin DÇD ve BÇD değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan DÇD ve BÇD değerlerine ait istatistiksel değerlendirmeler ise Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Doğrudan çekme deneylerine ait sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilmesi

Grup	Örnek sayısı	Doğrudan Çekme Deneyi				Brazilian Deneyi			
		En fazla (MPa)	En az (MPa)	Ortalama (MPa)	Standart sapma	En fazla (MPa)	En az (MPa)	Ortalama (MPa)	Standart sapma
A	11	1.27	0.22	0.558	0.2986	0.90	0.22	0.530	0.1933
B	13	1.78	0.47	0.707	0.343	1.98	0.56	0.922	0.3882
C	10	6.36	3.17	4.460	0.9451	8.75	3.95	5.662	1.4940
D	15	7.06	2.66	4.728	1.541	11.10	6.23	7.660	1.1537
E	4	7.11	4.49	5.638	1.282	7.94	3.27	5.168	2.2111
Tüm Gruplar	53	7.11	0.22	2.894	2.303	11.10	0.22	3.962	3.2377

Tablo 4.3'e göre en yüksek ortalama DÇD değeri 7.11 MPa ile E grubundan, en düşük ortalama DÇD değeri ise 0.22 MPa ile A grubuna ait örneklerden elde edilmiştir. En düşük ortalama DÇD değerleri A ve B grubunda ortaya çıkarken, C, D ve E grubu örneklerin ortalama DÇD değerleri birbirine yakındır ve diğer gruplara göre de daha yüksektir. Tüm gruplara ait değerler incelendiğinde, ortalama DÇD değeri 2.894 MPa, en düşük DÇD değeri 0.22 MPa, en yüksek DÇD değeri ise 7.11 MPa olarak belirlenmiştir.

Brazilian deneyine ait sonuçlara bakıldığında; en yüksek ortalama BÇD değeri 7.66 MPa ile D grubundan, en düşük ortalama BÇD değeri ise 0.90 MPa ile A grubuna ait örneklerden elde edilmiştir. En düşük ortalama BÇD değerleri DÇD'da olduğu gibi A ve B grubunda ortaya çıkmıştır. C ve E grubu örneklerin ortalama BÇD değerleri birbirine yakın değerlerdedir. Ortalama BÇD değerinin en yüksek olduğu kaya grubu ise D grubudur. Tüm gruplara ait BÇD değerleri incelendiğinde, ortalama BÇD değeri 3.962 MPa, en düşük BÇD değeri 0.22 MPa, en yüksek BÇD değeri ise 11.10 MPa'dır.

Tüm örnek grupları için belirlenen ortalama DÇD ve BÇD değerleri karşılaştırıldığında; kaya örneklerinin BÇD değerlerinin DÇD değerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu bulgu, önceki yıllarda doğrudan çekme ve Brazilian deneylerinden elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı birçok araştırmada (Andreev; 1991a, 1991b; Gorski vd., 2007; Klanphumeesri, 2010; Fuenkajorn ve Klanphumeesri, 2011; Li ve Wong, 2013; Liu vd., 2014; Jensen, 2016; Efe, 2019; Liao vd., 2019) ortaya çıkan sonuçlar ile uyum göstermektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, kaya malzemesinin DÇD ile BÇD arasındaki ilişkilerin ortaya konulabilmesi amacıyla basit regresyon analizleri yapılmış ve ilişkiler açıklanmaya çalışılmıştır.

5.1. Regresyon Analizleri

İki parametre arasındaki ilişkilerin belirlenebilmesinde kullanılan en yaygın istatistiksel yöntem basit veya çoklu regresyon analizleridir. Aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi kullanarak o konu ile ilgili tahminler ya da ön kestirimler yapabilmek amacıyla yapılan bu analiz yönteminde iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi açıklamak için matematiksel bir model kullanılır. Bu model Regresyon Modeli olarak adlandırılır. Eğer model bir bağımlı ve bir de bağımsız değişken içeriyor ise bu modele Basit Regresyon Modeli, bir bağımlı ve bir den fazla bağımsız değişken içeriyor ise bu modele de Çoklu Regresyon Modeli adı verilmektedir. Basit regresyon modeli; $Y = \alpha+\beta X$ şeklindeki bir modeldir ve bu modelde;

Y = Bağımlı (sonuç) değişkendir ve belli bir hataya sahip olduğu varsayılır.

X = Bağımsız (sebep) değişkendir ve hatasız ölçüldüğü varsayılır.

α = Regresyon sabiti değeridir ve X=0 olduğunda Y'nin aldığı değerdir.

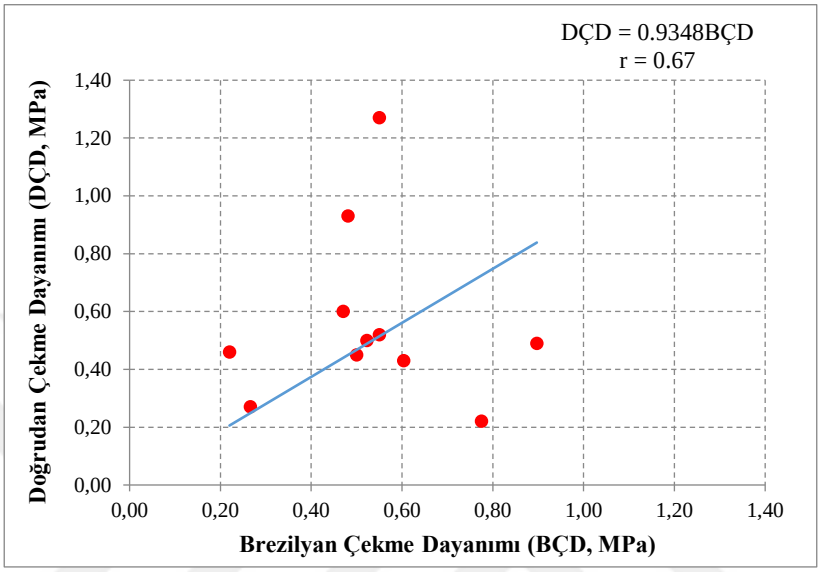
β = Regresyon katsayısı olup, X'in kendi birimi cinsinden 1 birim değişmesine karşılık Y'de kendi birimi cinsinden meydana gelecek değişme miktarını ifade eder.

