

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAYAÇLARIN ÇEKME DAYANIMLARININ DOĞRUDAN VE
DOLAYLI YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR
YAKLAŞIMIN GELİŞTİRİLMESİ**

Tamer EFE

**Danışman
Prof. Dr. Servet DEMİRDAĞ**

**DOKTORA TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2019**



© 2019 [Tamer EFE]

TEZ ONAYI

Tamer EFE tarafından hazırlanan "Kayaçların Çekme Dayanımlarının Doğrudan ve Dolaylı Yöntemlerle Belirlenmesine Yönelik Yeni Bir Yaklaşımın Geliştirilmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Servet DEMİRDAĞ

Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Raşit ALTINDAĞ

Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mahmut MUTLUTÜRK

Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Konya Teknik Üniversitesi

Jüri Üyesi

Dr.Öğr. Üyesi Eren KÖMÜRLÜ

Giresun Üniversitesi

Enstitü Müdürü

Doç.Dr. Şule Sultan UĞUR

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Tamer EFE


İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kayaçlarda Çekme Dayanımı Belirleme Yöntemleri	2
1.1.1. Doğrudan yöntemler	2
1.1.2. Dolaylı yöntemler	6
1.2. Kaya Mekanîği Uygulamalarında ÇD'nın Önemi ve Kullanım Alanları	15
1.2.1. Yenilme ölçütlerinde kullanımı	15
1.2.2. Yeraltı açıklıklarının tasarımında kullanımı	17
1.2.3. Delme ve patlatma uygulamalarında kullanımı	17
1.2.4. Petrol ve doğal gaz üretiminde kullanımı	18
1.2.5. Kazı ve kırılma mekanîği uygulamalarında kullanımı	19
1.2.6. Kesme teorileri	20
1.2.7. Gevreklik indeksleri	21
1.2.8. Çekme dayanımının tahmin edildiği diğer mekanik özellikler	24
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı	25
2. KAYNAK ÖZETLERİ	28
2.1. Tek Eksenli Çekme Dayanımı İle İlgili Çalışmalar	28
2.2. Brezilya Dolaylı Çekme Dayanımı ile İlgili Çalışmalar	30
2.3. Diğer Dolaylı Yöntemler ile İlgili Çalışmalar ve Genel Değerlendirme	40
3. MATERYAL, YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	43
3.1. Materyaller	43
3.1.1. Tez kapsamında kullanılan kayaçlar	43
3.1.2. Deney cihazı	44
3.1.3. Yüksek hızlı çekim yapan kamera	46
3.2. Yöntem ve Deneysel Çalışmalar	47
3.2.1. Deney numunelerinin temini ve hazırlanması	48
3.2.2. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi	52
3.2.3. Mekanik özelliklerin belirlenmesi	53
3.2.4. Petrografik tanımlama ve kimyasal analiz	54
3.2.5. TEÇD deneyleri (dambıl numune)	55
3.2.6. Tek eksenli çekme dayanımı deneyinde Elastisite modülünün tayini	56
3.2.7. Brezilya dolaylı çekme dayanımı deneyi	58
3.2.8. Çatlak başlangıçlarının belirlenmesi	59
3.2.9. 3 Nokta eğilme dayanımı	60
3.2.10. 4 Nokta eğilme dayanımı	63
3.2.11. Nümerik analiz çalışmaları	65
3.2.12. İstatistiksel analiz çalışmaları	68
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	69
4.1. Kimyasal Analiz Sonuçları	69
4.2. Mineralojik ve Petrografik Analiz Sonuçları	70

4.3. Fiziksel ve Mekanik Özellikler.....	74
4.3.1. Yoğunluk, birim hacim ağırlık ve gözeneklilik deney sonuçları.....	74
4.3.2. Sismik hız deney sonuçları	75
4.3.3. Tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları	76
4.4. En Uygun Dambıl Şekilli Numune Geometrisinin Tasarımı	78
4.4.1. Tasarlanan modeller için sonlu elemanlar analizi	81
4.4.2. Tasarlanan modellerin TEÇD deney sonuçları	84
4.4.3. Belirlenen dambıl numune geometrisi için gerilme analizleri.....	88
4.4.4. Sürekli değişken kesitli numune geometrisinde gerilme ve elastisite modülü için düzeltme katsayısı	91
4.5. Tüm Kayaçlar İçin TEÇD Deney Sonuçları.....	92
4.6. Brezilya Dolaylı Çekme Dayanımı İçin Nümerik Analiz Çalışmaları	96
4.6.1. Brezilya diski için sonlu elemanlar analizleri	98
4.6.2. Sayısal sonuçlar.....	99
4.6.3. Sayısal analiz sonuçlarının analitik sonuçlarla karşılaştırılması	101
4.6.4. Elastisite modülü ve Poisson oranı değişiminin X eksen yönündeki çekme gerilmelerine etkisi	103
4.7. Brezilya Dolaylı Çekme Dayanımı Deney Sonuçları	105
4.8. Görüntü Kayıtlarının Analizi ve Çatlak Başlangıçlarının Belirlenmesi	106
4.9. Eğilme Dayanımı Deneyleri İçin Nümerik Analiz Çalışmaları	113
4.10. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları.....	121
4.11. TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçlarının karşılaştırılması.....	123
4.12. İstatistiksel Analizler.....	129
4.12.1. Brezilya dolaylı çekme dayanımı	131
4.12.2. 3 Nokta eğilme dayanımı.....	135
4.12.3. 4 Nokta eğilme dayanımı.....	142
4.12.4. Düzeltme katsayıları.....	148
4.12.5. Çoklu doğrusal regresyon analizi.....	152
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	161
KAYNAKLAR.....	166
ÖZGEÇMİŞ	179

ÖZET

Doktora Tezi

KAYAÇLARIN ÇEKME DAYANIMLARININ DOĞRUDAN VE DOLAYLI YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIMIN GELİŞTİRİLMESİ

Tamer EFE

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Servet DEMİRDAĞ

Kaya malzemesinin çekme dayanımı (ÇD), doğrudan (direkt) ve dolaylı (indirekt) yöntemler kullanılarak belirlenmektedir. Genelde doğrudan yöntemler hem zaman alıcı, hem de daha maliyetlidir. Dolaylı yöntemlerin yaygın kullanılanları ise daha basit, ucuz ve uygulaması kolay olduğundan tercih edilmektedir. Ancak yapılan birçok çalışmada, dolaylı yöntemlerden elde edilen sonuçların gerçek ÇD'nı temsil etmediği belirtilmektedir.

Bu tez çalışmasında kayaçların ÇD değerlerinin doğru bir biçimde belirlenebilmesine imkân sağlayacak yeni bir yaklaşımın geliştirilmesi amacıyla bir dizi deneysel, nümerik ve istatistiksel analiz çalışması yürütülmüştür. Bu kapsamda sedimanter (kireçtaşı, killi kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı), metamorfik (ince ve iri kristalli mermer) ve magmatik (tuf, andezit, granit, diyabaz) kökenli 9 farklı kayaç türü üzerinde öncelikle temel fiziksel ve mekanik özellikler belirlenmiştir. Ardından ilk olarak kayaçların tek eksenli ÇD (doğrudan yöntem) değerini belirleyebilmek için 3 farklı dambıl (dog bone) şekilli numune geometrisi tasarımı yapılmıştır. Tasarımlara uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde nümerik (gerilme analizleri) ve deneysel çalışmalar yürütülerek ve en uygun geometri tespit edilmiştir. Belirlenen geometriye göre her kayaç türünden numuneler hazırlanarak doğrudan ÇD değerleri belirlenmiştir.

Daha sonra aynı kaya bloğundan elde edilmiş olan diğer numuneler üzerinde yaygın kullanılan dolaylı yöntemlerden Brezilya ÇD (3 farklı boy/çap oranında: 0,50; 0,75; 1,00), 3 nokta eğilme dayanımı (3 farklı standarda göre) ve 4 nokta eğilme dayanımı (3 farklı standarda göre) deneyleri yapılmıştır. Tüm deneylerde aynı cihaz kullanılarak cihaz kaynaklı hataların önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Brezilya deneyleri sırasında yüksek hızlı çekim yapan kamera ile çatlak başlangıçlarının nerede olduğu belirlenmiştir. Elde edilen tüm bulgular üzerinde bir dizi istatistiksel analiz çalışması yürütülmüştür.

Deneysel ve nümerik analiz çalışmaları sonuçlarına göre hiçbir dolaylı yöntemin, kayaçlarda tek eksenli ÇD'nı temsil etmediği görülmüştür.

Kayaçların tek eksenli $\text{ÇD}'$ nı belirleyebilmek için yeni bir numune geometrisi önerilmiştir. Brezilya deneylerinde çatlağın genellikle numune eksenine boyunca ve merkezine yakın bir bölgede başladığı tespit edilmiştir. Brezilya deneyinde boy/çap oranının deney sonucu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Kayaçların tek eksenli ÇD değerlerinin dolaylı yöntemlerden tahmin edilebilmesi için yeni düzeltme katsayıları önerilmiştir. Tüm kayaçlarda kullanılacak katsayılar $0,50\sigma_{t\text{Brez}}$, $0,33\sigma_{3\text{Neğ}}$, $0,40\sigma_{4\text{Neğ}}$ olarak bulunmuştur. Ayrıca çoklu doğrusal regresyon analizleri ile dolaylı yöntemler içerisinde $\text{ÇD}'$ nı en iyi tahmin eden ve P dalga hızı değerlerini içeren yeni istatistiksel modeller önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tek eksenli çekme dayanımı, dambıl numune, Brezilya deneyi, 3 ve 4 nokta eğilme dayanımı, nümerik analiz.

2019, 180 sayfa



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DEVELOPMENT OF A NEW APPROACH FOR DETERMINING THE TENSILE STRENGTH OF ROCKS BY DIRECT AND INDIRECT TEST METHODS

Tamer EFE

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mining Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Servet DEMİRDAĞ

The tensile strength (TS) of rock material is determined by two different test methods, direct and indirect. In general, direct methods are both time consuming and more costly. Widely used indirect methods are preferred because they are simpler, cheaper and easy to implement. However, in many studies, it is stated that the results obtained from the indirect methods do not represent the uniaxial tensile strength.

In this thesis, a number of numerical, experimental and statistical analysis studies were conducted in order to develop a new approach that would allow the accurate determination of the tensile strength values of the rocks. In this context, primarily, basic physical and mechanical properties were determined on 9 different rock types with sedimentary (limestone, argillaceous limestone (lymra) and dolomitic limestone), metamorphic (fine crystalline and holocrystalline marble) and magmatic (tuff, andesite, granite and diabase) origin. Then 3 different dumbbell-shaped specimen geometries were designed to determine the uniaxial tensile strength (direct method) values of the rocks. The most appropriate geometry was determined by carrying out numerical (stress analysis) and experimental studies on the samples prepared in accordance with the designs. According to the determined geometry, specimens of each rock type were prepared and uniaxial tensile strength values were determined.

Then Brazilian TS (3 different thickness/diameter ratio: 0,50; 0,75; 1,00), 3 point bending strength (3 different standards) and 4 point bending strength (3 different standards) tests which are commonly used indirect methods were carried out on the samples obtained from the same rock block. The same test machine was used in all experiments in order to prevent errors caused by the machine. During the Brazilian splitting tests, high-speed shooting camera was used to determine crack initiation region. A series of statistical analysis studies were carried out on all findings.

According to the results of experimental and numerical analysis studies, it was observed that none of indirect methods represent the uniaxial tensile strength

of the rocks. A new specimen geometry has been proposed to determine the direct TS of the rocks. In Brazilian tests, it was found that the crack usually starts along the specimen axis and in a region close to its center. In order to estimate the uniaxial TS values of the rocks from indirect methods, new correction coefficients have been proposed. The coefficients which can be used in all rock types were found to be $0,50\sigma_{tBrez}$, $0,33\sigma_{3PB}$, $0,40\sigma_{4PB}$. In addition, statistical models (which are best predictive of TS) including P wave velocity values are proposed by multiple linear regression analysis.

Keywords: Uniaxial tensile strength, dumbbell specimen, Brazilian test, 3 and 4 point bending strength test, numerical analysis.

2019, 180 pages



TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan, tezimin tüm deneysel süreçlerinde bir fiil benimle birlikte çalışan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Servet DEMİRDAĞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi ve yorumlanması aşamalarında desteklerini esirgemeyen değerli Hocam Doç. Dr. Nazmi ŞENGÜN'e ve Tez İzleme Komitesinde yer alan hocalarım Prof. Dr. Raşit ALTINDAĞ'a ve Prof. Dr. Mahmut MUTLUTÜRK'e sunmuş oldukları katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Nümerik ve istatistiksel analiz çalışmalarında bilgi ve tecrübesi ile sağlamış olduğu katkılardan ve emeklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Kenan TÜFEKÇİ'ye teşekkür ederim.

Minerolojik ve petrografik analiz çalışmalarında sağlamış olduğu katkılardan ve emeklerinden dolayı Doç. Dr. Kamil YILMAZ'a teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 116M724 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a ve Süleyman Demirel Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederim.

Deney numunelerinin temini ve hazırlanması aşamalarında vermiş oldukları desteklerden ötürü Metamar A.Ş., Granitaş, İSTEM A.Ş., Alimoğlu Mermer, Yasemen Mermer ve Demirtaş Mermer firmalarına teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında her türlü kolaylık ve çalışma ortamı sağlayan Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Ata Utku AKÇİL'a ve bölüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Tezin incelenmesine ve değerlendirilmesine katkı sağlayan değerli jüri üyelerine teşekkür ederim.

Akademik çalışma hayatım her aşamasında benim yanımda olan ve karşılaştığım sıkıntıları aşmamda desteğini hiç esirgemeyen başta eşim Seda EFE olmak üzere tüm aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Tamer EFE
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Geleneksel doğrudan çekme deney yöntemleri.....	3
Şekil 1.2. Doğrudan ÇD deneyi için farklı kavrama tipleri	5
Şekil 1.3. Dambıl şekilli numuneler için alternatif bir doğrudan çekme deney düzenegi.....	5
Şekil 1.4. Silindir geometrideki numuneler için alternatif bir doğrudan çekme deney düzenegi.....	6
Şekil 1.5. Brezilya dolaylı çekme dayanımı deneyi	8
Şekil 1.6. BÇD deneyi için tipik yükleme levhaları.....	9
Şekil 1.7. Eğilme deneylerinin şematik gösterimi.....	11
Şekil 1.8. TS EN standartlarına göre eğilme deneylerinin şematik gösterimi	12
Şekil 1.9. ASTM standartlarına göre eğilme deneylerinin şematik gösterimi	13
Şekil 1.10. Loung deneyinde kaya örneği ve yükleme şekli.....	14
Şekil 1.11. Halka deneyi için hazırlanmış numune örnekleri	15
Şekil 1.12. Kiriş etkisiyle kayacın bükülerek kırılmasının şematik gösterimi.....	18
Şekil 1.13. Kaya gazının üretim şeması örneği.....	19
Şekil 2.1. TEÇD ile alternatif dolaylı test yöntemlerinin karşılaştırılması.....	41
Şekil 3.1. Kayaçların temin edildiği bölgeleri gösteren yer bulduru haritası	44
Şekil 3.2. Elektromekanik üniversal test cihazı ve aparatları.....	45
Şekil 3.3. Yüksek hızlı çekim yapan kamera.....	46
Şekil 3.4. Tez çalışmasının akım şeması.....	47
Şekil 3.5. Numune hazırlama çalışmalarına ait görüntüler	49
Şekil 3.6. Karot alma ve düzeltme çalışmalarından görüntüler.....	50
Şekil 3.7. Dambıl şekilli numunelerin tornada hazırlanması.....	51
Şekil 3.8. Hazırlanan dambıl şekilli numuneler	52
Şekil 3.9. Fiziksel özelliklerin belirlenmesine ait bazı fotoğraflar	53
Şekil 3.10. Sismik hız ölçümlerine ait görüntüler	53
Şekil 3.11. TEBD ve Birim deformasyon deneylerine ait görüntüler.....	54
Şekil 3.12. Deneylerde kullanılan çekme çenesi ve numuneye montajı	55
Şekil 3.13. TEÇD (dambıl) deneylerine ait bazı görüntüler	56
Şekil 3.14. Ekstensometrenin genel görünümü ve numuneye montajı	57
Şekil 3.15. Çekme yönünde oluşan eksenel birim deformasyon-çekme gerilmesi eğrisinden elastisite modülü değerinin hesaplanması	57
Şekil 3.16. BÇD deneyleri için numune boyutları.....	58
Şekil 3.17. Brezilya deneyinde örnek bir yük zaman grafiği.....	59
Şekil 3.18. BÇD deney numuneleri ve deneysel kurulum	60
Şekil 3.19. 3NED deneyleri a) TS EN 12372 (50x50x300mm) b) TS EN 12372 (25x50x150mm) c) ASTM C 99.....	62
Şekil 3.20. 3NED deneylerine ait örnek fotoğraflar	62
Şekil 3.21. 4NED deneyleri a) TS EN 13161 (50x50x300mm) b) TS EN 13161 (25x50x150mm) c) ASTM 880-98	64
Şekil 3.22. 4NED deneylerine ait örnek fotoğraflar	64
Şekil 4.1. Gerilme-birim deformasyon grafikleri (K, KK, DK, İNM, İRM, T)	77

Şekil 4.2. Gerilme-birim deformasyon grafikleri (A, G, D)	78
Şekil 4.3. Dambıl numune tasarımları	80
Şekil 4.4. Kesit geçiş yerlerindeki radyus.....	81
Şekil 4.5. Tasarımların mesh yapıları.....	81
Şekil 4.6. Kuvvet uygulama ve mesnetleme durumu.	82
Şekil 4.7. Numunelerde oluşan dış/iç yüzey maksimum asal gerilmeler	83
Şekil 4.8. Tasarımlara uygun olarak Killi Kireçtaşı'ndan hazırlanan numuneler	84
Şekil 4.9. TEÇD deneylerine ait görüntüler	85
Şekil 4.10. İnce Kristalli mermer numunelerine ait ÇD deney görüntüleri	87
Şekil 4.11. Sürekli değişken kesitli geometri için orta kısım yatay hat boyunca (A-B) asal gerilme dağılımı	88
Şekil 4.12. Sürekli değişken kesitli geometri için dış kısım dikey hat boyunca (C-D) asal gerilme dağılımı	89
Şekil 4.13. Elastisite modülünün gerilme dağılımına etkisi a) A-B hattı, b) C-D hattı...	90
Şekil 4.14. Poisson oranının gerilme dağılımına etkisi a) A-B hattı, b) C-D hattı	90
Şekil 4.15. Sürekli değişken kesitli numune geometrisi.....	91
Şekil 4.16. Hazırlanan TEÇD deney numunelerinden görüntüler.....	93
Şekil 4.17. TEÇD deneylerine ait görüntüler	94
Şekil 4.18. TEÇD deneyleri sonrası numunelerin kırılma durumları	95
Şekil 4.19. Hondros (1959) denklemi için numunedeki yükleme durumu.	96
Şekil 4.20. a) Sonlu elemanlar ağ yapısı b) Yükleme ve mesnetleme durumu	98
Şekil 4.21. Brezilya disk numunesinde gerilme dağılımı	100
Şekil 4.22. Yatay hat boyunca gerilme dağılımı	100
Şekil 4.23. Dikey Hat boyunca gerilme dağılımı.....	101
Şekil 4.24. Kritik dikey hat boyunca oluşan X eksen yönündeki gerilmeler	102
Şekil 4.25. Kritik dikey hat boyunca oluşan Y eksen yönündeki gerilmeler	102
Şekil 4.26. Gerilme dağılımının elastisite modülü ile değişimi	103
Şekil 4.27. Gerilme dağılımının Poisson oranı ile değişimi	104
Şekil 4.28. Gerilme dağılımının t/D oranı ile değişimi	104
Şekil 4.29. Brezilya dolaylı çekme dayanımı deneylerine ait görüntüler	106
Şekil 4.30. Brezilya deney düzeneği ve hızlı çekim yapan kamera ile çatlak başlangıcının belirlenmesi	107
Şekil 4.31. Kireçtaşı numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri	108
Şekil 4.32. Killi kireçtaşı numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri	109
Şekil 4.33. Dolomitik kireçtaşı numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri	109
Şekil 4.34. İnce kristalli mermer numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri	110
Şekil 4.35. İri kristalli mermer numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri	110
Şekil 4.36. Tüf numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri	111
Şekil 4.37. Andezit numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri.....	111
Şekil 4.38. Granit numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri	112
Şekil 4.39. Diyabaz numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri	112
Şekil 4.40. EN 12372_50x50x300 mm a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı.....	116
Şekil 4.41. EN 12372_25x50x150 mm a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı.....	116

Şekil 4.42. ASTM C99 a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı	116
Şekil 4.43. EN 13161_50x50x300 mm a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı.....	117
Şekil 4.44. EN 13161_25x50x150 mm a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı.....	117
Şekil 4.45. ASTM C880 a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı	117
Şekil 4.46. 3NED deneylerinde numunelerin alt kenarı boyunca gerilme dağılımları	119
Şekil 4.47. 4NED deneylerinde numunelerin alt kenarı boyunca gerilme dağılımları	120
Şekil 4.48. 3 ve 4 nokta eğilme dayanımı deneylerine ait örnek görüntüler	121
Şekil 4.49. Kireçtaşı numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları.....	123
Şekil 4.50. Killi Kireçtaşı numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları	124
Şekil 4.51. Dolomitik Kireçtaşı numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları.....	124
Şekil 4.52. İnce Kristalli Mermer numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları.....	124
Şekil 4.53. İri Kristalli Mermer numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları.....	125
Şekil 4.54. Tüf numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları.....	125
Şekil 4.55. Andezit numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları.....	125
Şekil 4.56. Granit numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları	126
Şekil 4.57. Diyabaz numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları	126
Şekil 4.58. Literatürdeki veriler ile tez çalışmasının sonuçlarının karşılaştırılması..	128
Şekil 4.59. Basma dayanımının çekme dayanımına oranları	129
Şekil 4.60. Brezilya deneyleri için ortalama ve standart sapma değerleri	132
Şekil 4.61. TEÇD ve BÇD için doğrusal regresyon grafikleri	133
Şekil 4.62. BÇD, TEÇD ve d-BÇD ortalamalar ve standart sapmaları.....	135
Şekil 4.63. 3NED deneylerine ait ortalamalar ve standart sapmalar.....	136
Şekil 4.64. 3NED deneyleri için regresyon eğrileri ve katsayıları.....	137
Şekil 4.65. 3N_EN_50, TEÇD ve d-3N_EN_50 için ortalamalar ve standart sapmalar .	138
Şekil 4.66. 3N_EN_25, TEÇD ve d-3N_EN_25 için ortalamalar ve standart sapmalar .	139
Şekil 4.67. 3N_ASTM, TEÇD ve d-3N_ASTM için ortalamalar ve standart sapmalar ..	140
Şekil 4.68. 4NED deneylerine ait ortalamalar ve standart sapmalar.....	142
Şekil 4.69. 4NED deneyleri için regresyon eğrileri ve katsayıları.....	143
Şekil 4.70. 4N_EN_50, TEÇD ve d-4N_EN_50 için ortalamalar ve standart sapmalar .	144
Şekil 4.71. 4N_EN_25, TEÇD ve d-4N_EN_25 için ortalamalar ve standart sapmalar .	145
Şekil 4.72. 4N_ASTM, TEÇD ve d-4N_ASTM için ortalamalar ve standart sapmalar ..	146
Şekil 4.73. TEÇD ile dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişki (BÇD)	150
Şekil 4.74. TEÇD ile dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişki (3NED)	151
Şekil 4.75. TEÇD ile dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişki (4NED)	152
Şekil 4.76. Çoklu doğrusal regresyon modeli için normal olasılık grafiği (BÇD).....	155
Şekil 4.77. TEÇD ve Dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişkiler (BÇD).....	155
Şekil 4.78. Çoklu doğrusal regresyon modeli için normal olasılık grafiği (3NED)	157
Şekil 4.79. TEÇD ve Dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişkiler (3NED)	157
Şekil 4.80. Çoklu doğrusal regresyon modeli için normal olasılık grafiği (4NED)	159
Şekil 4.81. TEÇD ve Dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişkiler (4NED)	159

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Gevreklik için laboratuvar verileri.....	23
Çizelge 2.1. TEÇD ve BÇD deney sonuçlarının karşılaştırılması	39
Çizelge 3.1. Tezde kullanılan kayaçlar.....	43
Çizelge 3.2. Tezde kullanılan numune boyutları ve sayıları.....	48
Çizelge 3.3. Eleman / düğüm sayıları ve mesh kalitesi değerleri	66
Çizelge 3.4. Aspect oranı değerleri	67
Çizelge 3.5. Jakobian oranı değerleri.....	67
Çizelge 3.6. Skewness değerleri	68
Çizelge 4.1. Kimyasal Analiz Sonuçları	70
Çizelge 4.2. Mineralojik ve Petrografik Analiz Sonuçları	70
Çizelge 4.3. Kayaçların bazı fiziksel özellikleri.....	75
Çizelge 4.4. P-dalga hızı ölçüm sonuçları	76
Çizelge 4.5. TEBD deney sonuçları ve Elastik özellikler	76
Çizelge 4.6. 3 farklı tasarıma ait TEÇD deneysel çalışma sonuçları.....	85
Çizelge 4.7. Model 2 ve Model 3 için tekrarlanan ÇD deney sonuçları	87
Çizelge 4.8. TEÇD deney sonuçları	95
Çizelge 4.9. Brezilya dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.....	105
Çizelge 4.10. Analizlerde standart numunelere uygulanan yükler ve ağ yapıları	114
Çizelge 4.11. Eğilme dayanımı deneyleri için özet tablo.....	121
Çizelge 4.12. 3 Nokta Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları	122
Çizelge 4.13. 4 Nokta Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları	122
Çizelge 4.14. Tek eksenli ve dolaylı ÇD dayanımı sonuçları	128
Çizelge 4.15. Farklı t/D oranlarında yapılan Brezilya deney sonuçları için tek yönlü Anova tablosu.....	132
Çizelge 4.16. BÇD/TEÇD ve TEÇD/d-BÇD değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve (F) değerleri	134
Çizelge 4.17. 3NED deney sonuçları için tek yönlü Anova tablosu.....	136
Çizelge 4.18. 3N_EN_50/TEÇD ve TEÇD/d-3N_EN_50 değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri.....	141
Çizelge 4.19. 3N_EN_25/TEÇD ve TEÇD/d-3N_EN_25 değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri.....	141
Çizelge 4.20. 3N_ASTM/TEÇD ve TEÇD/d-3N_ASTM değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri.....	141
Çizelge 4.21. 4NED deney sonuçları için tek yönlü Anova tablosu.....	142
Çizelge 4.22. 4N_EN_50/TEÇD ve TEÇD/d-4N_EN_50 değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri.....	147
Çizelge 4.23. 4N_EN_25/TEÇD ve TEÇD/d-4N_EN_25 değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri.....	147
Çizelge 4.24. 4N_ASTM/TEÇD ve TEÇD/d-4N_ASTM değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri.....	148
Çizelge 4.25. Dolaylı çekme dayanımı yöntemleri için önerilen düzeltme katsayıları.....	149

Çizelge 4.26. Çoklu doğrusal regresyon analizinde kullanılan veriler (BÇD)	154
Çizelge 4.27. Varyans analizi tablosu (BÇD)	154
Çizelge 4.28. Çoklu doğrusal regresyon analizinde kullanılan veriler (3NED)	156
Çizelge 4.29. Varyans analizi tablosu (3NED)	156
Çizelge 4.30. Çoklu doğrusal regresyon analizinde kullanılan veriler (3NED)	158
Çizelge 4.31. Varyans analizi tablosu (4NED)	158



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	Amerikan Malzeme ve Test Birliği
ASE	Ağırlıkça su emme
BÇD	Brezilya dolaylı çekme dayanımı
ÇD	Çekme dayanımı
DK	Değişim katsayısı
GP	Görünür gözeneklilik
EN	Avrupa Normları
HSE	Hacimce su emme
ISRM	International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (Uluslararası Kaya Mekaniği ve Kaya Mühendisliği Topluluğu)
KBHA	Kuru birim hacim ağırlık
SS	Standart sapma
TEBD	Tek eksenli basınç dayanımı
TEÇD	Tek eksenli çekme dayanımı
TS	Türk Standartları
3NED	3 nokta eğilme dayanımı
4NED	4 nokta eğilme dayanımı
A	Kesit alanı
b	Genişlik
BI	Gevreklik indeksi
BPI	Disk makaslama dayanımı
BPI _c	Düzeltilmiş disk makaslama dayanımı
D	Çap
d	Kesme derinliği
d ₀	Yoğunluk
E	Elastisite modülü
E _t	Tanjant elastisite modülü
F	Kuvvet
F'C	Maksimum kesme kuvveti
h	Kalınlık
I _{s(50)}	Nokta yük dayanım indeksi
k	Düzeltilme katsayısı
K _f	Halka deneyinde gerilme yoğunluğu faktörü
KIC	Kırılma tokluğu
L	Uzunluk
l	Eğilme deneyinde alt mesnetler arası açıklık
M _e	Maksimum eğilme gerilmesi
m _i	Hoek-Brown parametresi
P	Hondros denklemlerinde uygulanan yük
PR	Delme hızı
R	Dambıl numunede değişken kesitin eğrilik yarıçapı
R	Hondros denklemlerinde numune yarıçapını
R	Halka deneyinde disk yarıçapı
r	Hondros denklemde gerilmesi hesaplanan noktanın orijine uzaklığını
r _i	Dambıl numunede orta bölgenin yarıçapı
SE _{opt}	Özgül kesme enerjisi
t	Brezilya deney numunesinin kalınlığı

V_p	P dalga hızı
W_e	Mukavemet momentini
w	Keski genişliği
X	İstatiksel analizlerde bağımsız değişkenin değeri
Y	İstatiksel analizlerde bağımlı değişkenin değeri
σ_t	Tek eksenli çekme dayanımı
σ_c	Tek eksenli basınç dayanımı
σ_{tBrez}	Brezilya çekme dayanımı
$\sigma_{3Neğ}$	3 nokta eğilme dayanımı
$\sigma_{4Neğ}$	4 nokta eğilme dayanımı
σ_θ	Brezilya diskinde yatay çap boyunca oluşan teğetsel gerilme
σ_r	Brezilya diskinde dikey çap boyunca oluşan radyal gerilme
σ_1	Asal gerilme
σ_3	Asal gerilme
ν	Poisson oranı
φ	İçsel sürtünme açısı
τ	Kesme gerilmesi
ϵ_a	Eksenel birim deformasyon
ϵ_d	Çapsal birim deformasyon
α	Hondros denkleminde yükün uyg.'dığı varsayılan yay açısının yarısını
α	Kesme açısı
θ	Dambıl numunede x konumuna göre yayın açısı
θ	Hondros denklemlerinde r yarıçapının pozitif x eksenini ile yaptığı açıyı
β_0	Regresyon doğrusunun kesişim değeri
β_1	Bağımsız değişkende 1 birimlik değişime karşılık bağımlı değişkende meydana gelecek değişim
Σ_{por}	Toplam gözeneklilik
ΔL	Dambıl numunede toplam uzama
Δr	Dambıl numunede x konumundaki yarıçap farkı

1. GİRİŞ

Kayaçların malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve buna bağlı olarak sınıflandırılması; maden ve inşaat kazılarının tasarımı, yeraltı açıklıklarının duraylılığı/boyutlandırılması, üretim yöntemi seçimi, tahkimat tasarımı, kazı ekipmanı seçimi, patlatma geometrisinin tasarımı ve şev stabilitesi gibi birçok alanda mühendislik çalışmaları için ihtiyaç duyulan en önemli konuların başında gelmektedir (Yenice, 2002). Kaya kütleleri içerisinde oluşan çekme, basma ve kayma gerilmeleri ve bu gerilmelerin birbirleriyle olan etkileşimleri, birçok farklı türde duraysızlık problemlerine yol açarak kaya kütlelerinin yenilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, sağlam kaya malzemesinin ve/veya kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımlarının (TEBD) ve tek eksenli çekme dayanımlarının (TEÇD) belirlenmesi duraylılık ve güvenlik açısından da oldukça önemli hale gelmektedir (Ünlü ve Yılmaz, 2014).

Aynı doğrultuda birbirlerinden uzaklaşan zıt yönlerdeki kuvvetlerin oluşturduğu gerilmeye çekme gerilmesi denilmektedir. Çekme gerilmesi kayaçların boylarında uzamaya, enlerinde ise daralmaya neden olmaktadır. Her iki uçundan çekilen bir numunenin yenildiği andaki gerilme değeri “Çekme ya da Çekilme Dayanımı” (ÇD) olarak tanımlanmaktadır. Kayaçların mekanik özelliklerinden birisi olan ÇD, bir kayacın yenilmeden dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesidir (ISRM, 1975). Diğer malzemelerde olduğunun aksine çekme dayanımının basınç dayanımına oranı intakt kayada çok daha düşük olduğundan daha dikkatli ölçülmesi gerekmektedir (Diederichs, 1999).

Kaya malzemesinin ÇD, birçok kaya mühendisliği uygulamasında önceden bilinmesi gerekli olan önemli bir tasarım parametresi olmasına rağmen yakın bir geçmişe kadar basınç dayanımına nazaran daha az araştırılmış bir mekanik özelliktir (Perras ve Diederichs, 2014). Farklı mühendislik malzemeleri için geçerli olmasa da kayaçlar için ÇD en küçük dayanım özelliğidir. Basınç dayanımı değerleri benzer özellik gösteren bazı kayaçların ÇD değerleri arasında ciddi farklılıklar olduğu geçmişte yapılmış çalışmalarda rapor

edilmiştir. Bu nedenle de ölçülmesi ve tasarımlarda kullanılması konusunda çok daha hassas davranılması gerekmektedir.

1.1. Kayaçlarda Çekme Dayanımı Belirleme Yöntemleri

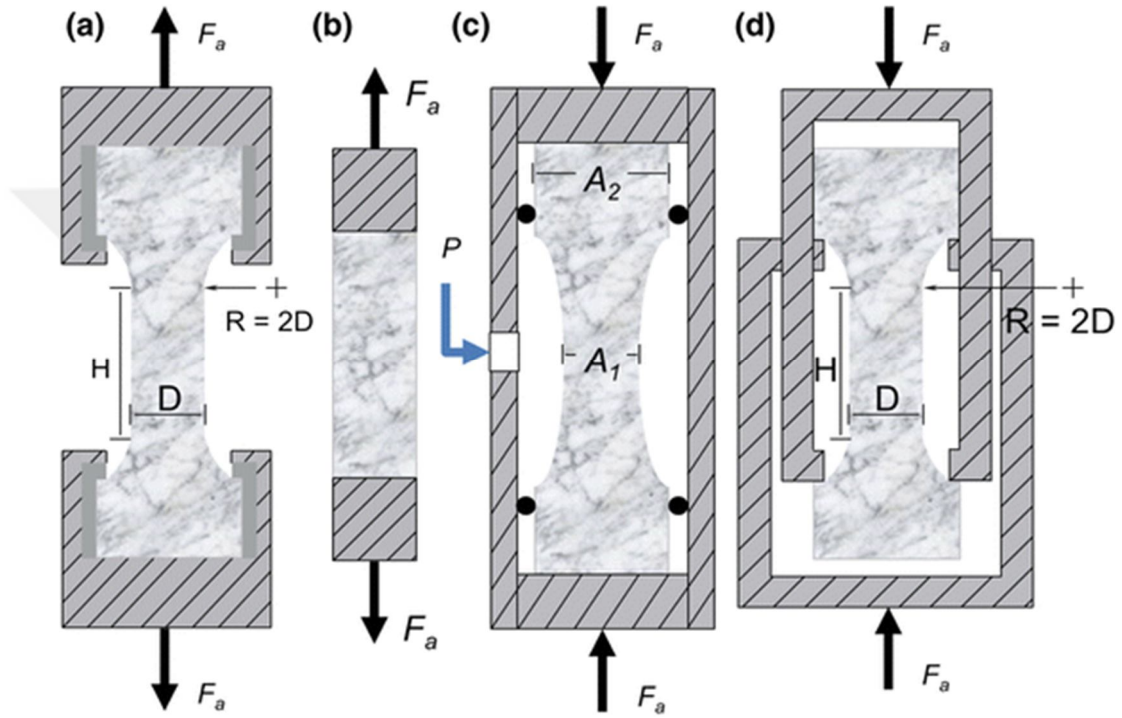
Kaya malzemesinde ÇD'nın belirlenmesine yönelik farklı deney yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler bazı araştırmacılara göre yaygın kullanılanlar ve yaygın kullanılmayanlar olarak ayrılrsa da bu tez kapsamında doğrudan (direkt) ve dolaylı (indirekt) yöntemler olarak açıklanmaya çalışılmıştır. Genelde doğrudan yöntemler, deney numunesi hazırlanması ve deneyin uygulanışı bakımından hem zaman alıcı, hem de maliyetlidir. Ayrıca doğrudan yöntemlerle yapılan deneylerde başarı oranı düşüktür. Dolaylı yöntemler (yaygın olarak kullanılanlar) ise daha basit, ucuz ve uygulanması kolaydır. Ayrıca az miktarda deney numunesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle de dolaylı yöntemler tüm Dünya'da doğrudan yöntemlere göre daha çok tercih edilmektedir. Fakat dolaylı yöntemlerden elde edilen sonuçların TEÇD'nı temsil edip etmediği bilim dünyası tarafından halen tartışılan bir konudur.

1.1.1. Doğrudan yöntemler

Doğrudan yöntemler; deney numunesinin şekline, kavrama mekanizmasına ve deneyin uygulanışına göre farklı türleri olan TEÇD deneyleridir. Şekil 1.1'de farklı araştırmacılar tarafından önerilmiş olan doğrudan çekme deney düzenekleri verilmiştir. Şekil 1.1(b)'de yer alan yöntemde deney; herhangi bir çatlak içermeyen, alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel, çapı 54 mm'den büyük ve boy/çap oranı 2,5-3,0 olan düzgün karot numuneleri üzerinde uygulanmaktadır. Deneyi yapılacak numunenin alt ve üst yüzeylerine, çapı numuneyle aynı olan diskler çimento veya epoksi bağlayıcı ile yapıştırılmaktadır. Bu diskler yardımıyla hidrolik prese bağlanan numuneye çekme kuvveti uygulanmakta ve numune 5 dakika içerisinde yenilecek şekilde veya yükleme hızı saniyede 5-10 kgf/cm² olacak şekilde ayarlanmaktadır. Numunenin TEÇD değeri (σ_t), yenilme yükünün (F), yük uygulanan numunenin yüzey alanına (A) bölünmesiyle hesaplanmaktadır (Eşitlik 1.1). Silindirik kaya

malzemesinin (Şekil 1.1(b)'dekine benzer) doğrudan ÇD'nı belirlemek için ASTM (Amerikan Malzeme ve Test Birliği) D 2936-08 standardı önerilmiştir. Ayrıca bu yöntem önemli eksikliklerine rağmen kabul görmüş olan TEÇD deneyidir.

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

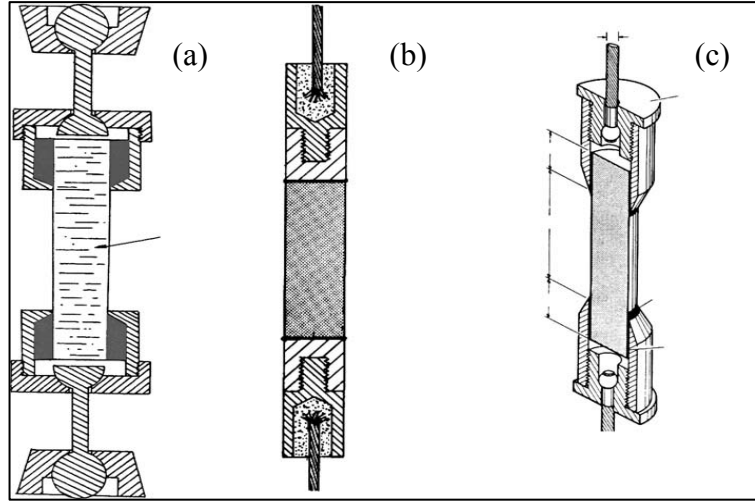


Şekil 1.1. Geleneksel doğrudan çekme deney yöntemleri (Perras ve Diederichs, 2014) (a) Hoek, (1964) b) ISRM, (1978) c) Brace, (1964) d) Gorski, (1993) ve Klanphumeesri, (2010)

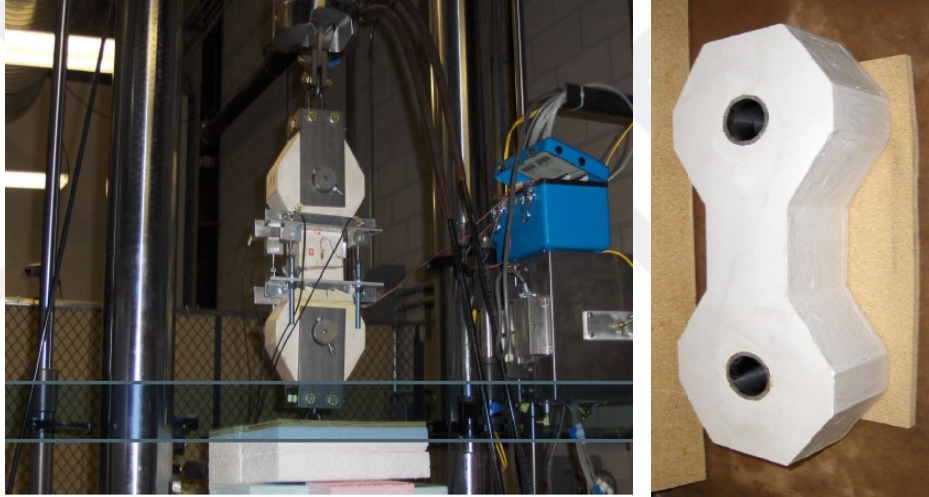
Dambıl (Dumbbell ya da dog-bone) şekilli numunelere uygulanan deneylerdeki en önemli farklılık; numunenin deney aparatına tutturulması sırasında yapıştırma işlemine gerek olmamasıdır. Deney numunesinin geometrik formu sayesinde çenelere ya da düzeneğe tutunması sağlanmakta ve çekme kuvveti uygulanmaktadır. Şekil 1.1(a), (c) ve (d)' de farklı kavrama mekanizmaları görülmektedir. TEÇD yine Eşitlik (1.1)' de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

Kaya malzemesinin ÇD doğrudan yöntemlerle belirlenebilmesine rağmen, gerilme yığılmaları numunenin bağlantı yapıldığı noktalarda (epoksi, çimento bağlayıcı kullanıldığında) gerçekleştiğinden, hasar; bağlantı yerlerinde meydana gelmekte, erken yenilme gerçekleşmekte ve çekme esnasında malzemede eğilme momentleri oluşabilmektedir. Bunun sonucunda istenilen tek eksenli gerilme durumundan sapmalar oluşmaktadır. Ayrıca ÇD, basma dayanımına göre daha yüksek sapma göstermektedir. Bunun nedeni, eksenel çekme yükünün tam olarak örneğin eksenine paralel uygulanamaması ve kısmen yenilmenin tabakalanma yüzeyi, yeniden çimentolanmış eklem yüzeyi vb. gibi zayıflık düzlemleri boyunca gelişebilmesidir (Ulusay vd., 2005). Bu nedenle kayaçların ÇD yanlış olarak hesaplanabilmektedir. Dambıl şekilli numuneler üzerinde yapılan TEÇD deneylerinde ise kesitindeki değişimlerden kaynaklanan çap değişim noktalarında gerilme yığılmaları oluşmaktadır.