Bu çalışmada, DÇD ile BÇD değerleri arasındaki ilişkilerin ortaya konulabilmesi amacıyla, her bir örnek grubunda ve bütün grupların bir arada değerlendirildiği basit regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

5.1.1. A Grubu Örneklere ait Basit Regresyon Analizi

Bu grupta yer alan örnekler magmatik kökenli granodiyorit litolojisindedir. Bu gruptan toplam olarak 20 adet örnek hazırlanmış, ancak bu örneklerden sadece 11 örnekte yapılan deneyler geçerli olmuştur. Diğer 9 örnekte gerçekleştirilen deneylerde yenilmeler standart dışı olduğundan değerlendirmeye alınmamıştır. A grubuna ait DÇD ve BÇD değerleri kullanılarak gerçekleştirilen basit regresyon analizinde (Şekil 5.1); bu parametreler arasında korelasyon katsayısı (r) 0.67 olan kuvvetli pozitif bir korelasyonun olduğu belirlenmiştir. Bozunmanın fazla olması ve bu nedenle kayayı oluşturan mineraller arasındaki bağların zayıflamış olması nedeniyle A grubu örneklerde bu çalışmada kullanılan tüm örneklere göre en düşük DÇD ve BÇD değerleri ortaya çıkmıştır. Ayrıca, önceki çalışmalarda belirtilmiş olan BÇD'nin DÇD'ye göre daha büyük olması durumu bu gruptaki tüm örnekler için geçerli değildir. Örneklerin bir kısmında DÇD

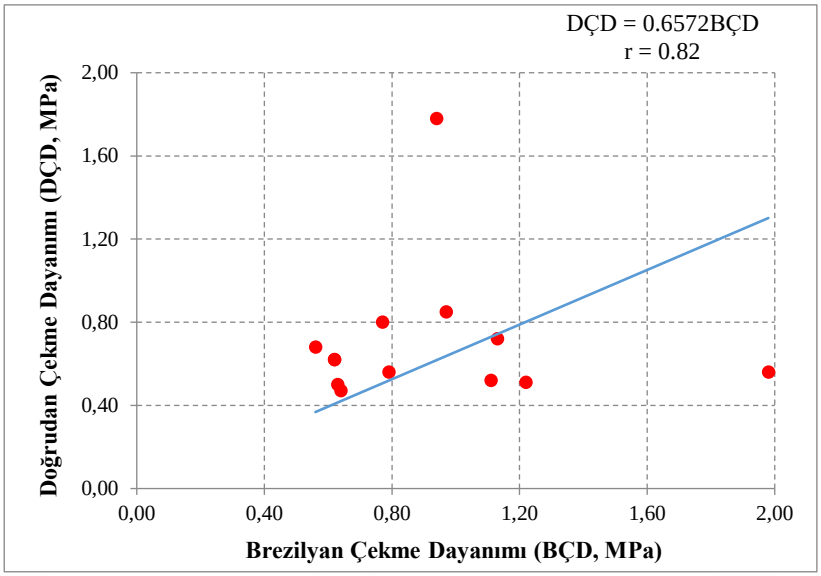
değerleri BÇD'den daha büyük iken, diğer örneklerde ise genel durumla uygun olarak BÇD değerleri DÇD değerlerinden daha küçüktür. Bu durum, verilerin dağılımına da etki etmiş ve Şekil 5.1'de görüldüğü gibi noktaların geniş alanda dağılım göstermesine neden olmuş ve böylece r değerini düşürmüştür.



Şekil 5.1. A Grubu örneklere ait dağılım grafiği

5.1.2. B Grubu Örneklere ait Basit Regresyon Analizi

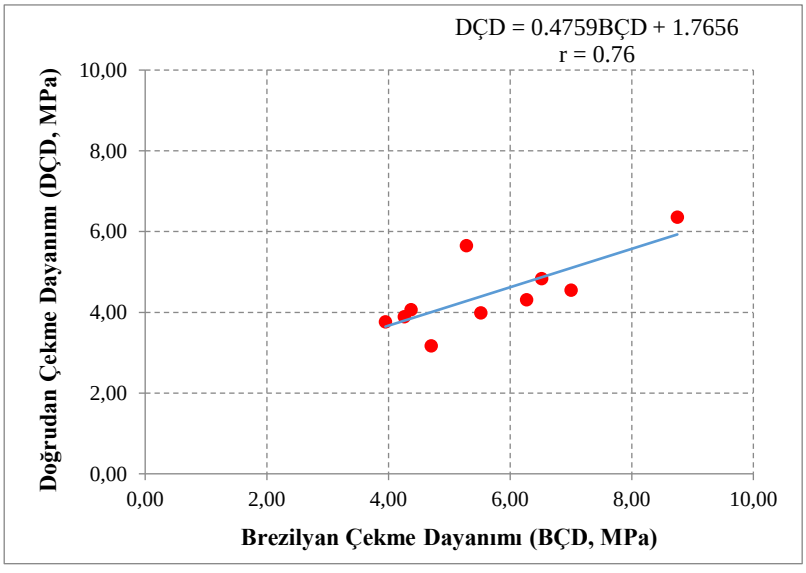
Bu grupta yer alan örnekler volkanik kökenli tüfitlerdir. Toplam olarak 16 adet örnek hazırlanmış, ancak bu örneklerden 13 âdetinde yapılan deneyler geçerli olarak kabul edilmiştir. B grubuna ait verilere ait basit regresyon analizi sonucunda (Şekil 5.2); DÇD ve BÇD parametreleri arasında kuvvetli pozitif bir korelasyonun (r = 0.82) olduğu belirlenmiştir. Bu grupta yer alan tüfit örneklerinin DÇD ve BÇD değerlerine bakıldığında, iki örnekte BÇD ve DÇD değerleri aynı, birkaç örnek hariç diğer örneklerde ise BÇD değerleri DÇD'dan daha büyüktür. İki parametre arasındaki fark %12 ile %58 arasında değişmektedir. Deneylere ait sonuçların dağılıma bakıldığında, A grubu örneklere göre veri dağılımı daha iyidir (Şekil 5.2) ve bunun sonucu olarak 0.82 gibi yüksek bir r değeri ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.2. B Grubu örneklere ait dağılım grafiği