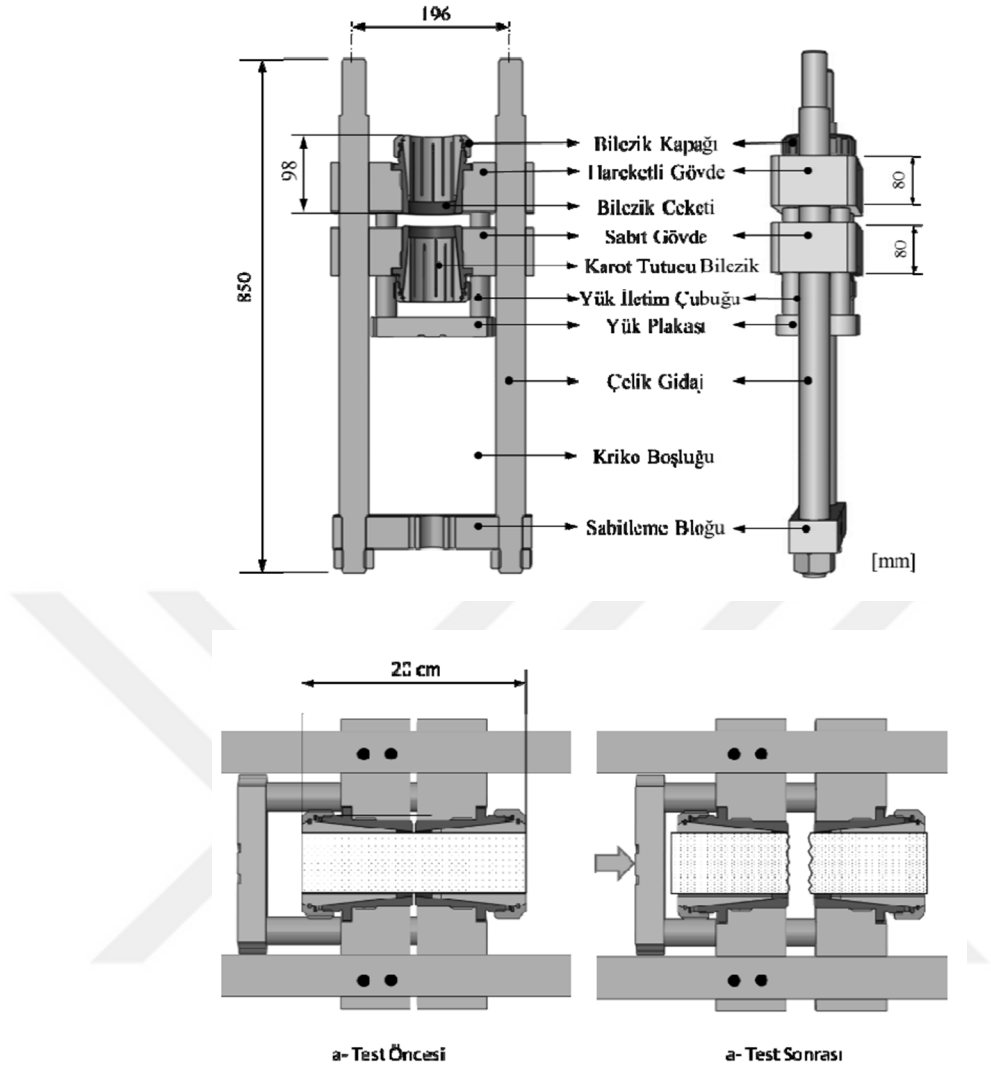
Tüm doğrudan yöntemlerde numune hazırlamak hem zaman alıcı hem de maliyetlidir. Birçok kaya mekaniği laboratuvarında çekme deney düzeneğinin bulunmadığı da düşünüldüğünde dolaylı yöntemlerin kullanılmak istenmesi daha anlaşılır olmaktadır. Geçmişten günümüze kadar birçok araştırmacı doğrudan çekme deneyi ile ilgili çalışmalar yaparak gerek kavrama mekanizmasında, gerekse numune geometrisinde değişiklikler önermişler ve yöntemin hataya sebep olan eksikliklerini gidermeye çalışmışlardır. Şekil 1.2, Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te geçmişten günümüze geliştirilmiş olan farklı kavrama mekanizmalarına sahip yöntemler örnek olarak verilmiştir. Bu tez kapsamında da TEÇD deneyleri için alternatif bir çekme aparatı (çene) ve numune geometrisi geliştirilerek yöntemin hataya neden kusurlarının giderilmesi amaçlanmış olup tezin metot bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 1.2. Doğrudan ÇD deneyi için farklı kavrama tipleri (a) Obert vd., (1946), (b) Fairhurst (1961), (c) Hawkes ve Mellor (1970)



Şekil 1.3. Dambıl şekilli numuneler için alternatif bir doğrudan çekme deney düzeneği (Nott, 2009)



Şekil 1.4. Silindir geometrideki numuneler için alternatif bir doğrudan çekme deney düzeneği (Ünlü ve Yılmaz, 2014)

1.1.2. Dolaylı yöntemler

Kaya malzemesinin ÇD'nın belirlenmesine yönelik ucuz ve pratik yöntemler olarak yıllardır dolaylı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en yaygın olanları Brezilya deneyi (ISRM, 1978; ASTM, 2008), üç ve dört nokta eğilme deneyleri (ASTM, 2010; TS EN, 2007, 2014), çevrelenmiş çekme deneyi (Hoek ve Brown, 1980) ve halka deneyi (Hobbs, 1965) gibi yöntemlerdir. Bu dolaylı yöntemler arasında en yaygın kullanılanı ise; numune hazırlama kolaylığı, deneylerin tekrar edilebilmesi, az miktarda deney numunesine ihtiyaç duyulması, basit ve ucuz olması gibi nedenlerden dolayı Brezilya dolaylı çekme dayanımı (BÇD) deneyidir. Fakat bu deney sonuçları incelendiğinde çatlak

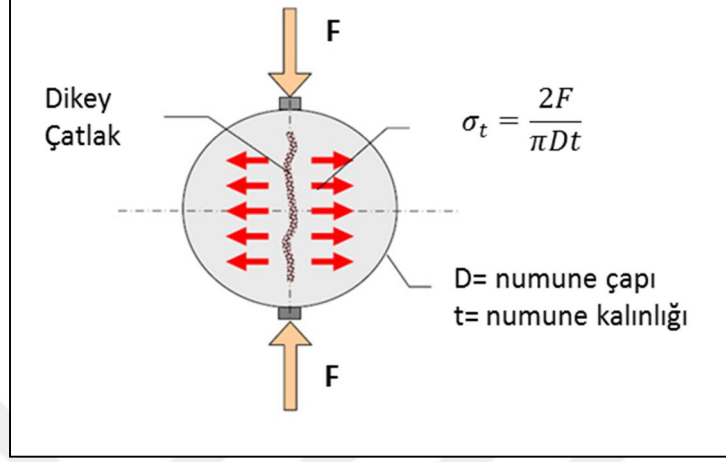
başlangıcı göz önünde bulundurulmazsa, elde edilen değerlerin gerçek ÇD değerlerinden yüksek bulunduğu birçok araştırmacı tarafından belirtilmektedir. Ayrıca, BÇD deneyinde kaya malzemesinin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değeri, tanelerin dağılımı ve yönelimi yenilme mekanizması üzerinde oldukça önemlidir. Bununla birlikte bu yöntemlerin bazıları pratik olmamaları (Loug deneyi gibi) ve güvenilir sonuç vermemeleri nedeniyle evrensel olarak kabul görmemiştir. Ayrıca bu yöntemlerden elde edilen deneysel veriler incelendiğinde aynı türde kayalar için farklı sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir. Hangi deney yönteminin daha uygun olduğu veya dolaylı yöntemlerle elde edilen değerlerin gerçekten kaya malzemesinin ÇD değerini temsil edip etmediği yaklaşık 70 yıldır araştırılan bir konudur. Literatür ayrıntılı olarak incelendiğinde kayalar ve kayaç benzeri malzemeler için uygun olan dolaylı deney yöntemi üzerinde genel bir uzlaşmanın olmadığı görülmektedir. Bu tez kapsamında; araştırmacılar tarafından belirtilen bazı eksiklikler giderilmeye çalışılarak ve bütün araştırmacıların kabul edebileceği bir yöntem veya modeli geliştirebilmek hedeflenmiştir.

1.1.2.1. Brezilya dolaylı çekme dayanımı deneyi

Brezilya ÇD, ISRM (1978) ve ASTM (2008b) tarafından kayalarda dolaylı çekme test yöntemi olarak belirlenmiştir. Deney boy/çap oranı 0,5 ila 1,0 arasında olan disk şeklindeki numuneler üzerinde uygulanmaktadır. Numune hidrolik pres tablaları arasına çapsal yükleme yapılacak şekilde yerleştirilmektedir. Bu amaçla ek parçalar da kullanılabilir. Yükleme hızı, numune 15-30 saniye içerisinde yenilecek şekilde uygulanmaktadır. Numunenin düşey eksenini boyunca (yükleme noktalarına yakın bölgelerde basma gerilmeleri oluşmakta) yatay çekme gerilmeleri oluşmakta ve malzemenin yenilme noktasındaki çekme gerilmesi, malzemenin çekme dayanımını vermektedir. ÇD Eşitlik (1.2) yardımıyla hesaplanmaktadır. Deneyin uygulanışı sembolik olarak Şekil 1.5'te gösterilmiştir.

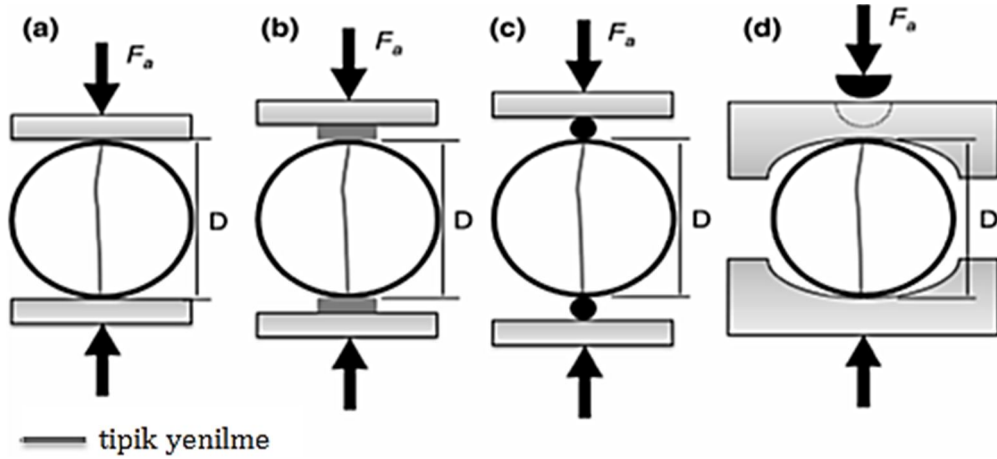
$$\sigma_{tBrez} = \frac{2F}{\pi Dt} = 0.636 \frac{F}{Dt} \quad (1.2)$$

Burada, F (kgf) numunenin yenilmesi anında uygulanan yük; D (mm) numune çapı ve t (mm) ise numune kalınlığıdır.



Şekil 1.5. Brezilya dolaylı çekme dayanımı deneyi

Deney sırasında uygulanan yük arttıkça yatay çekme gerilmelerinin şiddeti de artmaktadır. Yatay çekme gerilmesi numunenin $\frac{CD}{2}$ 'ni aştığı anda numune yükleme doğrultusunda yarılmaktadır. Numunenin yarıma çatlama (çekme çatlak) paralel doğrultuda bir basınç uygulandığı için bu deneye dolaylı çekme deneyi denilmektedir. Deney tercihen en az 10 adet numune üzerinde gerçekleştirilmektedir. Dolaylı çekme deneylerinde anizotropinin etkisi, yani kayadaki inklüzyonlar, kaolinize zonlar ve mikro çatlakların değişik doğrultuları farklı $\frac{CD}{2}$ değerleri elde edilmesine sebep olabilmektedir. Bu nedenle, disk şeklindeki numunelere farklı doğrultularda yük uygulanması daha doğru sonuçlar elde edilmesine imkân sağlayacaktır. Şekil 1.6'da ISRM tarafından önerilmiş farklı BÇD yükleme tipleri verilmiştir.



Şekil 1.6. BÇD deneyi için tipik yükleme levhaları; (a) Düz yükleme levhası, (b) Yastık ya da tamponlu düz yükleme levhası (genelde odundan), (c) Küçük çaplı çubuk ve yükleme levhası, (d) Kavisli çeneler (ISRM, 1978)

En yaygın kullanılan dolaylı yöntem olan Brezilya disk, yatay çap boyunca oluşan teğetsel gerilme (σ_θ) ve dikey çap boyunca oluşan radyal gerilmeyi (σ_r) içeren iki eksenli gerilme koşullarında yenildiği için bu testte önemli bir problem olduğu ve kayalarda TEÇD yerine kullanılmasının sakıncalı olduğu belirtilmektedir (Chen ve Stimpson, 1993; Fairhurst, 1964; Krishnayya ve Eisenstein, 1974; Erarslan ve Williams, 2012; Komurlu vd., 2017). Ayrıca kaya malzemesinin deformasyon karakteristiği ve numune ile çeneler arasındaki temas durumu (açısı, genişliği vb.) değişkenlik gösterdiği için bazı araştırmacılarca Brezilya testinde ilave problemler olduğu kanısı da bulunmaktadır (Markides ve Kourkoulis, 2016; Komurlu vd., 2017).

Brezilya disk deneyinde hasar mekanizmasının nasıl gerçekleştiği hakkında halen tartışmalar sürmektedir. Test edilen numune iki eksenli gerilme durumunda bulunduğundan hasarın, gerilmenin kritik bir değeri aşmasından mı yoksa gerinimin kritik bir değeri aşmasından mı meydana geldiği ile ilgili farklı görüşler mevcuttur. Bunların dışında numunenin yük uygulama noktalarında ezildiği ve hasarın bu bölgeden başladığını gösteren çalışmalar da mevcuttur. Bu nedenle Brezilya deneylerinde hasarın başlama noktasının belirlenmesi önem arz etmektedir. Hasarın başlangıç noktasının belirlenebilmesi için farklı teknikler (hızlı çekim yapan (high-speed) kameralar gibi) kullanılmaktadır.

Brezilya deneyi ile ilgili olarak Gerçek ve Özarslan (2011) tarafından belirtilen ve dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda yer almaktadır;

- Deney örneği homojen yapıda olmalıdır.
- Numunenin basınç dayanımı, ÇD'nın en az 3 katı olmalıdır.
- Kayacın basınç ve çekme gerilmeleri altında Young modülleri birbirine eşit olmalıdır (Çoğu kayaç bu koşulu sağlamaz). Olmadığı durumlar için düzeltme katsayılarının önerildiği çalışmalar mevcuttur.
- Deneylerde yenilme merkezden başlayan çekme çatlağı ile olmalıdır ve dayanım hesaplanırken ilk çatlak başlangıcındaki yük seviyesi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu konuyla ilgili yapılan ciddi çalışmaların bazıları, ilk çatlak başlangıcı ile TEÇD değerlerinin birbirine daha yakın çıktığı, BÇD değerlerinin TEÇD'dan daha yüksek çıktığını göstermektedir.
- Kayaç deformasyon anizotropisi göstermemelidir. Aksi takdirde düzeltme katsayıları uygulanması gerektiğini belirten çalışmalar mevcuttur (Claesson ve Bohloli, 2002).

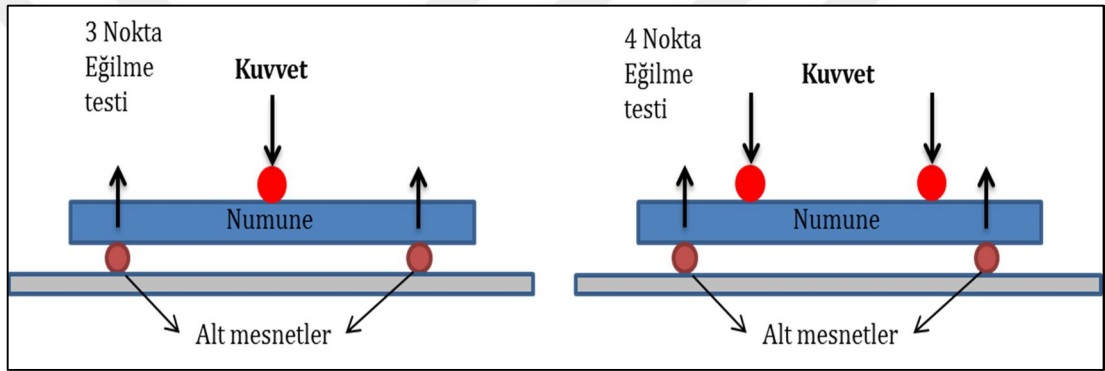
BÇD deneyi, üzerinde en çok araştırma yapılmış olan yöntemdir. Bu tez çalışmasının literatür özetleri bölümünde konu ile ilgili geçmişte yapılmış çalışmalar kapsamlı bir biçimde verildiği için bu bölümde ayrıntılı olarak değinilmemiştir.

1.1.2.2. Üç nokta ve dört nokta yüklemeli eğilme dayanımı deneyleri

Kayaçlarda eğilme deneyi, Elastite modülünün ve çekme dayanımının ölçülmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Bu tür bir yükleme hem çekme gerilmesi hem de basma gerilmesi alanları üretmektedir. Gerilme ve yer değiştirme dağılımları temel kiriş teorisi ile bulunmaktadır (Jaeger vd., 2007). Basit destekli kirişin noktasal yüklenerek bükülmesi sırasında en dış liflerde oluşan çekme gerilmesinin, malzemenin ÇD'na ulaşması anında ölçülen gerilmeye, "eğilmede çekme dayanımı" (flexural strength olarak bilinmektedir)

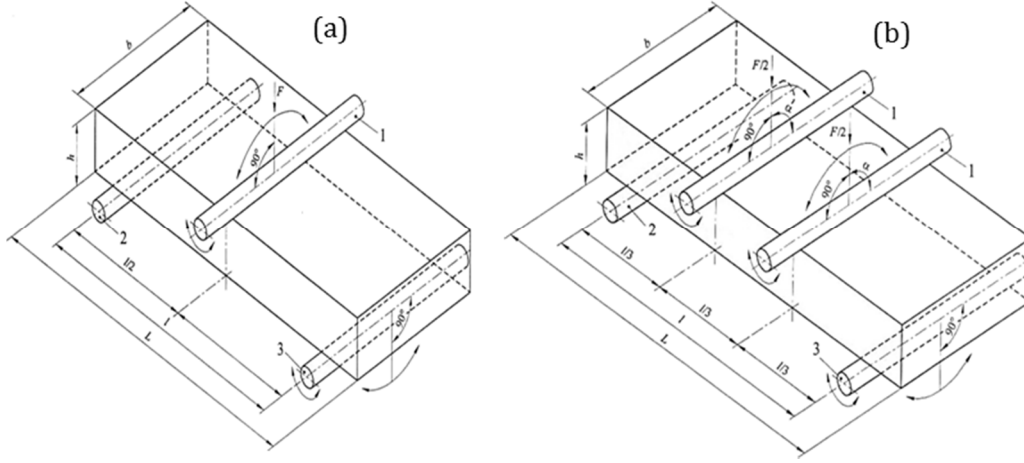
denilmektedir. ISRM tarafından önerilen yöntemler arasında olmasa da EN (European Norm) ve ASTM tarafından standartlaştırılmıştır.

Eğilme dayanımının bulunabilmesi için kiriş numuneler hazırlanmakta ve ilgili standartlara uygun olarak (Şekil 1.7, 1.8 ve 1.9’ da görüldüğü gibi) deneyler yapılmaktadır. 3 Nokta Eğilme Dayanımı (3NED) deneyinde kirişin oturtulduğu mesnetlerin arasındaki mesafenin orta noktasından ($l/2$ mesafesinden) yük uygulanarak deney gerçekleştirilmektedir. 4 Nokta Eğilme Dayanımı (4NED) deneyinde ise yük, mesnetlerden $l/3$ uzaklığındaki iki noktadan uygulanmaktadır.



Şekil 1.7. Eğilme deneylerinin şematik gösterimi

Kayaçların eğilme dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan üç nokta eğilme (yoğun yük altında) ve dört nokta eğilme (sabit moment altında) deneyleri, TS EN 12372 (2007) ve TS EN 13161 (2014) standartlarına uygun prizmatik numuneler üzerinde yapılmaktadır (Şekil 1.8). TS EN standartlarına göre; numune kalınlığının en az 25 mm, numune eninin en az 50 mm ve en fazla numune kalınlığının 3 katı olması, numune boyunun ise numune kalınlığının 6 katı olması önerilmiştir. Numunenin alt mesnetleri arasındaki mesafenin, numune kalınlığının 5 katı olması gerekmektedir. Deneylerin 70 °C’de kurutulmuş numuneler üzerinde ve uniform olarak yaklaşık $0,25 \pm 0,05$ MPa/s yükleme hızında yapılması gerekmektedir.



Şekil 1.8. TS EN standartlarına göre eğilme deneylerinin şematik gösterimi;
(a) 3NED deneyi TS EN 12372, (b) 4NED deneyi TS EN 13161

TS EN standartlarına göre kayaçların 3NED ve 4NED değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{3Neğ} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (1.3a)$$

$$\sigma_{4Neğ} = \frac{Fl}{bh^2} \quad (1.3b)$$

$\sigma_{3Neğ}$ = Numunenin üç nokta eğilme dayanımı, MPa

$\sigma_{4Neğ}$ = Numunenin dört nokta eğilme dayanımı, MPa

F = Kırılma yükü, N

l = Alt mesnetler arası açıklık, mm

b = Numunenin eni (genişliği), mm

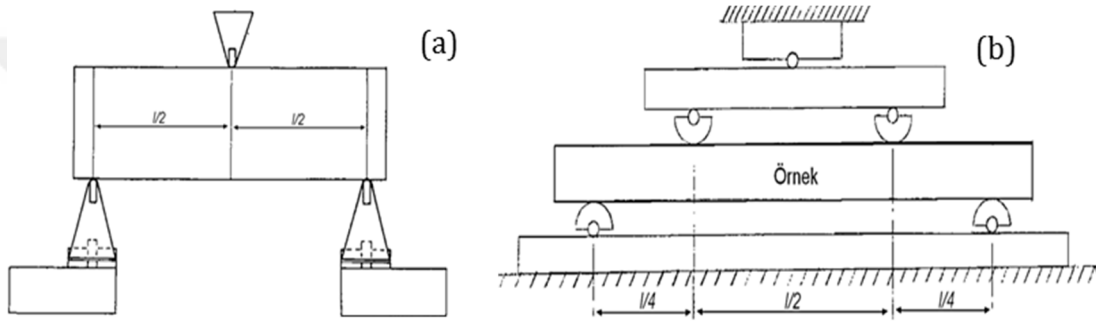
h = Numunenin yüksekliği (kalınlığı), mm

ASTM standartlarına göre eğilme dayanımının belirlenmesine yönelik yine iki prosedür (ASTM C99 ve ASTM C880) önerilmiştir. Fakat bu standartlara göre yapılacak deneylerde 3NED (Modulus of Rupture) için 101,6 x 203,2 x 57,2 mm ve 4NED (Flexural Strength) için 102 x 381 x 32 mm boyutlarında numuneler kullanılması, deneylerin hem kuru hem de suya doymun olarak yapılması gerekmektedir (Şekil 1.9). Deneylerin kuru şartlar için 60 °C'de kurutulmuş numuneler üzerinde, suya doymun şartlar için ise en az 2 gün suda bekletilmiş numuneler üzerinde yapılması ve üniform olarak yükleme hızının 3NED için 4,45 kN/dak değerini, 4NED için 4,14 MPa/dak değerini aşmaması önerilmiştir.

3NED değeri Eşitlik (1.3a)' da verilen formül yardımıyla (TS EN standardı ile aynı) hesaplanırken 4NED değeri aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{4Ned} = \frac{3Fl}{4bh^2} \quad (1.4)$$

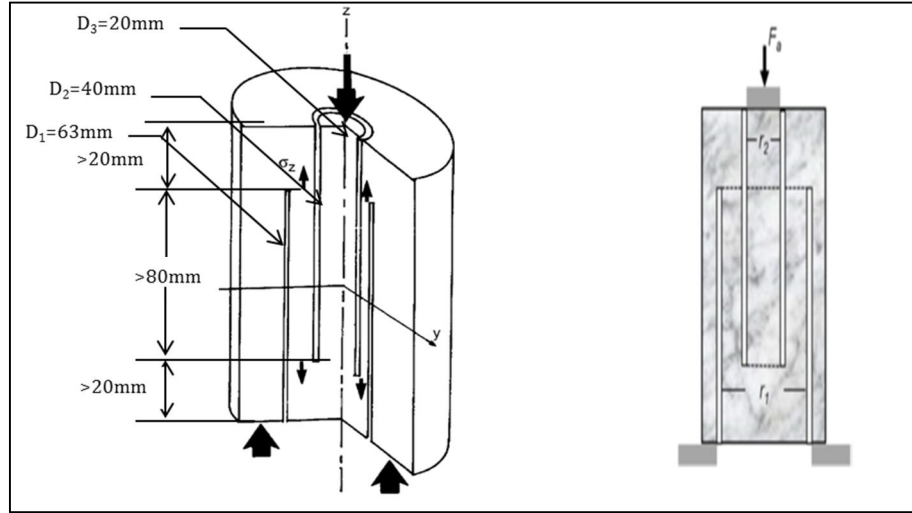
Elde edilen değerlerin TEÇD ve BÇD değerlerinden yüksek çıktığı bilinmektedir. Ayrıca çift modüllü malzemelerde düzeltme uygulanması gerektiğini belirten çalışmalar da mevcuttur. Ancak Brezilya deneyinden sonra en yaygın kullanılan dolaylı yöntemlerdir.



Şekil 1.9. ASTM standartlarına göre eğilme deneylerinin şematik gösterimi; (a) 3NED deneyi ASTM C99, (b) 4NED deneyi ASTM C880

1.1.2.3. Loung deneyi

İlk defa Loung tarafından 1986 yılında önerilen deneyde; farklı çapta karotiyerler kullanılarak, silindirik bir kaya örneğinin alt ve üst yüzeylerinden, boyları örnek boyundan daha küçük eş merkezli ve eş eksenli birer silindirik yarık açılmaktadır. Böylece ortada kalın duvarlı bir silindir oluşmaktadır. En dıştaki silindir ile en içteki dolu silindir sıkıştırılmakta ve aradaki kalın duvarlı silindirin aksenal olarak çekme yükleri altında kırılması sağlanmaktadır. Ancak ortadaki silindir, yarıkların uçlarına yakın kısımlarda eğilme momentlerine maruz kalmakta ve çekme gerilmelerinde düzensizlikler olmaktadır. Ayrıca ölçülen dayanım boyutlardan etkilenmektedir (Gerçek ve Özarslan, 2011; Coviello vd., 2005). Şekil 1.10' da çizimi yer alan deney yöntemi günümüzde yaygın olarak kullanılmamaktadır.



Şekil 1.10. Loung deneyinde kaya örneği ve yükleme şekli (Luong, 1986; Coviello vd., 2005)

1.1.2.4. Halka deneyi (ring test)

İlk olarak Hobbs (1965) tarafından önerilen ve günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından geliştirilmeye çalışılmış olan bir dolaylı çekme dayanımı belirleme yöntemidir. Brezilya deneyine benzerdir ve merkezinde bir delik bulunan disk şeklinde numuneler çapsal yükleme altında yenilmeye tabi tutulmaktadır. Halka numunesinin ÇD Hobbs eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

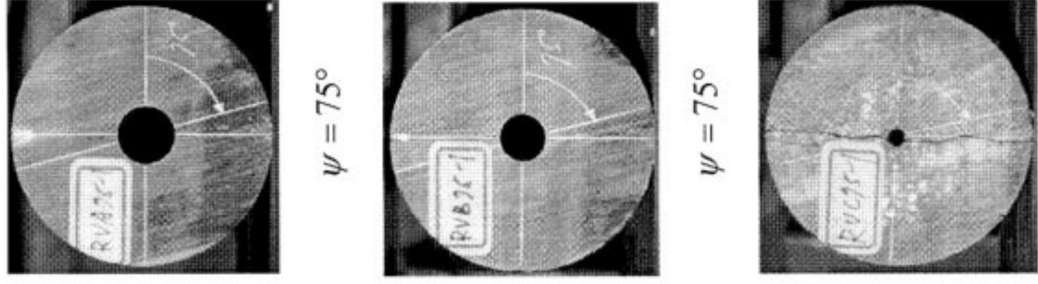
$$\sigma_t = \frac{2 F_a K_f}{\pi D t}, \quad K_f = 6 + 38 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (1.5)$$

Burada;

F_a = Uygulanan yük; D = Diskin çapı; t = Diskin kalınlığı

K_f = Gerilme yoğunluğu faktörü; r = Delik yarıçapı; R = Disk yarıçapı

Şekil 1.11'de halka deneyi için hazırlanmış örnek numuneler yer almaktadır. İlk ortaya atıldığı günden bugüne çeşitli araştırmalara konu olan yöntem günümüzde yaygın olarak kullanılmamaktadır.



Şekil 1.11. Halka deneyi için hazırlanmış numune örnekleri (Chen ve Hsu, 2001)

1.1.2.5. Çevrelenmiş çekme deneyi

Hoek-Brown (1980) tarafından “çevrelenmiş (confined) çekme deneyi” yöntemi önerilmiştir. Üç eksenli basınç dayanımına benzer bir düzenek ile deney yapılabilmektedir. Hem numune hazırlama zorluğu, hem de deneyin yapılışı itibariyle yaygınlaşmamıştır.

1.2. Kaya Mekaniği Uygulamalarında ÇD’nın Önemi ve Kullanım Alanları

Bu bölümde kayalarda çekme dayanımının kullanım (uygulama) alanları alt başlıklar halinde kısaca özetlenmiştir.

1.2.1. Yenilme ölçütlerinde kullanımı

Yenilme ölçütleri kayanın dayanım parametreleri ile etkiyen gerilmeler arasındaki matematiksel ilişkiler olarak tanımlanmaktadır (Gerçek ve Özarslan, 2011). Birçok araştırmacı tarafından geçmişten günümüze teorik, fiziksel ve görgül olmak üzere çok sayıda yenilme ölçütü geliştirilmiştir. Burada ÇD ile ilişkili olan yenilme ölçütlerinden bazıları örnek olarak verilmiştir. Griffith yenilme ölçütü (1924) en eski ölçüt olmasının yanı sıra pek çok ölçüt te bundan üretilmiştir ve çekme dayanımını esas almaktadır (Karpuz ve Hindistan, 2008). Griffith ölçütüne göre bir malzeme çekme gerilmesine maruz bırakıldığında, bünyesindeki mikro çatlakların ucunda gerilme yoğunlaşmaları oluşmaktadır. Çekme gerilmesi yoğunlaşmaları malzemenin ÇD’na ulaşırsa, çatlak oluşumu başlamakta ve yenilmeye neden olmaktadır. Ölçütün asal gerilmeler ile ilgili olan eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8 \sigma_t (\sigma_1 + \sigma_3) \quad \text{eğer } \sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0 \quad (1.6a)$$

$$\sigma_3 = -\sigma_t \quad \text{eğer } \sigma_1 + 3\sigma_3 < 0 \quad (1.6b)$$

Burada, σ_1 ve σ_3 asal gerilmeleri, σ_t çekme dayanımını, σ_c basma dayanımını ifade etmektedir. Griffith ölçütünde TEBD yükleme koşulu uygulanırsa, ($\sigma_3=0$, $\sigma_1=\sigma_c$) TEBD-ÇD oranı, $\sigma_c/\sigma_t = 8$ olarak bulunmaktadır. Ölçütün normal gerilme-kesme gerilmesi cinsinden eşitliği ise;

$$\tau^2 = 4 \sigma_t (\sigma + \sigma_t) \quad (1.7)$$

Burada τ kesme gerilmesini, σ normal gerilmeyi ifade etmektedir. Eğer $\tau=0$ ise $\sigma=-\sigma_t$, eğer $\sigma=0$ ise $\tau=2\sigma_t$ olmaktadır.

Mohr-Coulomb yenilme ölçütünde de kayaların basınç dayanımı-çekme dayanımı oranları 3 ila 10 arasında tahmin edilmektedir. Ancak gerçek deneylerde bu oranlar daha büyük aralıklarda olabilmektedir (8-100) (Karpuz ve Hindistan, 2008). Bu nedenle ölçütün daha temsili olması açısından Mohr-Coulomb ölçütü ÇD ile sınırlandırılmaktadır (tension cut off uygulaması). Ölçütteki eşitliklerden ÇD kestirimi yapıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilmektedir (Gerçek ve Özarslan, 2011).

$$\sigma_{ci} / \sigma_{ti} = -(1+\sin\varphi) / (1-\sin\varphi) \quad (1.8a)$$

$$\sigma_{ci} / \sigma_{tBrez} = -2 (2-\sin\varphi) / (1-\sin\varphi) \quad (1.8b)$$

Burada σ_{ci} :TEBD, σ_{ti} :TEÇD, σ_{tBrez} :Brezilya çekme dayanımını ve φ :içsel sürtünme açısını ifade etmektedir.

Hoek-Brown yenilme ölçütü (1980) araştırmacıların deneyimlerine dayanan görgül bir ölçüttür ve aşağıdaki eşitliği (1.9) önermektedir. Burada m_i Hoek-Brown parametresidir. Ölçütteki diğer eşitliklerden σ_{ci}/σ_{ti} ve $\sigma_{ci}/\sigma_{tBrez}$ oranlarını m_i sabitine bağlı olarak tahmin etmek mümkün olmaktadır.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + \sigma_{ci}^2)^{0.5} \quad (1.9)$$

Wang ve Shen (2017) tarafından yapılan çalışmada ise m_i sabiti, çekme dayanımına dayanan bir modelle belirlenmeye çalışılmış ve Hoek-Brown yenilme ölçütünde kullanılabileceği belirtilmiştir. Ancak yenilme ölçütlerinde kuramsal olarak çıkarımı yapılan bu oranlar gerçek deneysel çalışma verileri ile örtüşmemektedir.

1.2.2. Yeraltı açıklıklarının tasarımında kullanımı

Çekme dayanımı basma dayanımına kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle kayanın doğrudan çekme yüklemesi koşulları altındaki davranışı, yeraltı açıklıklarının tasarımında oldukça önemli bir rol oynamaktadır (Tang vd., 2007). Özellikle sert kaya kütlelerinde açılan yeraltı yapılarında çevre kayanın ÇD çok önemlidir (Diederichs, 1999).

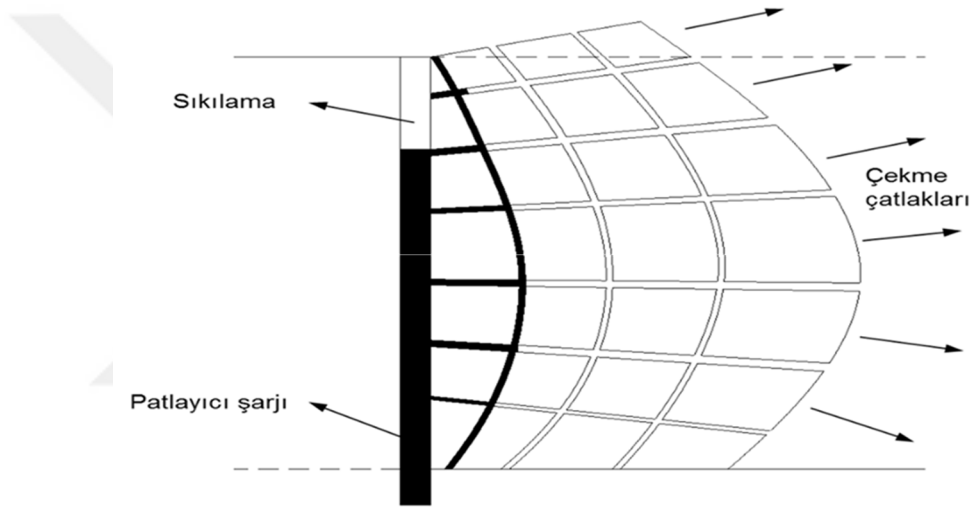
Bu kapsamda tabakalı ortamlarda oluşturulan düz tavanlı açıklıklarda, tavan tabakanın sarkması ve gelişen çekme gerilmeleriyle yenilmesi sık karşılaşılan bir olgudur. Bu problem elastik giriş kuramı ile incelenebilmektedir. Özellikle uzun ayaklardaki yalancı ve ana tavan tabakalarının duraylılığı konusunda ÇD çok kritik rol oynamaktadır (Gerçek ve Özarslan, 2011). Ocak (2005) yaptığı çalışmada konverjans ve tasmanı en iyi ifade eden kayaç özelliğinin çekme dayanımı ve basınç dayanımı/çekme dayanımı oranı olduğunu belirtmiş ve bu özellikler kullanılarak tasman ve konverjansın önceden tahmin edilebileceği sonucuna varmıştır.

1.2.3. Delme ve patlatma uygulamalarında kullanımı

Kayaların patlatılıp parçalanmasında yansıma kuramı dikkate alınmaktadır. Bu kurama göre parçalanma; ani olarak oluşan gazların çevresindeki kayaların kırılmasından değil, açık yüzeyden yansıyarak geri dönen çekme gerilmesi dalgalarınca gerçekleşmektedir. Kayanın çekmede, kesmeye göre daha dayanıksız olduğu bilinmektedir. Bu nedenle kayanın parçalanmasına asıl çekme gerilmesi vuruşuğunun (dalgası) neden olduğu belirtilmektedir (Özdoğan, 1986). Kayacın çekme gerilmesi patlatma sırasında ortaya çıkan

enerji ile geçilmesi zorunlu bir gerilmedir. Eğer geçemezse kayaç parçalanmaz ve böylece patlatma başarısızlıkla sonuçlanmaktadır (Mamurekli vd., 2006).

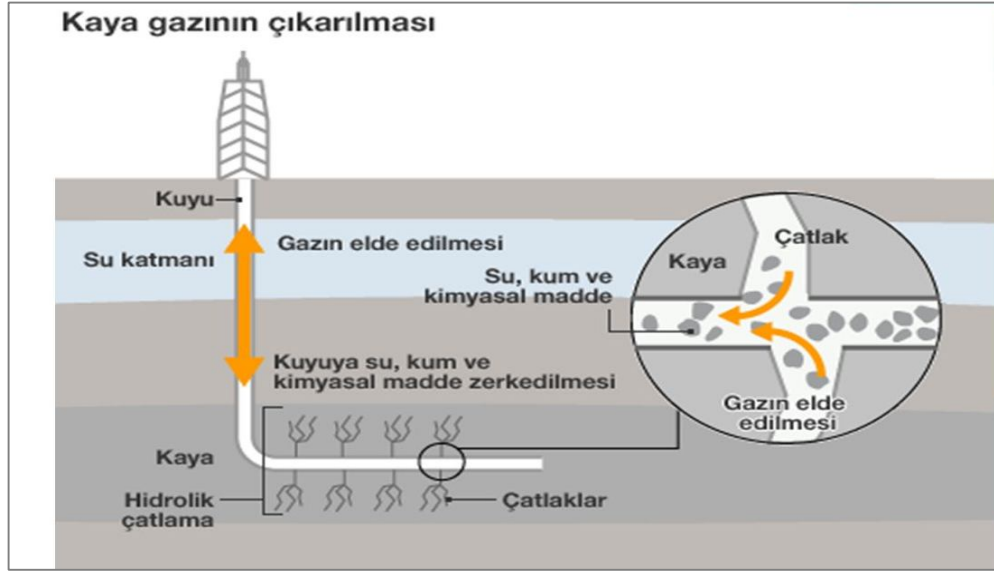
Patlatmayla kaya parçalama işlemi sırasında yüksek basınçlı gazların bir diğer parçalama etkisi de kayayı bükerek kırmalarıdır. Şekil 1.12’de gösterildiği gibi, patlayıcı gazlar tarafından kaya kütesine uygulanan basınç, patlayıcı kolonunun sıkılama bölgesi ve deliğin dip kısmının bir kiriş gibi hareket etmesiyle bu iki bölge arasında kalan kayacın bükülerek kırılmasına neden olmaktadır (Yılmaz, 2013). Bu nedenlerle kayaçların ÇD, patlatma mühendisliği uygulamalarında da temel bir tasarım parametresi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.12. Kiriş etkisiyle kayacın bükülerek kırılmasının şematik gösterimi (Jimeno vd. 1995; Yılmaz, 2013).

1.2.4. Petrol ve doğal gaz üretiminde kullanımı

Petrol ve doğal gaz üretimi amacıyla kullanılan hidrolik çatlatma tekniğinde, sondaj deliğinin tıkaçlarla yalıtılmış kısmına pompalanan kum-su karışımının oluşturduğu içsel basıncın, deliği çevreleyen kayanın çekme dayanımını yenmesi sonucu çatlaklar meydana gelmektedir (Gerçek ve Özarslan, 2011). Bu nedenle kaya biriminin ÇD’nın bilinmesi çok önemlidir. Şekil 1.13’de örnek bir kaya gazı çıkarılması işlemi yer almaktadır.



Şekil 1.13. Kaya gazının üretim şeması örneği (Anderson, 2014)

1.2.5. Kazı ve kırılma mekaniği uygulamalarında kullanımı

Kazı mekaniği alanında karşılaşılan delme hızı, özgül kesme enerjisi gibi parametrelerin, BÇD'na bağlı olarak tahmin edilebildiği görgül eşitlikler bazı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur. Örneğin Bilgin vd. (2006) konik uçlu keskiler kullanarak 22 farklı kayaç üstünde yaptıkları çalışmada özgül kesme enerjisi (SE_{opt} , kWh/m³) ile BÇD arasında aşağıdaki bağlantıyı önermişlerdir.

$$SE_{opt} = 1,2591 \sigma_{tBrez} + 0,1424 \quad (r^2 = 0,743) \quad (1.10)$$

Kahraman vd. (2003) üstten darbeli hidrolik delicilerde delme hızına (PR, m/dak) etki eden kayaç özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, BÇD değerinden delme hızını tahmin etmeye yarayan aşağıdaki eşitliği (1.11) önermişlerdir.

$$PR = -0,083 \sigma_{tBrez} + 1,67 \quad (r = 0,91) \quad (1.11)$$

Wang vd., (2007) tarafından kil numuneleri üzerinde yapılan çalışmada ise kırılma tokluğu (K_{IC}) ile TEÇD arasında güçlü ilişkilerin olduğu belirtilerek aşağıdaki görgül eşitlik (1.12) önerilmiştir.

$$K_{IC} = 0,3546 \sigma_{ti} \quad (r^2 = 0,88) \quad (1.12)$$

Şengün ve Altındağ (2010) 15 farklı kayacın Mod-I kırılma tokluğu değerleri ile diğer mekanik özellikleri karşılaştırdıkları çalışmalarında en yüksek korelasyon katsayısını BÇD değerleri ile sağlamışlardır. Diğer araştırmacılar gibi onlar da BÇD değerleri kullanılarak kayalarda kırılma tokluğunun tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir.

1.2.6. Kesme teorileri

İlk metal kesme teorisi Merchant tarafından 1945 yılında önerilmiştir (Yaşar vd., 2013). Kömürler ile ilgili ilk kesme teorisi ise Evans (1958) tarafından ortaya atılmıştır. Deneysel çalışmalar süresince, kama uçlu keskinlerin kömüre batmaları ve keski batarken kömürde oluşturduğu kırılma paternleri detaylı olarak incelenmiştir. Evans'ın önerdiği modele göre çekme kırılması keskinin ucundan başlayarak dairesel bir hat boyunca gelişmektedir. Diğer kesme teorilerinden farklı olarak bu teoride, kömürün çekme gerilmesinin aşılması sonucu yenildiği kabul edilmektedir (Yaşar ve Yılmaz, 2016). İlk kayaç kesme teorisi olarak gösterilen Nishimatsu kesme teorisinde ise kesme olayı, kayacın kesme dayanımının aşılması ile gerçekleşmektedir (Nishimatsu, 1972). Kömürün kazı şekli incelendiğinde metallere farklı olarak, kesilmeden ziyade patlayarak koparıldığı görülmektedir. Bu da gevrek kırılmaya (patlama) işaret etmektedir (Yaşar ve Yılmaz, 2016). Kama uçlu keskinler için kesme sırasında keskiye yatay yönde gelen kuvvet Eşitlik 1.13'te verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$F'C = \frac{2\sigma_t d \sin \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)}{1 - \sin \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)} \quad (1.13)$$

Burada;

$F'C$ = Maksimum kesme kuvveti, N

σ_t = Kömürün çekme dayanımı, MPa

d = Kesme derinliği, mm

w = Keski genişliği, mm

α = Kesme açısı'dır.

1.2.7. Gevreklik indeksleri

Gevreklik (brittleness), kaya mühendisliği uygulamalarında kaya kütlesinin olası yenilme karakteristiklerini belirlemek için sıklıkla kullanılan bir terimdir (Zhang vd., 2016). Gevreklik, malzemenin plastik şekil değiştirme kabiliyeti olmaması durumu olarak ifade edilmektedir. Yani gevrek malzemeler şekil değiştirmeye yatkın olmayan malzemelerdir. Bu malzemelere kuvvet uygulandığı zaman bir miktar şekil değiştirmeye uğrar ve plastik bölgeye geçmeden kırılırlar. Günümüze kadar birçok araştırmacı, kayalarda gevrekliği belirleyebilmek için çeşitli kavram ya da özelliklere (mineral kompozisyonu, dayanım parametreleri, arazi gerilmeleri vb.) bağlı gevreklik indeksleri (BI) önermiş olsalar da bu bölümde yalnızca ÇD ile ilgili önerilen gevreklik tanımlarından bahsedilmiştir.