5.1.3. C Grubu Örneklere ait Basit Regresyon Analizi

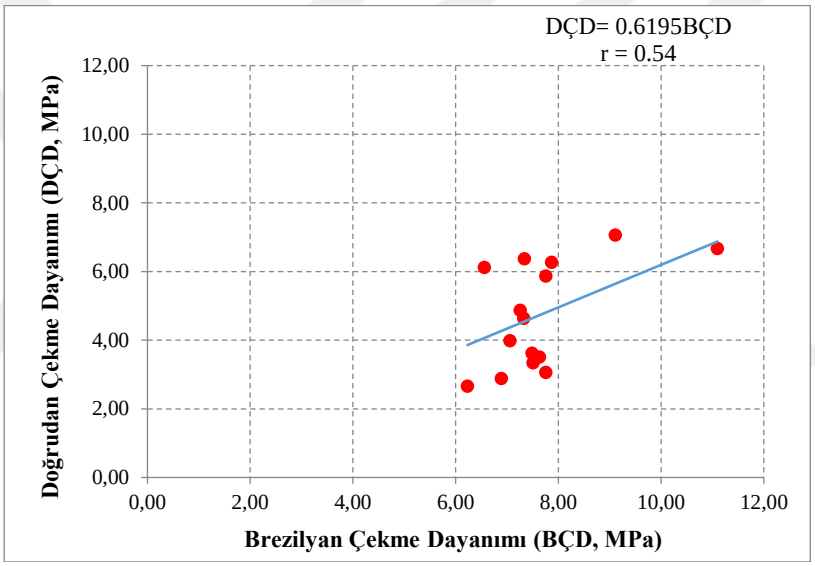
Bu grupta yer alan örnekler sedimanter kökenli killi kireçtaşlarıdır. Bu kayaçlardan hazırlanan 10 örnekte gerçekleştirilen doğrudan çekme ve Brazilian deneylerine ait veriler basit regresyon analizi ile değerlendirildiğinde (Şekil 5.3); r=0.76 olan kuvvetli pozitif bir korelasyonun olduğu görülmüştür. Bu gruba ait deney sonuçlarına bakıldığında, bir örnek hariç tüm örneklerde BÇD değerlerinin yaklaşık olarak %7 ile %32 arasında DÇD değerlerinden daha büyük olduğunu görmek mümkündür.



Şekil 5.3. C Grubu örneklere ait dağılım grafiği

5.1.4. D Grubu Örneklere ait Basit Regresyon Analizi

Bu grupta yer alan örnekler sedimanter kökenli marnlardır. D grubu kayaçlardan toplam 20 örnek hazırlanmış, bu örneklerde gerçekleştirilen deneylerin 15 tanesi geçerli sayılmıştır. Deneylere ait verilere ait basit regresyon analizine göre (Şekil 5.4); DÇD ve BÇD değerleri arasında korelasyon katsayısı (r) 0.54 olan zayıf pozitif bir korelasyon bulunmaktadır. Bu gruptaki örneklerin tamamında BÇD değerleri DÇD değerlerinden daha büyüktür ve bu fark %6 ile %58 gibi çok geniş bir aralıkta değişmektedir. İki parametre arasındaki korelasyona ait r değeri diğer gruplara göre daha düşüktür. Diğer gruplara göre daha fazla örnekte deney yapılmasına karşın r değerinin düşük çıkmasının nedenini DÇD ve BÇD değerlerinin büyük kısmının çok dar aralıkta (6-8 MPa) arasında yoğunlaşması (Şekil 5.4) ile açıklamak mümkündür.

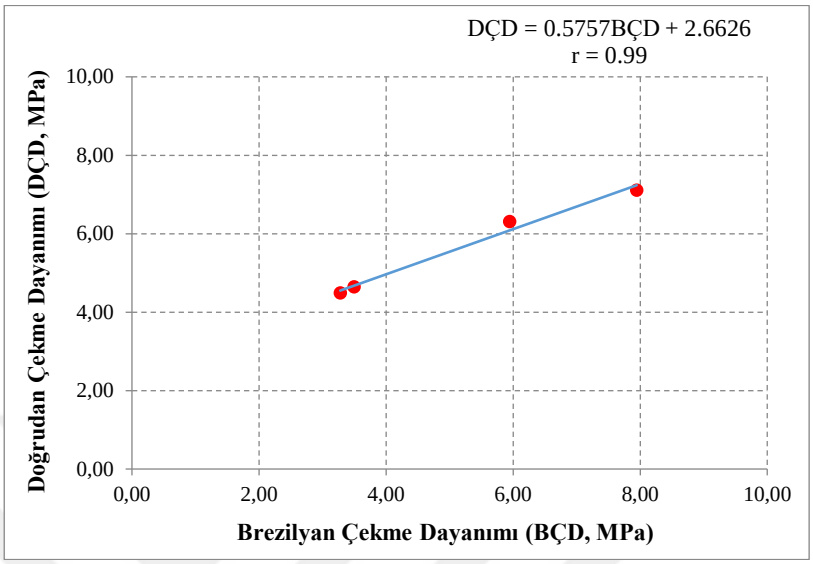


Şekil 5.4. D Grubu örneklere ait dağılım grafiği

5.1.5. E Grubu Örneklere Ait Basit Regresyon Analizi

E Grubu örnekler volkanik kökenli andezitlerden oluşmaktadır. Bu andezitlerden toplam 10 örnek hazırlanmasına karşın bu örneklerde yapılan deneylerden sadece 4 tanesi geçerli olmuştur. Bunun nedeni andezitlerin yoğun şekilde mikro çatlak içermesidir. Deney sonuçları kullanılarak yapılan basit regresyon analizine göre (Şekil 5.5); DÇD ve BÇD değerleri arasındaki korelasyon, çok kuvvetli pozitiftir ve korelasyon katsayısı (r) ise 0.99'dur. Bu grup için r değerinin çok yüksek olmasına karşın, deneylere ait sonuçlara bakıldığında, bir örnek hariç diğer üç örneğin hepsinde DÇD değerlerinin BÇD değerlerinden daha büyük olduğunu görmek mümkündür. Bu sonuç, DÇD ve BÇD değerleri arasındaki ilişki konusunda yapılmış olan çalışmalarda ortaya çıkan genel durum ile örtüşmemektedir. E grubunda yeterli örnekte deney yapılamaması

nedeniyle hem diğer gruplara göre çok yüksek r değeri ortaya çıkmış, hem de bu gruptaki andezitler için DÇD ve BÇD değerleri arasındaki ilişki tam olarak ortaya konulamamıştır.