Hucka ve Das, (1974) tarafından tanımlanan 2 farklı gevreklik indeksi aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$BI = \sigma_c / \sigma_t \quad (1.14a)$$

$$BI = (\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t) \quad (1.14b)$$

Altındağ tarafından 2002'de önerilen gevreklik indeksi Eşitlik (1.15a)'da, 2008 yılında önerilen gevreklik indeksi ise Eşitlik (1.15b)'de verilmiştir. Bu tanımlar Hucka ve Das (1974)'in önerdikleri tanımlamalara göre daha pratik ve kabul edilebilirdir. Çünkü delinebilirlik, kırılma tokluğu ve kesilebilirlik gibi gevreklikle ilgili bazı kayaç özelliklerini daha doğru tahmin etmektedir (Zhang, 2016).

$$BI = (\sigma_c * \sigma_t)/2 \quad (1.15a)$$

$$BI = \left(\frac{\sigma_c * \sigma_t}{2} \right)^{1/2} \quad (1.15b)$$

Ozfirat vd. (2016) tarafından ise TEBD ve ÇD değerlerinin aritmetik ortalaması olarak ifade edilebilecek aşağıdaki Eşitlik (1.16) önerilmiştir. Burada verilen gevreklik indeksleri formüllerinin tümünde σ_{ci} : TEBD, σ_t : ÇD'dır.

$$BI = (\sigma_c + \sigma_t)/2 \quad (1.16)$$

Benzer kayaçlar için yapılan deneylerde, örneğin kireçtaşlarında, ÇD değerleri; TEBD değerlerine kıyasla çok daha geniş bir aralıkta karşımıza çıkmaktadır. Bunun nedeni, ÇD değeri hangi yöntemle belirlenirse daha doğru olacağı konusunda halen bir uzlaşının olmamasıdır. Bu durum gevreklik indeksi tanımlamalarında da dikkate alınmalı, doğrudan mı yoksa dolaylı yöntemlerle mi elde edilmiş olan ÇD değerlerinin kullanılmasının daha doğru olacağı belirlenmeli, gevreklik indeksi formülleri gerekiyor ise revize edilmelidir. Çekme ve basma dayanımlarının birlikte kullanıldığı gevreklik indeksleri incelendiğinde, aynı tür kayaçlar için birbirinden farklı BI değerleri elde edilmektedir. Ozfirat vd. (2016)'nin çalışmasındaki veriler incelendiğinde bu durum açıkça görülmektedir (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1. Gevreklik için laboratuvar verileri (Yenice vd., 2009a, 2009b; Yaralı ve Kahraman, 2011; Ozfırat vd., 2016)

Kayaç Türü	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	BI ₁	BI ₂	BI ₃	BI ₄
Kuarsit	164,77	17,07	9,65	0,81	1406,31	90,92
Kireçtaşı1 (Norveç)	78,24	10,34	7,57	0,77	404,50	44,29
Diyabaz	98,39	7,89	12,47	0,85	388,15	53,14
Granodiorit	64,55	6,14	10,51	0,83	198,17	35,34
Kumtaşı	75,63	6,69	11,30	0,84	252,98	41,16
Silttaşı1	67,64	6,19	10,93	0,83	209,35	36,91
Kireçtaşı2 (Zonguldak)	82,51	6,78	12,17	0,85	279,71	44,64
Siyenit	182,10	8,34	21,83	0,91	759,36	95,22
Andezit1	110,86	8,30	13,36	0,86	460,07	59,58
Andezit2	76,45	7,62	10,03	0,82	291,27	42,03
Bazaltik andezit1	132,48	8,76	15,12	0,88	580,26	70,62
Dolerit	175,50	16,50	10,64	0,83	1447,88	96,00
Bazalt	120,73	10,78	11,20	0,84	650,73	65,75
Andezitik bazalt	77,80	9,42	8,26	0,78	366,44	43,61
Andezit3	82,93	5,17	16,04	0,88	214,37	44,05
Trakiandezit	104,53	5,75	18,18	0,90	300,52	55,14
Bazaltik andezit2	92,53	11,20	8,26	0,78	518,17	51,86
Dolomitik kireçtaşı1	51,37	5,66	9,08	0,80	145,38	28,51
Bazaltik andezit3	28,61	2,57	11,13	0,84	36,76	15,59
Kireçtaşı3	78,99	9,08	8,70	0,79	358,61	44,03
Silttaşı2	81,03	7,54	10,75	0,83	305,48	44,28
Andezit4	65,72	5,85	11,23	0,84	192,23	35,78
Granite	101,16	8,32	12,16	0,85	420,83	54,74
Dolomitik Kireçtaşı2	31,57	4,36	7,24	0,76	68,82	17,96
Dolomit	31,70	7,45	4,26	0,62	118,08	19,57
Bazaltik andezit4	143,14	12,38	11,56	0,84	886,04	77,76
Marn	89,60	7,03	12,75	0,85	314,94	48,31
Afyon beyaz mermer	57,66	6,57	8,78	0,80	189,41	32,11
Karacasu beyaz mermer	23,43	3,61	6,49	0,73	42,29	13,52
Yatağan beyaz mermer	45,67	5,40	8,46	0,79	123,31	25,53
Ege silver mermer	110,39	10,06	10,97	0,83	555,26	60,22
Firuze mermer	55,98	5,94	9,42	0,81	166,26	30,96
Bergama granit	112,00	10,50	10,67	0,83	588,00	61,25
Kireçtaşı4 (İzmir)	64,61	5,43	11,90	0,84	175,42	35,02
Fethiye Bej mermer	134,72	5,87	22,92	0,92	395,40	70,29
Yeşil bazalt	99,19	7,42	13,37	0,86	367,99	53,30
Blue pearl granit	182,00	13,50	13,48	0,86	1228,50	97,75
Kireçtaşı5 (Zonguldak)	78,99	9,08	8,70	0,79	358,61	44,03
Kireçtaşı6 (Zonguldak)	82,51	6,78	12,17	0,85	279,71	44,64
Dolomitik kireçtaşı3	31,57	4,36	7,24	0,76	68,82	17,96
Dolomitik kireçtaşı4	51,37	5,66	9,08	0,80	145,38	28,51
$\sigma_c = \text{TEBD}$, $\sigma_t = \text{ÇD}$, $BI_1 = \sigma_c / \sigma_t$, $BI_2 = (\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t)$, $BI_3 = (\sigma_c \times \sigma_t) / 2$, $BI_4 = (\sigma_c + \sigma_t) / 2$						

1.2.8. Çekme dayanımının tahmin edildiği diğer mekanik özellikler

Zhang (2005) tarafından özetlendiği gibi birçok araştırmacı, TEBD ve nokta yük indeksi arasındaki korelasyonu araştırmıştır. Zhang (2005) ise ÇD ile nokta yük indeksi ($I_{s(50)}$) arasında aşağıda verilen eşitliği önermiştir (Perras ve Diederichs, 2014).

$$\sigma_t = -1,5 I_{s(50)} \quad (1.17)$$

Hoek ve Brown (1997); sağlam kaya için asal gerilme ve maksimum gerilme arasındaki ilişkiyi açıklamak için malzeme sabiti m_i' yi önermişlerdir. Sadece üç eksenli ve tek eksenli gerilme verilerini uyarlayarak çekme dayanımını, m_i' nin hesaplanmasıyla tahmin etmek mümkün olsa da önerilmemektedir (Perras ve Diederichs, 2014). Çünkü Hoek ve Brown (1997) tarafından önerilen eşitlikten gevrek kayalar için çekme dayanımı aşağıdaki şekilde hesaplamakta fakat uygun bulunmamaktadır. Ayrıca m_i' nin belirlenmesi kaya türüne göre değişiklik göstermektedir (Diederichs, 2007).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \text{TEBD} \left(m_i \left(\frac{\sigma_3}{\text{TEBD}} \right) + 1 \right)^{0,5} \quad (1.18a)$$

$$\sigma_t = -\text{TEBD} / m_i \quad (1.18b)$$

Bazı araştırmacılar tarafından önerilen ve aşağıda yer alan ampirik eşitlikler de ÇD'nı tahmin etmekte kullanılmaktadır (Brisevac vd., 2015);

$$\text{Hoek (1966),} \quad \sigma_t = -\sigma_{\text{TEBD}} / 10 \quad (1.19a)$$

$$\text{Van der Schrier (1988),} \quad \sigma_{\text{tBrez}} = 0,4 \text{ BPI} - 0,4 \quad (1.19b)$$

$$\text{Sulukcu ve Ulusay (2001),} \quad \sigma_{\text{tBrez}} = 0,86 * \text{BPI}_c \quad (1.19c)$$

$$\sigma_{\text{tBrez}} = 2,3 * I_{s(50)} \quad (1.19d)$$

$$\text{Mishra ve Basu, (2012),} \quad \sigma_{\text{Brez}} = 0,35 \text{ BPI}_c + 3,69 \quad (1.19e)$$

Burada; σ_{TEBD} :tek eksenli basınç dayanımı, σ_{tBrez} :Brezilya çekme dayanımı, BPI :disk makaslama dayanımı, BPI_c :düzeltilmiş disk makaslama dayanımı, $I_{s(50)}$:nokta yük dayanım indeksidir.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Kayaçlarda ÇD çok önemli bir parametre olmasına rağmen, mühendislik uygulamalarının birçoğunda, güvenilir sonuçlar elde etmek zor olduğu için göz ardı edilmektedir. Kaya numunelerinin çekme gerilmeleri altındaki mekanik özelliklerinin hassas olarak bilinmesi; önceki bölümde özetlenen maden ve inşaat mühendisliği projeleri uygulamalarının yanı sıra, kayaçlar üzerinde kazı ve kesim yapan kesici ve delici ekipmanların seçimi, servis ömürlerinin tahmini, en uygun kesme açılarının tayini, yüzey sertliklerinin belirlenmesi, gibi birçok konuda da oldukça önemlidir. Buna rağmen bilimsel çalışmalar incelendiğinde (1943-2019 yılları arası) hangi yöntemin daha uygun olduğu ve doğrudan-dolaylı yöntemlerden elde edilen ÇD değerlerinin, kayacın gerçek ÇD değerini temsil edip etmediği konusunda **genel bir fikir birlikteliğinin olmadığı**, bu konularda çalışan bilim insanları tarafından belirtilmiştir. Ayrıca literatürdeki deneysel sonuçların ve bazı yaklaşımların birbirleri ile tutarlı olmadığı görülmektedir. Bunun nedenleri olarak; deneylerin yapılmasında kullanılan cihazlardaki hassasiyet ve kalibrasyon problemleri, kaya malzemelerinin davranışının ideal olmadığı durumlar, seçilen kaya malzemelerinin mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin literatürde belirtilen değerleri sağlamaması, gerilme-gerinim analizlerinin hesaplarda kullanılmaması ve çatlak başlangıçlarının belirlenmemesi gibi hususlar sıralanabilmektedir. TEÇD ile BÇD arasındaki ilişki literatürde oldukça geniş aralıkta verilmiştir. Bunun nedeni büyük bir ihtimalle numune çeşitliliği ve test konfigürasyonlarının farklılığı olabileceği düşünülmektedir.

Malzemelerin mekanik özellikleri belirlenirken kullanılan cihazların farklılığı, sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir. Sağlıklı karşılaştırmaların yapılabilmesi için tüm deneylerin aynı cihazda yapılması sonuçların güvenilirliği açısından uygun olacaktır. Farklı laboratuvarlarda bu tarz deneyler yüksek kapasiteli (40-200 ton) ve analog göstergeli (veri toplama ve kaydetme özelliği olmayan) cihazlar kullanılarak yapılmaktadır. Kayaç gibi düşük ÇD'na sahip malzemeler bu cihazlarda test edildiğinde tutarlı verilerin elde edilemediği görülmektedir. Bu tez çalışmasında, TÜBİTAK projesi kapsamında alınan hassas veri toplama

özelliklerine sahip universal test makinası ile bu tarz hataların önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

BÇD deneyinde hasar mekanizmasının nasıl gerçekleştiği özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda anlaşılmıştır. Ancak test edilen numune iki eksenli gerilme durumunda bulunduğundan hasarın, gerilmenin kritik bir değeri aşmasından mı yoksa gerininin (strain) kritik bir değeri aşmasından mı meydana geldiği ile ilgili bazı farklı görüşler de mevcuttur. Bunların dışında numunenin yük uygulama noktalarında ezildiği ve hasarın bu bölgeden başladığını gösteren çalışmalar olmakla birlikte yenilmenin numunenin merkezinden başladığını kabul eden çalışmalar da mevcuttur. Bu nedenle Brezilya deneylerinde **hasarın başlama noktasının** belirlenmesi gerekmektedir. Hasarın başlangıç noktasının belirlenebilmesi için hızlı çekim yapan kameralara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında hızlı çekim yapan kamera ile çatlak başlangıç noktaları belirlenmiştir.

Doğrudan çekme deneyindeki en büyük problem, dambıl şekilli numunelerde kesitindeki değişimlerden kaynaklanan çap değişim bölgelerinde gerilme yığılmalarının oluşmasıdır. Bu konuda Tufekci vd., (2016) tarafından bir ön çalışma yapılarak ilk deneme sonuçları elde edilmiştir. Yapılan bu ön çalışmalarda ANSYS programından (sonlu elemanlar yöntemi) elde edilen verilere göre gerilme yığılmasının çap geçiş noktalarında meydana geldiği belirlenmiş ve gerilme yığılması değerleri elde edilmiştir. Laboratuvar deneylerinde de numunedeki hasarın aynı bölgede olduğu görülmüştür. Bu tezde, gerilme yığılmalarını düşürmek için 3 farklı alternatif çekme numunesi modeli geliştirilerek nümerik ve deneysel analiz çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında en uygun numune geometrisi belirlenerek tüm kayaç türlerine TEÇD deneyleri yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında; ÇD'nın önemli olduğu proje ve uygulamalardaki kaya ortamlarını (sedimanter, metamorfik ve magmatik) temsil etmesi açısından seçilen 9 farklı kayaç türü üzerinde öncelikle temel fiziksel ve mekanik özellikler belirlenerek söz konusu kayaçlar teknik anlamda tanımlanmaya

çalışılmıştır. Daha sonra bir dizi nümerik analiz ve deneysel çalışma yürütülerek doğrudan çekme deneyinde kullanılacak en uygun dambıl şekilli numune geometrisi belirlenmiştir. ASTM standartlarına göre Tufekci vd. (2016) tarafından tasarlanmış olan yeni bir doğrudan çekme deney düzeneği aparatı (çene) kullanılarak kayaçların TEÇD değerleri belirlenmiştir. Bu sayede hem geliştirilen çenenin, hem de dambıl numune geometrisinin pratikte kullanılabilirliği bilimsel olarak kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Ardından kayaçların çekme dayanım değerlerini belirlemede dolaylı yöntem olarak yaygın bir kullanım alanına sahip olan BÇD deneyi ve 3-4 nokta eğilme dayanım deneyleri ISRM, ASTM ve TS EN'de belirtilen numune standartlarına göre ve **aynı cihazda** yapılarak dolaylı ÇD değerleri belirlenmiştir. Bu aşamada Brezilya deneyinde 3 farklı boy/çap oranı (0,50-0,75-1,0) kullanılmış ve deneyler sırasında yüksek hızlı çekim yapan kamera yardımıyla çatlak başlangıçları tespit edilmiştir. 3 ve 4 nokta yüklemeli eğilme dayanımı deneyleri ise ASTM ve TS EN'de belirtilen koşulları sağlamak kaydıyla 3'er farklı geometrideki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında deneysel, nümerik ve istatistiksel analiz çalışmaları yürütülerek seçilen 9 farklı kayaç türü üzerinde; dolaylı yöntemlerin TEÇD değerlerini tahmin etmekte ne ölçüde başarılı olduğu, hangi yöntemin kullanılmasının daha doğru olacağı ve düzeltme katsayılarının ya da modelinin ne olduğu, Brezilya yönteminde çatlak başlangıcının nerede gerçekleştiği ve boy/çap oranının etkisi, TEÇD için en uygun dambıl şekilli numune geometrisinin nasıl olması gerektiği, yöntemlerin birbiri arasındaki tutarlılıklar gibi bazı sorulara cevap aranmıştır. Elde edilen sonuçlar istatistiksel analiz çalışmaları ile değerlendirilerek kayaçlarda ÇD'nın daha doğru belirlenebilmesi için yeni modeller önerilmiştir. Böylelikle, yapılan çalışma ile yalnızca bilimsel alanda literatüre katma değer sağlamakla kalınmayarak, aynı zamanda uygulamalarda da yaygın olarak kullanılabilecek pratik yaklaşımlar verilmeye çalışılmıştır. İzlenen metodoloji ve ulaşılan sonuçlar sonraki bölümlerde ayrıntılı bir biçimde sunulduğundan bu bölümde tezin genel çerçevesi çizilmeye çalışılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatür incelendiğinde kayaçlarda ve diğer malzemelerde çekme dayanımının doğrudan ve dolaylı yöntemlerle belirlenmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Bu konularda yapılmış çalışmalar alt bölümler halinde kronolojik olarak özetlenmeye çalışılmıştır.

2.1. Tek Eksenli Çekme Dayanımı İle İlgili Çalışmalar

Brace (1964) malzemelerin TEÇD'nı (doğrudan yöntem) belirlemek için kullanılacak en uygun numune geometrisinin dambıl (dog bone) şeklinde olması gerektiğini belirtmiştir. Hoek (1964) üç eksenli hücre içinde dambıl şekilli numunelerin eksenel çekme gerilmelerini belirlemiştir. Bu numunede boy/çap oranının 2-3 olması gerektiği sonucuna varmıştır. Çalışmada, doğrudan çekme deney numunesinin dambıl şeklinde olmadığı durumlarda silindirik numunenin üst noktasında (epoksi veya çimento bağlantı noktalarında veya yandan sıkıştırma ile bağlantı yapılan noktalarda) gerilme yığılması olduğuna, bunun sonucunda numune üst noktaya yakın bir yerden yenilerek geçersiz deney sonucu elde edildiğine işaret edilmiştir. Colback (1966) bazı araştırmalarda doğrudan çekme deneylerinde kullanılan numunelerin hazırlanmasındaki zorluklardan dolayı, uygun numunenin hazırlanamadığını ve kırılmanın numunenin merkezinin dışında gerçekleştiğini ve böylece geçersiz sonuçlar elde edildiğini belirtmiştir. Bu konudaki çalışmaların arttırılabilmesi için Brezilya yöntemini kabul edilebilir bir çözüm olarak düşünmüştür. Daha sonra Brezilya deney yöntemi konusunda yaptığı çalışmalarda çatlağın görünümünü göstermek için düzeltilmiş Griffith yenilme kriteri teorisini kullanmıştır. Yaptığı çalışmalar sonucunda testin doğru olabilmesi için çatlağın disk numunenin merkezinde başlaması gerektiğini belirtmiştir. Belirli koşullar altında, çatlağın ilk yükleme noktasında başladığı durumlarda testin geçersiz olduğunu vurgulamıştır. Kırılmanın doğruluğunu belirlemek için her testten sonra numunenin kontrol edilmesi gerektiğini önermiştir. Gorksi (1993), ABD'de, özellikle gevrek malzemeler için doğrudan ÇD testinde kullanılmak üzere eksantrik yük altında kendiliğinden merkezlenen bir aparat (deney düzeneği)

için patent almıştır. Geliştirdiği düzenek Brace (1964)'in önerdiğine benzer olarak basma kuvveti altında dambıl şekilli numunelerin çekme gerilmesine maruz kalacağı şekilde tasarlanmıştır. Nott (2009) tarafından yapılan çalışmada yapay kaya örnekleri üzerinde TEÇD ve BÇD değerleri belirlenerek sayısal modelleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Dambıl deney numuneleri ile belirlenen ÇD değerleri, kırılma numunenin bağlantı noktalarından gerçekleştiği için uygun bulunmamıştır. Klanphumeesri, 2010 yılında yaptığı tez çalışmasında dambıl şekilli kaya örneğine dolaylı çekme gerilmesi uygulamak için yeni bir yükleme cihazı (aleti) geliştirmiştir. Alet aynı örnek üzerinde tek eksenli çekme ve basma gerilmeleri altında kayanın elastiste modülünü ve Poisson oranını ölçmeye yararmaktadır. Çalışmada kumtaşı, kireçtaşı ve mermer numuneleri kullanılmıştır. Dolaylı çekme gerilmelerinin numunenin ortasında gerçekleşmesini sağlayacak numune konfigürasyonunu belirlemek için bir dizi sonlu farklar analizi yapılmıştır. Alzo'ubi vd. (2010) tarafından yapılan ve ÇD'nın devrilme şeklinde yenilen kaya kütleleri üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmada ÇD'nın yenilme mekanizmasında kilit rol oynadığı tespit edilmiştir. Ünlü ve Yılmaz (2014) yaptıkları çalışmada silindirik kayaçların doğrudan ÇD'nı belirlemek için ISRM standartlarına uygun yeni bir deney düzeneği önermişlerdir. Bu düzeneği kullanarak doğrudan ÇD deneyleri yapmışlardır. Elde ettikleri değerlerin kayaçlarda TEÇD değerleri yerine kullanılabileceğini ve BÇD deneylerine göre daha güvenilir olduğunu belirtmişlerdir. Daha sonra sayısal çözümler yaparak numune çevresindeki maksimum asal çekme gerilmesi, örnek kesit alanından hesaplanan ortalama asal gerilmeden 1,5 kat daha büyük olduğundan, gerçek dayanım değerinin bu katsayı ile çarpılarak düzeltilmesi gerektiğini önermişlerdir. Jensen (2016) tarafından farklı sedimanter kayaçlar için ASTM standartlarına göre çekme dayanımlarının belirlendiği tez çalışmasında, farklı deney metotları uygulanarak ÇD'nda boyut etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmada TEÇD sonuçları, BÇD sonuçlarına göre daha düşük ve daha doğru çıktığı belirtilmiştir. Tufekci vd. (2016) yaptıkları çalışmada TEÇD'nı belirlemek için yeni bir çene kavrama mekanizması geliştirmişler ve dambıl şekilli numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları ile BÇD sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sonlu elemanlar metodu yardımıyla numerik modelleme çalışmaları yapılarak gerilme dağılımını ve yoğunluğunu

belirlemişlerdir. Komurlu vd. (2017) tarafından doğrudan çekme deneyinde dambıl şekilli numunelerde numunenin ve numuneyi kavrayacak çelik aparatın geometrisinin çekme deneyi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik modelleme çalışmaları yapılmıştır. Ardından 3 farklı kayaç grubu ve beton numunesi için doğrudan çekme deneyleri uygulanarak modelleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre minimum 3,2 cm çap ve çap geçiş bölgesi 63°lik açı yapacak şekilde incelen dambıl numune geometrisini, hem nümerik hem de deneysel olarak en uygun geometri olarak belirlemişlerdir. Wu vd. (2018) tarafından güçlendirilmiş (çelik donatı ve reçine) kaya örnekleri üzerinde çekme davranışını incelemek için yapılan deneysel çalışmada kumtaşı, granit, mermer ve şist numuneleri kullanılmıştır. Doğrudan çekme deneyleri uygulanarak güçlendirme işleminin çekme dayanımı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

2.2. Brezilya Dolaylı Çekme Dayanımı ile İlgili Çalışmalar

Brezilya deneyi (*Brazilian splitting test*), kayaçların ÇD'nı belirlemede yıllardır kullanılan en yaygın dolaylı yöntemdir. Bu konuda birçok araştırmacı bu yöntemin doğruluğu, doğrudan çekme değerini temsil edip etmediği ve pratikte kullanılabilirliği ile ilgili birçok çalışma yapmış ve elde ettikleri sonuçları tartışmışlardır.

İlk olarak Carneiro (1943) betonların çekme dayanımını belirlemek için Brezilya yöntemini önermiştir. Daha sonra ISRM (1978) kayaların dolaylı ÇD'nı belirlemek için bu yöntemi önermiştir. Akazawa 1943 yılında Carneiro ile aynı zamanda ve ondan habersiz olarak Japonya'da Brezilya test yöntemine benzer bir yöntem önermiştir. Hondros (1959) malzemenin homojen, izotropik ve lineer elastik olduğu kabulle analitik olarak yükün çapsal sıkıştırma ile sonlu çeneler üzerinde dağıtıldığı durum için tam bir gerilme çözümü sunmuştur (düzlemsel gerilme ve düzlemsel deformasyon koşullarında). Kayaçalarda Brezilya çekme deneyinin ilk uygulaması Berrenbaum ve Brodie (1959) tarafından yapılmıştır. Hobbs (1964; 1965 ve 1967) ise halka deneyi (ring test) üzerinde araştırmalar yapmış ve elde ettiği sonuçları Brezilya test sonuçları ile

karşılaştırmıştır. Fairhurst (1964) genelleştirilmiş Griffith yenilme kriterini Brezilya testine uygulamıştır. Yaptığı çalışmalarda düşük oranda basma ve çekme gerilmeleri arasında malzemelerin küçük açılı çapsal yükleme durumlarında kırılmanın disk merkezinden uzakta görülebileceği sonucuna varmıştır. Brezilya test yönteminde elde edilen çekme gerilmesi değerinin gerçek değerden biraz daha düşük olduğunu belirtmiştir. Jaeger ve Hoskins (1966) ve Jaeger (1967) basma gerilmelerini kullanarak çekme gerilmesini belirleyebilmek için üç farklı ölçüm yöntemini karşılaştırmışlardır. Hesaplanan maksimum çekme gerilmesinin, malzemenin TEÇD'na bağlı olduğunu bulmuşlardır. Hudson (1969) ÇD'nı elde edebileceği iki dolaylı yöntem olan Brezilya deneyi ile halka deneyini karşılaştırdığı çalışmada çekme dayanımının malzeme özelliği değil de deneysel bir özellik olduğunu vurgulamıştır. Mellor ve Hawkes (1971) ilk yükleme noktalarındaki deformasyonu azaltmak için kavisli çeneleri tasarlamışlardır. Yaptıkları araştırmalarda ÇD değerini belirlemek için Brezilya testinin uygun bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Yanagidani vd. (1978) tarafından yapılan çalışmada Brezilya diskinde çatlak başlangıcını belirleyebilmek için gerinim ölçerler kullanılmış ve çatlağın yükleme noktasından başlamadığı, çekme gerilmesi zonundan başladığı gözlemlenmiştir. ISRM, kayaçların çekme dayanımını belirlenmesi için Brezilya yöntemini önerdikten sonra 1979-1991 yılları arasında oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yıllarda anizotropi, basma ve çekme gerilmeleri altında lineer olmayan deformasyon karakteristikleri, boyut etkisi gibi konularda birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır (Lajtai, 1980; Sundaram ve Corrales, 1980; Pandey ve Singh, 1986; Satoh, 1987; Newman ve Bennett, 1990; Bazant vd., 1991). Pandey ve Singh (1986) çekme gerilmelerindeki deformasyon karakteristiğini analiz etmişler ve Brezilya testinden elde edilen çekme gerilmelerinin doğrudan yöntemden elde edilen değerlerden 2 kat daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Buna bağlı olarak, çekme gerilmesinin aslında deneysel bir özellik olduğunu, malzemenin karakteristik özelliği olmadığını iddia etmişlerdir. Andreev (1991) Brezilya testinde malzemelerin ÇD'nı belirlemek için tek eksenli basma ve çekme gerilmeleri arasındaki oranı kullanarak mevcut formülü revize etmiştir. Yaygın olarak kullanılan Brezilya test yönteminin geliştirilmesi ve kullanılan

eşitliğin modifiye edilmesi konusundaki çalışmalar 1992 yılından günümüze kadar devam etmektedir. Bu konuda birçok araştırmacı deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar yapmışlardır. Örneğin, bazı araştırmacılar Brezilya deneyinde asal gerilmelerin etkisini 3D nümerik model tekniklerini kullanarak analiz etmişler (Yu ve Meng, 2005; Yu vd., 2006; 2009), bazıları ise anizotropinin etkisini deneysel, analitik ve nümerik olarak incelemişlerdir (Chen vd., 1998; Exadaktylos ve Kaklis, 2001; Claesson ve Bohloli, 2002; Cai ve Kaiseri 2004; Chou ve Chen, 2008; Tavallali ve Vervoort, 2010a, b). Bazı araştırmacılar ise, yükleme plakaları ile deney numunesi arasındaki sürtünme kuvvetinin gerilme dağılımı ve numunenin yenilme modu üzerindeki etkisini deneysel, analitik ve nümerik incelemişlerdir (Lavrov ve Vervoort, 2002; Xu vd. 2006; Markides vd., 2011; Dorogoy ve Banks-Sills, 2005). Yu (2005) yaptığı 3 boyutlu sonlu elemanlar (Finite Element Method, FEM) analizlerine göre kaya gibi malzemelerin çekme gerilmelerinin belirlenmesinde en büyük eşdeğer gerilmelerin numunenin merkezinde değil de yükleme noktalarında meydana geldiği için Brezilya testinin uygun olmadığını belirtmiştir. Aydın ve Basu (2006) Brezilya testinde çapsal gerilme-deformasyon eğrisi kullanarak magmatik kayalarda ayrışmanın ve buna eşlik eden mikro yapısal zayıflama üzerinde çalışmışlardır. Yu vd. (2006) Brezilya diskinin numune kalınlığı dikkate alınmadığında dolaylı ÇD için sunulan formülün hatalı olduğuna dikkat çekmişlerdir. Yapılan 3D FEM gerilme analizi Brezilya testinde disk kalınlığı arttığında boyut/şekil etkisi ortaya çıktığını göstermiştir. Ye vd. (2009)' nin çalışmasında Brezilya testinde gerinim ölçerler kullanılarak kayacın çekme Elastiste modülünün elde edilmesi için analitik bir formül ve deneysel bir metot sunulmuştur. Çekme elastiste modülünün basma elastiste modülüne oranları mermer, kumtaşı, kireçtaşı ve granit için yaklaşık % 60-90 arasında çıkmıştır. Lanaro vd. (2009) Brezilya deneyinde sınır elemanlar metodu (Boundary Element Method, BEM) kullanarak gerilme dağılımlılarını incelemişler ve başlangıç çatlaklarının etkisini tartışmışlardır. Brezilya deneyinde kaya örneğinin çatlak başlangıcı ve dağılımı dolaylı çekme yüklemesine bağlı olarak modellenmiştir. Yu vd. (2009) gerilme yığılmasını azaltmak için yükleme noktalarında iki özel parça kullanılarak modifiye edilmiş bir Brezilya testi önermişlerdir. Test edilen malzemenin ÇD'nın, geleneksel Brezilya testinden

ciddi ölçüde düşük bulunduğuna dikkat çekilmiştir. Markides vd. (2010, 2011) tarafından yapılan çalışmalarda üniform dağıtılmış radyal yük altında Brezilya diskindeki gerilmeler ve yer değiştirmeler için çözümler (closed full-field) verilerek yükleme bölgelerinde sürtünme geriliminin üniform dağılımının etkisi araştırılmıştır. Çatlağın numune merkezinden değil de yük temas noktalarının yanından başlayabileceğine dikkat çekilmiştir. Disk malzemenin homojen, izotropik ve doğrusal elastik olduğu varsayılmıştır. Analitik inceleme için problem, düzlemsel gerilme problemi olarak değerlendirilmiştir. Erarslan ve Williams (2011) çevrimsel (tekrarlı) yüklenen çapsal basınç altındaki Brisbane tufü disk numunelerinde gerilme-deformasyon karakteristiğinin araştırılabilmesi için deneysel sonuçlar üretmişlerdir. Brezilya testi için çevrimsel yükleme koşullarının, tufünün dolaylı ÇD değerlerinde % 33-37'lik bir azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Erarslan vd. (2011) Brisbane tufünde Brezilya testi için standart çeneler ile farklı türlerde yükleme yay açlarına sahip çenelerin farklarını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Kaya malzemesinin dolaylı çekme testinde en iyi yükleme geometrisi $2\alpha=20^\circ$ ile 30° arasında bulunmuştur. Li ve Wong (2013) yaptıkları çalışmada Brezilya deneyinde kırılmanın numunenin merkezinden başlaması gerektiğine ve yenilmeye maksimum gerilmenin neden olduğuna dikkat çekmişlerdir. Ayrıca Brezilya testinde, tek eksenli çekme gerilmesi yerine iki eksenli gerilmeden dolayı kayaçların çekme gerilmelerinin değerinden fazla tahmin edilebildiğini, bu nedenle de Brezilya deneyinin asla kayaçların tek eksenli çekme gerilmesi yerine geçemeyeceği belirtmişlerdir. Li ve Wong (2013) Brezilya testinde çatlak başlaması ve ilerlemesinin hala güncel bir konu olduğunu ve bu konudaki çalışmaların sayısının arttırılarak yenilenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Karaman vd. (2014), Trabzonda inşa edilen bir tünelin farklı noktalarından temin ettikleri numuneler üzerinde nokta yük dayanım indeksi ve Schmidt sertliği deneyleri yaparak tek eksenli basma ve çekme dayanımı değerlerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Ayrıca araştırmacılar, geçmiş çalışmalarda toplanan verileri de kullanarak ayrıntılı bir regresyon analizi yapmışlardır. Perras ve Diederichs (2014) yaptıkları çalışmada TEÇD ile BÇD arasındaki ilişkiyi ve diğer yöntemlerden (çatlak başlangıcı gibi) ÇD'nın tahmin edilebilirliğini incelemişlerdir. Literatür incelemelerinde gerçek ÇD

değerlerinin, diğer laboratuvar testlerinden tahmin edilebilmesinin zor olduğu görülmüştür. ÇD'nın TEBD değerinden tahmin etmeye yönelik çalışmalarda hatalı sonuçlar sunulduğunu vurgulamışlardır. Çatlak başlangıcı ile ÇD arasında, kaya türüne bağlı olarak, TEÇD ile BÇD arasındakine benzer bir ilişki tespit edilmiştir. Komurlu ve Kesimal (2015), 17 farklı kayaç türü üzerinde 4 tür yükleme levhası (düz, standart çene, $2\alpha = 15^\circ$, $2\alpha = 30^\circ$) kullanarak BÇD üzerinde yükleme tipinin etkisini incelemişlerdir. Genel olarak yükleme levhası ile numune arasındaki kontak açısı arttığında, ilk çatlak başlaması için gereken gerilme ile yenilme gerilmesi arasındaki farkın arttığı gözlemlenmiştir. 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 tipini seçilmesinin uygun olacağı önerilmiştir. Briševac vd. (2015) malzemelerin ÇD ve Brezilya deneyi ile ilgili çok sayıda bilimsel çalışmaların yapıldığını, ama hala pratik yaklaşımların yapılamadığını belirtmiştir. Bu nedenle bütün malzemelere yönelik optimum sonuçların elde edilebilmesi için Brezilya deneyi ile dolaylı ÇD değerlerinin tahmini için daha doğru düzeltme katsayılarının belirlenmesi gerektiğini önermiştir. Garcia vd. (2017) beton numuneleri üzerinde farklı yükleme geometrileri ve numuneye temas açıları, disk çapı ve kalınlığı, maksimum agrega boyutu gibi değişkenlerin BÇD üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Minaeian ve Ahangari (2017) TEBD ve BÇD ile nokta yük dayanımı arasındaki korelasyonları inceledikleri çalışmalarında TEBD ile nokta yük dayanımı arasında, BÇD'na kıyasla daha yüksek korelasyonun olduğu tespit edilmiştir. Ma ve Huang (2018) tarafından yapılan çalışmada BÇD'nda deneyin geçerliliğinin 2 farklı senaryoya dayandığı, senaryo 1' e göre yenilmeye diskin merkezinde başlayan çekme çatlaklarının neden olduğu, senaryo 2' ye göre ise yükleme bölgesinde meydana gelen kırılma zonunda zuhur eden çatlakların ilerlemesiyle yenilmenin gerçekleştiği belirtilmiştir. Han vd. (2018) yaptıkları çalışmada kayaçlarda birim deformasyon ölçerler kullanarak tek bir Brezilya testinde Young modülünü, Poisson oranını ve ÇD'nı belirlemişler ve elastik özellikleri hesaplamada kullanılacak yeni formüller önermişlerdir. Patel ve Martin (2018) tarafından yapılan çalışmada kayaçlar basma ve çekme

gerilmeleri altında farklı Young modülü ve Poisson oranları göstermişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada dijital görüntü korelasyonu tekniği ile Brezilya diskinin düz yüzeyindeki yer değiştirmeleri kaydederek çekme gerilmesi altında Young modülünü ve Poisson oranlarını belirlemişler ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisini içeren yeni formülasyonlar türetmişlerdir.

Bazı araştırmacılar da anizotropinin (tabaka yönelimi) dolaylı ÇD'na etkisi konularında çalışmalar yapmışlardır. Chen ve Hsu (2001), anizotropik özellik gösteren kayaçların dolaylı ÇD'nı belirleyebilmek için halka yöntemini (ring test) kullanmışlardır. Merkezinde küçük bir delik bulunan ince disk numunelerde delik çapının ve foliasyon eğim açısının dolaylı ÇD'na etkisini araştırmışlardır. Zhu ve Tang (2006) tarafından yapılan çalışmada, heterojen kayada statik ve dinamik yükleme koşullarında kaya yenilme proses analizine (RFPA) bağlı olarak Brezilya diskinin deformasyon ve yenilme süreci açıklanmaya çalışılmıştır. Çalışmada malzeme özelliklerinin Weibull dağılımına uyduğu farz edilerek kayanın heterojenliği göz önünde bulundurulmuştur. Tavallali ve Vervoort (2010a, b) BÇD'nda izotropinin ve yenilme paterninin etkisini incelemişlerdir. Mikro ölçek parametrelerinin makro ölçek davranışa etkisinin tartışıldığı çalışmada belirgin tabakalı kumtaşındaki üç farklı çatlak türü (tabaka aktivasyonu, merkezi çatlaklar ve merkezi olmayan çatlaklar) gözlemlenmiştir. Jianbing vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada kireçtaşı numunelerinde tabakalanma eğimlerine göre BÇD değerleri belirlenmiş ve açılara bağlı olarak yenilme tipleri bulunmuştur. Zhang vd. (2017) tarafından çalışmada BÇD ve akustik emisyon deneylerinde yükleme yönüne bağlı olarak farklı tabaka yönelme durumlarında (farklı açılarda) anizotropik şist numunelerinin karakteristikleri incelenmiştir. Wang vd. (2017) şeyl numuneleri üzerinde anizotropik çekme davranışını inceledikleri çalışmalarında Brezilya testinde sistematik olarak gerinim hızlarını değiştirmişler ve tabakalanma düzlemlerinin yükleme doğrultusu ile yaptıkları açıya bağlı olarak dolaylı ÇD'nın değişimini araştırmışlardır. Kundu vd. (2017) tabakalı şistik kayalarda kuru ve suya doygun olarak dolaylı ÇD altında deformasyon davranışını ve kırılma biçimini deneysel olarak incelemişlerdir. Wang vd. (2018)'de yine anizotropi durumunun tünellerde ve madenlerde süreksizlikler içeren kaya kütlelerinin

çekme davranışını nasıl etkilediğini araştırmak için BÇD testine dayanan bir dizi deneysel çalışma yürütmüşlerdir.

Bazı araştırmacılar statik ve dinamik dolaylı çekme deneyleri konularında çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Örneğin Gomez vd. (2001) granit ve beton numunelerinde statik ve dinamik dolaylı çekme testleri uygulayarak statik deneyde dayanımın yükleme doğrultusunda oluşan hasarla ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir. Dinamik gerilme alanının statik gerilme alanına benzemesi nedeniyle dinamik ÇD'nın statik deneyler yardımıyla hesaplanabileceğini vurgulamışlardır. Malik vd. (2017) yaptıkları çalışmalarında bazalt numuneleri üzerinde farklı yükleme hızlarında statik ve dinamik dolaylı ÇD değerlerini belirlemeye çalışmışlardır. Elde ettikleri verilere göre düşük yükleme hızlarında numune boyutunun etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Zhou ve Zhu (2017) tarafından 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapay malzemeler üzerinde TEBD deneyleri yapılarak kayayı en uygun taklit edebilecek yapay malzeme belirlenmiş ve bu malzeme üzerinde statik ve dinamik BÇD testleri uygulanarak 3D yazıcı teknolojinin bu alana uygulanabilirliği araştırılmıştır. Li vd. (2018) statik ve dinamik yarmada halka deneyinde (splitting ring test) sert kayanın yenilme prosesini nümerik analiz çalışmaları yardımıyla araştırmışlardır. İlk olarak statik yükleme altında Brezilya diskinin benzetimi yapılmış ve sonrasında yazılım yardımıyla dairesel halka numunesi üzerinde statik ve dinamik yükleme koşullarında farklı iç çap/dış çap oranlarında nümerik olarak yenilme prosesi incelenmiştir.

Bazı araştırmacılar ise, BÇD ile TEÇD değerlerinin karşılaştırılması ve kırılma tokluğu konularında çalışmalar yapmışlardır. Guo vd. (1993) tarafından yapılan çalışmada Brezilya diski testinin çatlak mekaniği analizi ile kayaçların kırılma tokluğunu ölçmek için yeni bir hesaplama formülü ve test metodu önerilmiştir. Çekme çatlağının merkezden başlayıp basma çapı boyunca dışa doğru ilerlediği kabul edilmiştir. Erarslan (2017), statik çapsal gerilme altında kaya ve beton numunelerinde mod-I, mod-II ve mod I-II kırılma tokluğu değerlerini v- çentikli Brezilya diski yöntemi kullanarak incelemiştir. Han vd. (2017) doğrudan ve dolaylı çekme gerilmeleri altında çatlak prosesini (başlangıç, mod-I çatlak

ilerlemesi vs.) numerik analiz çalışmaları kullanarak incelemişlerdir. Hua vd. (2017), merkezinde çatlak oluşturulmuş ve çatlaksız Brezilya disk numunelerinde (kumtaşı) mod-II kırılma tokluğu ile ÇD arasındaki ilişkileri farklı koşullar altında incelemişler ve bu iki kayaç parametresi arasında güçlü doğrusal ilişkiler bulmuşlardır. Wei vd., (2018) laboratuvar deneyleri ve numerik modelleme çalışmaları ile mod I ve mod II kırılma tokluğu değerlerini belirleyebilmek için v- çentikli Brezilya diski testini kullanmışlar ve çatlak prosesini izleyebilmek için akustik emisyon tekniğini kullanmışlardır. Wang ve Cao (2018) 4 farklı Brezilya test metodunun (herhangi bir tampon olmadan düz yükleme levhası, küçük çaplı çelik çubuklar ile, kavisli çeneler ile ve düzleştirilmiş Brezilya numunesi ile) geçerliliğini ve gerçekliğini araştırdıkları çalışmalarında, kumtaşı ve granit numuneleri üzerinde hem TEÇD testlerini, hem de 4 farklı Brezilya deney yöntemi ile dolaylı çekme testlerini uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre; düz yükleme levhası kullanılan yöntemin ve küçük çaplı çelik çubuklar kullanılan yöntemin kayaçlarda dolaylı ÇD için uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Fakat kavisli çeneler kullanılan deney yönteminde dolaylı ÇD değerinin olduğundan yüksek bulunması nedeniyle çok dikkatli bir şekilde uygulanması gerektiği, düzleştirilmiş Brezilya numunesi ile yapılan deney yönteminin ise uygun olmadığı sonuçlarına varılmıştır. Cacciari ve Futai (2018) betonlarda yerinde çekme testi için kullanılan bir yöntemi (pull-off test) 6 farklı kayaç örneği üzerinde deneyerek TEÇD ve BÇD değerleri ile karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre yöntemin, kayaçlarda yerinde test yapılması gereken durumlar için ve süreksizlikler içeren heterojen kayaçların ÇD'nı belirlemede pratik olarak kullanılabileceğine işaret etmişlerdir.

Kaya mekaniğinde BÇD deneyi konusunda yaklaşık 70 yıldır yapılan araştırmalar sonucunda; sonraki sayfada verilen 5 adet soru (Li ve Wong, 2013) üzerinde odaklanıldığı tespit edilmiştir;

1. Kayaların ÇD'nı belirlemede neden en çok Brezilya testi kullanılmaktadır?
2. BÇD deneyinde kullanılan disk numunenin içindeki gerilme dağılımı nasıldır?
3. BÇD deneyinde kullanılan disk numunede çatlak başlama noktası nerededir?
4. Hangi kriterler Brezilya disk numunesinde çatlak yayılmasını tanımlamak için kullanılabilir?
5. Daha doğru sonuçlar elde edebilmek için Brezilya test yöntemini nasıl geliştirebiliriz?

Bu belirtilen konular yıllardır birçok araştırmacı tarafından oldukça yoğun bir şekilde çalışılmış ve tartışılmıştır. Birçok araştırmacı çalışmalarında gerilme analizi yaparak incelemelerde bulunmuştur. Çok az araştırmacı ise deformasyon (strain) analizi yapmıştır.

Daha önceki deneysel çalışmaların sonuçları incelendiğinde Brezilya deneyi sonuçlarının doğrudan belirlenen ÇD değerlerinden bazen daha yüksek bazen daha düşük bazen ise hemen hemen aynı çıktığı görülmektedir. Literatürde yaygın bir algı olan dolaylı yöntemlerden elde edilen ÇD sonuçlarının doğrudan yöntemlerle belirlenen değerlerden yüksek çıkar fikrinin pek doğru olmadığı, Çizelge 2.1'de görülmektedir. Bu şekilde sonuçların farklı çıkmasının birçok nedeni olabilir. Bunlar; çatlak başlangıcının belirlenmemesi, gerilme yığılmalarının nerelerde olduğunun analizinin yapılmaması, deneylerin farklı cihazlarda yapılması veya universal olmaması (okuma hataları, cihaz hassasiyetleri) gibi. Bu nedenle bu konuda birçok çalışma yapılmasına rağmen hangi yöntemin uygun olduğu ve elde edilen değerlerin gerçek ÇD değerini temsil edip etmediği hala tartışılmaktadır.

Çizelge 2.1. TEÇD ve BÇD deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ünlü ve Yılmaz, 2014; Briševac vd., 2015; Cacciari ve Futai, 2018)

Kayaç tipi	σ_t (MPa)	σ_{tBrez} (MPa)	σ_{tBrez}/σ_t	Kaynaklar
Bowral trakit	13,72	12	0,87	Jaeger (1967)
Gosford kumtaşı	3,59	3,72	1,04	
Carrara mermer	6,9	8,72	1,26	
Bane granit	13,45	14,34	1,07	Mellor ve Hawkes (1971)
Indiana kireçtaşı	5,86	6,21	1,06	
Kumtaşı	2,96	7,8	2,64	Pandey ve Singh (1986)
Vitosha siyenit	20,5	21,05	1,03	Adreev (1991)
Gri jips	1,75	1,99	1,14	
Beyaz jips	1,42	1,29	0,91	
Gazbeton	0,86	0,54	0,63	Coviello vd. (2005)
Gravina kalkarenit	0,69	0,64	0,93	
Ufalei mermer	5,9	6,9	1,17	Efimov (2009)
Saraburi kireçtaşı	9,31	10,9	1,17	Fuenkajorn ve Klanphumeesri (2011)
Saraburi mermer	6,33	8,02	1,27	
Phu Phan kumtaşı	6,49	10,68	1,65	
Trakit	13,7	7,7	0,56	Perras ve Diederichs (2014)
Mermer	7,5	10,1	1,35	
Gnays	8,2	9,8	1,2	
Kuvarsit	16,3	13	0,8	
Granit	6,3	10,3	1,63	
Şist	13,3	11,8	0,89	
Şeyl	5,6	5,9	1,05	
Kireçtaşı	7,1	6	0,85	
Dolomit	5,7	8	1,4	
Kumtaşı	5,1	9,5	1,86	
Andezit	3,9	7,1	1,82	
Kumtaşı	6,8	8,9	1,31	
Beton	4,2	6,7	1,6	
Kireçtaşı	11,9	11,8	0,99	
Bazalt	10	13	1,3	
Yapay kaya-A	3,3	6,08	1,84	Ünlü ve Yılmaz (2014)
Yapay kaya-B	2,5	6,47	2,59	
Yapay kaya-C	2,8	5,72	2,04	
Yapay kaya-D	2	4,5	2,25	
Mermer	1,7	2,7	1,59	Cacciari ve Futai (2018)
Beyaz granit	4,92	6,51	1,32	
Kırmızı granit	6,66	7,76	1,17	
Andezit	13,91	16,77	1,21	

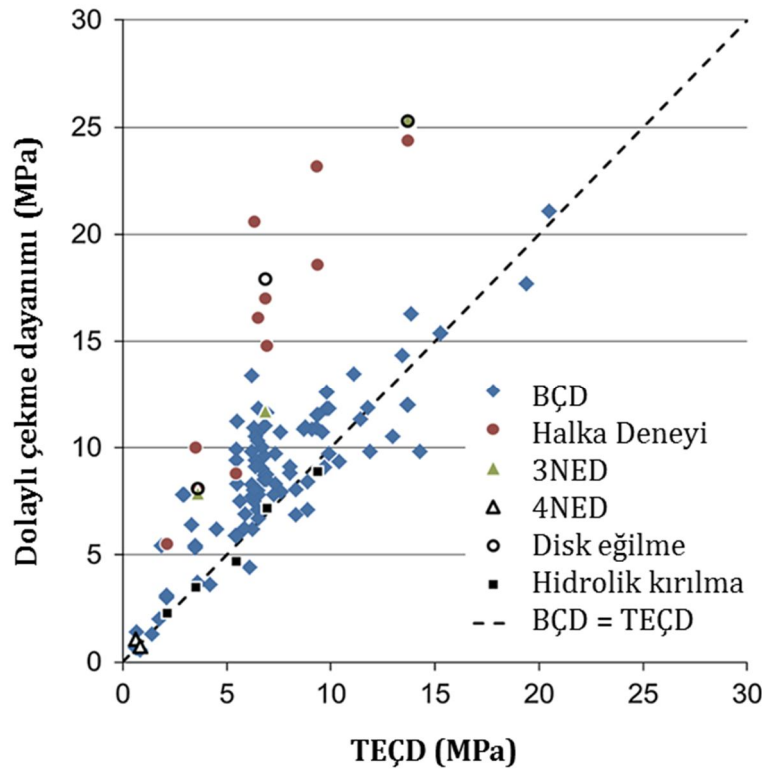
σ_t : Doğrudan (tek eksenli) çekme dayanımı; σ_{tBrez} : Brezilya dolaylı çekme dayanımı

2.3. Diğer Dolaylı Yöntemler ile İlgili Çalışmalar ve Genel Değerlendirme

Vutukuri (1974) halka deneyini kullanılarak kireçtaşının ÇD'nı belirlenmeye çalışmış ve kireçtaşlarının ÇD'nda sıvıların etkisini araştırmıştır. Çalışma sonucunda dielektrik sabitinin ve sıvının yüzey geriliminin artmasıyla çekme dayanımının azaldığını vurgulamıştır. Fuenkajorn and Daemen (1986) bazalt ve granit üzerinde 3 farklı delik çapında (38 mm, 76 mm ve 102 mm), uzunluğun çapa oranı 0,25 ve 0,30 olan ve deliğin yarıçapının disk yarıçapına oranı 0,25 ile 0,36 arasında değişen numuneler üzerinde halka deneyini uygulamışlar ve önerdikleri bir eşitlikle çekme dayanımını hesaplamışlardır.

Coviello vd. (2005); eğilme testlerinde yenilme noktasında oluşan çekme gerilmelerinin, sadece tek eksenli gerilmeler olmasına rağmen diğer dolaylı yöntemlerde yenilme noktasında oluşan çekme gerilmelerinin iki eksenli gerilmeler olduğunu ve bu nedenle malzemelerin çekme gerilmelerinin belirlenmesinde eğilme testlerinin daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca 3 ve 4 nokta eğilme deneyleri için kayalarda, yapı malzemelerinde, çimento ve beton gibi malzemelerde kabul edilebilir standartların olduğunu belirtmişlerdir. Gerçek ve Özarslan (2011) tarafından yapılan çalışmada, kaya malzemesinin ÇD için daha önce önerilen bir sınıflama sistemi genişletilmiştir. Planklang vd. (2017) tuz numuneleri üzerinde 4 nokta eğilme dayanımı deneyleri uygulayarak zamana bağlı ÇD değerlerini araştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre çekme gerilmesi altında tuzun elastik özellik gösterdiği ve zamana bağlı olarak deformasyonlara maruz kaldığı bulunmuştur. Razavi vd., (2018) karma mod çatlak davranışını önceden çatlatılmış granit numuneleri üzerinde asimetrik 4 nokta eğilme deneyleri uygulayarak deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Yu vd. (2018), 3 farklı tipte granit üzerinde ve farklı çentik uzunluklarında üç nokta eğilme testlerini kullanarak ÇD'nı ve kırılma tokluğunu hesaplamaya yarayan yeni bir metot önermişlerdir. Fan vd., (2019) tarafından yapılan çalışmada, 3NED deneyinde boyut etkisi incelenmiş ve eğilme dayanımı ile BÇD arasındaki ilişki araştırılmıştır. Granit üzerinde yapılan çalışmada, eğilme dayanımının BÇD'na oranı dikdörtgen kesitli numunelerde 3,81-4,26 arasında, silindirik kesitli numunelerde 3,14-3,48 arasında bulunmuştur.