Şekil 5.5. E Grubu örneklere ait dağılım grafiği

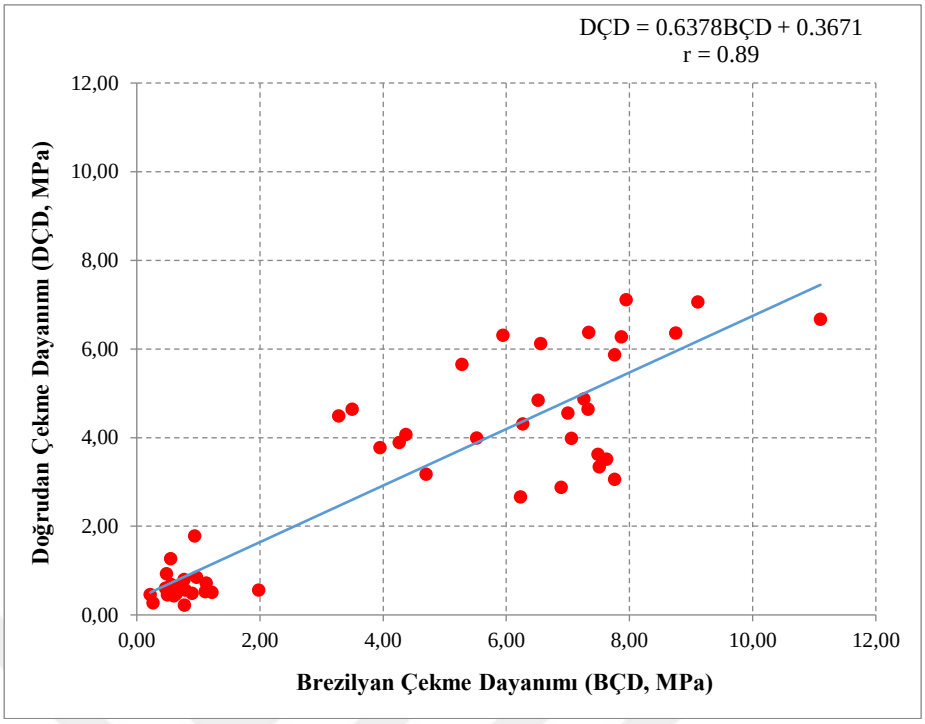
5.1.6. Tüm Örnek Gruplarına Ait Basit Regresyon Analizi

Bu çalışma kapsamında 5 farklı formasyondan derlenen ve deney için kesilerek hazırlanan toplam 152 adet örnekte gerçekleştirilen doğrudan çekme ve Brazilian deneylerinde, 106 adet örnekte standartlara uygun yenilme gerçekleşmiştir. Böylece, doğrudan çekme deneyi için 53 adet, Brazilian deneyi için de 53 adet olmak üzere toplam 106 deney sonucu geçerli sayılmıştır. Geçerli kabul edilen bu deneylere ait DÇD ve BÇD değerlerinin tamamı basit regresyon analizleri ile değerlendirilerek, bu parametreler arasındaki ilişki ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Bağımlı değişken (Y) olarak DÇD, bağımsız değişken (X) olarak da BÇD'nin girdi parametresi olarak kullanıldığı regresyon analizine ait veri dağılım grafiği Şekil 5.6'da verilmiştir. Regresyon analizi sonuçlarına göre, tüm örnek gruplarının DÇD ile BÇD değerleri arasında çok kuvvetli pozitif bir korelasyon bulunmaktadır. Bu korelasyonun r değeri 0.89, korelasyonu tanımlayan eşitlik ise;

$$DÇD = 0.6378BÇD + 0.3671 \quad (5.1)$$

olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.6. Tüm örneklere ait dağılım grafiği

Bu iki parametre arasındaki korelasyon dikkate alındığında, bu konuda daha önce yapılan çalışmalarda da belirtildiği gibi kaya malzemesinin Brazilian deneyi sonucunda belirlenen BÇD değerinin, DÇD değerinden büyük olduğu görülmektedir. Birçok çalışmada belirtilmemesine karşın Lui vd. (2014) yaptıkları çalışmada BÇD değerinin, kaya malzemesinin gerçek ÇD'sini temsil eden DÇD'den %20 daha büyük olduğunu belirtmektedir. Bu çalışmada elde edilen veriler dikkate alındığında, bu oranın çok daha fazla olduğu (%70'lere kadar çıktığı) görülmektedir. Bu iki parametre arasındaki fark, deneye tabi tutulan kayanın, türü, tane boyutu ve bozunma derecesi g,b, özellikler ile yakından ilişkilidir. Dolayısıyla, farklı litoloji, doku ve bozunma derecesine sahip kaya malzemelerinde DÇD değerleri ile BÇD arasındaki fark değişmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, düşük dayanımlı, zayıf kaya malzemesinin DÇD ve BÇD değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla beş farklı litolojiye sahip kayaçlardan hazırlanan örneklerde doğrudan çekme ve Brazilian deneyleri gerçekleştirilmiş ve deneyler sonucunda elde edilen veriler basit regresyon analizleri ile değerlendirilmiş ve sonuçta DÇD ile BÇD değerleri arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan tüm çalışmalar ile elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1) Granodiyoritlerden oluşan A grubu, tüm gruplar içerisinde en düşük DÇD ve BÇD (0.22 MPa) değerlerinin ortaya çıktığı gruptur. Örneklerin ortalama DÇD değeri 0.558 MPa iken, BÇD'si 0.530 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler birbirlerine oldukça yakın değerlerdir. Bu gruba ait tüm değerlere bakıldığında, örneklerin bir kısmında DÇD değerlerinin BÇD'den daha büyük olduğu, diğer örneklerde ise daha küçük olduğu görülmektedir. Literatürde kaya malzemesinin BÇD'nin DÇD'ye yakın ve daha büyük olduğu vurgulanmaktadır. A grubu granodiyoritlere ait verilerin literatürdeki sonuçlar ile tam olarak uyuştuğunu söylemek mümkün değildir. Bunun sebebi olarak, granodiyoritlerin bozunma derecesinin oldukça fazla olması ve mineraller arasındaki bağın oldukça zayıf olmasıdır. Bu durumda kaya malzemesi aynı olsa bile deneylerden farklı sonuçlar ortaya çıkabileceği olarak söylenebilir. A grubu için DÇD ile BÇD değerleri arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla yapılan basit regresyon analizine göre, bu iki parametre arasında r değeri 0.67 olan kuvvetli pozitif bir korelasyon mevcuttur.
2) Tüfit litolojisindeki B grubu, A grubundan sonra en düşük DÇD (0.47 MPa) ve BÇD (0.56 MPa) değerlerinin elde edildiği gruptur. Örneklerin ortalama DÇD değeri 0.707 MPa, ortalama BÇD değeri ise 0.922 MPa olarak belirlenmiştir. Örneklere ait DÇD ve BÇD değerleri karşılaştırıldığında, genel olarak örneklerin çoğunluğunun BÇD değerinin DÇD'den %12-58 arasında daha büyük olduğu görülmektedir. Bu sonuç literatür verileri ile uyumludur. B grubu için gerçekleştirilen basit regresyon analizi sonucunda, DÇD ile BÇD değerleri arasında 0.82 gibi yüksek bir r değerine sahip kuvvetli pozitif bir korelasyonun olduğu belirlenmiştir
3) C grubundaki killi kireçtaşlarına ait deney sonuçlarına göre; bu grubun ortalama DÇD değeri 4.460 MPa, ortalama BÇD değeri ise 5.662 MPa'dır ve hemen hemen bütün örneklerde BÇD değeri DÇD'den %7 ile %32 arasında değişen oranlarda büyüktür. Bu sonuçlar, literatürde verilen sonuçlar ile tam olarak uyum sağlamaktadır. C grubuna ait verilerin basit regresyon analizi sonucunda DÇD ile BÇD değerleri arasında kuvvetli pozitif bir korelasyon bulunmaktadır. Bu korelasyona ait r değeri ise 0.76'dır.