Literatür incelendiğinde TEÇD ile alternatif dolaylı çekme dayanımlarının karşılaştırdığı birçok çalışma olduğu görülmektedir. Bunlar içerisinde Coviello vd. (2005)' nin çalışmasında yer alan birçok alternatif test sonucu kullanılarak Perras ve Diederichs (2014) tarafından yeniden düzenlenen grafik (Şekil 2.1) TEÇD ile alternatif dolaylı test yöntemlerinin karşılaştırılması açısından önemlidir. Şekil 2.1'den anlaşılacağı üzere TEÇD ile en yakın ilişki BÇD sonuçları ile görülmüştür. Ancak laboratuvar testleri yapılırken seçilen numunelerin aynı bloktan üretilmiş olup olmadığı, deney cihazlarının farklılıkları ve deneyleri gerçekleştirilenlerin hassasiyetlerinin aynı olamayacağı da göz ardı edilmemelidir.



Şekil 2.1. TEÇD ile alternatif dolaylı test yöntemlerinin karşılaştırılması, (Perras ve Diederichs, 2014)

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

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

Yapılan birçok çalışmanın sonuç veya öneri bölümlerinde bu ifadeler görülmektedir. Yani bilimsel çalışmalarda aradan yaklaşık 70 yıl geçmesine rağmen ÇD belirleme yöntemleri konusunda hala fikir birlikteliğinin olmadığı anlaşılmaktadır. Bu tezde literatürde araştırmacıların işaret ettikleri bazı eksikliklerin giderilmesi amaçlanmış olup bu kapsamda kayalarda ÇD değerlerinin doğru olarak nasıl belirlenmesi gerektiği konusu üzerinde odaklanılmıştır. Kayaçların ÇD değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılacak en uygun dolaylı yöntemler belirlenerek, teoride ve pratikte kullanılacak yaklaşımlar ve katsayılar önerilmiştir.

3. MATERYAL, YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez çalışması kapsamında incelenen ve kullanılan materyaller, izlenen yöntemler ve deneysel süreçler alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

3.1. Materyaller

Bu bölümde; tezde kullanılan kayaçlar, ÇD deneylerinde kullanılan cihaz ve yüksek hızlı çekim yapan kamera ile ilgili bilgiler yer almakta olup diğer tüm deneylere ait cihazlar “Yöntem” bölümünün içerisinde ele alınmıştır.

3.1.1. Tez kapsamında kullanılan kayaçlar

Tez kapsamında sedimanter, metamorfik ve magmatik olmak üzere 3 farklı jeolojik kökene sahip 9 farklı kayaç türü seçilmiştir. Kayaçların türleri, kökenleri, temin edildiği bölgeler ve tezde bundan sonraki süreçlerde kullanılacak olan kodları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Kayaçların temin edildiği bölgeler Şekil 3.1’deki yer bulduru haritasında temsili olarak gösterilmiştir. Tezde kullanılan kayaç türleri belirlenirken mümkün olduğu kadar farklı mineralojik yapının ve mekanik özelliklerin temsil edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca belirlenen kayaç türlerinden tezde ihtiyaç duyulan boyut ve adetlerde temin edilebilir olması da göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 3.1. Tezde kullanılan kayaçlar

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



Şekil 3.1. Kayaçların temin edildiği bölgeleri gösteren yer bulduru haritası

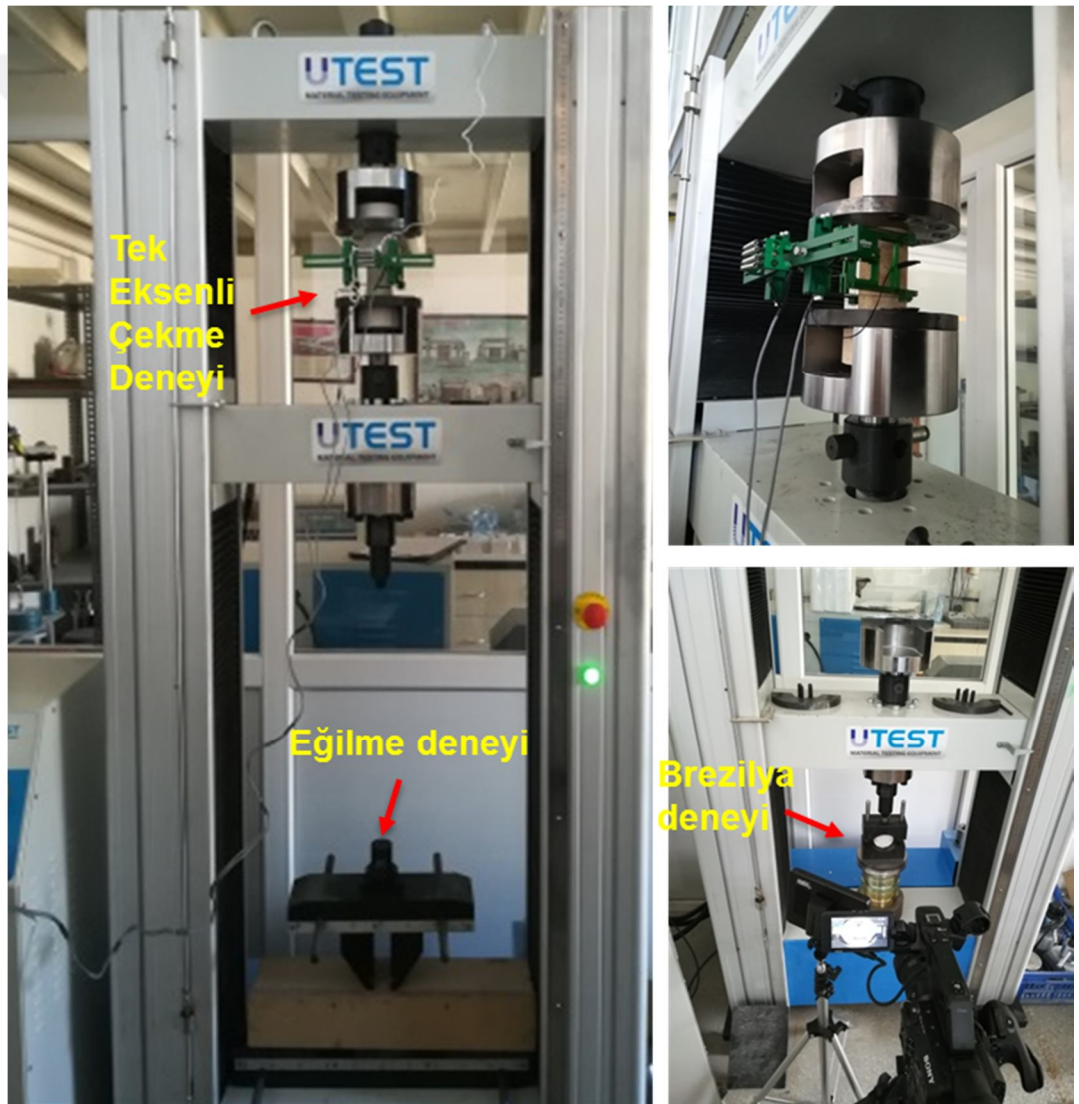
3.1.2. Deney cihazı

Malzemelerin mekanik özellikleri belirlenirken kullanılan cihazların farklılığı, deney sonuçlarının birbiri ile karşılaştırılmasının yapılacağı çalışmalarda önemli hatalara neden olabilmektedir. Doğru verilerin elde edilebilmesi için tüm deneylerin aynı cihazda yapılması sonuçların güvenilirliği açısından daha uygun olmaktadır. Kayaç gibi düşük çekme dayanımına sahip malzemeler yüksek kapasiteli (40-200 ton) ve analog göstergeli (veri toplama ve kaydetme özelliği olmayan) cihazlar kullanılarak test edildiğinde tutarlı verilerin elde edilemediği görülmektedir. Bu tez çalışması ile eşzamanlı yürütülmüş olan ve TÜBİTAK tarafından desteklenen 116M724 nolu proje kapsamında alınan hassas veri toplama özelliklerine sahip universal test makinası ile bu tarz hataların önüne geçilmesi hedeflenmiştir. UTEST marka Elektromekanik Universal Test Cihazı, tam otomatik PC kontrollü, 100 kN kapasiteli, basma, çekme, üç ve dört nokta eğilme testlerini yapmaya uygundur (Şekil 3.2). Test cihazının içeriğinde;

- 100 kN kapasiteli yük hücresi,
- 10 kN Kapasiteli yassı tip yük hücresi,
- Mekanik V yataklı Çekme Çenesi 1 set,
- Basınç plakaları,
- 3 nokta eğilme fikstürü,

- 4 nokta eğilme fikstürü,
- Elektronik kontrol ünitesi (1000 Hz),
- 220V, 50Hz, Epsilon Marka Ekstensometre, (50 mm ölçme uzunluğu, 0.001 mm doğrulukta, %100 gerilme özelliği, standart sıcaklık aralığı: - 40°C ile +100°C),
- Brezilya deneyi yükleme aparatı bulunmaktadır.

Böylece bütün doğrudan ve dolaylı çekme deneyleri aynı cihazda yapılarak hassas bir şekilde deneysel veriler elde edilmiştir.



Şekil 3.2. Elektromekanik universal test cihazı ve aparatları

3.1.3. Yüksek hızlı çekim yapan kamera

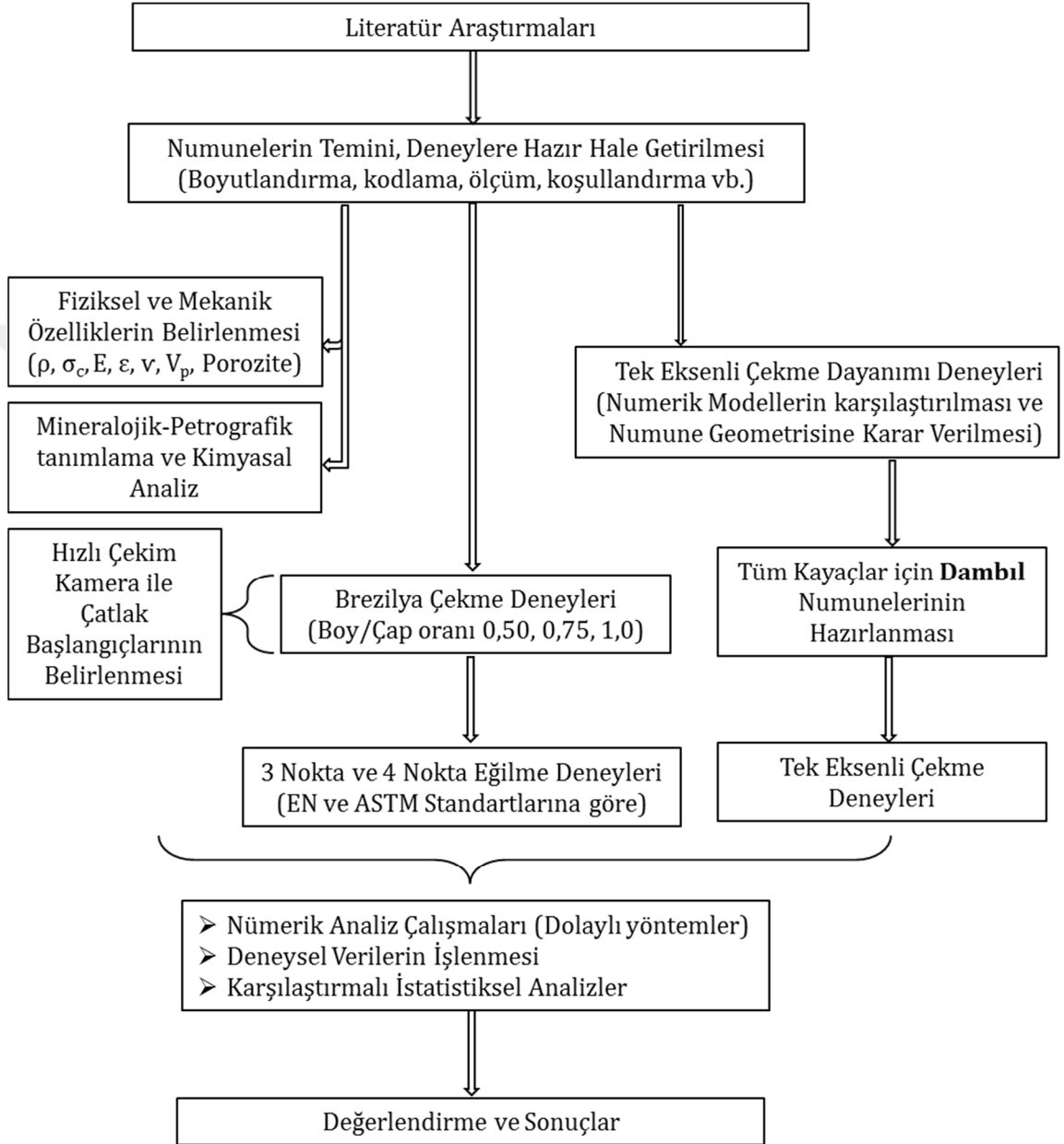
Bu tez kapsamında BÇD testlerinde çatlak başlangıçlarının nerede gerçekleştiğinin belirlenmesi amacıyla deneyler sırasında video kaydı alınmıştır. Tez çalışması ile eş zamanlı yürütülen TÜBİTAK 116M724 nolu proje kapsamında temin edilen Sony PXW-FS5K 4K Slow motion kamera ve ekipmanları bu amaçla kullanılmıştır (Şekil 3.3). Kamera Full HD 10 bit 4:2:2 görüntü kalitesinde 960 fps'ye varan kare hızında Yüksek Kare Hızlı (HFR) önbellek kaydı yapmaya imkân sağlamaktadır.



Şekil 3.3. Yüksek hızlı çekim yapan kamera

3.2. Yöntem ve Deneysel Çalışmalar

Tez süresince takip edilen tüm süreç Şekil 3.4'te verilen akım şemasıyla özetlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.4. Tez çalışmasının akım şeması

3.2.1. Deney numunelerinin temini ve hazırlanması

Tez çalışmasında kullanılan tüm kayaç türleri aynı zamanda ticari anlamda doğal taş olarak değerlendirildiğinden numunelerin temini aşamasında aynı kaya bloğundan boyutlandırılarak elde edilmesine özellikle dikkat edilmiştir. Bu kapsamda kayaçlar, önceden planlanan boyutlarda ve adetlerde aynı kaya bloğundan ilgili fabrikalarda dairesel testereler ile olabildiğince örselenmeden kesilerek hazırlanmış ve laboratuvar ortamına getirilmiştir. Numuneler olası problemler öngörülerek ihtiyaçtan fazla miktarlarda temin edildiği için tez süresince ilave numuneye ihtiyaç kalmamıştır. Çizelge 3.2’de tezde kullanılan numune boyutları, adetleri ve ilgili deneyler verilmiştir (Kimyasal analiz, petrografik tanımlama ve ön deneme çalışmalarında kullanılan numuneler hariç).

Çizelge 3.2. Tezde kullanılan numune boyutları ve sayıları

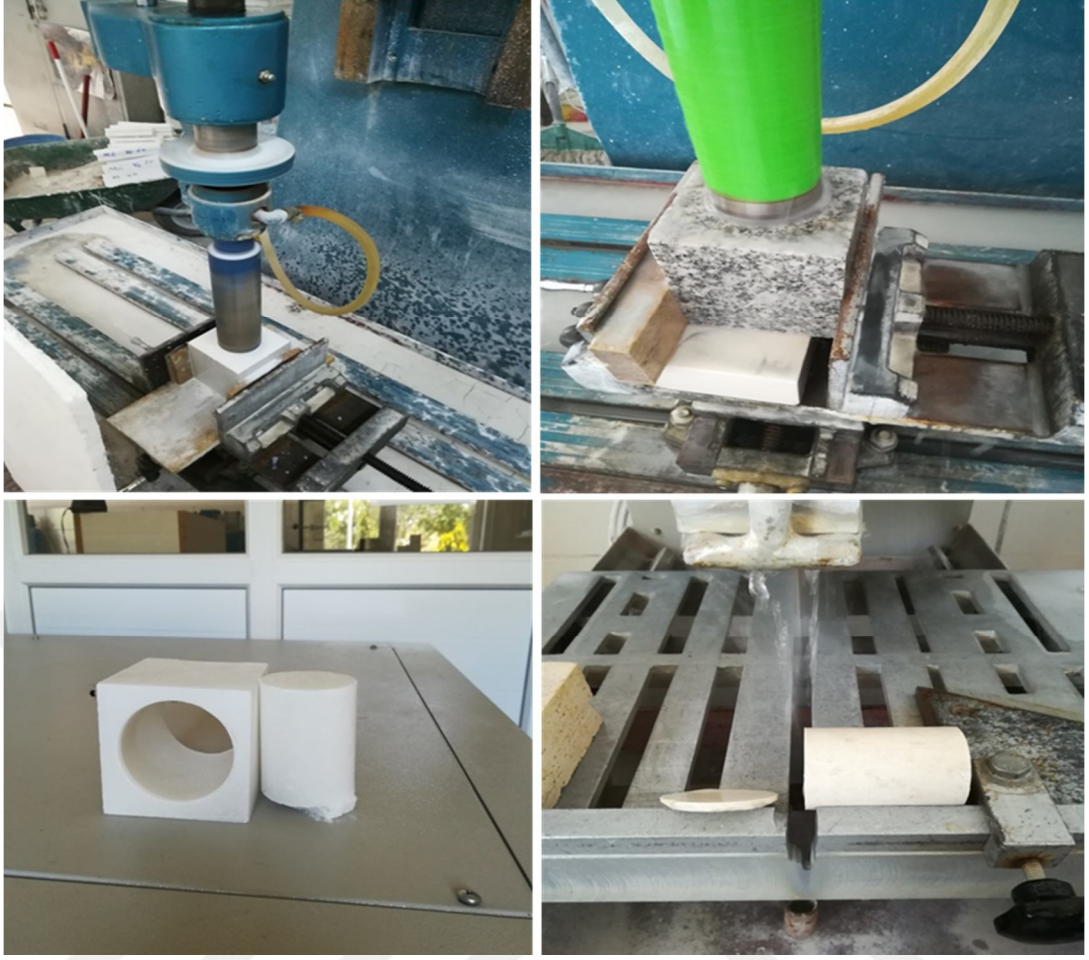
Numune Boyutları ~ (mm)	Min. Num. Adedi	İlgili Deney(ler)
Enxboyxyük.	50x50x50	24
	25x50x150	28
	50x50x300	28
	101,6x203,2x57,2	14
	32x102x250	14
	120x120x250	10
Boy/çap	27/54	12
	41/54	12
	54/54	12
	116/54	6

Her kayaç türü için en az 150, toplamda 1350 adet farklı boyutlarda numune kullanılmış olup 100’den fazla dambıl şekilli numune hazırlanmıştır. Temin edilen numunelerin bir kısmı ilgili standartlara göre yapılacak deneylere hazır durumda olduğundan herhangi bir işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır. Uygun olmayanlar ise SDÜ Maden Mühendisliği Kazı Mekaniği ve Doğal Taşlar Laboratuvarında baş kesme makinası ile gerekli boyutlara getirilmiştir. BÇD deneyleri için 80x80x80 mm boyutlarındaki küplerden, Elastisite modülü ve

Poisson oranı tayini amacıyla yapılan deneyler için de 100x100x120 mm boyutlarındaki prizmatik numunelerden otomatik karot alma makinası yardımıyla NX karotiyer (54 mm) çapında karotlar alınmıştır. Karot makinasından çıkan numunelerin alt ve üst yüzeylerinin birbirine paralel olması amacıyla sonrasında dairesel testere yardımıyla kesilerek düzeltilmiştir (ISRM, 1981 ve ASTM tarafından önerilen yöntemler dikkate alınmıştır). Şekil 3.5'te numune hazırlama çalışmalarına, Şekil 3.6'da karot alma çalışmalarına ait görüntüler yer almaktadır.



Şekil 3.5. Numune hazırlama çalışmalarına ait görüntüler



Şekil 3.6. Karot alma ve düzeltme çalışmalarından görüntüler.

3.2.1.1. Dambıl şekilli numunelerin hazırlanması

Tek eksenli çekme dayanımı deneylerinde kullanılan dambıl şekilli numuneler için 120x120x250 mm boyutlarında kare prizma şeklindeki kayaçlar ilgili firmalarda hazırlanmıştır (diğer tüm numuneler ile birlikte ve aynı zamanda). Daha sonra bu numuneler mermer fabrikalarında kullanılan ve kayaçlara istenen şekilleri vermeye uygun olan torna tezgahında işlenerek istenilen boyutlara ve şekillere getirilmiştir (Şekil 3.7). Dambıl numunelerin hazırlanması aşamalarında Kireçtaşları, Mermerler, Andezit, Tuf numunelerinde herhangi bir sorun yaşanmamıştır. Fakat Diyabaz ve Granit numunelerinden dambıl numune hazırlamak oldukça zahmetli olmuştur. Çünkü Türkiye’deki birçok işletmede sadece Kireçtaşı ve Mermer gibi yumuşak veya orta sert kayaçlar üzerindeki çalışmalara odaklandığından sert taş grubu ve aşındırıcılığı yüksek olan Granit ve Diyabaz gibi kayaçları işlemede güçlük çekilmektedir. Türkiye genelinde

birçok firma ile temasa geçilmesine rağmen olumsuz sonuçlar alınmıştır. Daha sonra, Afyon/İscehisar bölgesinde bir firma, torna sistemini bu kayalara (Granit ve Diyabaz) uygun olacak şekilde uyarlayarak dambıl numunelerin hazırlanması işleminin gerçekleştirilmesine yardımcı olmuştur. Dambıl numuneler için başlangıçta her bir kayaç türünden 10'ar adet 120x120x250 mm boyutlarında kare prizma numuneler temin edilmiş ve sonrasında bu numuneler torna makinelerinde işlenmiştir. Torna makinelerinde işleme esnasında özellikle magmatik kökenli kayalarda fire oranı artmıştır. Silis içeriğinin yüksek olması ve iri taneli yapılarda kırılma ve düzensiz aşınmalar olmuştur. Özellikle Tüf gibi bir kayacı tornada işlemek, başlıklara tutturmak oldukça problem olduğundan (dağılma özelliğinden dolayı) 10 numuneden ancak 5 adet deneylere elverişli numune elde edilebilmiştir. Diğer kayalarda ise 7 ile 10 arasında deneylere uygun numuneler hazırlanmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Dambıl şekilli numunelerin tornada hazırlanması



Şekil 3.8. Hazırlanan dambıl şekilli numuneler

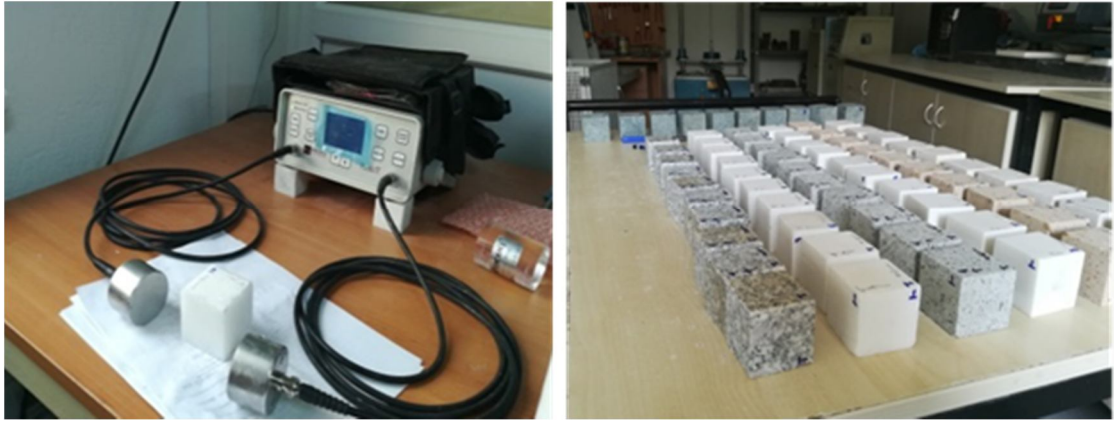
3.2.2. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi

Kayaçların yoğunluk, birim hacim ağırlık, görünür ve toplam porozite deneyleri TS EN 1936 (2010) nolu standarda göre, atmosfer basıncında ağırlıkça su emme (ASE) ve hacimce su emme (HSE) deneyleri ise TS EN 13755 (2014) nolu standarda göre yapılmıştır. Yoğunluk deneyleri, -200 µm altına öğütülmüş numuneler üzerinde ve her kayaç için 10'ar defa tekrarlanmak suretiyle yapılmıştır. Diğer deneyler ise kenar uzunluğu 50 mm olan 10'ar adet küp numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan cihazlara ve numunelere ait fotoğraflar Şekil 3.9'da verilmiştir.

Kayaçların P dalga hızı ölçümleri TS EN 14579 (2006) nolu standarda göre yapılmıştır. Deneylerde kenar uzunluğu 50 mm olan küp şeklinde 10'ar adet örnek kullanılmıştır. Sismik hız deneylerinde Pundit marka cihaz kullanılmış olup deneylere ait görüntüler Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Fiziksel özelliklerin belirlenmesine ait bazı fotoğraflar



Şekil 3.10. Sismik hız ölçümlerine ait görüntüler

3.2.3. Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) deneyleri TS EN 126 (2013) standardına göre yapılmış olup Elastisite modülü (E)-Poisson oranları (ν) ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre belirlenmiştir. Testlerde 200 ton kapasiteli hidrolik pres ve 8 kanallı veri toplama sistemi ile 120 ohm dirence sahip gerinim pulları (strain gauge) kullanılmıştır. Deneyler sırasında yükleme

hızları 0,5-1,0 MPa/s olarak seçilmiştir. TEBD deneylerinde, her bir kayaç için 5x5x5 cm boyutlarında en az 10 adet numune kullanılmıştır. Elastisite modülü ve Poisson oranlarının belirlenmesinde ise, 54 mm çapında ve boy/çap oranı 2-2,5 olan en az 6 adet düzgün karot numune kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan cihazların genel görünimleri Şekil 3.11’de sunulmuştur.



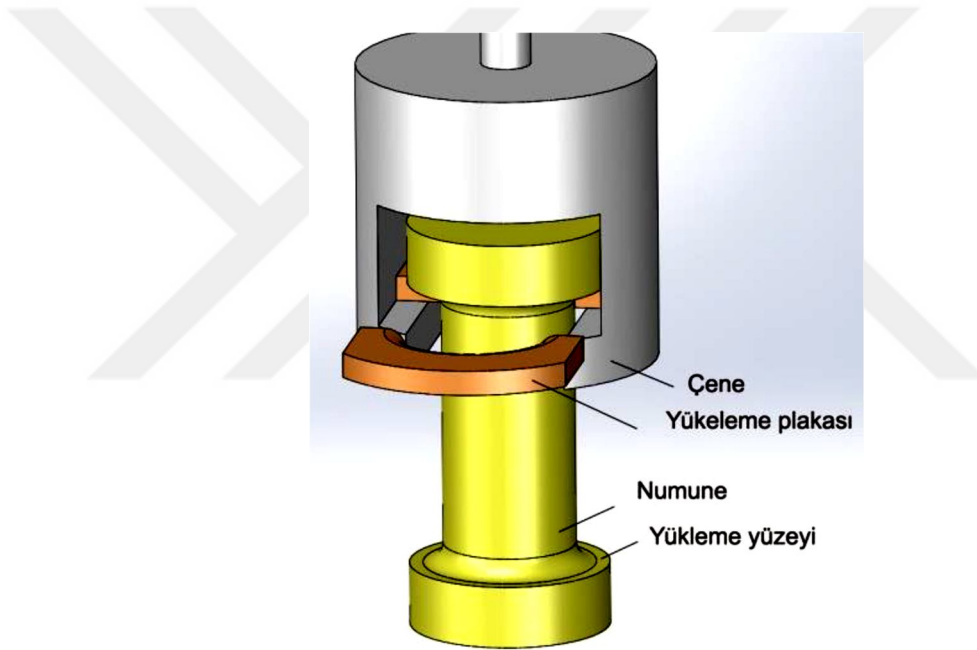
Şekil 3.11. TEBD ve Birim deformasyon deneylerine ait görüntüler

3.2.4. Petrografik tanımlama ve kimyasal analiz

Tez kapsamında çalışılan kayaçların kimyasal analizleri; hem SDÜ Kimyasal&Biyolojik Kazanım Laboratuvarında hem de Afyon Kocatepe Üniversitesi Akredite Doğaltaş Analiz Laboratuvarında XRF cihazıyla TS EN 15309 (2008) standardına göre yapılmıştır. Bu sayede sonuçların karşılaştırılması yapılarak olası hataların önüne geçilmiştir. Kayaçların mineralojik ve petrografik analizleri ise SDÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında TS EN 12407 (2013) nolu standarda uygun olarak yapılmıştır.

3.2.5. TEÇD deneyleri (Dambıl numune)

Bu tez çalışması kapsamında kayaçların TEÇD deneyleri önceki bölümlerde özellikleri verilen UTEST marka Elektromekanik Üniversal Test Cihazı ile gerçekleştirilmiştir. ASTM D 2936 (2008) standardında, numunenin 5 ile 15 dakika arasında yenilmesi sağlanacak şekilde yük uygulanması gerektiği belirtilmektedir. Bu nedenle TEÇD deneylerinde yükleme hızı ön deneme çalışmaları için 20 N/s, daha sonraki çalışmalarda numune türüne göre değişmekle beraber 5-15 N/s aralığında seçilmiştir. Deneylerde kullanılan çekme aparatının çizimi Şekil 3.12’de yer almaktadır.



Şekil 3.12. Deneylerde kullanılan çekme çenesi ve numuneye montajı

Direk çekme aparatı bir çene ve iki parçalı simetrik yükleme plakasından oluşmaktadır. Numune üzerine kuvvet, yüzeyi ile temasta bulunan yükleme plakalarıyla uygulanmaktadır. TEÇD değeri, yenilme anında uygulanan yükün (F), yük uygulanan kesit alanına (A) bölünmesi ile hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan dambıl şekilli numune geometrisinin tasarımı, karşılaşılan sıkıntılar, deneysel süreç ve nümerik analiz çalışmaları bu tezde ayrı bir bölüm olarak verildiğinden burada kısaca değinilmiştir. Şekil 3.13’te deneylerin genel görünümüne ait fotoğraflar yer almaktadır.



Şekil 3.13. TEÇD (dambıl) deneylerine ait bazı görüntüler

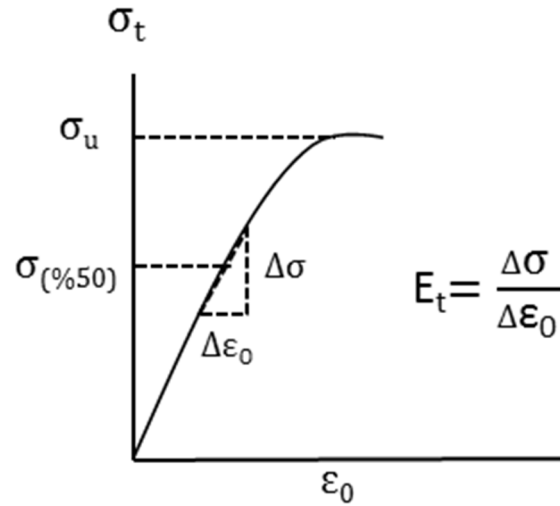
3.2.6. Tek eksenli çekme dayanımı deneyinde Elastisite modülünün tayini

Kayaçların tek eksenli çekme gerilmesi altındaki birim deformasyon değerleri, 50 mm ölçme uzunluğuna sahip ve 0,001 mm doğrulukta ölçüm yapabilen Epsilon marka Ekstensometre (Tübitak Projesi kapsamında alınan) ile bilgisayar kontrollü olarak ölçülmüştür (Şekil 3.14). Cihaz, deneyler sırasında 1 saniyede 100 veri toplayacak şekilde programlanmıştır. Elde edilen eksenel

birim deformasyon (ϵ_a) ve çekme dayanımı (σ_t) verilerinden Şekil 3.15'te örneği yer alan grafikler üretilmiştir. Grafikler üzerinden Tanjant Elastisite Modülü (E_t) değerleri ISRM (1981)'e göre hesaplanmıştır.



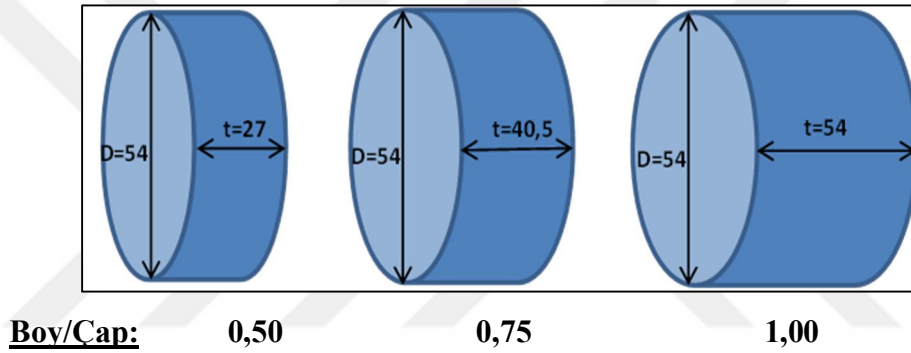
Şekil 3.14. Ekstensometrenin genel görünümü ve numuneye montajı



Şekil 3.15. Çekme yönünde oluşan aksel birim deformasyon-çekme gerilmesi eğrisinden elastisite modülü değerinin hesaplanması

3.2.7. Brezilya dolaylı çekme dayanımı deneyi

Brezilya dolaylı çekme dayanımı (BÇD) (splitting tensile strength) deneyinde, TS 7654 standardına göre yükleme hızının 3,5 ile 20 MPa/dak arasında, kalınlığın çapa oranının (t/D) 0,5 ile 1,0 arasında olması gerektiği belirtilmektedir. ASTM D 3967 standardına göre ise yükleme hızı 0,05 ile 0,35 MPa/s arasında, (t/D) oranının 0,2 ile 0,75 arasında olması önerilmektedir. ISRM (2007) tarafından önerilen metoda göre kalınlığın yarıçapa eşit olması ve yükleme hızının 200 N/s olması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında deneyler 0,5, 0,75 ve 1,0 olmak üzere 3 farklı boy/çap (t/D) oranında yapılmış, yükleme hızı 200 N/s olarak seçilmiştir (Şekil 3.16).

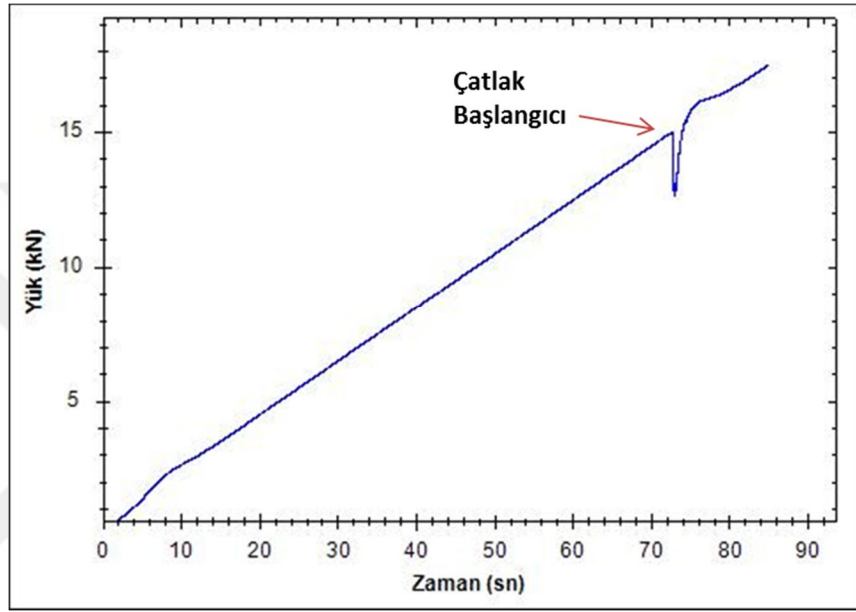


Şekil 3.16. BÇD deneyleri için numune boyutları (Ölçüler mm cinsinden)

Tüm kayaç türlerinden karotiyer yardımıyla laboratuvar ortamında 54 mm çapında karot numuneleri üretilerek 3 farklı (27 mm, 40.5 mm ve 54 mm) kalınlıkta (boyunda) en az 12'şer adet deney numunesi hazırlanmıştır. Deneyler sonunda elde edilen sonuçlardan hatalı olanlar, en yüksek ve en düşük değerler çıkarılarak kalanların aritmetik ortalaması alınmıştır. Deneylerde ISRM (2007) tarafından önerilen çelikten imal edilmiş kavisli çeneler kullanılmıştır. BÇD değeri Eşitlik 3.1'de verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır. Burada, F (kgf), numunenin yenilmesi anında uygulanan yük; D (mm) numune çapı ve t (mm) ise numune kalınlığıdır.

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi Dt} = 0,636 \frac{F}{Dt} \quad (3.1)$$

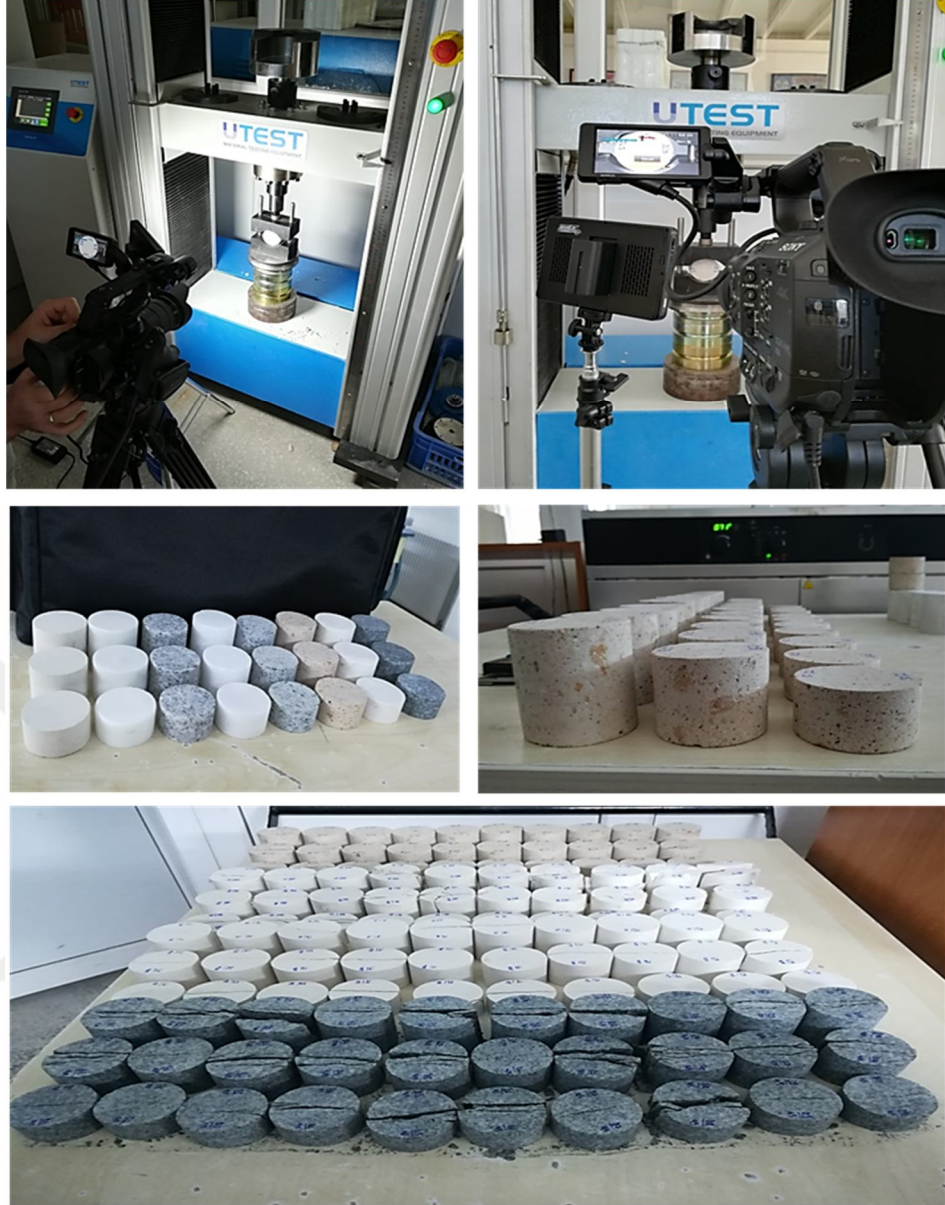
Brezilya deneyleri, bilgisayar kontrollü elektromekanik üniversal test cihazında yapılmıştır. Bazı deneylerde numunenin, yenildikten sonra da yük almaya devam ederek ezilmeye maruz kaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle deneyler anında bilgisayar ekranından eş zamanlı olarak yük-zaman grafikleri izlenerek yenilmeye neden olan gerçek yük (kN) değerleri kaydedilmiştir. Şekil 3.17’de bu duruma örnek olması açısından granit numunesine ait yük-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 3.17. Brezilya deneyinde örnek bir yük zaman grafiği

3.2.8. Çatlak başlangıçlarının belirlenmesi

Bu tez kapsamında BÇD testlerinde çatlak başlangıçlarının nerede gerçekleştiğinin belirlenmesi amacıyla deneyler sırasında yüksek hızda çekim yapan kamera ile 960 fps kayıt hızında video kayıtları alınmıştır. Daha sonra elde edilen videolar, görüntü işleme programı yardımıyla kırılmanın hemen öncesinde, kırılmanın ilk başladığı anda ve kırılma sonrasında fotoğraflara dönüştürülmüştür. Bu kapsamda toplamda 300'ün üzerinde video kaydedilmiş, bu videolardan her bir kayaç türü için en az 500 adet fotoğraf karesi üretilmiştir. Elde edilen görüntülerin analizi 4. Bölümde sunulmuştur. Deney düzeneği ve numunelere ait görüntüler Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18. BÇD deney numuneleri ve deneysel kurulum

3.2.9. 3 Nokta eğilme dayanımı

Kayaçların 3 Nokta Eğilme Dayanımı (3NED) deneyleri TS EN 12372 (Yoğun yük altında bükülme dayanımı tayini) standardına ve ASTM C 99 standardına göre yapılmıştır. TS EN 12372 nolu standartta kalınlığın (h) 25 mm ile 100 mm arasında olması, uzunluğun (L) kalınlığın 6 katı olması ve genişliğin (b) $50\text{mm} \leq b \leq 3h$ olması önerilmektedir. Mesnetler arası mesafenin ise kalınlığın 5 katı olması gerekmektedir. Tez çalışmasında 3NED deneyleri TS EN 12372 standardına göre ve yukarıda belirtilen numune geometrisi koşullarına uymak

kaydıyla 50x50x300 mm ve 25x50x150 mm boyutlarında olmak üzere 2 farklı şekilde yapılmıştır. Yükleme hızının standartta $0,25 \pm 0,05$ MPa/s olması önerildiğinden 50x50x300 mm boyutlarında yapılan deneyler için 66 N/s, 25x50x150 mm boyutlarında yapılan deneyler için 41 N/s seçilmiştir. ASTM C 99 standardına göre ise önerilen numune geometrisi 101,6x203,2x57,2 mm olduğu için aynı şekilde deneyler yapılmış yükleme hızı 4450 N/dak önerildiği için 74 N/s seçilmiştir. Mesnetler arası mesafe 177.8 mm olarak belirlenmiştir. Bu bölümde yapılan tüm deneyler için en az 12 adet numune kullanılmış olup hatalı olanlar, en yüksek ve en düşük değerler çıkarılarak kalanların aritmetik ortalaması alınmıştır. 3NED deneylerinin sembolik çizimleri Şekil 3.19’da, deneysel süreçlere ait örnek fotoğraflar Şekil 3.20’de sunulmuştur. Bu tez kapsamında yapılan doğrudan ve dolaylı çekme dayanımı deneylerinin tümü UTEST marka, 100 kN kapasiteli ve bilgisayar kontrollü “Elektromekanik Universal Test Cihazı” kullanılarak yapılmıştır. Bu sayede eğilme dayanımı değerlerinin tamamı aynı cihazda belirlenerek cihaz farklılıklarından kaynaklanacak hataların önüne geçilmiştir. 3NED değerleri hem TS EN, hem de ASTM standardına göre yapılan deneyler için aşağıdaki formüle (Eşitlik 3.2) göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_{3Neğ} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (3.2)$$

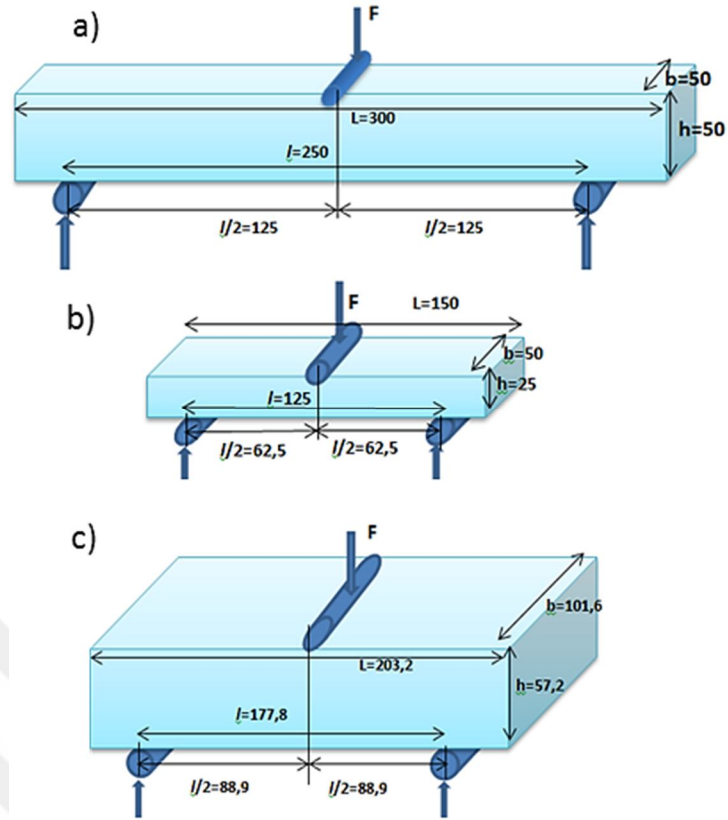
$\sigma_{3Neğ}$ = Numunenin üç nokta eğilme dayanımı, MPa