4) Sedimanter kökenli marn litolojisindeki D grubu örneklerde ortalama DÇD değeri 4.728 MPa, ortalama BÇD değeri ise 4.766 MPa olarak belirlenmiştir. Örneklerin tamamında BÇD değerleri DÇD'dan %6-58 oranında büyüktür. Bu grup için gerçekleştirilen basit regresyon analizine göre DÇD ile BÇD değerleri arasında r değeri 0.54 olan zayıf pozitif bir korelasyon bulunmaktadır. Bu korelasyonun diğer gruplara göre zayıf olmasının nedeni, deney yapılan örneklerin ÇD değerlerinin birbirine çok yakın olmasıdır. Nitekim, deney sonuçlarına ait dağılım grafiğine bakıldığında örneklere ait DÇD ve BÇD değerlerini 6-8 MPa aralığında yoğunlaştığını görmek mümkündür.
5) E grubu olarak tanımlanan andezit örneklerinin yoğun mikro çatlak içermesi nedeniyle bu grupta yeterince deney yapılamamıştır. Gruba ait örneklerin ortalama DÇD değeri 5.638 MPa, ortalama BÇD değeri ise 5.168 MPa'dır. Ortalama değerlerin birbirine çok yakın olmasına karşın her bir örneğe ait sonuçlara bakıldığında, toplam dört örnekten üçünde DÇD değerleri BÇD'den daha büyük çıkmıştır. Bu sonuçlar DÇD ile BÇD değerleri arasındaki ilişkiyi inceleyen literatürdeki çalışma sonuçları ile örtüşmemektedir. Bunun nedeni ise E grubu için yapılan deneylerin yeterli sayıda olmamasıdır. Böylece, olması gerekenden daha kuvvetli bir korelasyon ve r değeri ortaya çıkmıştır.
6) Bu çalışma kapsamında yapılan tüm deneylere ait sonuçlara göre, örneklere ait DÇD değerleri 0.22 ile 7.11 MPa arasında, BÇD değerleri ise 0.22MPa ile 11.10 MPa arasında değişmektedir. Ortalama DÇD değeri 2.894 MPa iken ortalama BÇD değeri 3.962 MPa'dır. Ortalama değerler dikkate alındığında BÇD değerlerinin DÇD'dan yaklaşık %37 oranında daha büyük olduğu görülmektedir. Bu sonuç, önceki yıllarda gerçekleştirilmiş araştırmalara ait sonuçlar ile uyumludur. Tüm örnek gruplarının birlikte değerlendirilerek yapılan basit regresyon analizi sonuçları, DÇD ile BÇD değerleri arasında çok kuvvetli pozitif bir ilişkinin var olduğunu göstermektedir. Bu korelasyona ait r değeri ise 0.89 olarak belirlenmiştir.
7) Elde edilen sonuçlar, kaya malzemesinin ÇD'si belirlenirken en fazla tercih edilen Brazilian deneyi ile elde edilen BÇD değerinin, kayanın gerçek ÇD'sini temsil eden DÇD değerini yansıtmadığını ve dolayısıyla, BÇD değerinin kaya malzemesinin DÇD'si olarak kullanılamayacağını göstermektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen basit regresyon analizi ile düşük dayanımlı kayalar için elde edilen eşitlik ile çekme dayanımı 12 MPa'dan daha düşük olan kaya malzemelerinin BÇD değeri kullanarak DÇD değeri tahmin edilebilir.

KAYNAKLAR

Aimone-Martin, C.T., Oravecz, K.I., Nytra, T.K. (1997). A Mechanical Device for the Measurement of Combined Shear and Tension in Rocks, *International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 34(1), ss. 147–151

Akazawa, T. (1943). New Test Method For Evaluating Internal Stress Due to Compression of Concrete (The Splitting Tension Test) (Part 1), *Journal of Japanese Civil Engineering Institute*, cilt 29, ss. 777–787

Akkuş, M.F. (1971). Darende-Balaban Havzasının (Malatya E-SE Anadolu) Jeolojik Ve Stratigrafik Incelenmesi. *MTA Dergisi*, cilt76, ss. 1-60.

Altındağ, R. (2000). Kayaçlarda Kırılma Tokluğu ve Diğer Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen-Mühendislik Dergisi*, cilt 2(2), ss. 39-47

Altındağ, R. (2008). Kazı Mekaniğinde Gevreklik ve Spesifik Enerji Arasındaki İlişkiler, *IX. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, İzmir

Altunbey, M. (1996). *Tuzbaşı-Kanatburun-Ayazpınar (Pertek/Tunceli) Yöresindeki Demir Cevherleşmelerinin Jeolojisi ve Kökeni*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Alzo'ubi, A.K., Martin, C.D., Cruden, D.M. (2010). Influence of Tensile Strength on Toppling Failure in Centrifuge Tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 47, ss. 974-982

Andreev, G.E. (1991a). A Review of the Brazilian Test for Rock Tensile Strength Determination. Part I: Calculation Formula, *Mining Science and Technology*, cilt 13(3), ss. 445–456

Andreev, G.E. (1991b). A Review of the Brazilian Test for Rock Tensile Strength Determination. Part II: Contact Conditions. *Mining Science and Technology*, cilt 13(3), ss. 457–465

Arıoğlu E., Tokgöz N. (1993). A Statistical Study on Relationships Between the Uniaxial Compressive and Tensile Strengths of Rocks. *Geosound*, cilt 23, ss. 17-25

ASTM. (2000). Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, USA

ASTM D2664. (2004). Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens without Pore Pressure Measurements. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D2936. (2008a). Standard test method for direct tensile strength of intact rock core specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D3967. (2008b). Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM C293/C293M. (2010a). Standard test method for flexural strength of concrete, Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA, USA

ASTM C78/C78M. (2010b). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading. West Conshohocken, PA, USA

Berrenbaum, R., Brodie, I., 1959. Measurement of The Tensile Strength of Brittle Materials. *British Journal of Applied Physics*, cilt 10, ss. 281–286

Bilgin, N., Demircin, M.A., Copur, H., Balcı, C., Tuncdemir, H., Akcın, N. (2006). Dominant Rock Properties Affecting the Performance of Conical Picks and the Comparison of Some Experimantal and Theoretical Results, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 43, ss.139- 156

Bingöl, F.A. (1984). Geology of the Elazığ Area in the Eastern Taurus Region, The *International Symposium on The Geology of The Taurus*, Ankara

Bobich, JK. (2005). *Experimental Analysis of the Extension to Shear Fracture Transition in Berea Sandstone,* MS Thesis Texas A&M University