F = Kırılma yükü, N

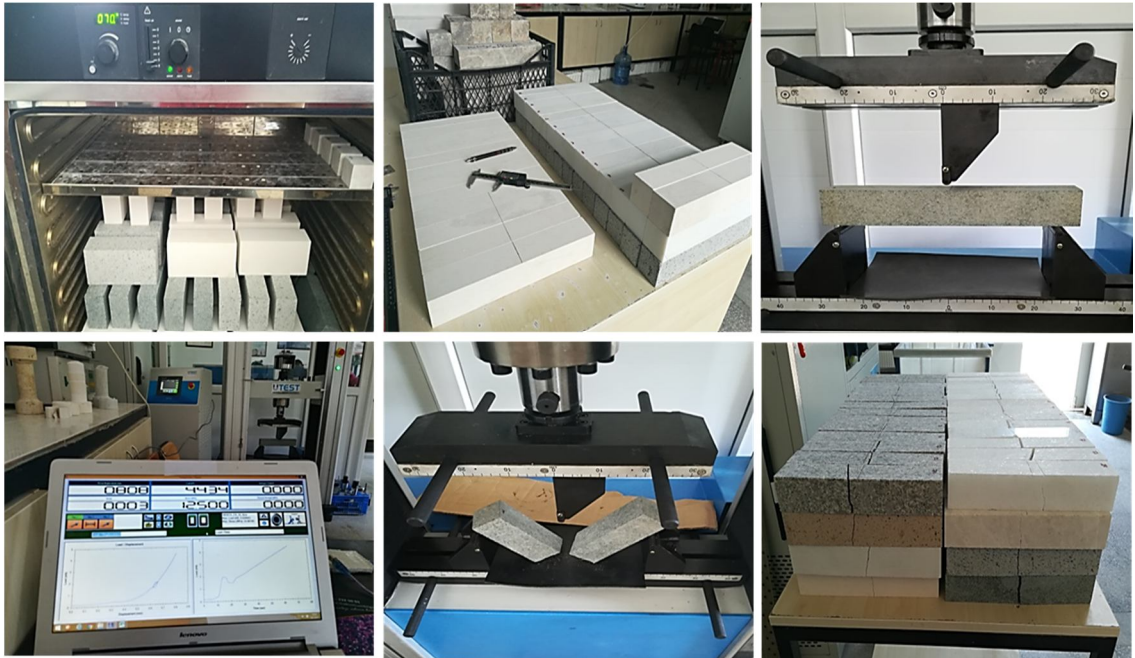
l = Alt mesnetler arası açıklık, mm

b = Numunenin eni (genişliği), mm

h = Numunenin yüksekliği (kalınlığı), mm



Şekil 3.19. 3NED deneyleri a) TS EN 12372 (50x50x300mm) b) TS EN 12372 (25x50x150mm) c) ASTM C 99



Şekil 3.20. 3NED deneylerine ait örnek fotoğraflar

3.2.10. 4 Nokta eğilme dayanımı

Kayaçların 4 Nokta Eğilme Dayanımı (4NED) deneyleri TS EN 13161 (2014) (Sabit moment altında eğilme dayanımı tayini) standardına ve ASTM C 880-98 standardına göre yapılmıştır. TS EN 13161 nolu standartta kalınlığın (h) 25 mm ile 100 mm arasında olması, uzunluğun (L) kalınlığın 6 katı olması ve genişliğin (b) $50\text{mm} \leq b \leq 3h$ olması önerilmektedir. Mesnetler arası mesafe ise kalınlığın 5 katı olması gerekmektedir. Tez çalışmasında 4NED deneyleri TS EN 13161 standardına göre ve yukarıda belirtilen numune geometrisi koşullarına uymak kaydıyla 50x50x300 mm ve 25x50x150 mm boyutlarında olmak üzere 2 farklı şekilde yapılmıştır. Yükleme hızının standartta $0,25 \pm 0,05$ MPa/s olması önerildiğinden 50x50x300 mm boyutlarında yapılan deneyler için 66 N/s, 25x50x150 mm boyutlarında yapılan deneyler için 41 N/s seçilmiştir. ASTM C 880-98 standardına göre ise önerilen numune geometrisi 102x32x381 mm olduğu için aynı şekilde deneyler yapılmış ve yükleme hızı 4,14 MPa/dak önerildiği için 70 kPa/s seçilmiştir. Mesnetler arası mesafe 318 mm olarak belirlenmiştir. Bu bölümde yapılan tüm deneyler için en az 12 adet numune kullanılmış olup hatalı olanlar, en yüksek ve en düşük değerler çıkarılarak kalanların aritmetik ortalaması alınmıştır. 4NED deneylerinin sembolik çizimleri Şekil 3.21’de, deneysel süreçlere ait örnek fotoğraflar Şekil 3.22’de sunulmuştur. 4NED değerleri; TS EN standardına göre yapılan deneylerde Eşitlik 3.3’teki formüle göre, ASTM standardına göre yapılan deneylerde ise Eşitlik 3.4’teki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_{4\text{Neğ}} = \frac{Fl}{bh^2} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{4\text{Neğ}} = \frac{3Fl}{4bh^2} \quad (3.4)$$

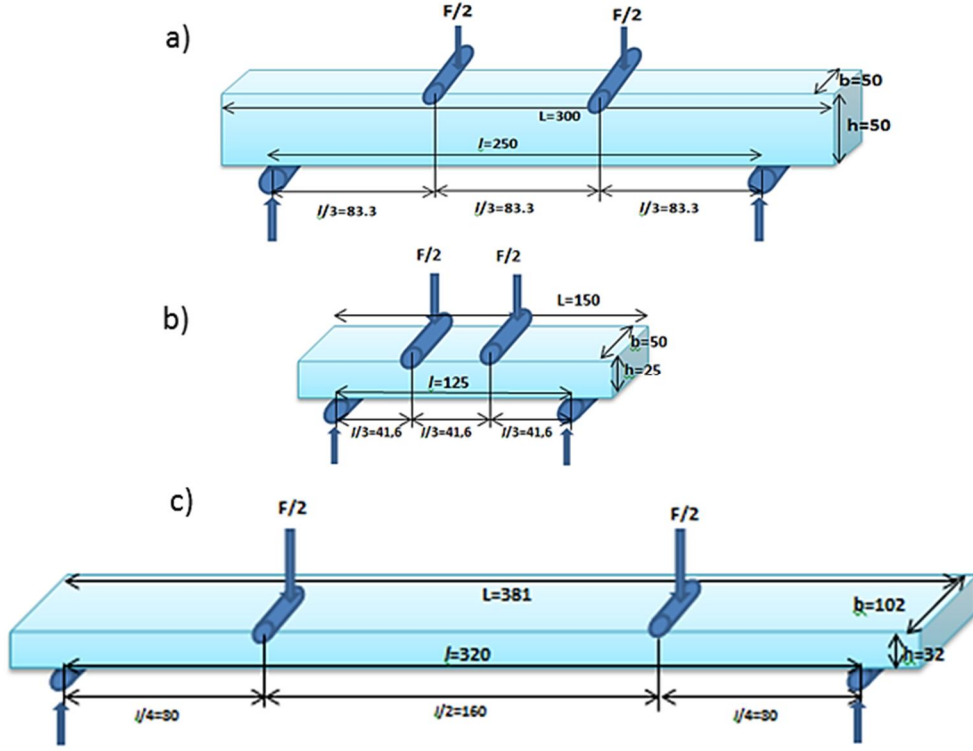
$\sigma_{4\text{Neğ}}$ = Numunenin dört nokta eğilme dayanımı, MPa

F = Kırılma yükü, N

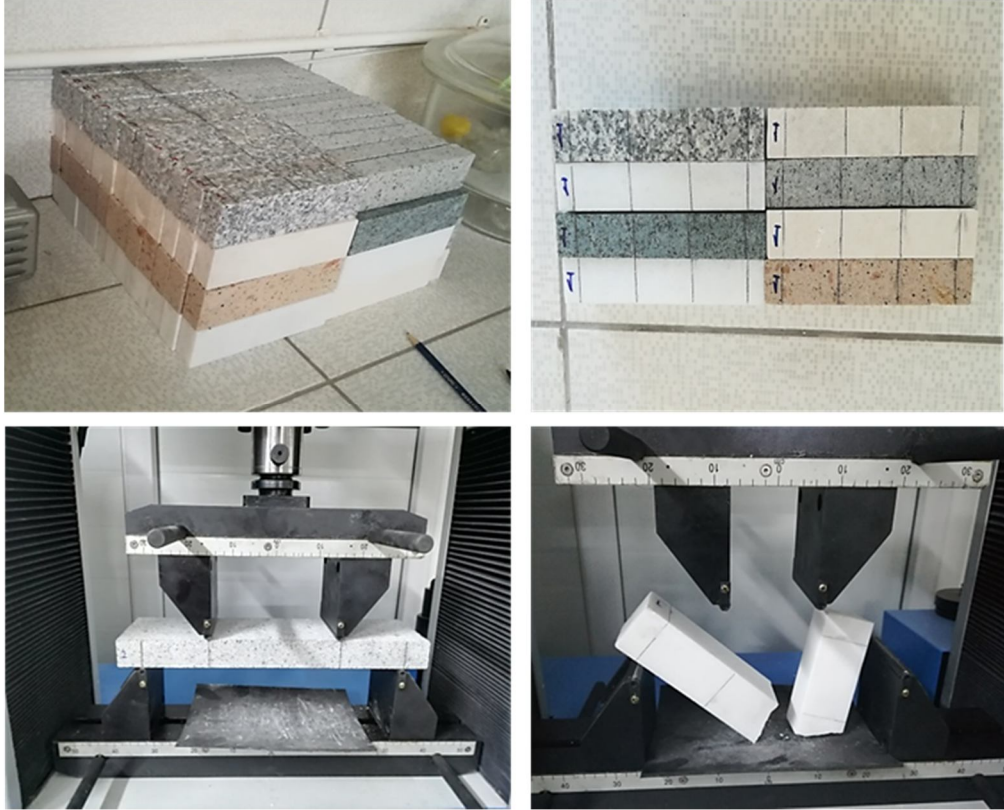
l = Alt mesnetler arası açıklık, mm

b = Numunenin eni (genişliği), mm

h = Numunenin yüksekliği (kalınlığı), mm



Şekil 3.21. 4NED deneyleri a) TS EN 13161 (50x50x300mm) b) TS EN 13161 (25x50x150mm) c) ASTM 880-98



Şekil 3.22. 4NED deneylerine ait örnek fotoğraflar

3.2.11. Nümerik analiz çalışmaları

Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal bir metottur. Sonlu elemanlar yöntemi "parçadan bütüne gitme" genel prensibine dayanmaktadır. Sonlu eleman; iki ya da üç boyutlu yapıların bir parçasıdır. Bu yöntemin ilk ve en geniş uygulama alanı ise gerilme analizidir (Liu ve Quek, 2003).

Sonlu elemanlar gerilme analizinde gerçek geometrik cisim, bilgisayarda hesaplanması kolay olan daha küçük elemanlardan oluşturulmaktadır. Daha sonra bilinen fizik kuralları daha basit geometriye sahip olan bu küçük elemanların her birine uygulanmaktadır. Bütün cismin elemanlara bölünebilmesi için bir ağ yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Cismin boyutuna ve geometrisine uygun olarak seçilen elemanlara bölünmüş haline sayısal model denilmektedir. Şekli oluşturan elemanların malzeme özelliklerini belirleyebilmek için elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri programa tanıtılmaktadır. Oluşturulan matematik modelde, düğüm noktalarına dışarıdan en basit dış etken ve sınır şartlarının uygulanmasıyla meydana gelen değişiklik durumları için matrisler oluşmakta, bu matrisler bilgisayar yardımıyla çözülmektedir. Bu yolla her bir elemandaki ve dolayısıyla elemanların oluşturdukları cismin tamamındaki gerilme ve şekil değiştirmeler belirlenmektedir (Liu ve Quek, 2003; Fish ve Belytschko, 2007; Güler ve Şen, 2015). Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan yazılımlardan birisi ANSYS programıdır. Bu program model üzerinde gerilmelerin yoğunlaşmasını, bulunduğu yerleri ve sebep olduğu yer değişikliklerinin grafiksel olarak gösterilmesine de olanak sağlamaktadır (Güler ve Şen, 2015).

Sonlu elemanlarda mesh (ağ) yapısını oluşturulurken, gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için eleman tipi ve sayısı önemlidir. Eleman sayısı arttıkça daha doğru sonuçlar elde edilebilmesine rağmen, gereğinden fazla eleman oluşturmak işlem zamanını artıracaktır. Eğer mesh yapısı düzgün oluşturulmuş ise belirli bir eleman sayısından sonra hesaplanan parametreler belirli bir değere yakınsayacaktır. Eleman sayısının bundan daha fazla artırılması ise

çözüm süresini uzatacaktır. Burada önemli olan optimum değerleri yakalayabilmektir. Eleman sayısının ne kadar olması gerektiği konusunda kesin bir kural olmayıp, analizi yapan kişinin bilgi ve tecrübesi sonuçlar üzerinde etkilidir. Bununla birlikte ANSYS yazılımı, analizi yapan kullanıcıya yardımcı olması açısından bazı mesh kalitesi ölçüm değerleri geliştirerek kriterler belirlemiştir. Bu çalışmada mesh yapısı oluşturulduktan sonra yazılımın önerdiği kriterlere uygun mesh oluşturulup oluşturulmadığı kontrol edilmiştir. Yazılımın sunduğu araçlardan bazılarının açıklamaları ve bu çalışmada mesh yapısı oluşturulduktan sonra elde edilen değerler aşağıda sunulmuştur.

1) Eleman Kalitesi: Eleman kalitesi 0 ile 1 arasında değişen bir değer olup Eşitlik (3.4) yardımıyla hesaplanmaktadır. Sonuç 1'e ne kadar yakınsa mesh kalitesi o kadar iyi demektir.

$$Kalite = C \left(\frac{Hacim}{\sqrt{[\Sigma(Kenar\ uzunlu\u{g}u)^2]^3}} \right) \quad (3.4)$$

C: eleman tipine göre program tarafından otomatik olarak seçilmektedir. Tüm testler için oluşturulan örnek bir analizin mesh yapısı için eleman ve düğüm sayıları ile eleman kalitesi değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Eleman / düğüm sayıları ve mesh kalitesi değerleri

	Brezilya Deneyi		TEÇD Deneyi		Eğilme Deneyleri	
	Eleman kalitesi	Eleman ve (Düğüm) Sayısı	Eleman kalitesi	Eleman ve (Düğüm) Sayısı	Eleman kalitesi	Eleman ve (Düğüm) Sayısı
Minimum	0,14		0,12		0,99	
Maksimum	1,00	29380	0,99	51770	0,99	46750
Ortalama	0,77	(124572)	0,73	(85721)	0,99	(205338)
Standart Sapma	0,18		0,13		0,0004	

2) Aspect Oranı (AR): Mesh in en büyük kenarı ile en küçük kenarı oranıdır.

AR=1 : Mükemmel Mesh

1 < AR < 3: İyi Mesh

3 < AR < 10: Kabul edilebilir Mesh

AR>10 : Hatalı değerler vermesi muhtemel Mesh.

Tüm testler için oluşturulan örnek bir analizde mesh yapısı için Aspect oranı değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Aspect oranı değerleri

	Brezilya Deneyi	TEÇD Deneyi	Eğilme Deneyleri
Minimum	1,03	1,19	1,03
Maksimum	9,07	27,6	1,05
Ortalama	1,97	2,23	1,04
Standart Sapma	0,80	0,70	0,005

3) Jakobian Oranı: Elemanların eğrilik durumları ile ilgilidir.

Jakobian Oranı=1: Mükemmel Eleman

1 < Jakobian Oranı < 40 : Kabul edilebilir

40 < Jakobian Oranı : Kabul edilemez.

Tüm testler için oluşturulan örnek bir analizde mesh yapısı için Jakobian oranı değerleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Jakobian oranı değerleri

	Brezilya Deneyi	TEÇD Deneyi	Eğilme Deneyleri
Minimum	1,00	1	1,0004
Maksimum	3,54	2,03	1,0038
Ortalama	1,17	1,02	1,0008
Standart Sapma	0,24	0,047	0,00027

4) Skewness: Mevcut mesh yapısı ile optimum mesh yapısı arasındaki oranı vermektedir. Skewness 0 ve 1 arasında değerler alır. Değer sıfıra ne kadar yakın olursa mesh kalitemiz o derece de yüksektir.

0 < Skewness < 0.25 Mesh'in iyi olduğunu gösterir.

Tüm testler için oluşturulan örnek bir analizde mesh yapısı için skewness değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Skewness değerleri

	Brezilya Deneyi	TEÇD Deneyi	Eğilme Deneyleri
Minimum	0,00592	0,0023	0,00029
Maksimum	0,62	0,98	0,015
Ortalama	0,10	0,37	0,00773
Standart Sapma	0,094	0,18	0,00482

Sonuç olarak tüm ortalama değerlere bakıldığında analizler için oluşturulan meshlerin iyi olduğu ve güvenilir sonuçlar vereceği söylenebilir. Doğrudan çekme numuneleri tasarımlarında ve dolaylı yöntemlerin sonlu elemanlar ile gerilme analizlerinde ANSYS R18 paket programı kullanılmıştır. Analizler için sonlu elemanlar ağ yapısı oluşturulurken “quadratic” elemanlar kullanılmıştır. Sonlu elemanlar gerilme analizinde kullanılacak malzeme özelliği; elastisite modülü 30 GPa ve Poisson oranı 0,3 olarak belirlenmiştir. Numunelere uygulanan kuvvet, numune kesitinde 1 MPa’lık gerilme oluşturacak şekilde belirlenmiştir.

3.2.12. İstatistiksel analiz çalışmaları

Tez kapsamında belirtilen amaçlara ulaşmak için deneyler sonucunda elde edilen doğrudan ve dolaylı ÇD değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Ayrıca kayaçların TEÇD özelliklerini belirlemede veya tahmin etmede hangi dolaylı çekme deney yönteminin daha uygun olduğu belirlenerek pratik yaklaşımlar sunabilmek için katsayılar önerilmiştir. Laboratuvar testlerinde farklı yöntemlerle elde edilen ham ÇD değerleri arasındaki farklar istatistiksel olarak ANOVA (Varyans analizi) testleri ile incelenerek F ve p değerleri belirlenmiştir. Daha sonra, bu ham ÇD verileri analizler sonunda elde edilen düzeltme katsayıları ile çarpılarak modifiye edilmiş ÇD değerleri elde edilmiştir. Modifiye edilmiş veriler de kendi aralarında Anova testleri ile analiz edilmiş ve F ve p değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Ayrıca hangi yöntemin en uygun olduğunu ve diğer fiziko-mekanik özelliklerin ÇD üzerindeki etkisi belirleyebilmek için MİNİTAB 16 paket programı yardımıyla çoklu doğrusal regresyon analizleri yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde sedimanter (kireçtaşı (K), dolomitik kireçtaşı (DK) ve killi kireçtaşı (KK)), metamorfik (ince (İNM) ve iri kristalli mermer (İRM)) ve magmatik (tüf (T), andezit (A), granit (G) ve diyabaz (D)) kökenli 9 farklı kayaç türü için doğrudan ve dolaylı yöntemlerle ÇD'lerinin belirlenmesine yönelik yapılan deneysel, nümerik ve istatistiksel analiz çalışmalarından elde edilen bulgular verilmiştir. Çalışma kapsamında yeni bir deney düzeneği (ASTM standardında belirtilen koşullara uygun) ile kaya örneklerinin TEÇD özellikleri belirlenmiştir. Bunun yanı sıra dolaylı olarak kullanılan yöntemler (Brezilya, üç ve dört nokta yüklemeli eğilme) ile de bu kayaçların dolaylı ÇD değerleri (ISRM, ASTM ve TS EN'ye göre) bulunmuştur. Deneysel çalışmalara ek olarak, numunelerde oluşan gerilme dağılımları ve gerilme yığılmaları sonlu elemanlar yöntemi (ANSYS) kullanarak analiz edilmiştir. Bu sayısal çözümlemeler ve hızlı çekim yapan kameradan alınan görüntü kayıtları kullanılarak, deney sırasında kaya örneğinde gelişen gerilmeler ve yenilme başlangıç bölgeleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre numunelerde yenilmeye hangi gerilmelerin neden olduğu ve çatlağın nereden başladığı tanımlanmıştır. Deneysel, istatistiksel ve nümerik analiz sonuçlarına göre, doğrudan ve dolaylı ÇD sonuçları arasında bir ilişki olup olmadığı, dolaylı yöntemlerin hangisinin kayaçların ÇD'nı tahmin etmekte daha uygun olduğu belirlenmeye çalışılarak, yeni düzeltme katsayıları ve istatistiksel modeller önerilmiştir.

Kayaçları tanımlamaya yönelik yapılan çalışmaların sonuçları ve tahmin modellerinde/nümerik analizlerde girdi parametresi olarak kullanılacak bazı fiziksel-mekanik özellikler ile kimyasal ve mineralojik-petrografik analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.1. Kimyasal Analiz Sonuçları

Kayaçların kimyasal analizleri TS EN 15309 (2008) standardına göre yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Magmatik kayaçların silis oranları yüksek çıkarken diğer kayaçlar kalsiyum oksit bakımından zengin bulunmuştur.

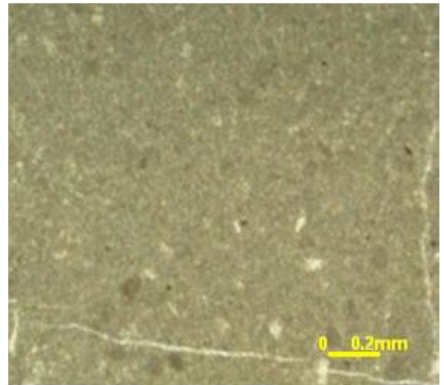
Çizelge 4.1. Kimyasal Analiz Sonuçları (%)

Kayaç Kodu	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI
K	55,53	0,24	0,16	0,13	0,70	0,02	0,03	0,04	43,91
KK	55,28	1,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06	43,46
DK	43,81	13,50	0,31	0,45	1,09	0,02	0,21	0,05	41,16
İNM	55,90	0,27	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,04	43,23
İRM	55,94	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	43,58
T	1,32	0,23	13,75	1,52	71,09	6,81	2,07	-	2,93
A	4,48	0,58	20,29	3,58	53,16	7,72	5,11	0,13	2,49
G	3,28	0,77	15,47	2,49	68,49	4,77	3,58	-	0,54
D	8,66	4,43	18,00	11,19	45,37	1,31	4,72	0,11	2,21
LOI: Kızdırma kaybı									

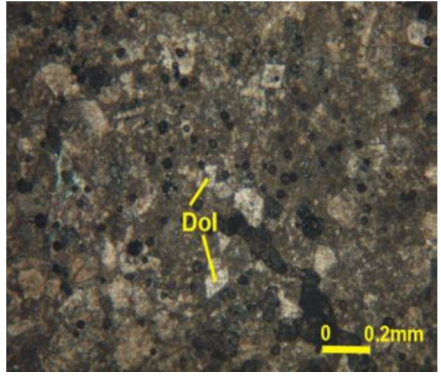
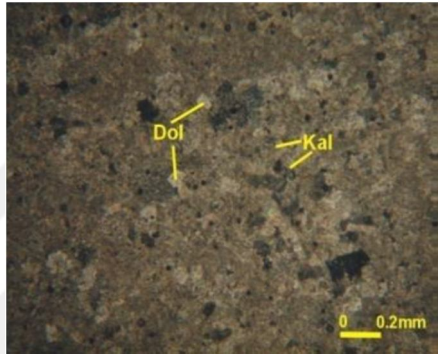
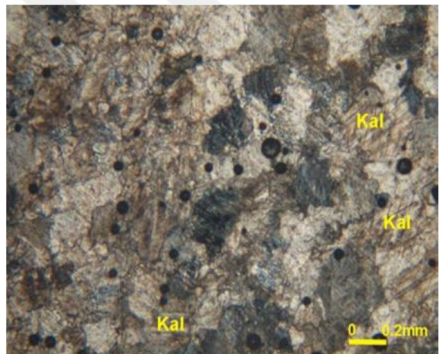
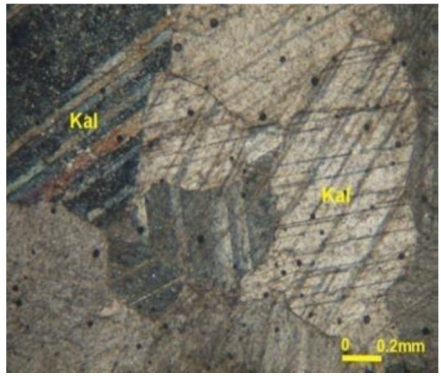
4.2. Mineralojik ve Petrografik Analiz Sonuçları

Kayaçların mineralojik ve petrografik incelemeleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde hazırlanan ince kesitler üzerinde yapılmıştır. Polarizan mikroskobu kullanılarak çekilen fotoğraflar üzerinde incelemeler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.2’de kayaçların mineralojik ve petrografik tanımlamaları sunulmuştur.

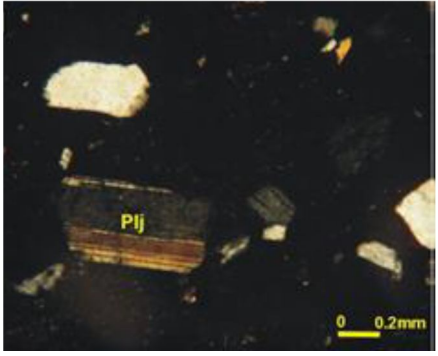
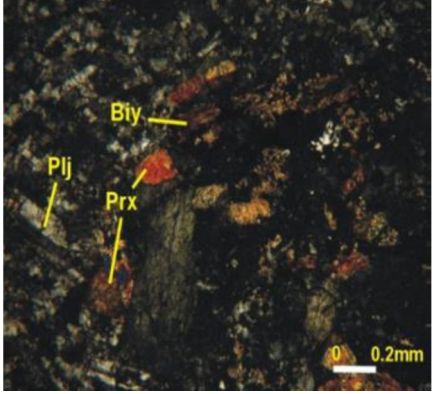
Çizelge 4.2. Mineralojik ve Petrografik Analiz Sonuçları

K	Kayaç çoğunlukla mikritik bazen de sparitik özellikler göstermektedir. Böyle bir hamura sahip bir kayaçta çok yoğun bir şekilde kırık, çatlak ve erime boşlukları gelişmiştir. Bu yapısal unsurlar hemen hemen bütünüyle kalsitler ile doldurulmuştur. Kalsit kristalleri ince ve orta boyutlardadır. Yarı özşekilli veya özşekilsiz olan kalsitler birbirine kenetlenmiş durumdadırlar ve bazen polisentetik ikizlenmeler gösterirler. Kayaç, %60 tane ve %40 oranında sparitik-mikritik dokudan oluşmaktadır.	
----------	--	--

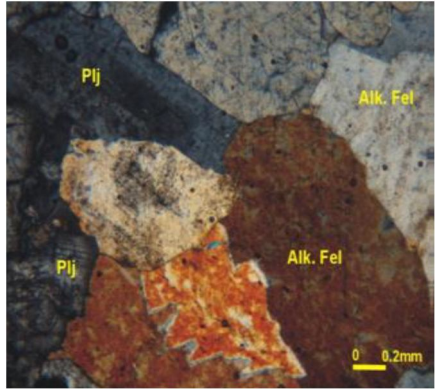
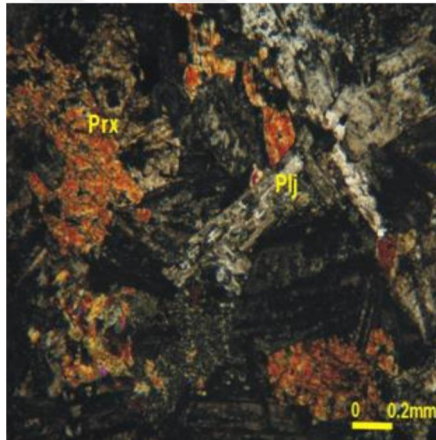
Çizelge 4.2.'nin devamı

KK	Mikritik dokulu olan kayaç, kalsit ve dolomit kristallerinden oluşmuştur. Kalsitler; ince-orta kristaller şeklindedir. Bunlar özşekli ve rombohedral biçimlidirler.	
DK	Kayaç mikritik dokulu dolomitik kireçtaşı özelliği göstermekte olup %10-15 kadar dolomit kristalleri bulunmaktadır. Dolomitler ince boyutlarda, özşekli ve rombohedral biçimlidirler. Kalsitler genel olarak ince boyutlardadır. Kayaç seyrek olarak kalsit dolgulu kırık ve çatlaklar içerir.	
İNM	Kayaç bütünüyle kalsit minerallerinden meydana gelmekte ve granoblastik doku göstermektedir. İnce-orta tane boyutlarında olan kalsitler yarı özşekli ve özşekilsiz olarak bulunmaktadır. Polisentetik ikizlenmeler ve rombohedral dilinimler yaygın olarak görülmektedir. Kalsitler birbiriyle kenetlenmiş olup aralarında hiçbir boşluk bulunmamaktadır.	
İRM	Kayaç tamamen kalsit minerallerinden oluşmaktadır. Kalsitler genel olarak büyük kristaller şeklinde olup seyrek olarak orta büyüklükte de olabilmektedir. Özşekilsiz ve yarı özşekli olan kalsitler birbiriyle kenetlenmiş durumdadırlar ve granoblastik bir doku oluşturmuşlardır. Kalsitlerin hemen hemen tamamında rombohedral dilinimler ve polisentetik ikizlenmeler görülmektedir.	

Çizelge 4.2.'nin devamı

T	Sıcak kül akmaları şeklinde meydana gelmiş olan kayada plajioklas, mika (biyotit) mineralleriyle birlikte pomza taneleri bulunmaktadır. Plajioklaslar özşekilli, yarı özşekillidirler. İrili-ufaklı, dikdörtgen ve kare biçimli, levhamsı, prizmatik kristaller şeklinde bulunmaktadır. Tipik olarak polisentetik ikizlenmeleri vardır. Genelde ayrışmamış, temiz görünümlü veya düşük derecede ayrışmışlardır. Biyotit kristalleri küçük, ince iğnemsî şekillerde bulunmaktadır. Seyrek olarak görülen biyotitlerin belirgin tek yönlü dilinimleri ve kahve renkli pleokroizmaları vardır. Pomza taneleri ince uzun biçimlerde görülürler. Genel olarak sıcaklığın ve akmanın etkisiyle yassılaşıp, uzamış ve bazen de kıvrımlanmışlardır. Kayacın hamurunu kahve renkli küller oluşturmuş olup ignimbiritik tüf olarak tanımlanmaktadır.	
A	Porfirik dokusu olan kayac; başlıca plajioklas, amfibol (hornblend), mika (biyotit) ve klinopiroksen fenokristallerden meydana gelmiştir. Plajioklas mineralleri hem fenokristaller, hem de matriksi oluşturan mikrolitler olarak bulunurlar. Fenokristaller özşekilli ve polisentetik ikizlidirler. Amfibol kristalleri özşekilli (altıgen şeklinde), yarı özşekillidir. Birbirini verek kesen dilinimlere sahiptirler. Hemen hemen bütün amfibollerin kenarları oksitlenmiştir. Klinopiroksenler özşekilli-yarı özşekilli olarak görülürler. Çeşitli girişim renkli olan klinopiroksenler tek nikolde renksizdirler. Biyotitler; küçük levhamsı şekillerde ve düşük oranda bulunmaktadır. Belirgin olarak kahve renkli pleokroyizmaları vardır. Dilinim düzlemleri boyunca ayrışarak opaklaşmışlardır. Bir yöndeki dilinimleri iyi olarak gelişmiştir.	

Çizelge 4.2.'nin devamı

G	Kayaç başlıca alkali feldispat (ortoklas), plajioklas (albit), mika (biyotit), kuvars ve opak minerallerden meydana gelmiştir. Ortoklaslar; oldukça iri kristaller şeklinde bulunurlar ve seyrek olarak karlspat ikizlenmesi gösterirler. Özşekilli-yarı özşekillidirler ve iki yönlü dilinimleri bulunmaktadır. Plajioklas kristalleri orta-iri boyutludurlar ve polisentetik (albit) ikizlenmeleri vardır. Dikdörtgen şeklinde olup, yarı özşekillidirler. Kuvars mineralleri ince-orta taneler şeklindedir ve öz şekilsizdirler. Biyotitler; kahve renkli tek yönde dilinimli, uzun çubuksu ve bazen kısa levhamsı olarak görülmektedir. Kayaçtaki feldispat mineralleri (ortoklas ve plajioklaslar) genel olarak alterasyonun etkisinden dolayı bozuşarak killeşmişlerdir. Kayaç tüm kristalli (holokristalen) dokuludur.	
D	Kayaç başlıca plajioklas, klinopiroksen ve opak minerallerden oluşmuştur. Kayacın çoğunluğunu oluşturan plajioklas mineralleri öz ve yarı özşekillidirler. Kısa levhamsı ve uzun çubuksu olarak görülmektedir. Ayrışmadan dolayı killeşmişlerdir. Klinopiroksenler kayacın %20-25 kadarını oluşturmaktadırlar. Öz şekilli, yarı özşekilli ve seyrek olarak özşekilsizdirler. Sarımsı, kahverenkli girişim renkleri vardır. Paralel ışıktaki renksizdirler ve dik olarak gelişmiş olan iki yönlü dilimlere sahiptirler. Opak olarak pirit ve ilmenit mineralleri görülmektedir. Öz şekilli olan pirit kristallerinin köşeleri, bazen magma sıvısı tarafından korozyona uğrayarak aşındırılmıştır. Dolayısıyla elips ve yuvarlağımsı şekillerde de bulunurlar. İlmenit kristalleri koyu kahve renkli olup, yarı özşekillidirler. İskeletimsi bir doku özelliği gösterirler.	

4.3. Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Tez çalışmasında kullanılan kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler ilgili standartlara ve önerilmiş yöntemlere göre SDÜ Maden Mühendisliği Bölümü Kazı Mekaniği ve Doğal Taşlar Teknolojisi Laboratuvarında yapılmıştır. Sonuçlar aritmetik ortalama (Ort.) ve standart sapma (SS) değerleri ile birlikte bu bölümde verilmiştir.

4.3.1. Yoğunluk, birim hacim ağırlık, su emme ve gözeneklilik deney sonuçları

Kayaçların gerçek yoğunlukları (d_0), -200 μm altına öğütülmüş numuneler üzerinde TS EN 1936 (2010) standardına göre yapılmıştır. Kuru birim hacim ağırlık (KBHA) deneyleri ise (TS EN 1936, 2010) kenar uzunluğu 50 mm olan küp örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda gerçek yoğunluk ve birim hacim ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Su emme deneyleri belirli bir geometriye sahip kayaç örneklerinin ağırlıklarına ve hacimlerine oranla, boşluklarının alabileceği su miktarının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Bu şekilde kayaçların açık gözeneklilikleri belirlenmektedir. Toplam gözeneklilik ise kayaçların bünyesinde bulunan açık ve kapalı gözeneklerin yüzde olarak toplamıdır. Kayaçların, ağırlıkça su emme (ASE), görünür gözeneklilik (porozite) (GP) ve toplam gözeneklilik (Σpor) deneyleri ilgili standartlar (TS EN 13755, 2014; TS EN 1936, 2010) çerçevesinde yapılmış ve elde edilen değerler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde en yüksek yoğunluğa sahip kayacın diyabaz, en düşük yoğunluğa sahip kayacın tuf olduğu görülmektedir. Kireçtaşı ve ince kristalli mermerin toplam gözeneklilik değerleri %1'in altında bulunmuştur. Tuf ve andezitin toplam gözeneklilik değerleri ise sırasıyla %39,5 ve %12,3 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Kayaçların bazı fiziksel özellikleri

Num. Kodu	d_o (g/cm ³)		KBHA (g/cm ³)		ASE (%)		GP (%)		Σ por (%)	
	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS
K	2,721	0,014	2,708	0,001	0,038	0,008	0,104	0,022	0,479	0,023
KK	2,739	0,008	2,472	0,002	3,207	0,160	7,929	0,020	9,748	0,086
DK	2,865	0,008	2,736	0,035	0,458	0,123	1,252	0,336	4,493	1,228
İNM	2,731	0,009	2,720	0,004	0,049	0,007	0,134	0,020	0,381	0,158
İRM	2,745	0,013	2,715	0,001	0,064	0,008	0,174	0,023	1,093	0,041
T	2,456	0,009	1,485	0,007	20,771	0,377	30,852	0,473	39,521	0,286
A	2,660	0,004	2,333	0,020	2,479	0,218	5,779	0,463	12,318	0,756
G	2,671	0,009	2,644	0,004	0,183	0,007	0,484	0,019	1,023	0,153
D	3,044	0,010	2,961	0,019	0,497	0,047	1,471	0,136	2,744	0,624
<i>d_o: Yoğunluk, KBHA: Kuru birim hacim ağırlık, ASE: Ağırlıkça su emme, GP: Görünür porozite, Σpor: Toplam porozite</i>										

4.3.2. Sismik hız deney sonuçları

P-dalga hızı kaya malzemelerinin elastiklik ve çatlaklılığının bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Eğer kayacın içerdiği süreksizlik (çatlak, gözenek vb.) miktarı fazla ise numuneden geçen ses dalgaları daha fazla yol kat edeceği için P-dalga hızının geçme süresi artacaktır. Bu özellik kayacın dayanımı açısından da bir gösterge olmaktadır. Kayaçların P-dalga hızları (V_p) TS EN 14579 (2006) standardına göre ölçülmüş olup sonuçların aritmetik ortalama (Ort.), standart sapma (SS) ve değişim katsayısı (DK) değerleri Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Sonuçlara göre en yüksek V_p değerleri kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşı numunelerinde, en düşük V_p değerleri ise tuf numunesinde bulunmuştur. K kodlu kayaç dışında elde edilen sonuçların Çizelge 4.3'te verilen toplam gözeneklilik değerleri ile uyumlu olduğu, yani gözenekliliği yüksek olan kayaçların V_p değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Tuf dışındaki magmatik kayaçların sismik hız değerleri birbirine yakın bulunmuştur.

Çizelge 4.4. P-dalga hızı ölçüm sonuçları

Num. Kodu	V _p (m/s)		DK (%)
	Ort.	SS	
K	6361	51	0.80
KK	3924	83	2.12
DK	6261	368	5.87
İNM	5301	250	4.72
İRM	4827	203	4.20
T	2436	89	3.64
A	4935	46	0.93
G	5215	81	1.55
D	5136	232	4.52

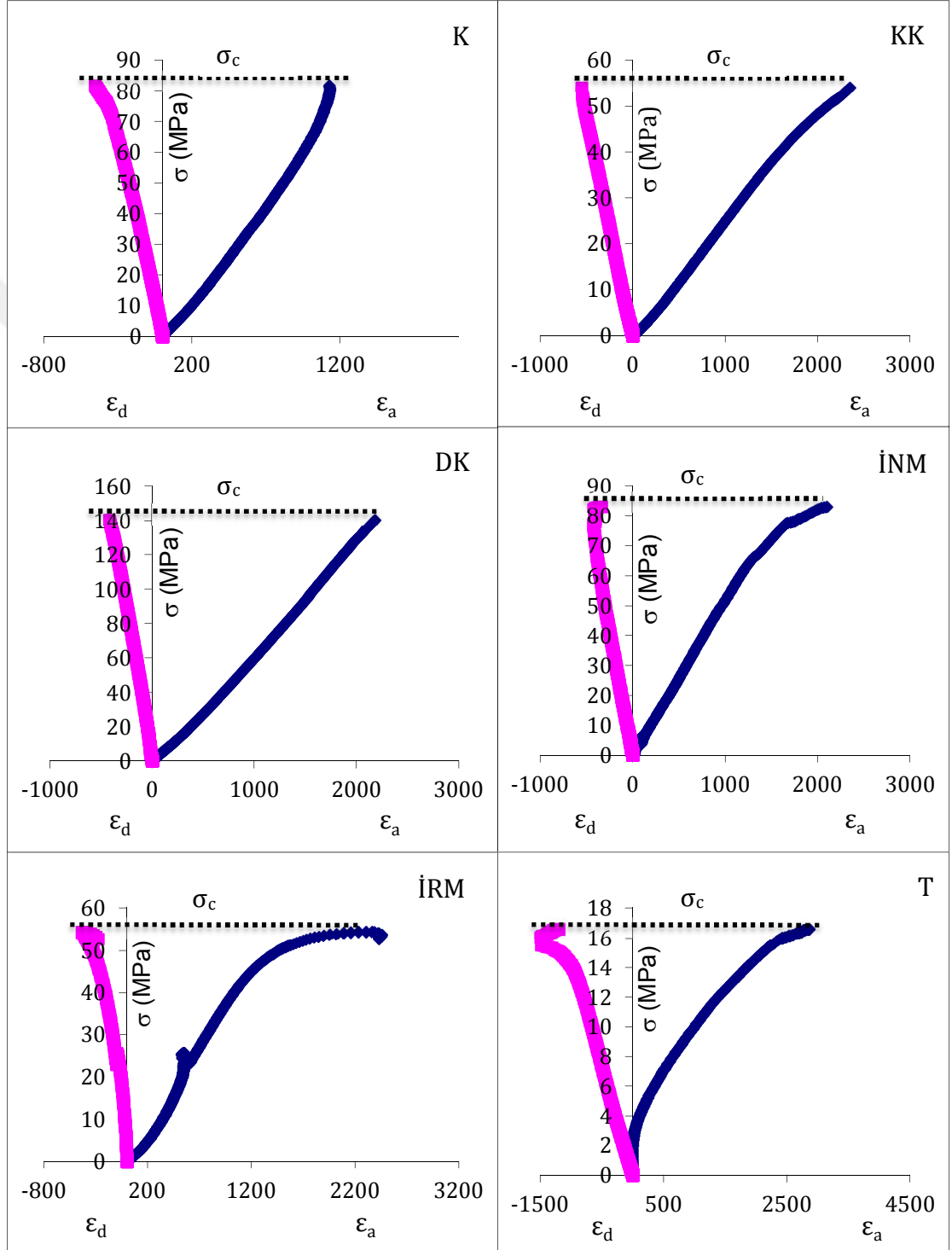
4.3.3. Tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları

TEBD deneyleri, TS EN 1926 (2013) standardına göre 5x5x5 cm boyutlarında 10'ar adet küp numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülü (E) ve Poisson oranları (ν) ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre 54 mm çapında ve boy/çap oranı 2-2,5 olan en az 6 adet düzgün karot numunesi ve gerinimölçerler kullanılarak belirlenmiştir. Çizelge 4.5'te verilen sonuçlara göre TEBD değerleri en yüksek bulunan kayalar granit ve diyabaz, en düşük bulunanlar ise sırasıyla tuf, iri kristalli mermer ve killi kireçtaşıdır.

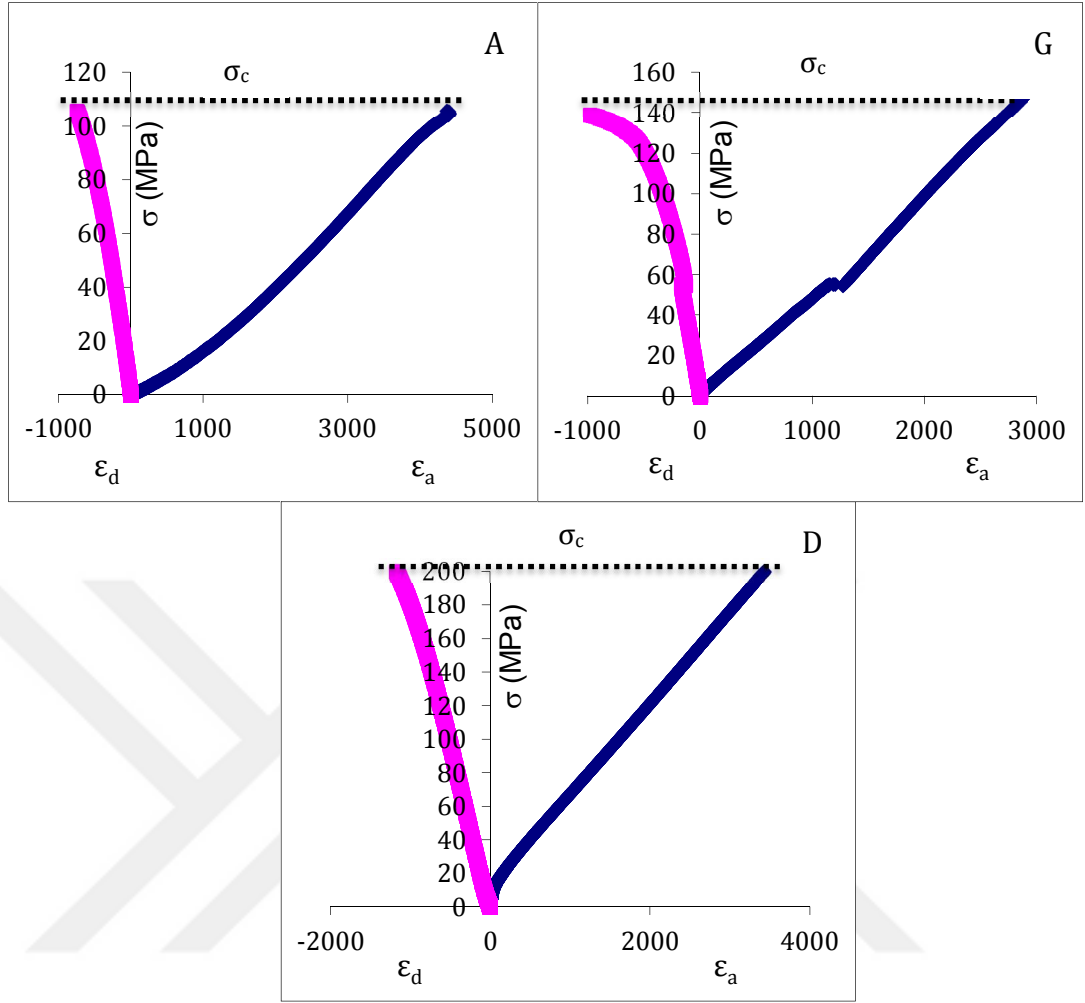
Çizelge 4.5. TEBD deney sonuçları ve Elastik özellikler

Num. Kodu	TEBD (MPa)		DK (%)	E (GPa)	ν	Dayanım Sınıfı (Deere ve Miller, 1966)
	Ort.	SS				
K	121,15	14,54	12,00	66,40	0,24	Yüksek dayanımlı
KK	77,14	7,73	10,02	24,33	0,25	Orta dayanımlı
DK	119,28	13,62	11,42	54,95	0,24	Yüksek dayanımlı
İNM	77,78	6,74	8,67	51,15	0,30	Orta dayanımlı
İRM	60,41	8,18	13,54	42,03	0,19	Orta dayanımlı
T	19,38	2,15	11,12	6,00	0,36	Çok düşük dayanımlı
A	88,55	12,88	14,54	29,30	0,22	Orta dayanımlı
G	149,06	18,37	12,32	50,97	0,18	Yüksek dayanımlı
D	146,08	21,82	14,94	52,60	0,33	Yüksek dayanımlı

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de çapsal ve aksenal gerilme-birim deformasyon grafikleri yer almaktadır. Şekillerdeki grafikler yapılan deneylerden örnek olarak seçilmiştir. Çizelge 4.5’te verilen Elastisite modülü değerleri ve Poisson oranları 6’şar adet deneyden elde edilen ortalama değerlerdir.