Bozkaya, O, Yalçın, H. (1991). Hekimhan Doğu ve Güney Kesimlerindeki Kretase–Tersiyer Yaşlı Sedimenter Yaşlı Birimlerin Minerolojisi ve Jeokimyası, *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, cilt 6, ss. 234–252

Brace, W.F. (1964). *Brittle Fracture of Rocks, in State of Stress in the Earth's Crust*, American Elsevier, New York

Briševac, Z., Kujundžić, T., Čajić, S. (2015). Current Cognition of Rock Tensile Strength Testing By Brazilian Test, *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, cilt 30(2), ss. 101-114

Carneiro, F.L.L.B., 1943. A New Method To Determine The Tensile Strength of Concrete, *The 5th Meeting of the Brazilian Association for Technical Rules*, Sao Poulo

Chen, C.S., Hsu, S.C. (2001). Measurement of Indirect Tensile Strength of Anisotropic Rocks by the Ring Test, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, cilt 34(4), ss. 293-321

Colback, P.S.B. (1966). An Analysis of Brittle Fracture Initiation and Propagation in the Brazilian Test, *1st Congress. International Society Rock Mechanics*, Lisbon

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, Paris

Coviello, A., Lagioia, R., Nova, R. (2005). On the Measurement of the Tensile Strength of Soft Rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, cilt38 (4), ss. 251-273

Diederichs, M.S. (1999). *Instability of Hard Rock Masses: The Role of Tensile Damage and Relaxation*, Ph.D. Thesis, Universty of Waterloo

Diederichs, M.S, Kaiser, P.K. (1999). Tensile Strength and Abutment Relaxation as Failure Control Mechanics in Underground Excavations, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 36, ss. 69–96

Efe, T. (2019). *Kayaçların Çekme Dayanımlarının Doğrudan ve Dolaylı Yöntemlerle Belirlenmesine Yönelik Yeni Bir Yaklaşımın Geliştirilmesi,* Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Erarslan, N. (2017). Experimental and Numerical Studies on Tensile and Shear Fracturing of Brittle Materials, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,* cilt 32(2), ss. 173-181

Erarslan, N., Williams, D.J. (2011). Investigating the Effect of Cyclic Loading on The Indirect Tensile Strength of Rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, cilt 45(3), ss. 327-340

Ercan, T., Asutay, H.J. (1993). Malatya-ElazığTunceli-Bingöl-Diyarbakır Dolaylarındaki Neojen Kuvaterner Yaşlı Volkanitlerin Petrolojisi, A.*Suat Erk Jeoloji Sempozyumu*, Ankara

Fairhurst, C. (1961). Laboratory Measurement of Some Physical Properties of Rock, *4th Symposium of Rock Mechanics*, Pennsylvania

Fairhurst, C. (1964). On The Validity of The Brazilian Test for Brittle Materials, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences&Geomechanics Abstracts*, cilt 1, ss. 535–546

Fan, X., Lin, H., Cao, R. (2019). Bending Properties of Granite Beams with Various Section-Sizes in Three-Point Bending Tests, *Geotechnical and Geological Engineering*, cilt 37(1), ss. 1-11

Franklin, J.A., Dusseault, M.B. (1989). Rock engineering. McGraw-Hill, New York

Fuenkajorn, K., Klanphumeesri, S. (2011). Laboratory Determination of Direct Tensile Strength and Deformability of Intact Rocks, *Geotechnical Testing Journal,* cilt 34(1), ss. 97-102.

Gerçek, H., Özarslan, A. (2011). Kaya Malzemesinin Çekme Dayanımı Sınıflaması. *10. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Ankara

Gomez, J.T., Shukla, A., Sharma, A. (2001). Static and Dynamic Behavior of Concrete and Granite in Tension With Damage, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, cilt 36(1), ss. 37-49

Gorski, B. (1993). *Tensile Testing Apparatus,* United States Patent, 5193396.

Gorski, B., Conlon, B., Ljunggren, B. (2007). Forsmark Site investigation-Determination of the Direct and Indirect Tensile Strength on Cores from Borehole, SP Swedish National Testing and Research Institute Report, Stockholm

Griffith, A.A. (1924). Theory of rupture, *1st International Congress on Applied Mechanics*, Delft

Guo, H., Aziz, N.I., Schmidt, L.C. (1993). Rock Fracture-Toughness Determination by The Brazilian Test, *Engineering Geology,* cilt 33(3), ss. 177–188

Gürocak, Z., Kürüm, E.B. (2020). Elazığ Bölgesinin Kırmataş Potansiyeli ve Kullanım Alanları, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.* Cilt 10(4), ss. 1007-1026

Gürocak, Z. (1999). *Boztepe (Malatya) Barajı Eksen Yerindeki Kayaçların Jeomekanik Özelliklerinin ve Ayrışma Derecelerinin İncelenmesi,* Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Han, Z., Weatherley, D., Puscasu, R. (2017). A Relationship Between Tensile Strength and Loading Stress Governing the Onset of Mode I Crack Propagation Obtained via Numerical Investigations Using a Bonded Particle Model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, cilt 41, ss. 1979–1991

Han, Y., Lai, B., Liu, H.H., Li, H. (2018). Measurement of Elastic Properties in Brazilian Disc Test: Solution Derivation and Numerical Verification, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, cilt 4(1), ss. 63–77

Hawkes, I., Mellor, M. (1970). Uniaxial Testing in Rock Mechanics Laboratories. *Engineering Geology*, cilt 4, ss. 177-285

Hobbs, D.W. (1964). The Tensile Strength of Rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences&Geomechanics Abstracts,* cilt 1(3), ss. 385–396

Hobbs, D.W. (1965). An Assessment of a Technique For Determining the Tensile Strength of Rock, *British Journal of Applied Physics,* cilt 16(2), ss. 259–268

Hobbs, D.W. (1967). Rock Tensile Strength and Its Relationship to a Number of Alternative Measures of Rock Strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences&Geomechanics Abstracts,* cilt 4(1), ss. 115–127

Hoek, E. (1964). Fracture of Anisotropic Rock. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, cilt 64(10), ss. 501–518

Hoek, E., Brown, E.T. (1980). Emprical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, cilt 106, ss. 1013-1035

Hua, W., Dong, S., Fan, Y., Pan, X., Wang, Q. (2017). Investigation on the Correlation of Mode II Fracture Toughness of Sandstone with Tensile Strength, *Engineering Fracture Mechanics*, cilt 184, ss. 249–258

Hucka, V., Das, B. (1974). Brittleness Determination of Rocks by Different Methods, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences&Geomechanics Abstracts,* cilt 11(10), ss. 389-392

Hudson, J.A. (1969). Tensile Strength and The Ring Test, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences&Geomechanics Abstracts*, cilt 6, ss. 91–97

ISRM. (1975). Terminology (English, French, German), Lisbon

ISRM. (1978). Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials. International *Journal of Rock Mechanics, Mining Science&Geomechanics Abstracts*, cilt 15, ss. 99–103

ISRM. (2007). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, Ankara

Jaeger, J.C. (1967). Failure of Rocks Under Tensile Conditions, International *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences&Geomechanics Abstracts*, cilt 4(2), ss. 219–227

Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W. (2007). Fundamentals of Rock Mechanics (Fourth Edition). Wiley-Blackwell Publishing, New Jersey

Jaeger, J.C., Hoskins, E.R. (1966). Rock Failure under The Confined Brazilian Test, *Journal of Geophysical Research*, cilt 71, ss. 2651–2659

Jensen, S.S. (2016). Experimental Study of Direct Tensile Strength in Sedimentary Rocks, M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology

Jianbing, L., Zhancheng, X., Yingmei, Y., Miao, Y., Zhitao, Y. (2017). Study on Brazilian Splitting Test of Bedding Limestone Slope Deformation Failure, *Innovative Infrastructure Solutions*, cilt 2, ss. 16

Kahraman, S., Bilgin, N., Feridunoglu, C. (2003). Dominant Rock Properties Affecting The Penetration Rate of Percussive Drills, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 43, ss. 711-723

Karaoğlan, F. (2005). *Günedoğru-Beğre (Doğanşehir-Malatya) Arasında Yüzeyleyen Tektono-magmatik Birimlerin Petrografisi ve Jeokimyası*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Klanphumeesri, S. (2010). *Direct Tension Testing of Rock Specimens*, Master of Engineering Thesis, Suranaree University of Technology

Komurlu, E., Kesimal, A. (2015). Evaluation of Indirect Tensile Strength of Rocks Using Different Types of Jaws, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, cilt 48, ss. 1723–1730

Komurlu, E., Kesimal, A., Durmus Demir, A. (2017). Dog Bone Shaped Specimen Testing Method to Evaluate Tensile Strength of Rock Materials, *Geomechanics and Engineering*, cilt 12(6), ss. 883-898

Kourkoulis, S., Markides, C.F. (2014). Fracture Toughness Determined by the Centrally Cracked Brazilian-Disc Test: Some Critical Issues in the Light of an Alternative Analytic Solution. *Materials Performance and Characterization*, cilt 3, ss. 20130056

Kundu, J., Mahanta, B., Sarkar, K., Singh, T.N. (2017). The Effect of Lineation on Anisotropy in Dry and Saturated Himalayan Schistose Rock Under Brazilian Test Conditions, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, cilt 51(1), ss. 5–21

Lan, H., Junhui Chen, J., Macciotta, R. (2019). Universal Confined Tensile Strength of İntact Rock. *Nature*, cilt 9, ss. 1-9

Lanaro, F., Sato, T., Stephansson, O. (2009). Microcrack Modelling of Brazilian Tensile Tests With The Boundary Element Method, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 46(3), ss. 450–461

Li, D.Y, Wong, L.N.Y. (2013). The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, cilt 46, ss. 269-287

Li, D.Y., Wang T, Cheng TJ, Sun XL. (2016). Static and Dynamic Tensile Failure Characteristics of Rock Based on Splitting Test of Circular Ring, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, cilt 26(7), ss. 1912–1918

Li, X., Wu, Q.H., Tao, M., Weng, L., Dong, L.J., Zou, Y. (2016). Dynamic Brazilian Splitting Test of Ring-Shaped Specimens with Different Hole Diameters, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, cilt 49(10), ss. 4143–4151

Li, X., Feng, F., Li, D. (2018). Numerical Simulation of Rock Failure Under Static and Dynamic Loading by Splitting Test of Circular Ring, *Engineering Fracture Mechanics*, cilt 188, ss. 184-201

Liao, Z.Y., Zhu, J.B., Tan, C.A. (2019). Numerical Investigation of Rock Tensile Strength Determined by Directtension, Brazilian and Three-Point Bending Tests, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 115, ss. 21-32

Liu, J., Chen, L., Wang, C., Man, K., Wang, L., Wang, J., Su, R. (2014). Characterizing the Mechanical Tensile Behavior of Beishan Granite with Different Experimental Methods, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* cilt 69, ss. 50–58

Luong, M. P. (1986). Un Nouvel Essai Pour la Mesure de la Resistance a la Traction (A New Test For Tensile Strength Measurements), *Revue Française de Geotechnique,* cilt 34, ss. 69–74

Luong, M.P., (1988) Direct Tensile and Direct Shear Strengths of Fontainebleau Sandstone, *Key Question in Rock Mechanics: the 29th US Symposium*, University of Minnesota, Minneapolis

Luong, M.P. (1990). Tensile and Shear Strengths of Concrete and Rock, *Engineering Fracture Mechanics*, cilt 35(1,2,3), ss.127–135

Ma, Y., Huang, H. (2018). DEM Analysis of Failure Mechanisms in the Intact Brazilian Test, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* cilt 102, ss.109–119

Malik, A., Chakraborty, T., Rao, K.S., Kumar D. (2017). Experiments to Determine Static and Dynamic Tensile Strength of Deccan Trap Rocks, India, *Procedia Engineering*, cilt 191, ss. 946-953

Markides, C.F., Pazis, D.N., Kourkoulis, S.K. (2011). Influence of Friction on The Stress Field of The Brazilian Tensile Test, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, cilt 44(1), ss. 113–119

McClintock, F.A., Walsh, J.B. (1963). Friction on Griffith Cracks in Rocks under Pressure, *The American Society of Mechanical Engineers Scientific Research,* ss. 1015-1021

Mellor, M., Hawkes, I. (1971). Measurement of Tensile Strength by Diametral Compression of Discs and Annuli, *Engineering Geology*, cilt 5 (3), ss. 173–225

Minaeian, B., Ahangari, K. (2017). Prediction of The Uniaxial Compressive Strength and Brazilian Tensile Strength of Weak Conglomerate, *International Journal of Geo-Engineering*, cilt 12, ss. 8-19

Naz, H. (1979). Elazığ-Palu Dolayının Jeolojisi, TPAO raporu, Ankara

Nott, J.A. (2009). *Tensile Strength and Failure Criterion of Analog Lithophysal Rock*, Ph.D. Thesis, University of Nevada

Obert, L., Windes, S. L., Duvall, W. I. (1946). *Standardized Tests for Determining The Physical Properties of Mine Rock,* University of Michigan Library Publishing, Michigan

Önal, A., Altunbey, M. (1999). Dedeyazı-Çavuşlu (Doğanşehir-Malatya) Yöresindeki Skarn Oluşumları ve İlişkili Demir Cevherleşmeleri, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, cilt 42(1), ss.15-27