Şekil 4.1. Gerilme-birim deformasyon grafikleri (K, KK, DK, İNM, İRM, T)



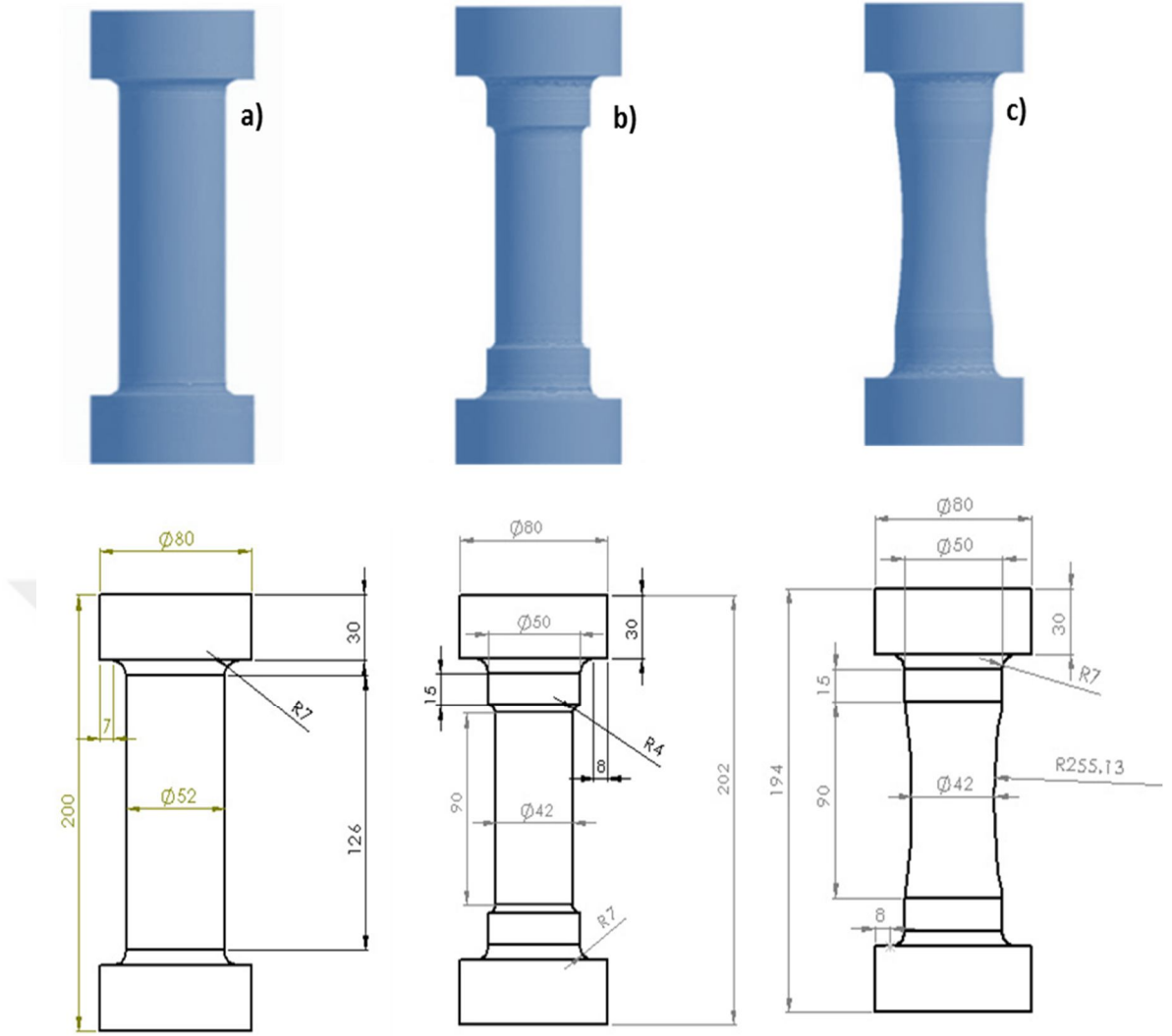
Şekil 4.2. Gerilme-birim deformasyon grafikleri (A, G, D)

4.4. En Uygun Dambıl Şekilli Numune Geometrisinin Tasarımı

Tek eksenli çekme deneyleri, mühendislik malzemelerinin mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Tek eksenli çekme deneylerinde artan yük ile birlikte malzemedeki uzamanın doğru bir şekilde ölçülmesi için kopmanın meydana geldiği bölgenin ölçüm sınırlarında kalmasını sağlamak da ayrıca önemlidir. Bu amaçla, numune kesitinin belli bir bölgede azaltıldığı ve kopmanın bu bölgede gerçekleştirildiği dambıl şekilli numuneler tüm mühendislik malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, numunenin belirli bölgelerinde kesit azaltma işlemi yükleme esnasında eksenel doğrultuda kuvvet akışını bozmakta ve özellikle kesit geçiş noktalarındaki numune eksenine dik kesitlerde uniform olmayan gerilme dağılımına neden

olmaktadır. Böylece numunenin dış kısımlarda nominal (hesaplanan) gerilmelerden daha yüksek, iç kısımlarda ise nominal gerilmelerden daha düşük gerilmeler meydana gelmektedir. Visko-elastik özellik gösteren sünek malzemeler için söz konusu gerilme düzensizliği büyük bir probleme neden olmamaktadır. Bunun nedeni; gerilme yığılmalarının olduğu dış yüzeyde lokal akımlar meydana gelse bile malzeme bu noktalarda sabit gerilme altında uzamaya devam edecektir. Bu esnada gerilmenin düşük olduğu iç kısımlarda gerilme artışı devam etmekte ve belirli bir süre sonra tüm kesit uniform gerilme dağılımına kavuşmuş olmaktadır. Gevrek özellik gösteren malzemelerde ise, numune dış yüzeyinde meydana gelen bu gerilme yığılmaları hasar başlangıcını tetikleyerek numuneyi olması gereken kuvvet değerlerinden daha düşük değerlerde ve uzama ölçüm aralığının dışındaki bir noktada kırma potansiyeli taşımaktadır. Sonuç olarak, deneylerden elde edilen gerilme ve gerinim değerleri gerçek değerleri yansıtmayacaktır. Kaya gibi gevrek bir malzemenin çekmedeki mekanik özelliklerinin doğru belirlenebilmesi için kırılmanın meydana geldiği bölgenin kesit geçiş noktalarından uzak ve kullanılacak ise ekstansometrenin ölçüm sınırları içerisinde olması önemlidir. Bununla birlikte, hassas sonuçlar elde etmek için yapılan numune tasarımları, numune işleme maliyetlerini de artırmaktadır. Bu noktada; maliyet/güvenilir sonuçlar arasında bir optimizasyon gereklidir.

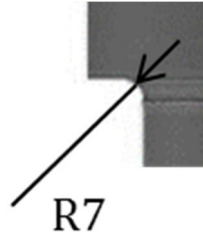
Bu tez çalışmasında, dambıl şekilli numunelerde gerilme yığılmalarını azaltmak ve en uygun çekme deney numunesini belirleyebilmek amacıyla 3 farklı numune geometrisi tasarlanmıştır. Tasarımlar yapılırken ilk olarak Brace (1964) tarafından önerilmiş olan numune şekli baz alınmış ve ASTM D 2936 standardında belirtilen koşulların sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca numune hazırlama açısından maliyet/güvenilir sonuçlar arasında denge kurulmaya çalışılmıştır. Yapılan tasarımların teknik çizimleri ve boyutları (mm cinsinden) Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Dambıl numune tasarımları a) Model 1 (Tek kademeli) b) Model 2 (İki kademeli) c) Model 3 (Sürekli değişken kesitli)

Şekil 4.3 (a)'da şekli ve boyutları gösterilen ilk tasarım (Model 1), işleme maliyetlerinin en az olduğu tek kademeli dambıl şekilli numune tasarımıdır. Şekil 4.3 (b)'de şekli ve boyutları gösterilen iki kademeli dambıl şekilli numune tasarımında (Model 2) kuvvet uygulama noktası ile hasarın beklendiği ince kesitli bölge arasındaki mesafenin artırılması amaçlanmıştır. İkinci tasarımdaki işleme maliyetleri ilk tasarıma göre daha fazladır. Şekil 4.3 (c)'de gösterilen üçüncü tasarım (Model 3) sürekli değişken kesitli numune tasarımıdır. Burada kopmanın gerçekleşmesinin istendiği orta bölümün çapı sabit olmayıp bir yay profili formunda kademeli olarak azalacak şekilde tasarlanmıştır. Buradaki amaç, numune boyunca gerilmeyi kontrollü bir şekilde artırmak ve kopmanın

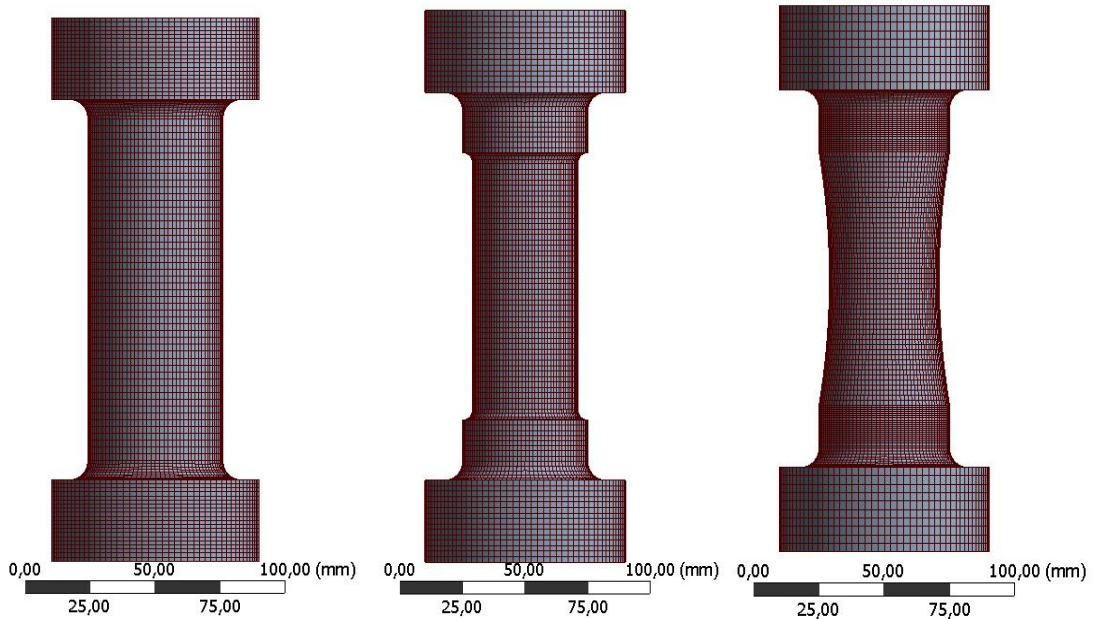
istenilen aralıkta kalmasını sağlamaktır. Bu tasarımın dezavantajı, yay profili formunu düzgün verebilmek için bilgisayar kontrollü torna tezgahlarına ihtiyaç duyulması ve işleme maliyetlerinin diğerlerinden daha fazla olmasıdır. Tüm numune geometrilerinde kesit geçiş yerlerinde, gerilme yığılmalarını azaltmak amacıyla radyuslar (R7 mm) atılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Kesit geçiş yerlerindeki radyus

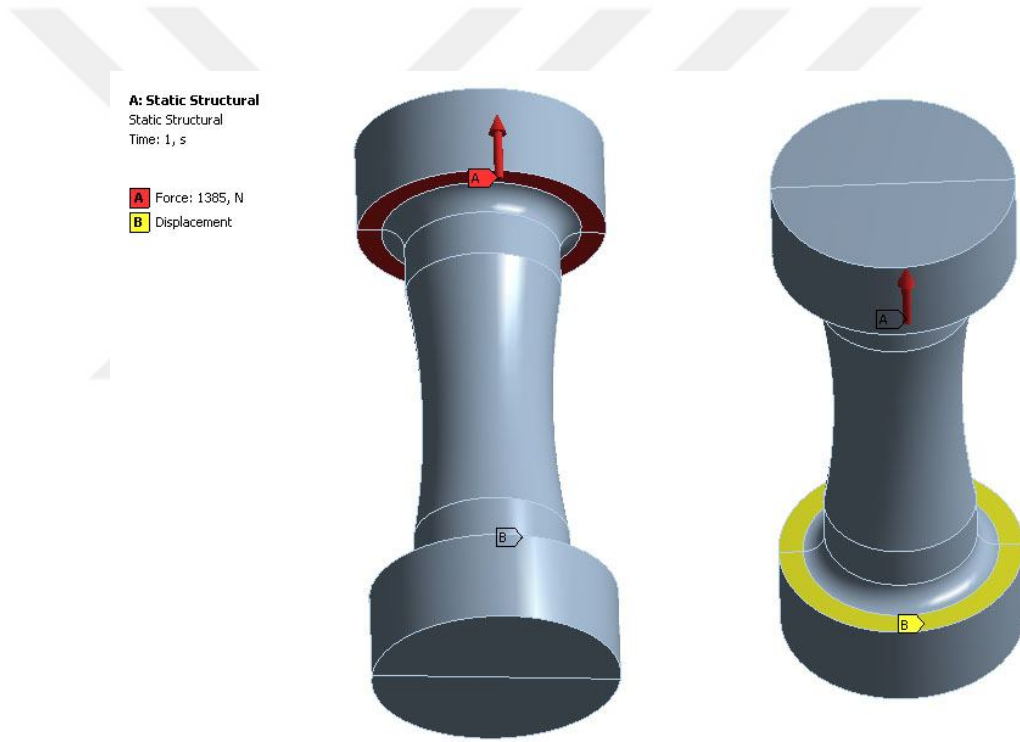
4.4.1. Tasarlanan modeller için sonlu elemanlar analizi

Bu tez çalışmasında doğrudan çekme numuneleri tasarımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme analizleri için ANSYS R18 paket programı kullanılmıştır. Analizler için sonlu elemanlar ağ yapısı oluşturulurken “quadratic” elemanlar kullanılmıştır. Şekil 4.5’te her bir numune geometrisi için oluşturulan mesh (ağ) yapısı gösterilmiştir.



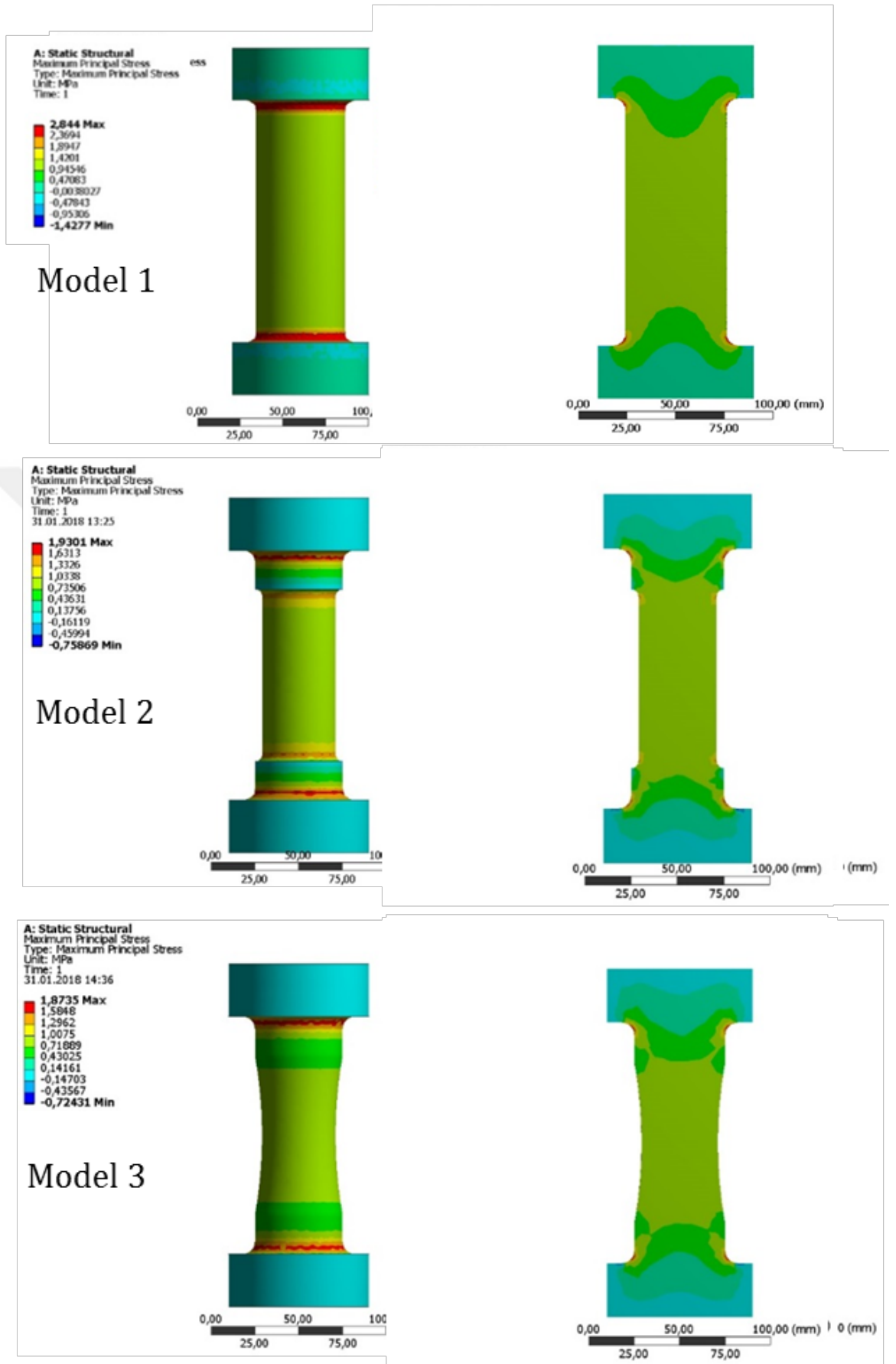
Şekil 4.5. Tasarımların mesh yapıları

Sonlu elemanlar gerilme analizinde kullanılacak malzeme özelliklerinden; elastisite modülü 30 GPa ve Poisson oranı 0,3 olarak belirlenmiştir. Kuvvet ve mesnet, gerçek modele uygun olarak numune baş kısımlarının hemen altında kesit geçiş yerlerinde oluşturulan halka şeklindeki yüzeylere uygulanmıştır. Mesnet şartı kuvvetle aynı doğrultuda bulunan Y eksenı boyunca hiç deplasman olmayacak şekilde tanımlanmıştır. Numunelere uygulanan kuvvet, F/A formülüne göre numune kesitinde 1 MPa'lık gerilme oluşturacak şekilde belirlenmiştir. Bu değer tek kademeli dambıl numune için kuvvet değeri 2123 N, iki kademeli ve sürekli değışken kesitli numune için bu değeri 1385 N olarak hesaplanarak programa girilmiştir. Şekil 4.6'da örnek olarak sürekli değışken kesitli numuneye uygulanan yük ve mesnet durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Kuvvet uygulama ve mesnetleme durumu.

Analiz sonrası her üç model için maksimum asal gerilme sonuçları; hem numune dış yüzeyi boyunca hem de numune kesiti iç yüzeyi boyunca Şekil 4.7'de verilmiştir.

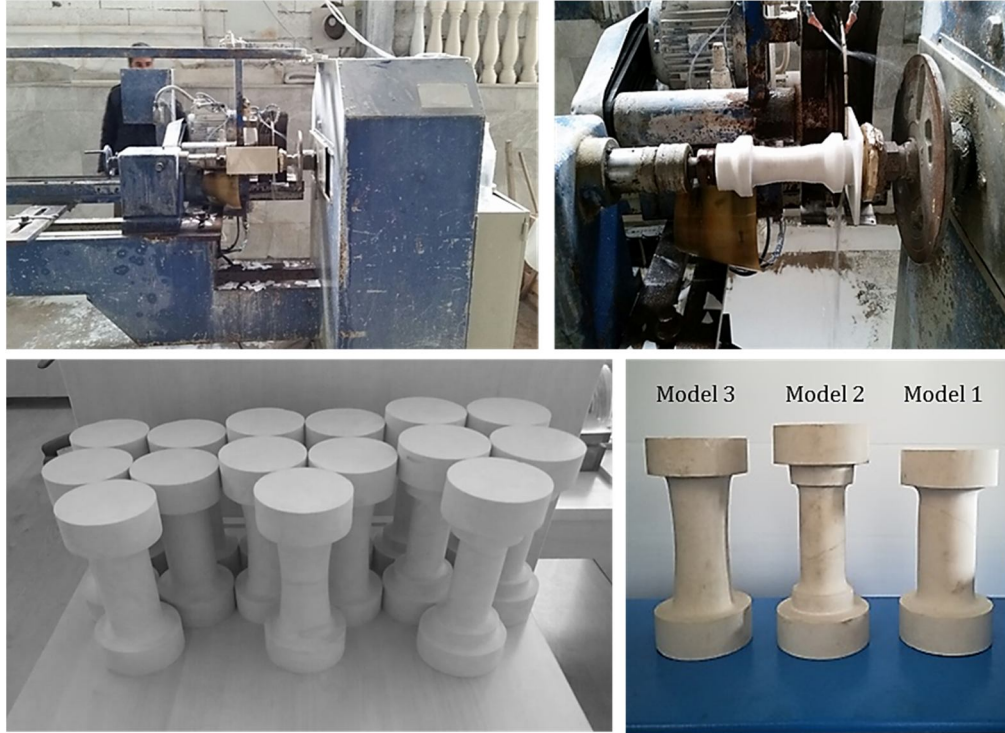


Şekil 4.7. Numunelerde oluşan dış/iç yüzey maksimum asal gerilmeler

Tüm modellerde numune dış yüzeyi kesit geçiş noktalarında, nominal gerilme değeri 1 MPa üzerinde asal gerilmeler görülmektedir. Şekil 4.7’de dış yüzeyden içeri doğru yatay eksenle ilerledikçe gerilme değerinin azaldığı ve kesitin orta kısmında nominal 1 MPa’nın altına indiği gözlemlenmektedir. Kesit geçiş yerlerinden uzaklaşıp numunenin orta kısımlarında gelindiğinde ise daha uniform gerilme dağılımının olduğu görülmektedir. En büyük gerilme yığılması nominal gerilmenin 2,84 katı ile tek kademeli numune kesitinde, en düşük gerilme yığılması ise nominal gerilmenin 1,87 katı ile sürekli değişken kesitli numunede meydana gelmektedir. İki kademeli kesitte ise gerilme yığılması nominal gerilmenin 1,93 katı kadar çıkmaktadır. Bu sonuçlara göre en uygun numunenin sürekli değişken kesitli numune olduğu söylenebilmektedir.

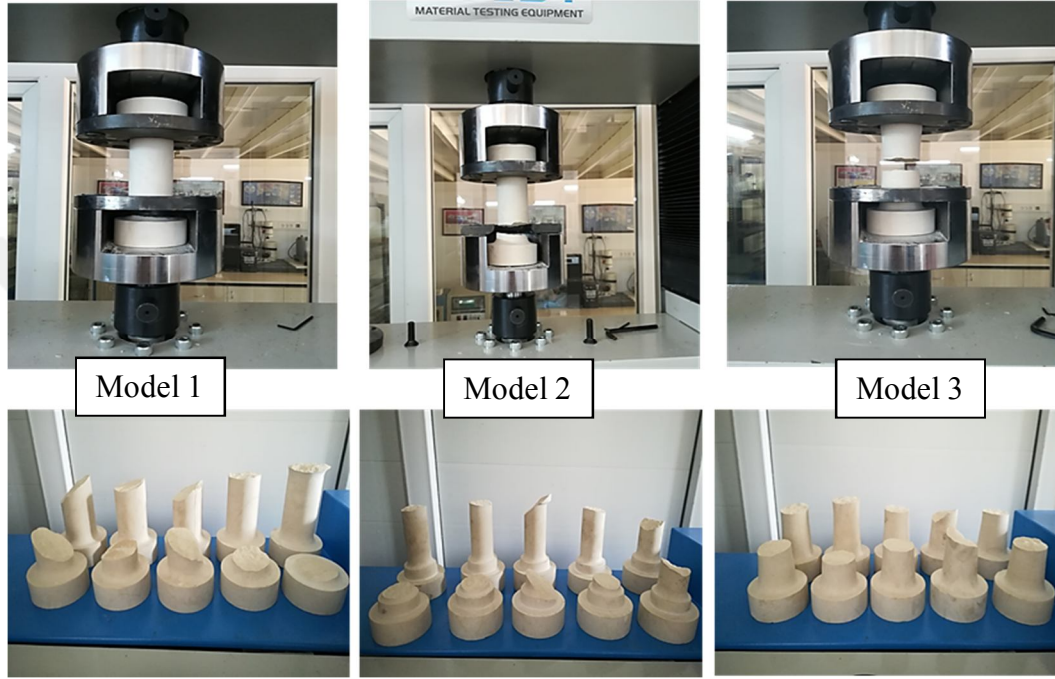
4.4.2. Tasarlanan modellerin TEÇD deney sonuçları

Gerilme analizleri önceki bölümde verilen 3 farklı model için, deneme çalışmalarını yapmak üzere torna tezgahında killi kireçtaşından (KK) 5’er adet numune hazırlanmış olup Şekil 4.8’ de numune hazırlama çalışmaları ve deneye hazır numunelerin son hali yer almaktadır.



Şekil 4.8. Tasarımlara uygun olarak Killi Kireçtaşından hazırlanan numuneler

Dambıl şekilli numunelerin TEÇD deneyleri ASTM D2936 standardı ve ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemler dikkate alınarak yapılmıştır. Yükleme hızları 20 N/s olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 4.9’ da deneylere ait görüntüler ve numunelerin kırıldıktan sonraki durumları yer almaktadır. Çizelge 4.6’da killi kireçtaşı (KK) numuneleri için 3 farklı geometride yapılmış TEÇD deney sonuçları ve gözlemler verilmiştir.



Şekil 4.9. TEÇD deneylerine ait görüntüler

Çizelge 4.6. 3 farklı tasarıma ait TEÇD deneysel çalışma sonuçları

Tasarım	I (mm)	D (mm)	F (N)	σ_t (MPa)	t (s)	Kırılma durumu
	120.34	48.36	859	0.468	57	Çap geçiş bölgesine yakın
	120.00	48.44	6682	3.626	446	Çap geçiş bölgesinden
	120.60	48.20	4334	2.375	290	Çap geçiş bölgesinden
	120.50	48.15	1416	0.778	65	Çap geçiş bölgesine yakın
	119.19	48.23	3257	1.783	213	Çatlak yüzeyinden
	117.32	38.40	Veri alınamadı			Çap geçiş bölgesinden
	118.00	38.30	Veri alınamadı			Çatlak yüzeyinden
	117.35	38.40	1901	1.641	92	Çap geçiş bölgesinden
	118.10	38.35	1245	1.078	65	Çap geçiş bölgesinden
	117.90	38.20	Veri alınamadı			Çatlak yüzeyinden
	111.10	42.56	5732	4.029	640	Tam ortadan
	111.30	42.30	2591	1.843	170	Tam ortadan
	111.00	42.42	3732	2.641	250	Tam ortadan
	110.79	42.48	3489	2.462	234	Tam ortadan
	111.00	42.40	2275	1.611	153	Tam ortadan
I: çeneler arasında kalan mesafe, D: numune çapı, F: yenilme anında ölçülen mak. yük, t: deney süresi						

Yapılan deneme çalışmalarının sonuçlarına göre;

- İlk olarak tek kademeli (Model 1) geometriye sahip numunelerin deneyleri yapılmıştır. 3 numunede yenilme çatlak yüzeylerinde, 2'sinde ise çap geçiş bölgesine yakın bölgede meydana gelmiştir.
- İki Kademeli (Model 2) geometriye sahip numunelerin yalnızca birinde deney düzgün yapılabilmiş, birinde yenilme ortada olmasına rağmen çatlak yüzeyine denk gelmiş, diğerlerinde ise numune yerleştirildiği anda hatalı kırılmalar meydana gelmiştir.
- Sürekli değişken kesitli (Model 3) numunelerin tamamında yenilme orta bölgede ya da ortaya yakın bir bölgede gerçekleşmiş ve anlamlı sonuçlar elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar (Çizelge 4.6) incelendiğinde, bu verilerin en uygun dambıl numune modeline karar verebilmek için yeterli olmadığı görülmüştür. Çünkü Model 2'ye ait deneylerde sağlıklı veri alınamamıştır. Ayrıca sonuçların killi kireçtaşı dışında farklı kayaçlar için de (daha sert) benzer şekilde olup olmayacağı sorusuna cevap bulunması da önemli hale gelmiştir. Bu nedenle farklı bir kayaç türü olan ince kristalli mermer numuneleri üzerinde Model 2 ve Model 3 geometrilere uygun olarak 3'er adet daha numune hazırlanarak TEÇD deneyleri tekrarlanmıştır.

Model 1 görece en kolay hazırlanan numune geometrisi olsa da deneme sonuçlarına göre numunelerin tümünde kırılma çap geçiş bölgesinde ya da yakınında gerçekleşmiştir. Ayrıca gerilme analizi sonuçlarına göre de çap geçiş bölgesinde gerilme yığılmalarının en yüksek olduğu modeldir. Bu nedenle tekrar denenmesine gerek duyulmamıştır.

Şekil 4.10'da deneylere ait görüntüler ve deney sonrası numunelerin durumu, Çizelge 4.7'de ise deneysel çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.10. İnce Kristalli mermer numunelerine ait ÇD deney görüntüleri

Çizelge 4.7. Model 2 ve Model 3 için tekrarlanan ÇD deney sonuçları (İnce kristalli mermer)

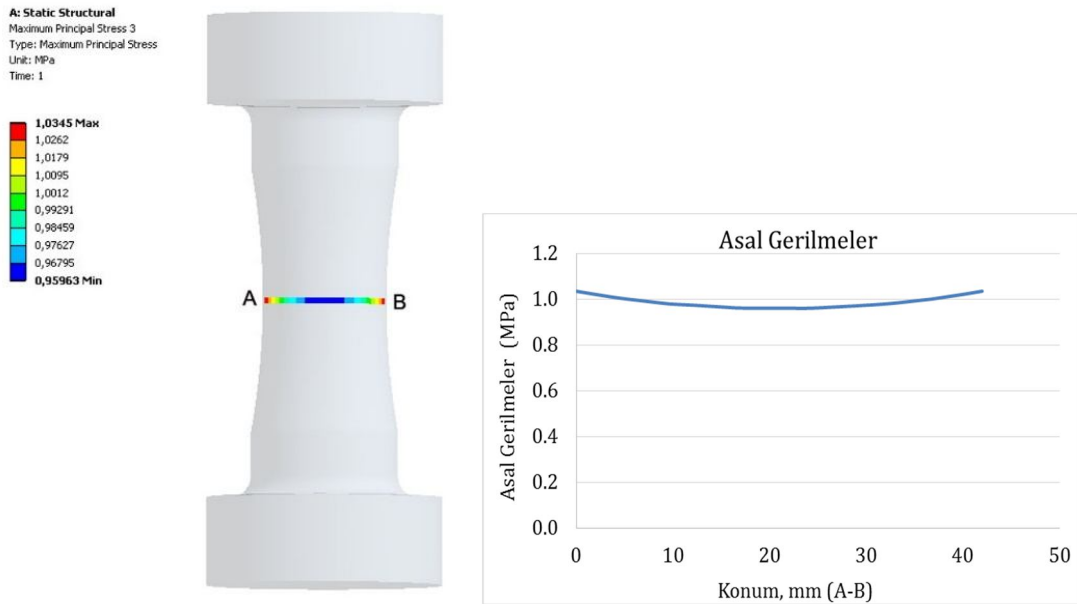
Tasarım	I (mm)	D (mm)	F (N)	σ_t (MPa)	t (s)	Kırılma durumu
Model 2	142.80	42.8	968	0.673	51	Çap geçiş bölgesinden
	141.10	42.1	5977	4.294	399	Çap geçiş bölgesinden
	142.50	44.2	5667	3.693	377	Çap geçiş bölgesinden
Model 3	142.00	40.8	7953	6.083	530	Tam ortadan
	143.00	43.2	5484	3.741	366	Tam ortadan
	140.90	41.8	5573	4.061	372	Tam ortadan

Çizelge 4.7' deki deney sonuçları incelendiğinde Model 2' ye uygun olarak hazırlanan numunelerde, başlangıç çalışmasında olduğu gibi hasarın çap geçiş bölgesinde gerçekleştiği görülmüştür. Model 3'te ise her 3 deneyde de yenilmenin numunenin inceltilmiş olan orta bölgesinde gerçekleştiği, elde edilen dayanım sonuçlarının ise literatürde mermer için belirlenen değerlere yakın olduğu görülmüştür. Bu deneme çalışmaları sonucunda (hem deneysel hem de nümerik analizler sonucunda), tasarlanan modeller arasında en uygun modelin veya numune geometrisinin sürekli değişken kesitli numune (Model 3) olduğuna karar verilmiştir. Böylece tez kapsamında hedeflenen model

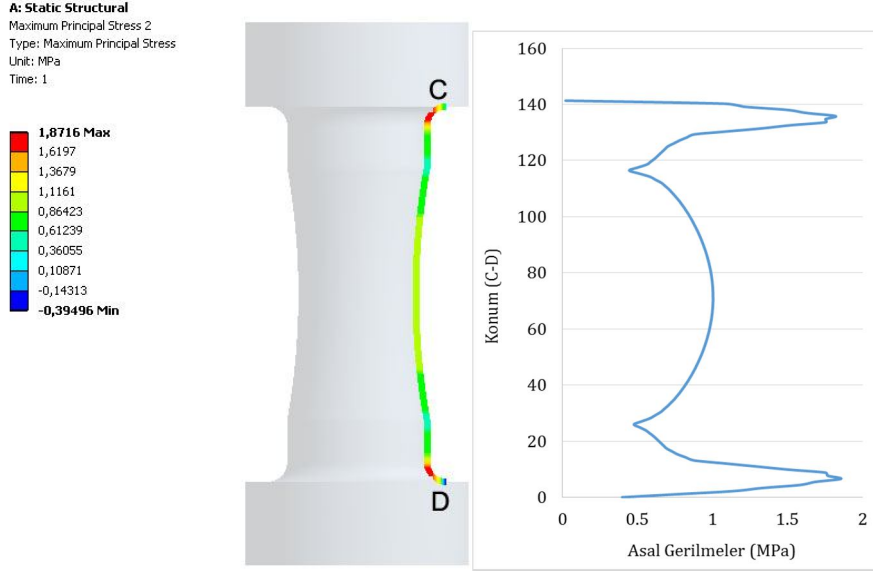
tanımlanarak gerçek tek eksenli çekme dayanımlarının deneysel olarak belirlenebileceği numune modeli belirlenmiştir.

4.4.3. Belirlenen dambıl numune geometrisi için gerilme analizleri

Sürekli değişken kesitli numune geometrisinde numunenin dış profili bir yay biçiminde olduğu ve kesitin sürekli değiştiği göz önünde tutulursa, kırılmanın (kopmanın) beklendiği orta kesitteki gerilme dağılımının uniform olup olmadığının da belirlenmesi gerekir. Bu amaçla Sürekli Değişken Kesitli Numune geometrisi için numune orta kısmından geçen yatay hat boyunca hesaplanan asal gerilme grafiği Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Şekilde, numune dış yüzeyinde 1.034 MPa’lık bir gerilme meydana geldiği ve 1 MPa’lık nominal gerilme ile arasında yaklaşık %3.4’lük bir fark olduğu görülmektedir. Bu değer hata sınırları içerisinde olup kesit boyunca gerilme dağılımının uniform kabul edilebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca Şekil 4.12’de, beklendiği gibi, yay şeklinde azalan numune kesitinden dolayı yay şeklinde artan bir gerilme dağılımı görülmektedir. Kesitin en ince olduğu tam orta noktada nominal gerilme değerine yakın gerilmeler hesaplanmıştır.

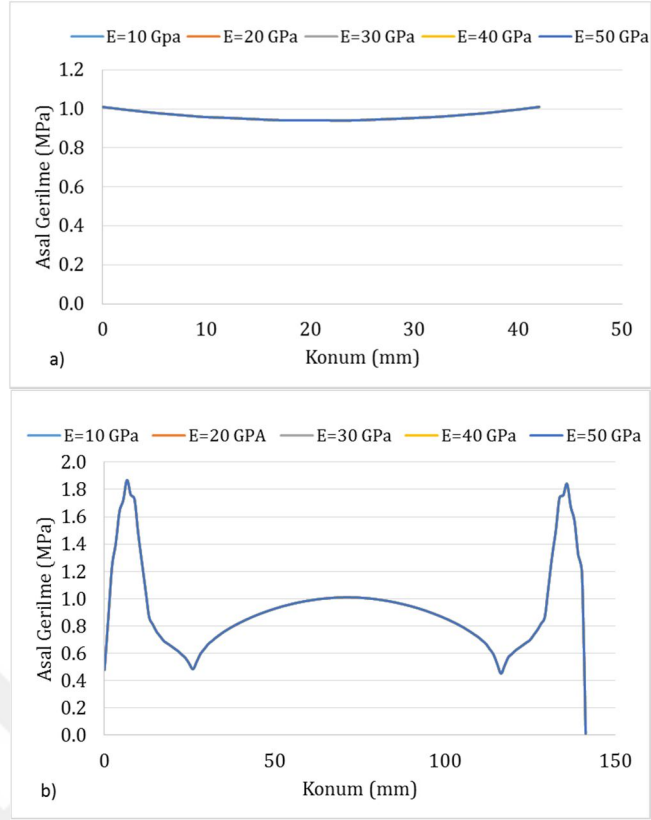


Şekil 4.11. Sürekli değişken kesitli geometri için orta kısım yatay hat boyunca (A-B) asal gerilme dağılımı

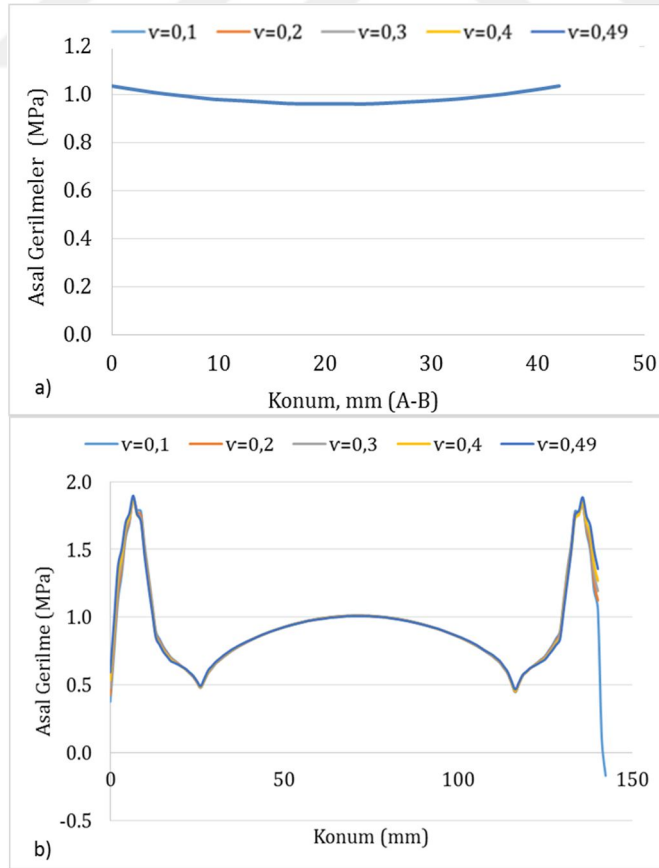


Şekil 4.12. Sürekli değişken kesitli geometri için dış kısım dikey hat boyunca (C-D) asal gerilme dağılımı

Sonlu elemanlar ile gerilme analizinde en önemli iki parametre olan elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) değerleri, kaya numunesinin türüne bağlı olarak değişmektedir. Deneysel çalışmalar kayaçlarda E değerinin genellikle 10-60 GPa, ve ν değerinin 0.1-0.49 arasında değiştiğini göstermektedir. Bu çalışmada önerilen sürekli değişken kesitli numune için tek eksenli çekme deneyinde E ve ν 'nin değişiminin gerilme dağılımı etkisini görmek amacıyla farklı E ve ν değerleri için analizler yapılmıştır. Öncelikle ν değeri 0.3 olarak sabit tutularak E=10, 20, 30, 40 ve 50 GPa değerlerinde analiz yapılmıştır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterilen A-B ve C-D hatları boyunca oluşan gerilme dağılımları Şekil 4.13'te verilmiştir. Poisson oranı değişiminin gerilme dağılımına etkisini görmek için E değeri 30 GPa'da sabit tutularak sırasıyla $\nu=0,1, 0,2, 0,3, 0,4$ ve 0,49 değerleri için yeni analizler yapılmıştır. A-B ve C-D hatları boyunca oluşan gerilme dağılımı Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Analiz sonuçları; E değeri değişiminin gerilme dağılımına etkisinin olmadığını; Poisson oranındaki değişimin ise gerilme dağılımında çok küçük sapmalara neden olsa bile bunun ihmal edilebilecek seviyede olduğunu göstermektedir. Tüm bu analiz sonuçları deneylerden elde edilecek gerilme değerlerinin TEÇD değerlerini yansıtacağına işaret etmektedir.



Şekil 4.13. Elastisite modülünün gerilme dağılımına etkisi a) A-B hattı, b) C-D hattı



Şekil 4.14. Poisson oranının gerilme dağılımına etkisi a) A-B hattı, b) C-D hattı

4.4.4. Sürekli değişken kesitli numune geometrisinde gerinme ve elastisite modülü için düzeltme katsayısı

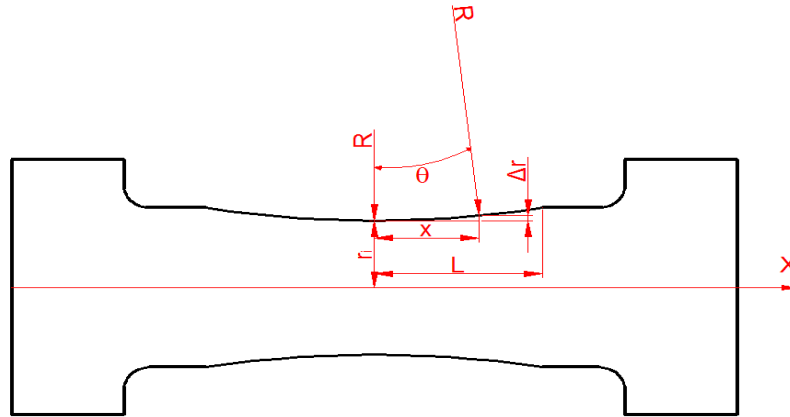
Sürekli değişken kesitte gerilme değerleri direkt olarak kullanılabilmesine rağmen gerinme değerlerinin klasik yöntemlerle hesaplanması yanlış bir yöntem olacaktır. Diğer taraftan çekme cihazı yazılımları çekme numunesinde kesitin sabit olduğunu, yani uzama bölgesinin sabit gerilme altında kaldığını varsayarak gerinme değerini hesaplamaktadırlar. Klasik yöntemde kesiti sabit numuneler için numunedeki toplam uzama Eşitlik 4.1’de verilen formül ile hesaplanabilir. Burada ΔL : toplam uzama, L : uzunluk, F : uygulanan yük, A : kesit alanı ve E : Elastisite modülüdür.

$$\Delta L = \int_0^L \frac{F dx}{AE} = \frac{FL}{AE} \quad (4.1)$$

Ancak bu tez çalışmasında kullanılan numune kesiti sürekli değiştiği için kesit alanının (A), konumun (x) bir fonksiyonu olarak yazılması gerekmektedir. Hesaplarda kolaylık olması bakımından yüklemenin x eksenı boyunca yapıldığı ve numunenin x eksenı boyunca uzadığı (Şekil 4.15) varsayılırsa;

$$A_{(x)} = \pi(r_i + \Delta r)^2 \quad (4.2)$$

şeklinde olacaktır. Burada r_i : numunenin orta bölgesinin yarıçapı, Δr : x konumundaki yarıçap farkı, R : numunenin değişken kesitinin eğrilik yarıçapı, θ : x konumuna göre yayın açısıdır.



Şekil 4.15. Sürekli değişken kesitli numune geometrisi

Şekilden $\Delta r = R(1 - \cos\theta)$ ve $x = R\sin\theta$ olduğu görülmektedir.

$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{x}{R}\right)$ ve Δr 'nin değeri yerine yazılırsa

$$A_{(x)} = \pi \left(r_i + R \left(1 - \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{x}{R}\right)\right) \right) \right)^2 \text{ veya}$$

$$A_{(x)} = \pi \left(r_i + R - \sqrt{R^2 - x^2} \right)^2 \text{ şeklinde ifade edilebilir.}$$

Toplam uzama değeri ise,

$$\Delta L = \frac{F}{E} \int_0^L \frac{dx}{\pi \left(r_i + R \left(1 - \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{x}{R}\right)\right) \right) \right)^2} \quad (4.3)$$

veya

$$\Delta L = \frac{F}{E} \int_0^L \frac{dx}{\pi \left(r_i + R - \sqrt{R^2 - x^2} \right)^2} \quad (4.4)$$

formüllerinden elde edilebilir. Ancak yukarıdaki her iki gerinme formülünün de analitik çözümü mümkün olmadığından sayısal olarak çözülmesi gerekmektedir. Numune geometrisinde $r_i=21$ mm, $R=255,13$ mm olduğu dikkate alınır ve $F=1000$ N ve $E=20$ GPa olduğu kabul edilirse numunedeki toplam elastik uzama yukarıdaki formüllerden 0,0028963802 mm olarak bulunur. Oysaki bu mekanik özelliklere sahip 21 mm yarıçapındaki bir numunenin uzaması klasik yöntemlerle hesaplandığında 0,0032480600 mm olmaktadır. Her iki değer birbirine oranlandığında $k_s=0,8917$ katsayısı elde edilir. Bu durumda programın hesapladığı gerinme değerleri bu k_s katsayısına bölünerek, elastisite modülleri ise bu k_s katsayısı ile çarpılarak düzeltilebilir.

4.5. Tüm Kayaçlar İçin TEÇD Deney Sonuçları

Önceki bölümlerde dambıl şekilli numunelerin doğrudan çekme deneyleri için belirlenen numune geometrisi ve geometriyi belirlemek için izlenen yöntemler gerekçeleri ile birlikte açıklandığı için bu bölümde sadece deney sonuçları verilmiştir. 9 farklı kayaç türü için, tez çalışmasının en başında temin edilen 120x120x250 mm boyutlarındaki prizmatik kaya örneklerinden çeşitli atölye ve

fabrikalarda Model 3'e uygun numuneler hazırlanmıştır (Şekil 4.16). Kayaçların önceden belirlenemeyen yapısal kusurlar içermesi, mineralojik farklılıklar, aşınmaya ya da torna altında işlenmeye karşı gösterdikleri direnç farklılıkları gibi nedenler, tez çalışmasının başında planlandığı gibi her tür kayaç için en az 10 adet deney numunesi üretilmesi imkânını ortadan kaldırmıştır. Tez kapsamında yapılan tüm deneyler için kayaçlar, en başından aynı kaya bloğundan temin edildiği için deney numuneleri işlenirken verilen fireler yerine ilave numune temin edilmesi yoluna gidilmemiştir.



Şekil 4.16. Hazırlanan TEÇD deney numunelerinden görüntüler

ASTM D 2936 standardında, numunenin 5 ila 15 dakika arasında yenilmesi sağlanacak şekilde yük uygulanması gerektiği belirtilmektedir. Bu nedenle yükleme hızları Tuf için 5 N/s, Andezit, Granit ve Diyabaz için 15 N/s, diğer kayaçlar içinse 10 N/s seçilmiştir. Dayanım değeri; yenilme anında kaydedilen maksimum yükün, yenilmenin gerçekleştiği yüzey alanına bölünmesi ile hesaplanmıştır. Nümerik analizlerde öngörüldüğü üzere ön deneme

çalışmalarında sürekli değişken kesitli numunelerin tümü orta bölümden kopmuştur. Ancak TEÇD deney sonuçlarına göre bazı numunelerin çap geçiş bölgesinde (gerilme yığılmasının olduğu bölge) yenildiği gözlemlenmiştir. Bu durumdaki deneyler için hesaplama yapılırken numunenin ince olan orta bölümü değil, yenilmenin olduğu bölgenin kesit alanı dikkate alınmış, ancak sonuçlar verilirken ortalamaya dâhil edilmemiştir. Hesaplanan elastisite modülü değerleri, numune geometrisinden kaynaklanan ve bir önceki bölümde açıklanan düzeltme katsayısı ($k_s=0,8917$) ile çarpılarak verilmiştir. Şekil 4.17’de deneylere ait bazı fotoğraflar, Şekil 4.18’de numunelerin deney sonrası görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4.17. TEÇD deneylerine ait görüntüler



Şekil 4.18. TEÇD deneyleri sonrası numunelerin kırılma durumları

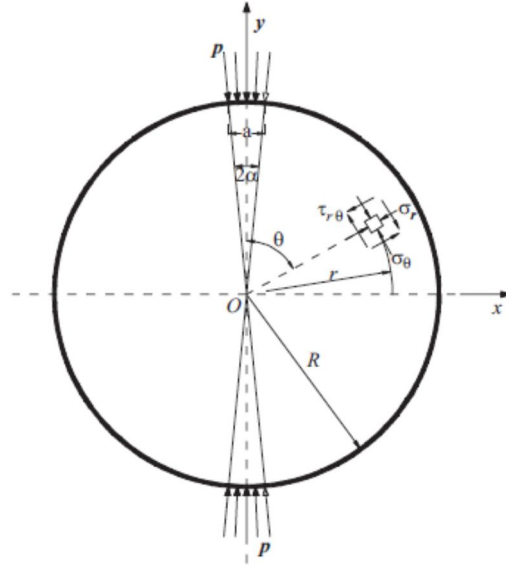
Çizelge 4.8’de TEÇD (σ_t) deney sonuçları yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek değerlerin magmatik kayalarda bulunduğu görülmektedir. Tüf kayacı magmatik kökenli olmasına karşın TEBD sınıfı “çok düşük dayanımlı” bir kayaktır. Bu nedenle hem TEÇD, hem de Elastisite modülü (E_t) değerleri en düşük kayaç türü olarak belirlenmiştir. Karbonat kökenli kayaçların (KK, DK, İNM ve İRM) TEÇD değerleri birbirine yakın bulunmuştur. Elastisite modülü yüksek olsada K kodlu kireçtaşı numunelerinde kırık çatlak sistemleri fazla olduğundan TEÇD değerleri tüf numunesine yakın bulunmuştur.

Çizelge 4.8. TEÇD deney sonuçları

Num. Kodu	Num. Adedi	σ_t (MPa)		DK. (%)	E_t (GPa)	Düzeltilmiş E_t (GPa)	Yükleme Hızı (N/s)
		Ort.	SS			Ort.	Ort.
K	8	1.559	0.15	9.32	46.59	41.54	10
KK	10	3.448	0.90	26.17	41.15	36.70	10
DK	8	3.289	0.96	29.24	69.48	61.95	10
İNM	9	3.194	0.61	18.98	34.35	30.63	10
İRM	9	2.845	0.57	19.88	51.63	46.04	10
T	5	1.360	0.32	23.31	5.38	4.79	5
A	7	4.880	1.07	21.85	41.99	37.45	15
G	7	5.271	1.11	20.98	40.41	36.03	15
D	7	8.870	2.89	32.65	66.24	59.06	15

4.6. Brezilya Dolaylı Çekme Dayanımı İçin Nümerik Analiz Çalışmaları

Brezilya disk deneyi, numune hazırlamadaki kolaylık ve gerilme hesaplarındaki basitlik gibi avantajlarından dolayı birçok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir. Brezilya diskinin sonlu elemanlar analizinde gerçek sonuçlara yaklaşabilmek için yapılan kabuller büyük önem taşımaktadır. Örneğin yükün tekil bir kuvvet olarak mı, yoksa belli bir bölgede yayılı yük olarak mı etki etmesi gerektiği önemli bir sorudur. Hondros (1959) tarafından Brezilya numunesinde gerilme dağılımını tespit etmek için çıkarılmış olan analitik ifadede, yükün 2α açısına karşılık gelen yay üzerinde yayılı olarak etkidiğini varsayılmıştır. Numune boyunca oluşacak gerilmeler için Eşitlik 4.5a, 4.5b ve 4.5c'de verilen analitik denklemleri bu temel üzerine geliştirmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Hondros (1959) denklemi için numunedeki yükleme durumu.

$$\sigma_r = -\frac{2p}{\pi} \left\{ \alpha + \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{n} \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \sin(2n\alpha) \cos(2n\theta) \right\} \quad (4.5a)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{2p}{\pi} \left\{ \alpha - \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \sin(2n\alpha) \cos(2n\theta) \right\} \quad (4.5b)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{2p}{\pi} \left\{ \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \sin(2n\alpha) \sin(2n\theta) \right\} \quad (4.5c)$$

Bu denklemlerde P: uygulanan yükü, α : yükün uygulandığı varsayılan yay açısının yarısını, R: numune yarıçapını, r: gerilmesi hesaplanan noktanın orijine uzaklığını ve θ : r yarıçapının pozitif x eksenini ile yaptığı açıyı göstermektedir.

Eşitlik 4.5'te verilen Hondros'un denklemleri sonsuz seri açılımını içermekte ve işlem yükünü artırmaktadır. Mellor ve Hawkes (1971), Hondros'un denklemini dikey Y eksenini boyunca normal gerilmeleri verecek şekilde modifiye etmişler ve Eşitlik 4.6a ve 4.6b ile verilen denklemleri çıkarmışlardır.

$$\sigma_x = \frac{F_a}{\pi R t \alpha} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{r}{R}\right)^4} + \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{r}{R}\right)^2}{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \tan \alpha \right] \right\} \quad (4.6a)$$

$$\sigma_y = -\frac{F_a}{\pi R t \alpha} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{r}{R}\right)^4} - \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{r}{R}\right)^2}{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \tan \alpha \right] \right\} \quad (4.6b)$$

Burada F_a : uygulanan yükü, R: numune yarıçapını, t: numune kalınlığını, 2α : yükün numuneye uygulandığı bölgedeki radyal genişliği ve r: gerilmesi hesaplanan noktanın diskin merkezinden olan uzaklığını göstermektedir. ISRM standardına göre konkav yükleme plakası kullanıldığı takdirde kırılma anında 2α değerinin 10° alınabileceğini tavsiye etmektedir. Jianhong vd. (2009), 2α değerinin kaya tipine, plastik özelliklerine, mineral miktarına, kırılabilirliğine ve rijitliğine bağlı olarak değişebileceğini ve sabit değer olarak alınamayacağını belirterek, P (ya da F) kuvvetinin tekil yük olarak dikkate alındığı, numune merkezinden geçen dikey doğrultudaki gerilmeleri hesaplayabilmek için alternatif denklemler (Eşitlik 4.7a, 4.7b ve 4.7c) önermişlerdir.

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t} \left\{ \frac{(R-y)x^2}{[(R-y)^2 + x^2]^2} + \frac{(R+y)x^2}{[(R+y)^2 + x^2]^2} - \frac{1}{2R} \right\} \quad (4.7a)$$

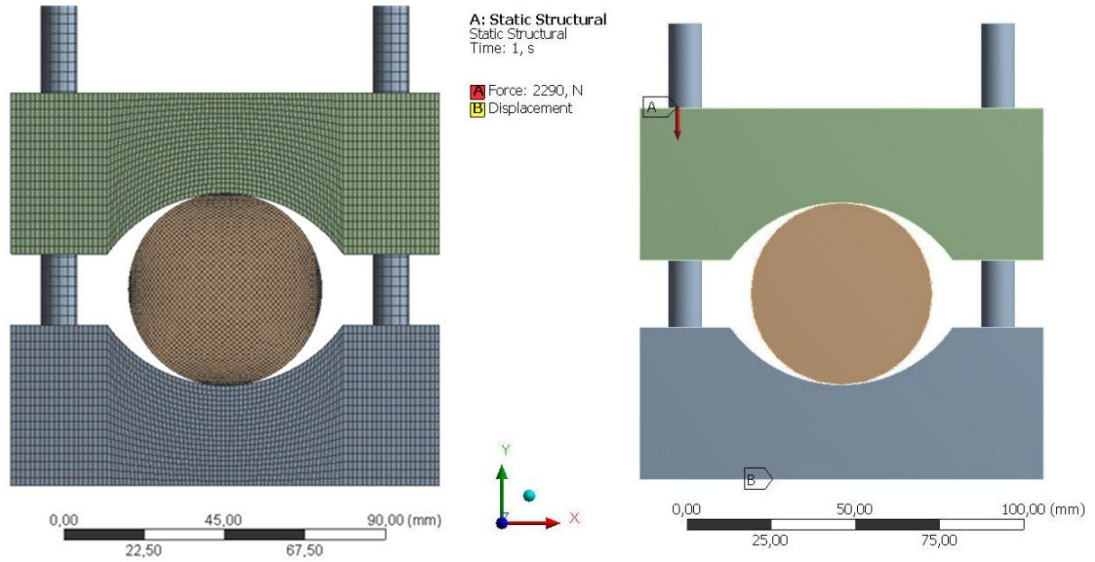
$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi t} \left\{ \frac{(R-y)^3}{[(R-y)^2 + x^2]^2} + \frac{(R+y)^3}{[(R+y)^2 + x^2]^2} - \frac{1}{2R} \right\} \quad (4.7b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2P}{\pi t} \left\{ \frac{(R-y)x}{[(R-y)^2 + x^2]^2} + \frac{(R+y)x}{[(R+y)^2 + x^2]^2} \right\} \quad (4.7c)$$

Bu denklemlerde P:uygulanan yükü, R:numune yarıçapını, t:numune kalınlığını, x ve y ise orijini numune merkezinde olan Kartezyen koordinat sistemine göre gerilmesi hesaplanacak noktanın koordinatlarını göstermektedir.

4.6.1. Brezilya diski için sonlu elemanlar analizleri

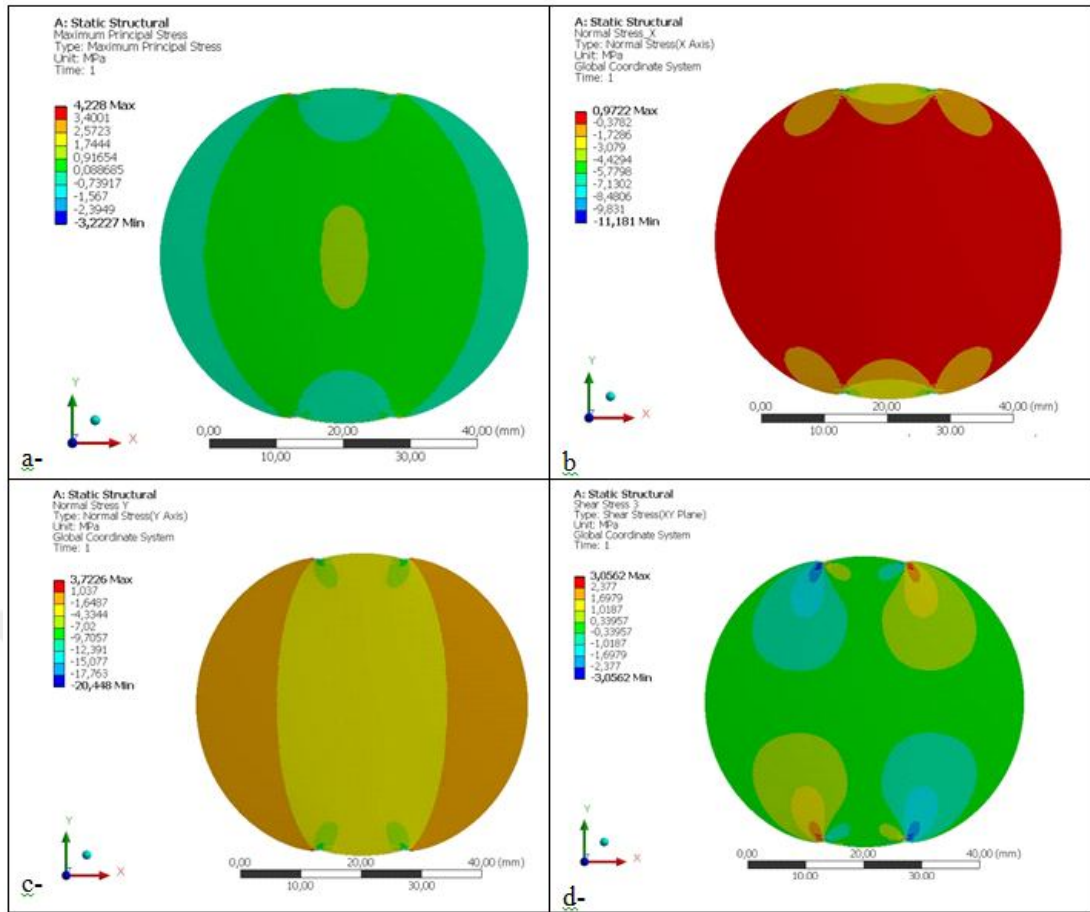
Literatürdeki bu tartışmalar da dikkate alınarak bu tez çalışmasında modelleme, deney ortamına uygun olarak çelik malzemeli standart Brezilya çenesi kullanılarak yapılmıştır. Çelik malzeme için elastisite modülü 200 GPa ve Poisson oranı 0,3 olarak kabul edilmiştir. Kaya malzemesi için elastisite modülü 30 GPa ve Poisson oranı 0,3 olarak girilmiştir. Numune geometrisi olarak D=54 mm çapında t=27 mm kalınlığında (boyunda) bir üç boyutlu disk modellenmiştir. Modelin sonlu elemanlar ağ yapısı Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Analizlerde (t/D=0,5 için) numunenin orta kısmında ($2F/\pi Dt$) formülüne göre 1 MPa değerinde gerilme üretecek yük değeri 2290 N olarak belirlenmiştir. Şekil 4.20’de görüldüğü gibi yük, üst çeneye yayılı olarak etki ettirilmiştir. Alt çene ise sabitlenmiştir.



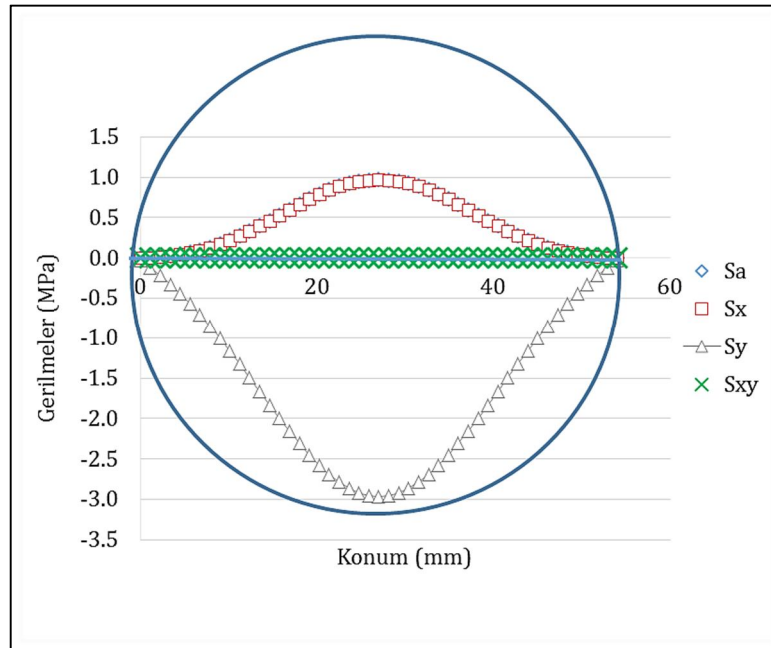
Şekil 4.20. a) Sonlu elemanlar ağ yapısı b) Yükleme ve mesnetleme durumu

4.6.2. Sayısal sonuçlar

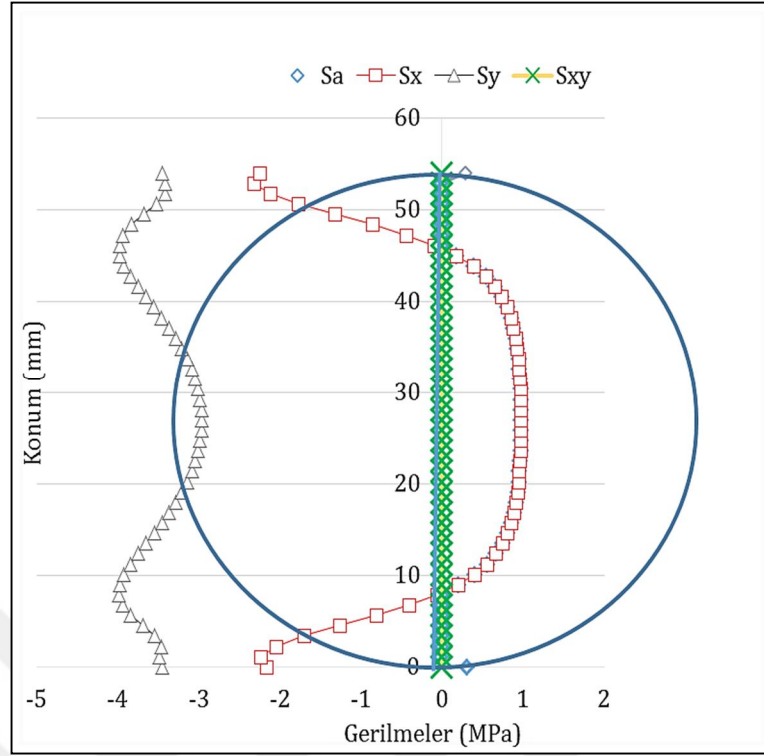
Brezilya diski için sonlu elemanlar analizinde diğer bölümlerde olduğu gibi ANSYS R18 paket programı kullanılmıştır. Sonuçlara göre numune dış yüzeyinde meydana gelen maksimum asal gerilmeler, X eksen yönündeki gerilmeler, Y eksen yönündeki gerilmeler ve kayma gerilmeleri sırasıyla Şekil 4.21(a), 4.21(b), 4.21(c) ve 4.21(d)'de gösterilmiştir. Numune üzerine kuvvetin uygulandığı temas noktaları göz ardı edilirse maksimum asal gerilmelerin, X yönündeki çekme gerilmelerinin orta kısmında daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Brezilya disk deneyleri hasarın genellikle orta kısımda ve kuvvet etki doğrultusunda (dikey hat) meydana geldiğini göstermektedir. Bu kritik noktalardaki gerilmelerin sayısal değerlerini daha net görebilmek için; yatay hat üzerinde hesaplanan maksimum asal gerilme (S_a), X yönündeki normal gerilme (S_x), Y yönündeki normal gerilmeler (S_y) ve XY düzlemindeki kayma gerilmeleri (S_{xy}) Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Benzer şekilde dikey hat ve bu hat üzerindeki farklı gerilme değerleri Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Her iki şekilde de görüldüğü gibi numune merkezinde analitik hesaplara uygun 1 MPa'lık gerilme oluşmuştur. Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te numunenin orta kısmında maksimum asal gerilme ile X yönündeki çekme gerilmesinin neredeyse aynı değerleri aldığı görülmektedir. Bunun nedeni; söz konusu bölgelerde kayma gerilmelerinin sıfıra çok yakın değerler almasıdır. Yatay eksenden bakıldığında (Şekil 4.22) maksimum asal gerilmenin ve X yönündeki normal gerilmenin orta noktada olduğu görülmektedir. Dikey eksenden bakıldığında ise maksimum asal gerilmenin ve X yönündeki normal gerilmenin numune merkezinden yaklaşık ± 15 mm uzaklık boyunca bir hat şeklinde sabit ve teorik hesaba uygun olarak 1 MPa seviyesinde olduğu görülmektedir. Kuvvet uygulama noktalarına doğru yaklaştıkça maksimum asal gerilmeler sıfır değerine doğru yaklaşırken, X yönündeki normal gerilmeler bası gerilmesine dönüşerek negatif değerler almaktadır. Asal gerilmelerin sıfırda kalmasının nedeni analizin üç boyutlu olmasındandır. Uç kısımlarda hem X yönündeki hem de Y yönündeki normal gerilmeler bası (negatif) gerilmeleri olduğundan maksimum asal gerilme Z eksen yönünde ve sıfır değerindeki normal gerilmeler olmaktadır.



Şekil 4.21. Brezilya disk numunesinde gerilme dağılımı a) Asal gerilmeler, b) X eksenı yönünde gerilmeler, c) Y eksenı yönünde gerilmeler, d) XY düzleminde Kayma gerilmeleri.



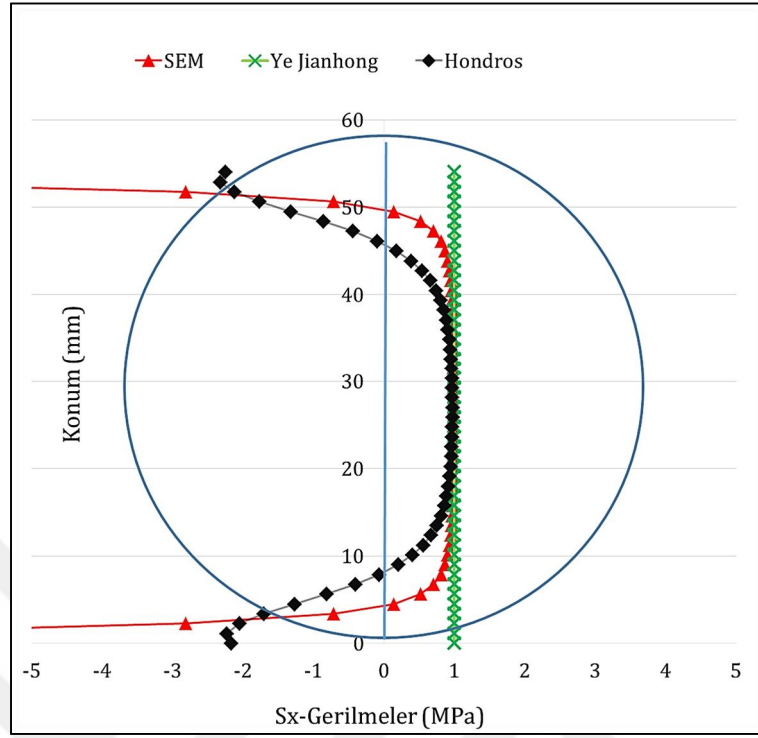
Şekil 4.22. Yatay hat boyunca gerilme dağılımı ($E=30$ GPa, $\nu=0,3$)



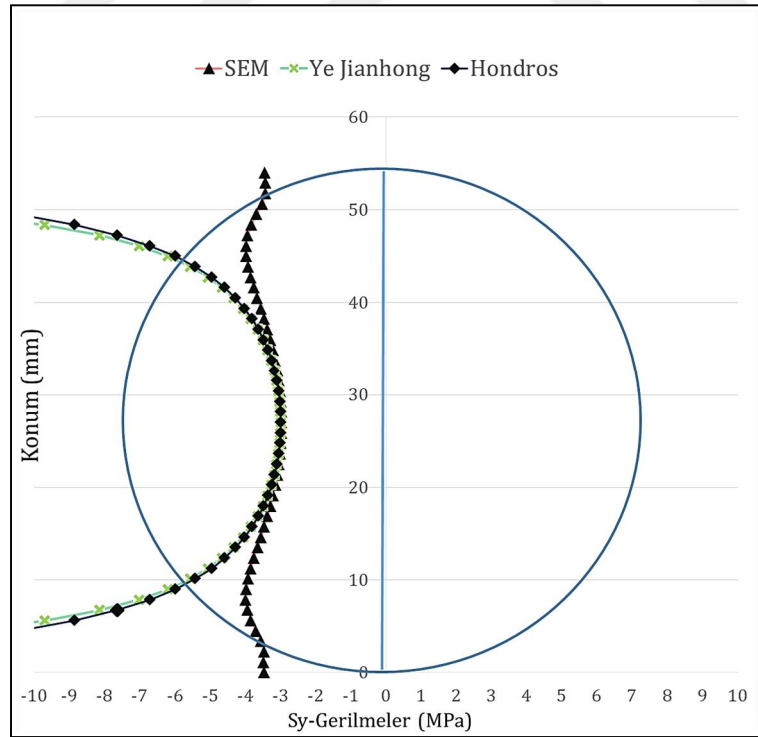
Şekil 4.23. Dikey Hat boyunca gerilme dağılımı ($E=30 \text{ GPa}$, $\nu=0,3$)

4.6.3. Sayısal analiz sonuçlarının analitik sonuçlarla karşılaştırılması

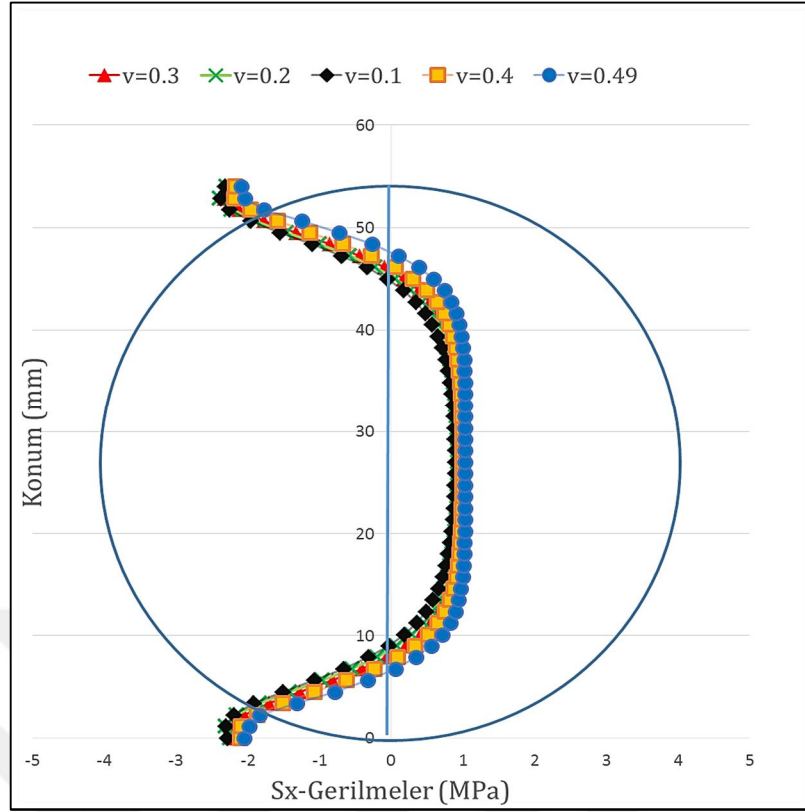
Brezilya disk numunesinde merkezden geçen kritik dikey hat üzerindeki Sonlu elemanlar metodu (SEM) ile hesaplanan X ve Y yönündeki gerilmelerin, Eşitlik 4.5'de verilen Hondros denklemleri ve Eşitlik 4.7'de verilen Jianhang denklemleri ile karşılaştırması sırasıyla Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Eşitlik 4.5 ve Eşitlik 4.7 ile verilen denklemlerde eksen takımı numune merkezine yerleştirilmiştir. Dikey eksen boyunca ($x=0$ konumu) Jianhang denklemi $P/2\pi Rt$ eşitliğine dönüşmekte ve dikey hat boyunca tek bir değer hesaplamaktadır. Orta kısım için doğru sonuçlar veren bu denklem kenarlara yaklaştıkça SEM sonuçlarından uzaklaşmaktadır. Bunun yanında Hondros denklemi SEM sonuçlarına daha yakın değerler hesaplamaktadır. Dikey eksen boyunca oluşan Y eksen yönündeki normal gerilmelerde ise orta noktaya yakın bölgelerde her üç denklemde aynı değerleri hesaplamaktadır. Kenarlara doğru gidildikçe Jianhang ve Hondros denklemleri yakın değerler hesaplamakla birlikte SEM yöntemi ile hesaplanan değerlerden uzaklaşmaktadırlar (Şekil 4.25).



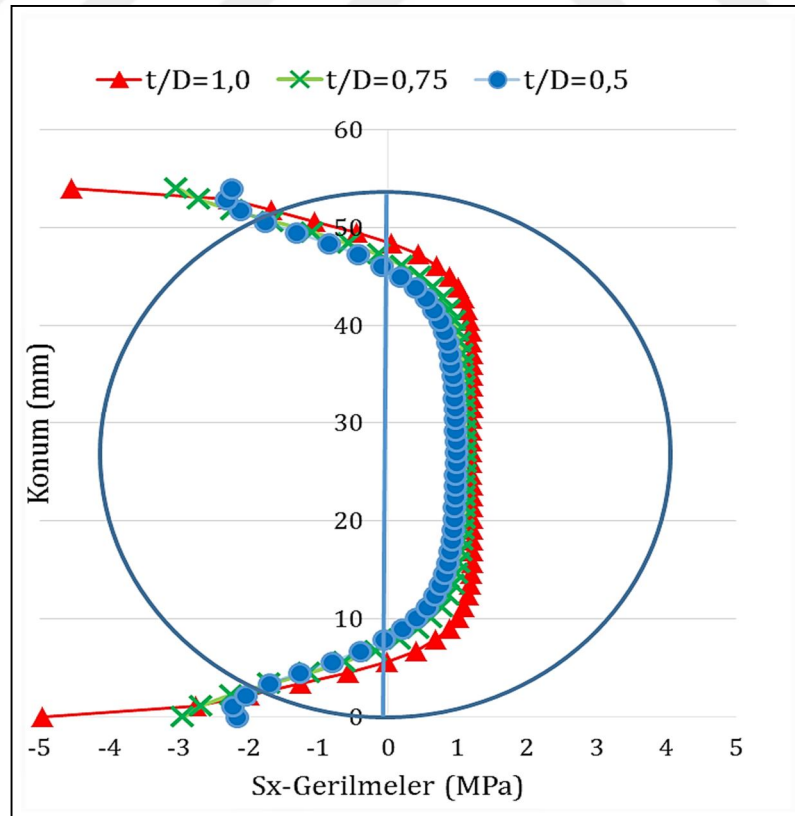
Şekil 4.24. Kritik dikey hat boyunca oluşan X eksen yönündeki gerilmeler



Şekil 4.25. Kritik dikey hat boyunca oluşan Y eksen yönündeki gerilmeler



Şekil 4.27. Gerilme dağılımının Poisson oranı ile değişimi ($E=30$ GPa)



Şekil 4.28. Gerilme dağılımının t/D oranı ile değişimi ($E=30$ GPa, $\nu=0,3$)

4.7. Brezilya Dolaylı Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

Kayaçlarda Brezilya dolaylı çekme dayanımı (splitting tensile strength) için TS 7654 standardına göre yükleme hızının 3,5 ile 20 MPa/dak arasında, kalınlığın çapa oranının (t/D) 0,5 ile 1,0 arasında olması gerekmektedir. ASTM D3967'ye göre ise yükleme hızı 0,05 ile 0,35 MPa/s arasında, (t/D) oranının 0,2 ile 0,75 arasında olması gerekmektedir. ISRM tarafından önerilen metoda göre ise kalınlığın yarıçapa eşit olması ve yükleme hızının 200 N/s olması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında deneyler 0,5, 0,75 ve 1,0 olmak üzere 3 farklı boy/çap (t/D) oranında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan hatalı olanlar, en yüksek ve en düşük değerler çıkarılarak kalanların aritmetik ortalaması alınmıştır. Yükleme hızı 200 N/s olarak seçilmiştir. Sonuçlar standart sapma (SS) ve değişim katsayısı (DK) değerleri ile birlikte Çizelge 4.9'da, deneysel süreçlere ait örnek fotoğraflar Şekil 4.29'da verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi en düşük sonuçlar tuf numunelerinde, en yüksek sonuçlar diyabaz numunelerinde gözlemlenmiştir. Numune kalınlığının dikkate değer bir fark oluşturmadığı, yani t/D oranının önemli bir etkisinin olmadığı deneysel veriler ile de görülmüştür.

Çizelge 4.9. Brezilya dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları

Num. Kodu	σ_{tBrez} (MPa)								
	t/D=0,50			t/D=0,75			t/D=1,0		
	Ort.	SS	DK (%)	Ort.	SS	DK (%)	Ort.	SS	DK (%)
K	7,678	0,84	10,98	7,943	1,34	16,91	6,583	1,08	16,37
KK	5,343	0,73	13,72	5,819	0,44	7,53	5,884	0,59	10,10
DK	8,594	2,08	24,24	7,805	1,55	19,84	8,667	2,78	32,11
İNM	7,685	0,87	11,34	7,720	1,13	14,63	7,085	1,57	22,11
İRM	5,235	0,60	11,47	5,441	0,70	12,91	5,585	0,70	12,51
T	2,049	0,24	11,96	1,937	0,25	12,72	2,073	0,16	7,90
A	9,405	0,89	9,45	9,634	0,78	8,06	9,290	0,99	10,67
G	9,541	0,68	7,12	10,854	0,92	8,44	10,059	1,20	11,95
D	15,871	1,26	7,92	16,090	1,66	10,34	15,312	1,80	11,77



Şekil 4.29. Brezilya dolaylı çekme dayanımı deneylerine ait görüntüler

4.8. Görüntü Kayıtlarının Analizi ve Çatlak Başlangıçlarının Belirlenmesi

Brezilya testlerinde çatlak başlangıçlarının nerede gerçekleştiğinin belirlenmesi amacıyla tüm deneyler sırasında video kaydı alınmıştır. Bu amaçla TÜBİTAK projesi bütçesinden alınan ve yüksek hızlı çekim yapan bir kamera kullanılmıştır (Şekil 4.30).



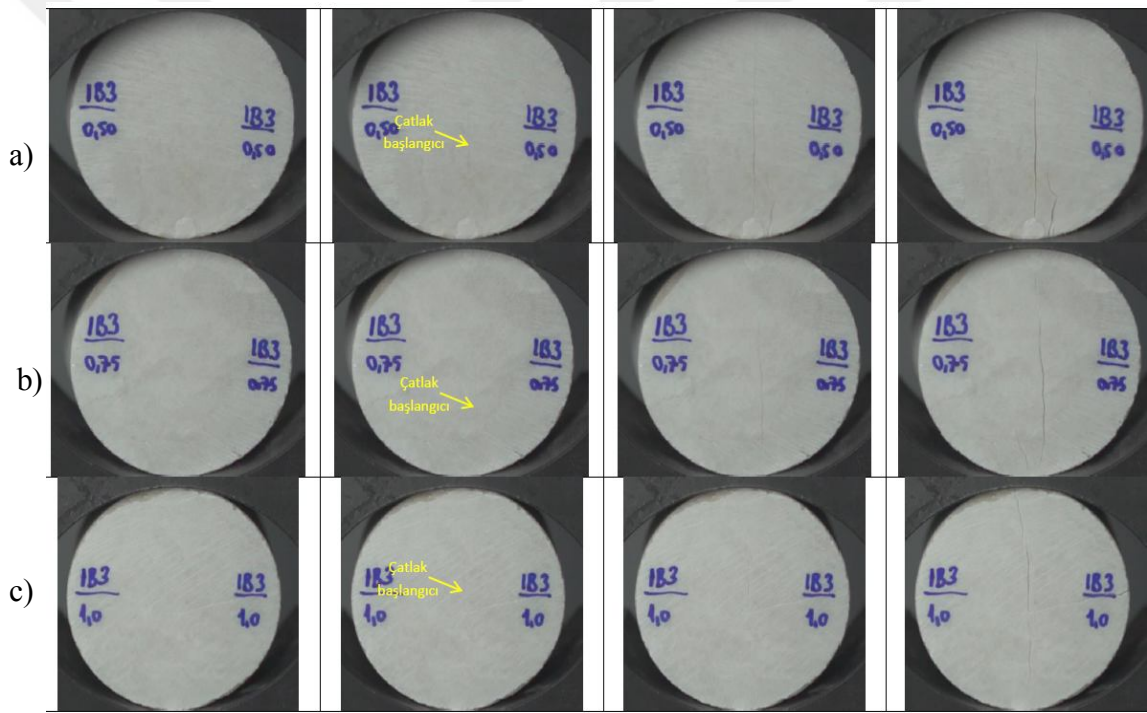
Şekil 4.30. Brezilya deney düzeneği ve hızlı çekim yapan kamera ile çatlak başlangıcının belirlenmesi

Daha sonra elde edilen videolar, görüntü işleme programı yardımıyla yavaşlatılarak kırılmanın hemen öncesinde, kırılmanın ilk başladığı anda ve kırılma sonrasında fotoğraflara dönüştürülmüştür. Bu kapsamda toplamda 300'ün üzerinde video kaydedilmiş, bu videolardan her bir kayaç türü için, her bir deney de en az 500 adet fotoğraf karesi üretilmiştir. Yapılan analizler sonucu elde edilen temsili fotoğraflar Şekil 4.31-4.39'da sunulmuştur. Fotoğraflarda 3 farklı t/D oranı (0,50, 0,75 ve 1,0) oranı için her kayaç türünden 4'er adet fotoğraf seçilmiştir. "Çatlak başlangıç"larının gerçekleştiği bölgeler sarı renkle gösterilmeye çalışılmıştır.

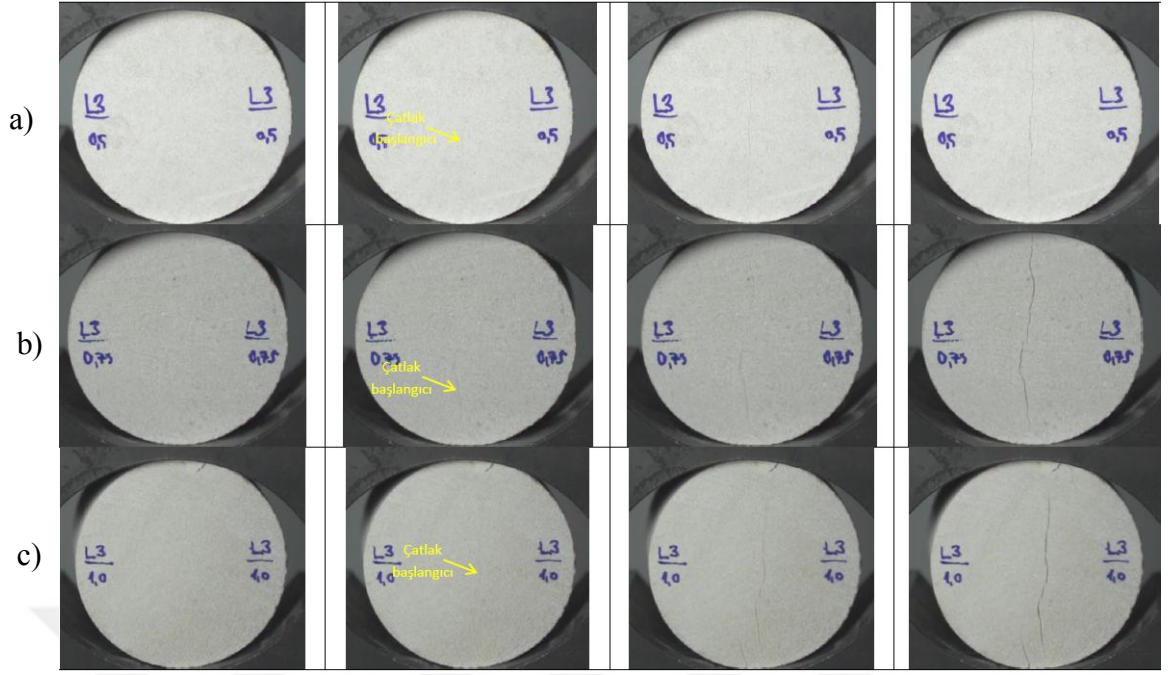
Fotoğraf karelerinin analizi sonucunda **çatlak başlangıçlarının** genellikle numune eksenine boyunca **merkezinde veya merkezine yakın** bölgelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Nadir de olsa çatlak başlangıcı temas noktalarından olan görüntüler de elde edilmiştir. Bunun nedenleri; hazırlanan disk şeklindeki

numunelerin tümünün mükemmel geometriye sahip olmaması ve numunenin sahip olduğu yapısal kusurlar olarak açıklanabilmektedir.

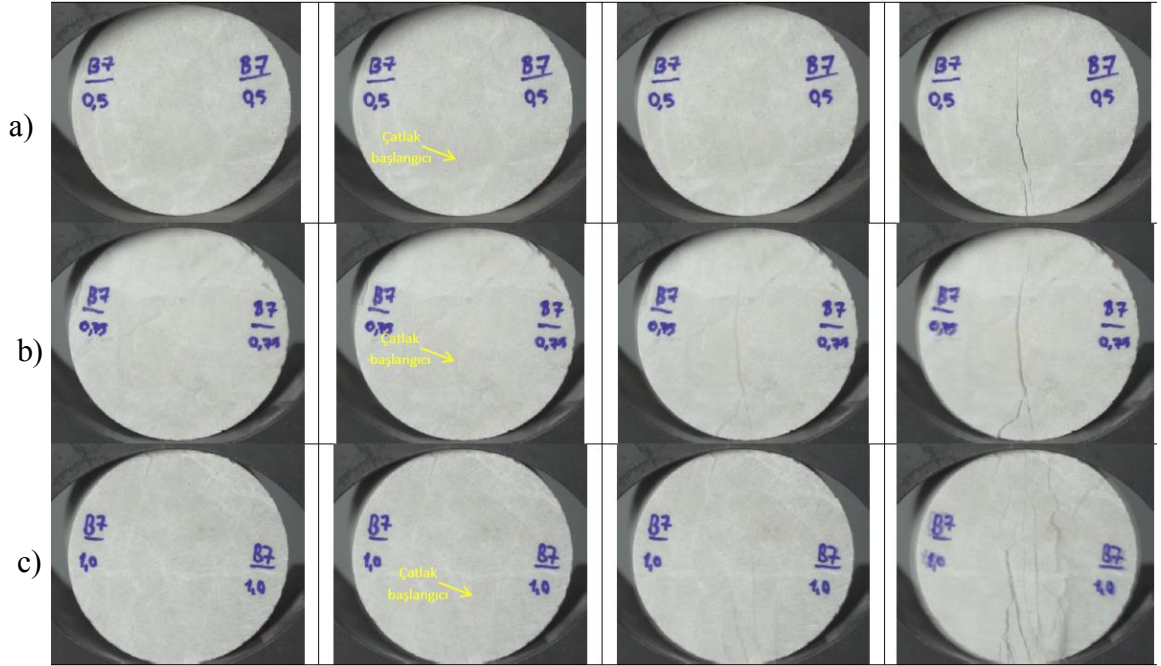
Literatür incelendiğinde çatlak başlangıçları temas noktalarında olduğu için Brezilya deneyinin uygun bulunmadığı ya da geliştirilmesi gerektiğini belirten çalışmalar mevcuttur (Yu (2005), Markides vd. (2010, 2011)). Li ve Wong (2013) Brezilya testinde çatlak başlaması ve ilerlemesi konusunda çalışmaların sayısının arttırılarak yenilenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu nedenle tez çalışmasının sonuçları, literatürde fikir birlikteliğinin olmadığı bu konuya da bir anlamda açıklık getirmiştir.