Örçen, S. (1986). Medik- Ebreme (KB Malatya) Dolayının Biyostratigrafisi ve Paleontolojisi, *MTA Dergisi*, cilt 18, ss.1-37

Özdoğan, M. 1986. Kayalarda Delme ve Patlatma, *Madencilik Dergisi,* cilt 25(3), ss. 7-15

Perras, M.A., Diederichs, M.S. (2014). A Review of The Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing, *Geotechnical and Geological Engineering*, cilt 32(2), ss. 525-546

Plangklang, J., Artkhonghan, K., Tepnarong, P., Fuenkajorn, K. (2017). Time-Dependent Tensile Strength of Maha Sarakham Salt, *Engineering Journal of Research and Development*, cilt 28(4), ss. 5-12

Ramsey, J.M., Chester, F.M. (2004). Hybrid Fracture and The Transition from Extension Fracture to Shear Fracture, *Nature*, cilt 428, ss.63–66

Sevimli, U.İ., Zorlu, K., Bağcı, U. (2017). Yazıhan (Malatya) Dolayının Neotektonik Özellikleri Volkaniklerin Petrografisi ve Jeokimyası, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 20(4), ss.143-157

Sevimli, U.İ. (2009). Yazıhan (Malatya) Batısının Tektono–Stratigrafisi, Doktora Tezi, Çukuroca Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

TS EN 12372. (2007). Doğal taşlar- Deney Metotları-Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Tufekci, K., Demirdag, S., Sengun, N., Altindag, R., Akbay, D. (2016). A New Design Test Apparatus for Determining Direct Tensile Strength of Rocks, *EUROCK 2016 Semposium of Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future*, Cappadocia/Turkey

Turan, M.,Bingöl, A.F. (1991). Kovancılar-Baskil (Elazığ) Arası Bölgenin Tektonostratigrafik Özellikleri, *Çukurova Üniversitesi Ahmet Acar Sempozyumu*, Adana

Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Binal, A. (2011). *Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri,* TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.

Ünlü, T., Yılmaz, Ö. (2014). Kaya Malzemelerinin Doğrudan Çekme Dayanımının Belirlenmesi için Geliştirilen Yeni Bir Deney Düzeneği, *11. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Afyonkarahisar

Vutukuri, V.S., Lama, R.D., Saluja, S.S. (1974). *Handbook on Mechanical Properties of Rock, Series on Rock and Soil Mechanics* 2(1), Trans Technical Publications, Ohio

Wang, J-J., Zhu, J-G., Chiu, C.F., Zhang, H. (2007). Experimental Study on Fracture Toughness and Tensile Strength of a Clay, *Engineering Geology*, cilt 94, ss. 65–75

Wang, Y., Li, C., Hu, Y., Mao, T. (2017). Brazilian Test for Tensile Failure of Anisotropic Shale under Different Strain Rates at Quasi-static Loading, *Energies*, cilt 10(9), ss. 1324

Wang, M., Cao, P. (2018). Experimental Study on the Validity and Rationality of Four Brazilian Disc Tests, *Geotechnical Geological Engineering*, cilt 36(1), ss. 63–76

Wei, M.D., Dai, F., Xu, N.W., Zhao, T. (2018). Experimental and Numerical Investigation of Cracked Chevron Notched Brazilian Disc Specimen For Fracture Toughness Testing of Rock, *Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures*, cilt 41, ss. 197–211

Whittaker, B.N., Singh, R.N., Sun, G. (1992). *Rock Fracture Mechanics-Principles, Design and Applications*, Elsevier Publishing, Amsterdam

Wu, C., Chen, X., Hong, Y., Xu, R., Yu, D. (2018). Experimental Investigation of The Tensile Behavior of Rock with Fully Grouted Bolts by The Direct Tensile Test, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, cilt 51, ss. 351–357

Yanagidani, T., Sano, O., Terada, M., Ito, I. (1978). The Observation of Cracks Propagating in Diametrically-Compressed Rock Discs, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences&Geomechanics Abstracts*, cilt 15(5), ss. 225–235

Yarali, O., Kahraman, S. (2011). The Drillability Assessment of Rocks Using The Different Brittleness Values, *Tunnelling and Underground Space Technology*, cilt 26, ss. 406-414

Ye, J., Wu, F.Q., Sun, J.Z. (2009). Estimation of The Tensile Elastic Modulus Using Brazilian Disc by Applying Diametrically Opposed Concentrated Loads, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 46(3), ss. 568–576

You, M.Q., Su, C.D. (2010). Study on Strength and Failure of Hollow Cylinders and Rings of Sandstone Under Compression-Tension Stresses, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, cilt 29(6), ss. 1096–1105

You, M.Q, Chen, X.L., Su, C.D. (2011). Brazilian splitting strengths of discs and rings of rocks in dry and saturated conditions, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, cilt 30(3), ss. 464–472

Yu, Y., Yin, J., Zhong, Z. (2006). Shape Effects in The Brazilian Tensile Strength Test and A 3D FEM Correction, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 43(4), ss. 623–627

Yu, Y., Zhang, J. (2009). A Modified Brazilian Disk Tension Test, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 46(2), ss. 421–425

Zeng, B., Huang, D., Ye, S.Q., Chen, F.Y., Zhu, T.T., Tu, Y.L. (2019). Triaxial Extension Tests on Sandstone Using A Simple Auxiliary Apparatus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 120, ss. 29–40

Zhang, Z.X., 2002. An Empirical Relation Between Mode I Fracture Toughness and The Tensile Strength of Rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* cilt 39, ss. 401–406

Zhang, Z.X., Kou, S.Q., Lindqvist, P.A., Yu, Y. (1998). *The Relationship Between The Fracture Toughness and Tensile Strength of Rock. Strength Theories: Application, Development and Prospects for 21st Century*, Science Press, Beijing

Zhang, S.W., Shou, K.J., Xian, X.F., Zhou, J.P., Liu G.J. (2017). Fractal Characteristics and Acoustic Emission of Anisotropic Shale in Brazilian Tests, *Tunnelling and Underground Space Technology*, cilt 71, ss. 298–308

Zhu, W.C., Tang, C.A., Huang, Z.P., Liu, J. (2004). A Numerical Study of The Effect of Loading Conditions on The Dynamic Failure of Rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 41(1), ss. 348-353

Zhu, W.C., Tang, C.A. (2006). Numerical Simulation of Brazilian Disk Rock Failure Under Static And Dynamic Loading, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt43(2), ss. 236–252

ÖZGEÇMİŞ

Fatih Mehmet DEMİRBAĞ

KİŞİSEL BİLGİLER

[redacted]

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı aleti, Çekme dayanımı aleti

AKADEMİK FAALİYETLER

Projeler:

1. MF.19.21. Zayıf Dayanımlı Kayalarda Doğrudan ve Dolaylı Çekme Dayanımları Arasındaki İlişkiler