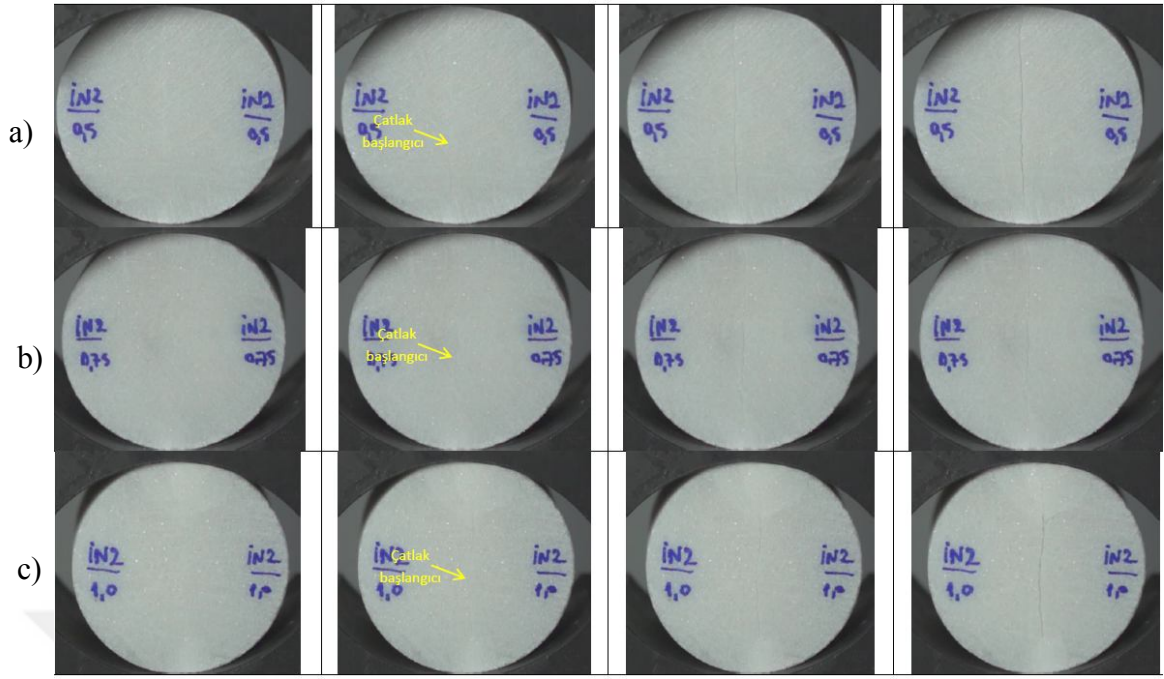
Şekil 4.31. Kireçtaşı numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri a) $t/D:0,50$ b) $t/D:0,75$ c) $t/D: 1,0$



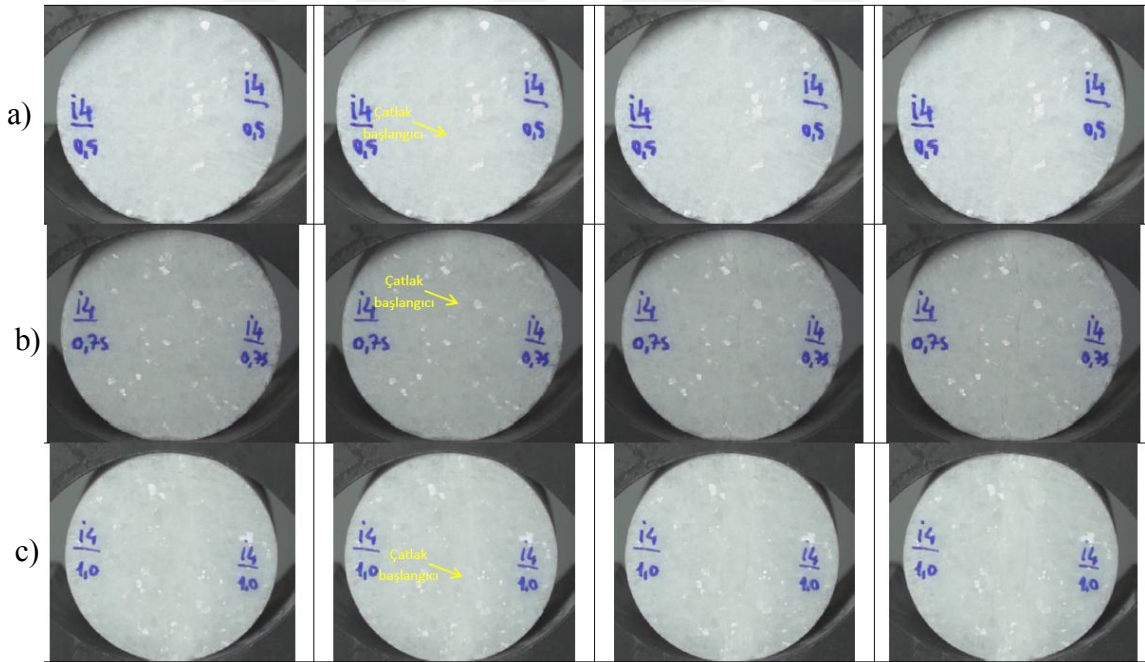
Şekil 4.32. Killi kireçtaşı numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri a) $t/D:0,50$ b) $t/D:0,75$ c) $t/D: 1,0$



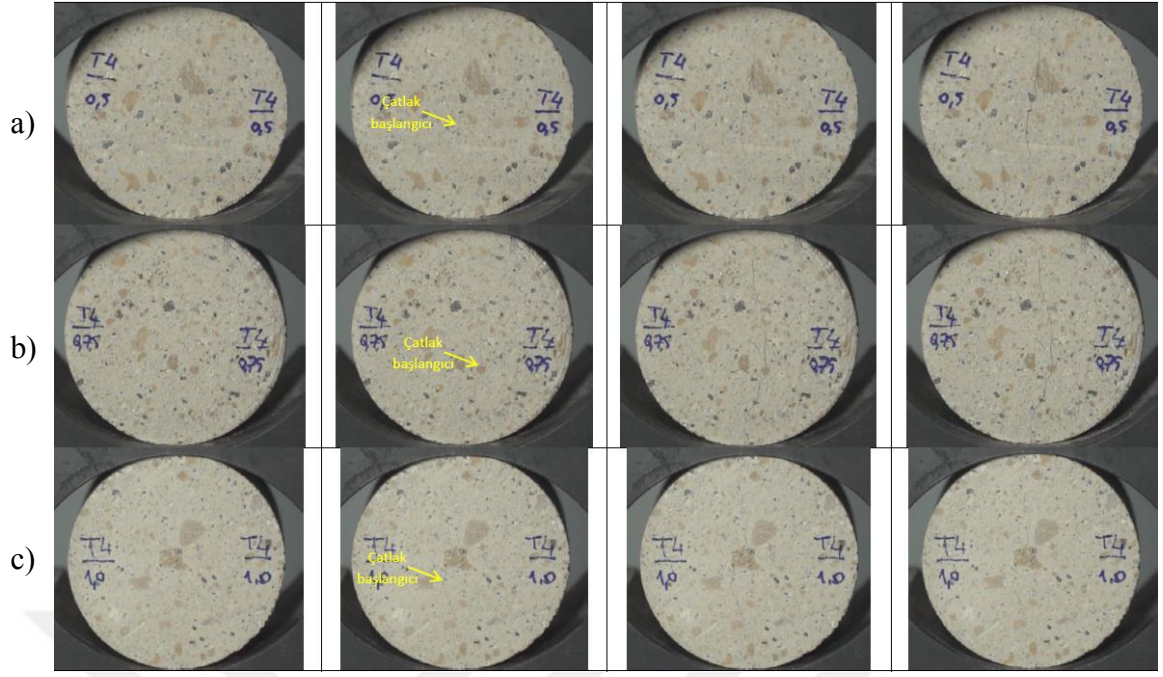
Şekil 4.33. Dolomitik kireçtaşı numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri a) $t/D:0,50$ b) $t/D:0,75$ c) $t/D: 1,0$



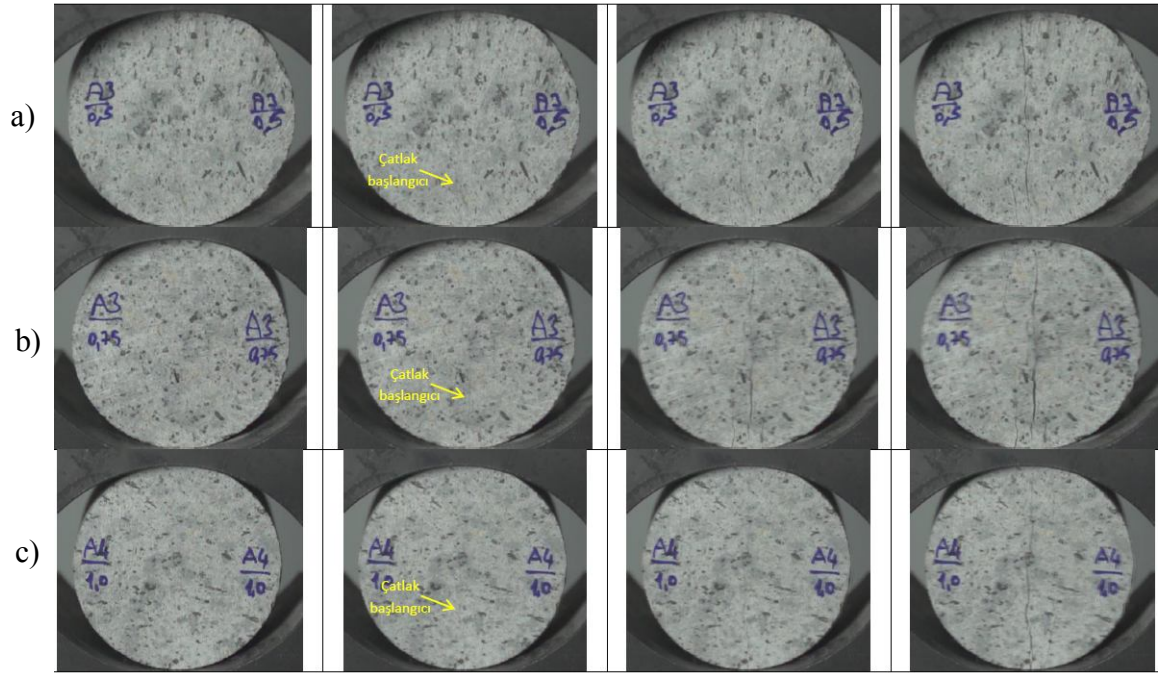
Şekil 4.34. İnce kristalli mermer numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri
a) $t/D:0,50$ b) $t/D:0,75$ c) $t/D:1,0$



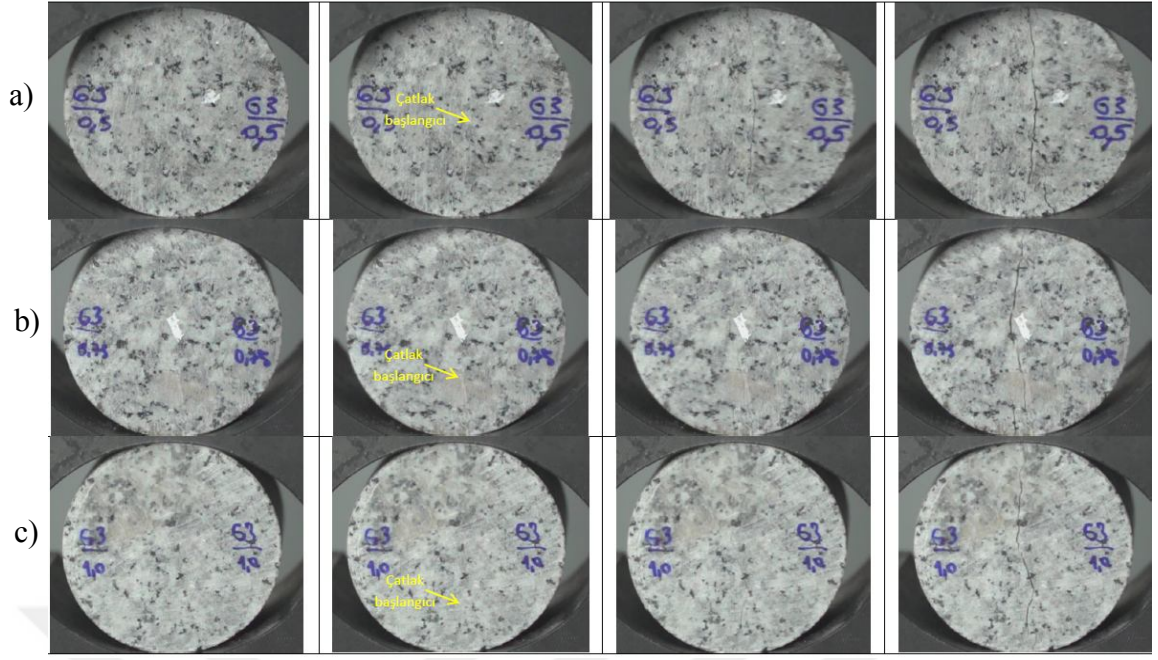
Şekil 4.35. İri kristalli mermer numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri
a) $t/D:0,50$ b) $t/D:0,75$ c) $t/D:1,0$



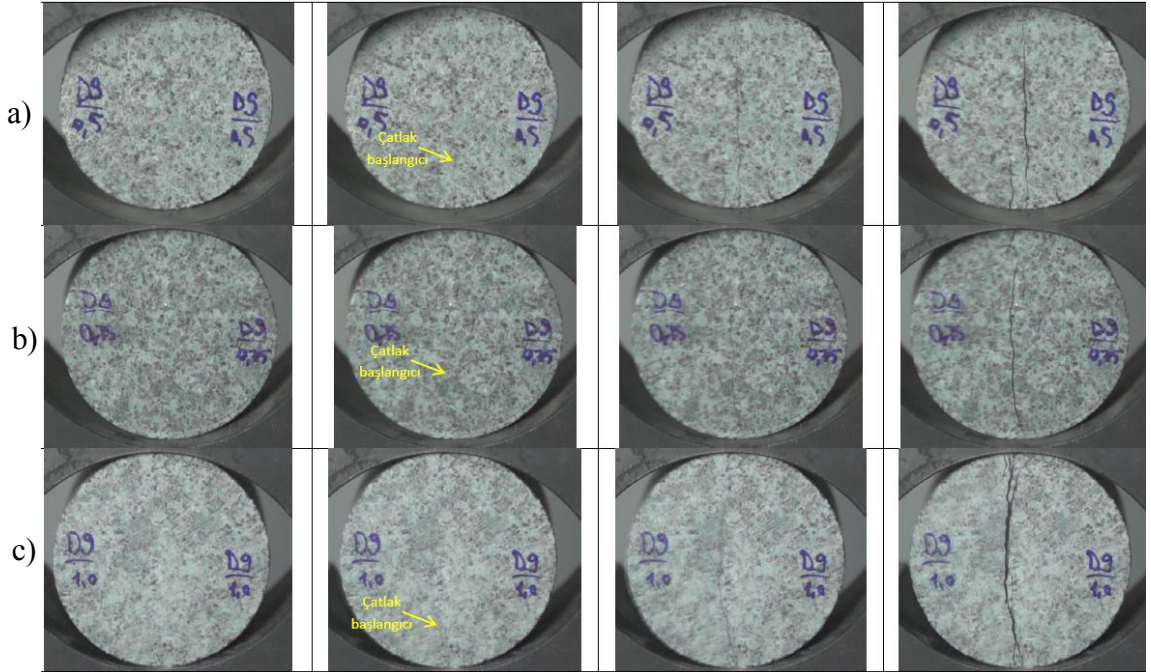
Şekil 4.36. Tüf numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri a) $t/D:0,50$ b) $t/D:0,75$ c) $t/D: 1,0$



Şekil 4.37. Andezit numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri a) $t/D:0,50$ b) $t/D:0,75$ c) $t/D: 1,0$



Şekil 4.38. Granit numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri a) $t/D:0,50$ b) $t/D:0,75$ c) $t/D: 1,0$



Şekil 4.39. Diyabaz numunesine ait çatlak başlangıcı görüntüleri a) $t/D:0,50$ b) $t/D:0,75$ c) $t/D: 1,0$

4.9. Eğilme Dayanımı Deneyleri İçin Nümerik Analiz Çalışmaları

Bu tez çalışmasının “Yöntem” bölümünde ayrıntılı açıklandığı üzere kayaçların ÇD değerinin dolaylı olarak belirleyebilmek için hem 3 nokta, hem de 4 nokta eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. 3NED deneyleri TS EN 12372 (Yoğun yük altında bükülme dayanımı tayini) standardına göre 50x50x300 mm ve 25x50x150 mm boyutlarında olmak üzere 2 farklı şekilde, ASTM C 99 standardına göre ise 101,6x203,2x57,2 mm boyutlarında yapılmıştır. 4NED deneyleri de benzer şekilde TS EN 13161 (Sabit moment altında eğilme dayanımı tayini) standardına göre 50x50x300 mm ve 25x50x150 mm boyutlarında olmak üzere 2 farklı şekilde, ASTM 880-98 standardına göre ise 102x32x381 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Özet olarak tez kapsamında 9 farklı kayaç türü üzerinde 6 tür eğilme testi yapılmıştır.

Bu bölümde gerilme dağılımlarını belirleyebilmek için tez kapsamında yapılan tüm eğilme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde ANSYS R18 paket programı kullanılmıştır. Altı farklı eğilme deneyi standart numunesi için yapılan sonlu elemanlar analizinde; numunelere analitik formüllerinden hesaplanan ve 1 MPa’lık gerilmeyi meydana getirecek yüklemeler yapılmıştır. Kesitte maksimum 1MPa’lık gerilme meydana getirebilmek için gereken yük miktarı Eşitlik 4.8’den hesaplanmıştır.

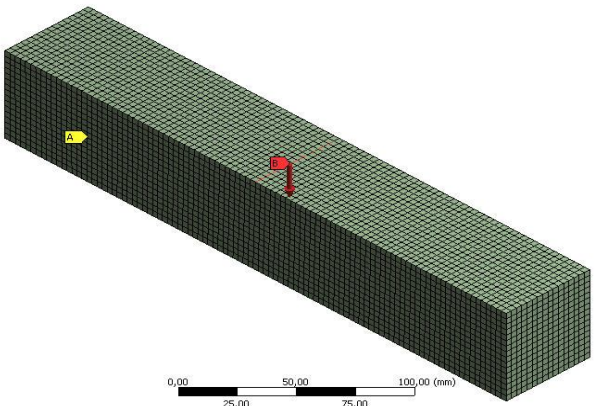
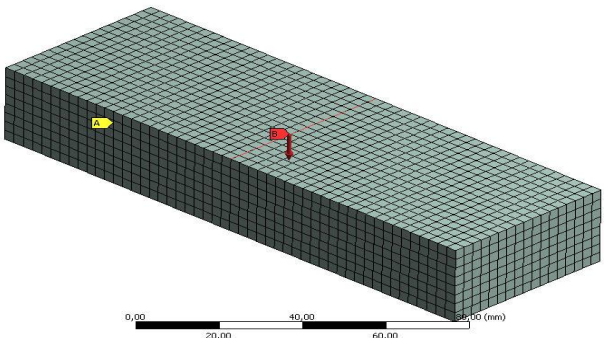
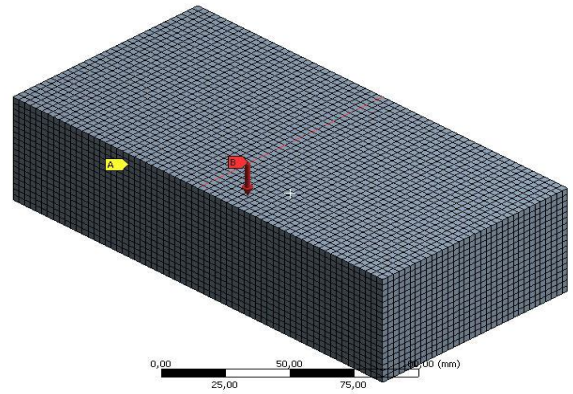
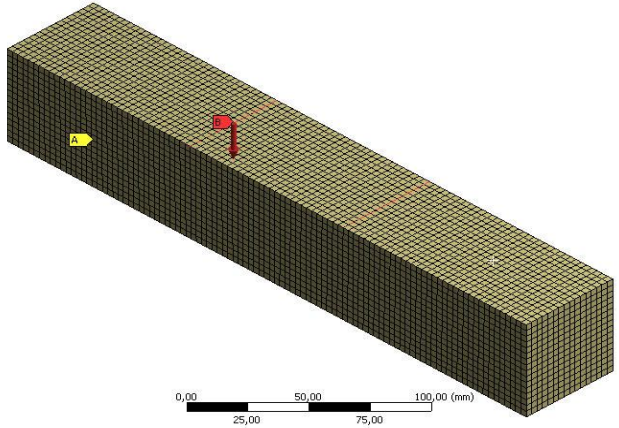
$$\sigma = \frac{M_e}{W_e} \quad (4.8)$$

Burada M_e : Numunede oluşacak maksimum eğilme gerilmesini ve W_e : mukavemet momentini göstermektedir. Dikdörtgen kesitleri için;

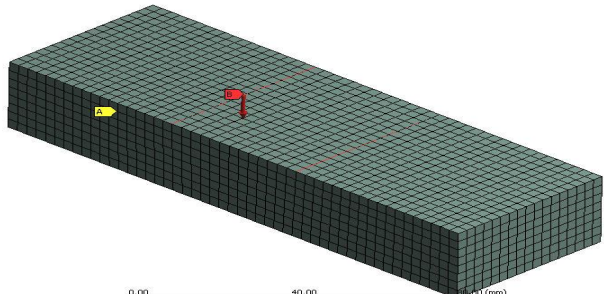
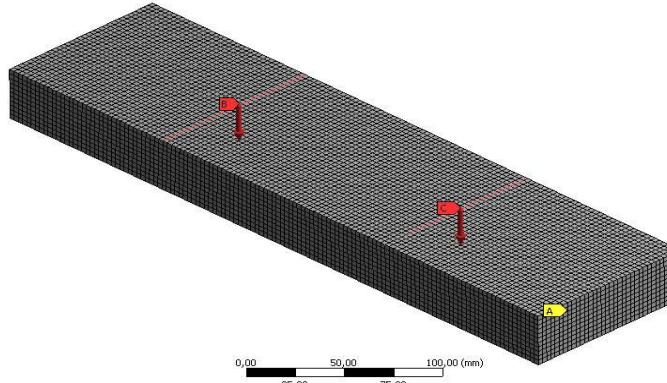
$$W_e = \frac{bh^2}{6} \quad (4.9)$$

Formülü ile hesaplanmaktadır. Burada b: numunenin kalınlığını, h: numunenin yüksekliğini göstermektedir. Diğer analizlerde olduğu gibi numune için elastisite modülü 30 GPa ve Poisson oranı 0,3 olarak kabul edilmiştir. Her bir numune için uygulanan yük ve sonlu elemanlar ağ yapıları Çizelge 4.10’da gösterilmiştir.

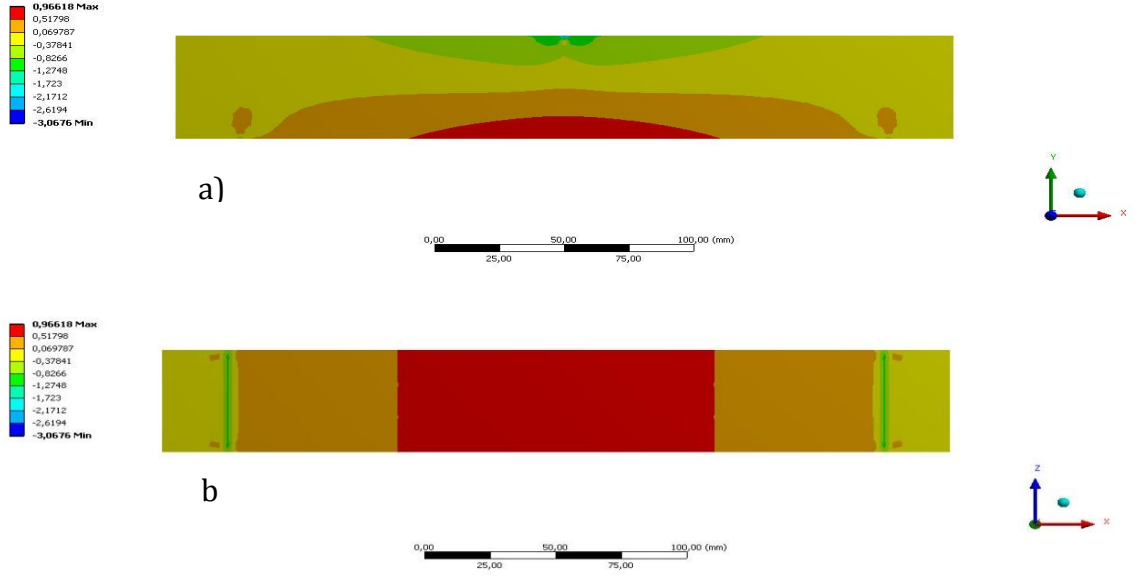
Çizelge 4.10. Analizlerde standart numunelere uygulanan yükler ve ağ yapıları

Standart	Ağ Yapısı ve Uygulanan Yükler
TS EN 12372 50x50x300 (3NED)	A: Static Structural Static Structural Time: 1, s 19.04.2018 12:13 A Displacement B Force: 333,33 N 
TS EN 12372 25x50x150 (3NED)	A: Static Structural Static Structural Time: 1, s 19.04.2018 12:31 A Displacement B Force: 166,67 N 
ASTM C99 101.6x203.2 x57.2 (3NED)	A: Static Structural Static Structural Time: 1, s 19.04.2018 12:07 A Displacement B Force: 1246,4 N 
TS EN 13161 50x50x300 (4NED)	A: Static Structural Static Structural Time: 1, s 19.04.2018 12:27 A Displacement B Force: 500, N 

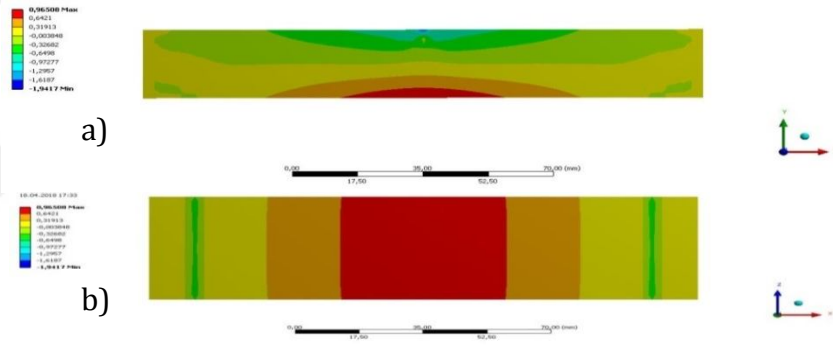
Çizelge 4.10.'un devamı

TS EN 13161 25x50x150 (4NED)	A: Static Structural Static Structural Time: 1, s 19.04.2018 12:14 A Displacement B Force: 250, N 
ASTM C880 102x32x381 (4NED)	A: Static Structural Static Structural Time: 1, s 19.04.2018 12:29 A Displacement B Force: 217,6 N C Force 2: 217,6 N 

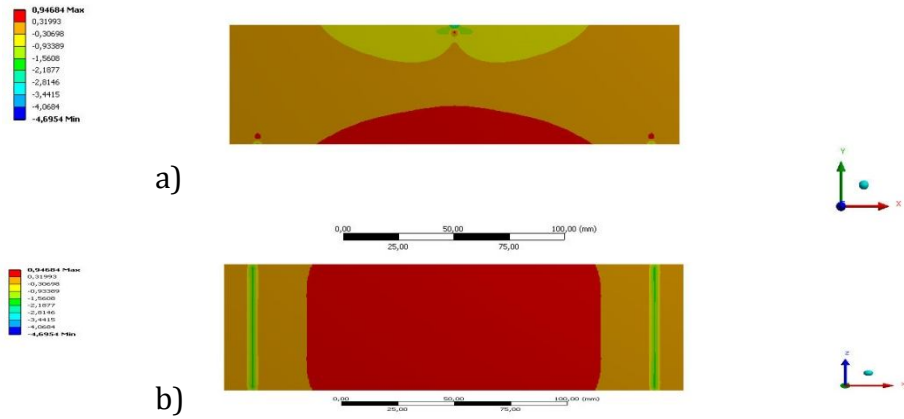
Analizler sonunda elde edilen her bir standart deney numunesi için ön ve alt yüzeylerdeki grafiksel maksimum asal gerilme dağılımları Şekil 4.40-4.45'de verilmiştir. Tüm grafiklerde pozitif gerilmeler çekme gerilmelerini, negatif gerilmeler basma gerilmelerini göstermektedir. Kesitlerdeki kayma gerilmeleri sıfır değerine çok yakın oldukları için maksimum asal gerilme değerleri aynı zamanda numunedeki maksimum çekme gerilmelerini göstermektedirler.



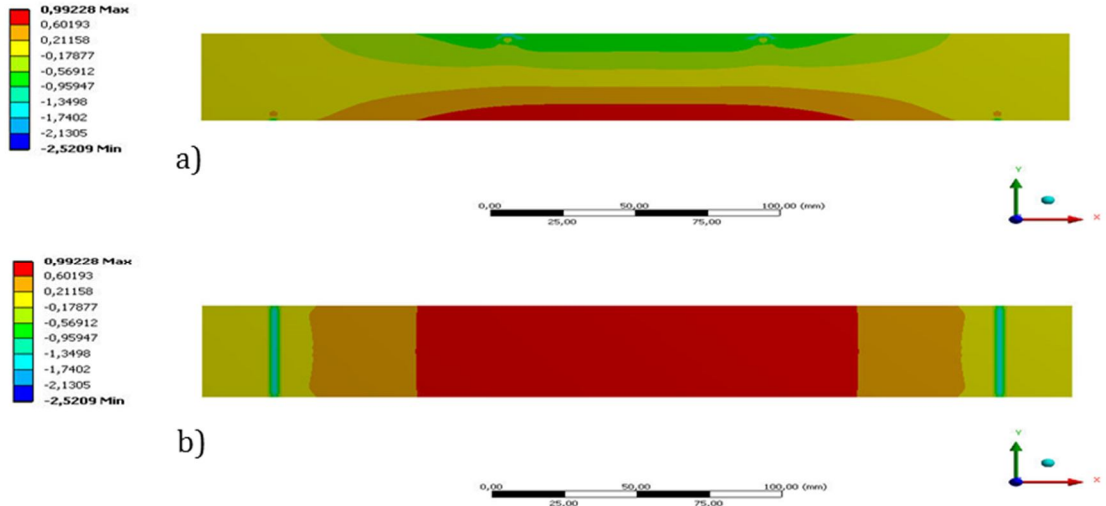
Şekil 4.40. EN 12372_50x50x300 mm a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı



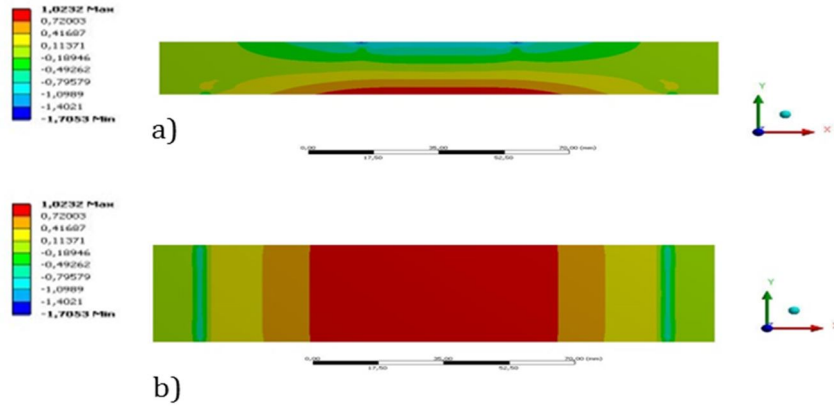
Şekil 4.41. EN 12372_25x50x150 mm a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı



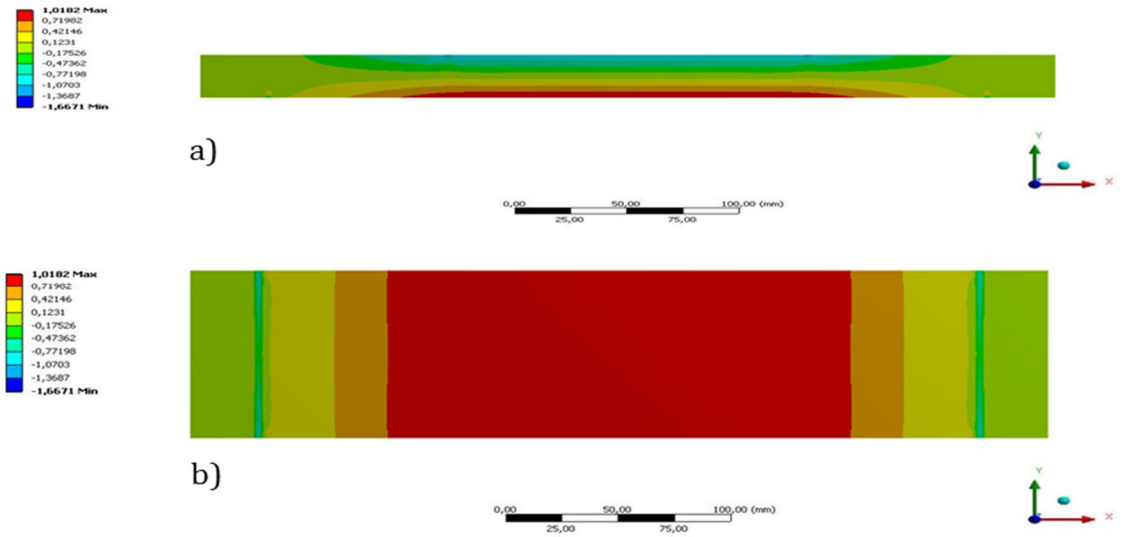
Şekil 4.42. ASTM C99 a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı



Şekil 4.43. EN 13161_50x50x300 mm a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı

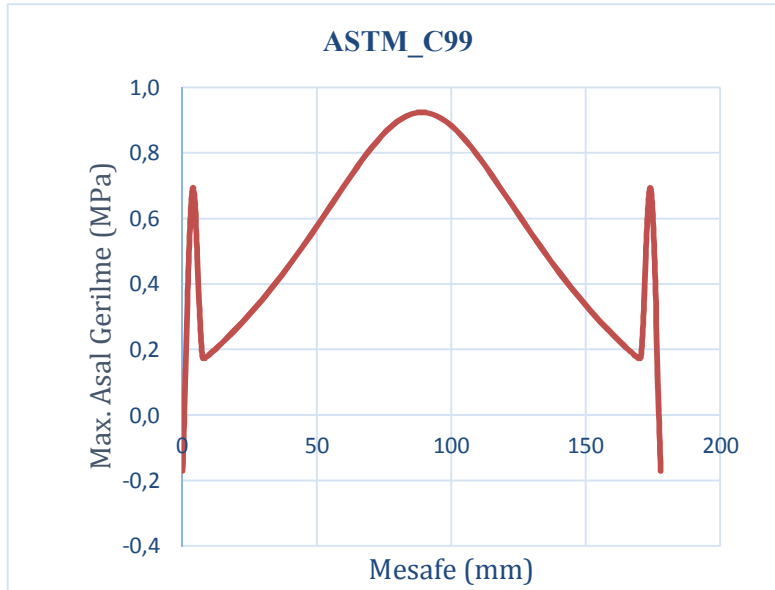
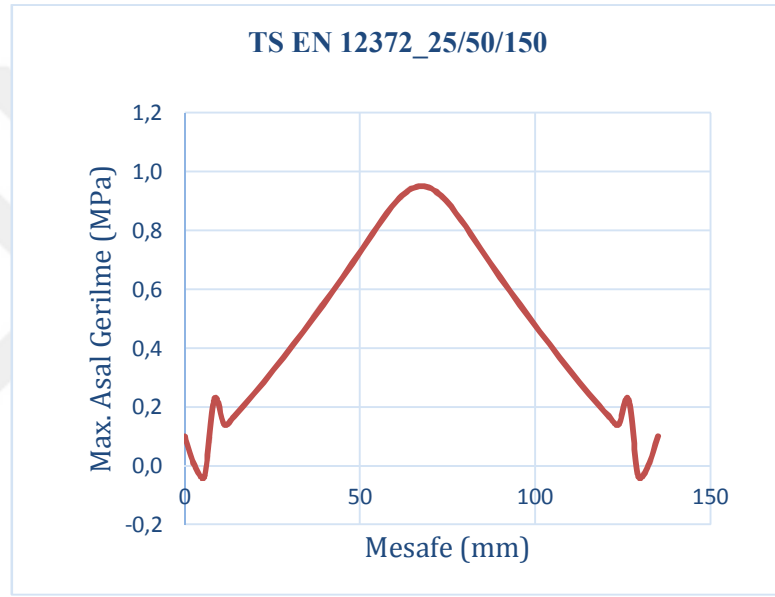
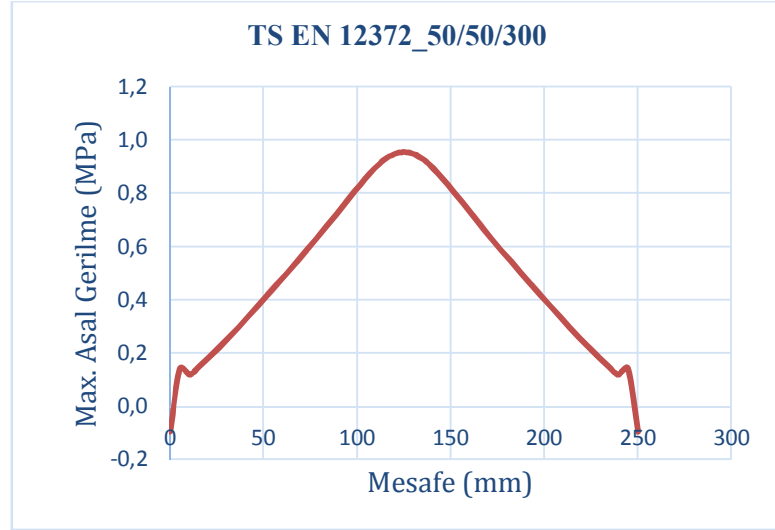


Şekil 4.44. EN 13161_25x50x150 mm a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı

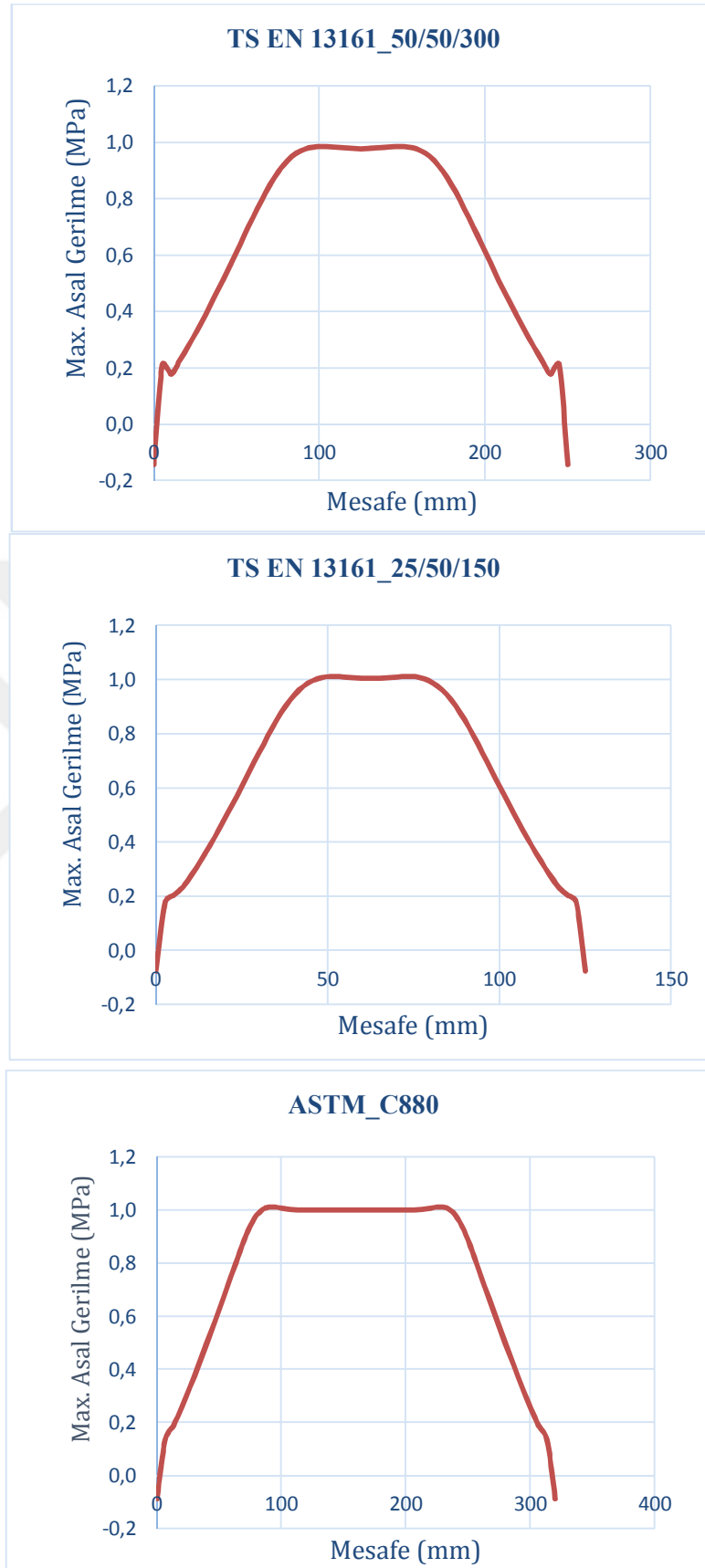


Şekil 4.45. ASTM C880 a) ön yüzey b) alt yüzey normal gerilme dağılımı

Şekil 4.46'da 3 nokta eğilme dayanımı deneyleri için, Şekil 4.47'de 4 nokta eğilme dayanımı deneyleri için numunelere uygulanan sonlu elemanlar analizinde numunenin ön yüzey ile alt yüzeyi ara kesitinde meydana gelen normal gerilmeler gösterilmiştir. Analizler sonunda 4 nokta eğilme deneylerinden elde edilen sayısal sonuçların, 3 nokta eğilme dayanımı deneyinden elde edilen sayısal sonuçlara göre analitik sonuçlara daha yakın olduğu görülmektedir. 3 nokta eğilme deneylerinde analitik olarak hesaplanan 1 MPa'lık gerilme iki boyutlu düzlemde tek bir noktadadır. Sonlu elemanlar analizinde bu noktaya karşılık belirli bir boyutu olan eleman yerleştirilir ve bu elemanın her iki yüzeyine etki eden kuvvetler belirlenerek ortalama gerilme yaklaşık olarak hesaplanmaktadır. Uzunluk boyunca gerilme dağılımı sabit kalmadığı ve doğrusal bir şekilde değiştiğinden, sonlu elemanlar modelindeki elemana gelen kuvvetler, hesaplanan kuvvetlerden bir miktar düşük kalmaktadır. 4 nokta eğilme deneylerinde ise iki boyutlu düzlemde analitik olarak hesaplanan 1 MPa'lık gerilme, iki kuvvetin etkidiği aralıkta bir hat boyunca oluşmakta ve sonlu elemanlar analizinde orta kısma yerleştirilen elemanın her iki yüzeyin etki eden kuvvetler uniform kaldığı için analitik sonuçlara daha yakın değerleri vermektedir.



Şekil 4.46. 3NED deneylerinde numunelerin alt kenarı boyunca gerilme dağılımları



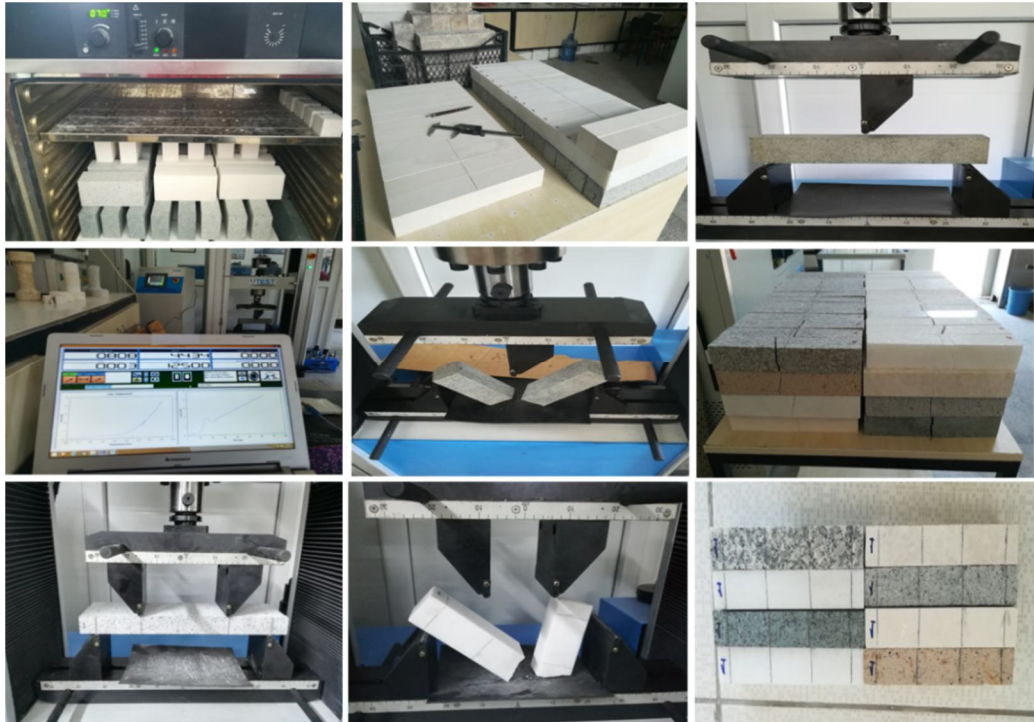
Şekil 4.47. 4NED deneylerinde numunelerin alt kenarı boyunca gerilme dağılımları

4.10. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Önceki bölümde eğilme dayanımı deneylerinde izlenen yöntemler açıklandığı için burada yalnızca deney standartları, numune boyutları, yükleme hızları ve istatistiksel analizlerde kullanılacak kısaltmalar (deney kodu) özet olarak Çizelge 4.11’de sunulmuştur. Tüm kayaç türleri için her deneyde 12’şer adet numune kullanılmış, en yüksek ve en düşük değerler çıkartılarak kalanların aritmetik ortalama, standart sapma (SS) ve değişim katsayısı (DK) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13). DeneySEL süreçlere ait örnek fotoğraflar Şekil 4.48’de yer almaktadır.

Çizelge 4.11. Eğilme dayanımı deneyleri için özet tablo

	Deney Standartı	Numune Boyutları (mm)	Yükleme Hızları	Deney Kodları
3 Nokta	TS EN 12372	50x50x300	66 N/s	3N_EN_50
	TS EN 12372	25x50x150	41 N/s	3N_EN_25
	ASTM C 99	101.6x203.2x57.2	74 N/s	3N_ASTM
4 Nokta	TS EN 13161	50x50x300	66 N/s	4N_EN_50
	TS EN 13161	25x50x150	41 N/s	4N_EN_25
	ASTM C 880-98	102x32x381	70 KPa/s	4N_ASTM



Şekil 4.48. 3 ve 4 nokta eğilme dayanımı deneylerine ait örnek görüntüler

Çizelge 4.12. 3 Nokta Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları (MPa)

Num. Kodu	3N_EN_50		DK (%)	3N_EN_25		DK (%)	3N_ASTM		DK (%)
	Ort.	SS		Ort.	SS		Ort.	SS	
K	8,73	1,54	17,64	10,49	1,53	14,58	8,66	1,60	18,50
KK	9,57	1,21	12,61	10,40	0,89	8,55	8,91	0,88	9,93
DK	10,38	2,51	24,15	10,71	1,91	17,87	9,59	3,05	31,78
İNM	15,80	4,04	25,55	12,94	1,17	9,01	14,26	1,69	11,86
İRM	8,81	0,71	8,03	10,04	0,42	4,23	9,24	1,03	11,15
T	3,81	0,29	7,64	3,73	0,33	8,77	3,72	0,35	9,45
A	16,78	1,04	6,20	15,42	1,39	9,03	12,60	1,26	10,04
G	16,63	1,15	6,94	13,55	1,59	11,74	13,34	1,10	8,28
D	21,64	1,34	6,19	22,71	2,14	9,42	20,38	2,17	10,62

Çizelge 4.13. 4 Nokta Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları (MPa)

Num. Kodu	4N_EN_50		DK (%)	4N_EN_25		DK (%)	4N_ASTM		DK (%)
	Ort.	SS		Ort.	SS		Ort.	SS	
K	7,90	1,83	23,21	7,34	1,48	20,15	7,50	1,13	15,09
KK	8,75	1,18	13,45	7,85	0,92	11,69	8,27	0,49	5,95
DK	8,19	0,99	12,10	7,88	1,32	16,70	7,58	2,20	29,02
İNM	10,68	0,93	8,68	8,33	0,93	11,15	13,38	0,98	7,33
İRM	7,32	0,72	9,81	8,19	0,88	10,74	8,35	0,78	9,34
T	2,52	0,50	19,89	2,77	0,14	5,11	2,89	0,32	11,02
A	13,95	1,12	8,00	13,82	1,48	10,74	12,12	0,79	6,52
G	11,60	1,56	13,41	13,20	1,43	10,84	14,15	1,36	9,61
D	18,98	2,12	11,14	18,20	2,30	12,66	19,26	1,48	7,70

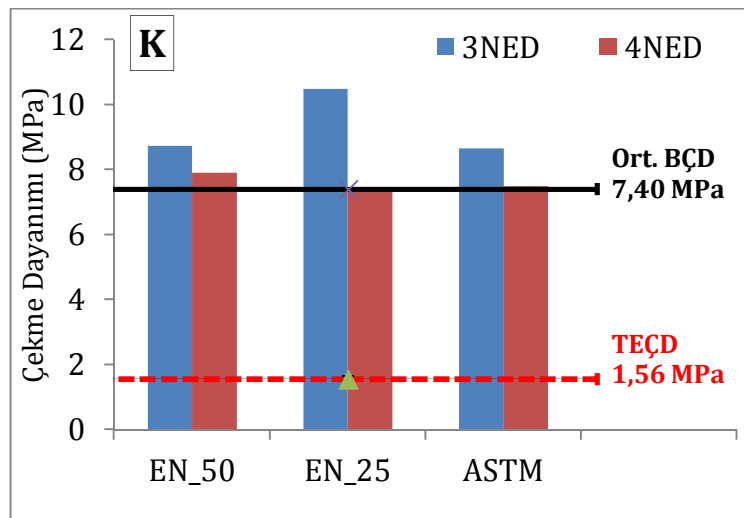
3 Nokta ve 4 Nokta eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde deney yöntemine bağlı olarak sonuçların kayaç türüne göre değiştiği görülmüştür. En düşük değerler tüfte, en yüksek değerler ise diyabaz numunelerinde bulunmuştur. Hem 3NED, hem de 4NED deneylerinde numune boyutunun etkili olduğu görülmüştür. 3NED deneylerinde en yüksek dayanım değerleri K, KK, DK, İRM ve D kodlu kayaçlar için 3N_EN_25 kodlu deneyde, İNM, T, A ve G kodlu kayaçlar için 3N_EN_50 kodlu deneyde bulunmuştur. İNM ve İRM kodlu kayaçların dışındaki diğer kayaçlarda en düşük eğilme dayanımı değerleri 3N_ASTM kodlu deneylerde gözlemlenmiştir.

4NED deney sonuçları incelendiğinde ise kendi içlerinde genel bir trendin olmadığı, sonuçların kayaç türüne göre değiştiği görülmüştür. Ancak tüm sonuçlar incelendiğinde 4NED değerlerinin, 3NED değerlerine göre %2-35

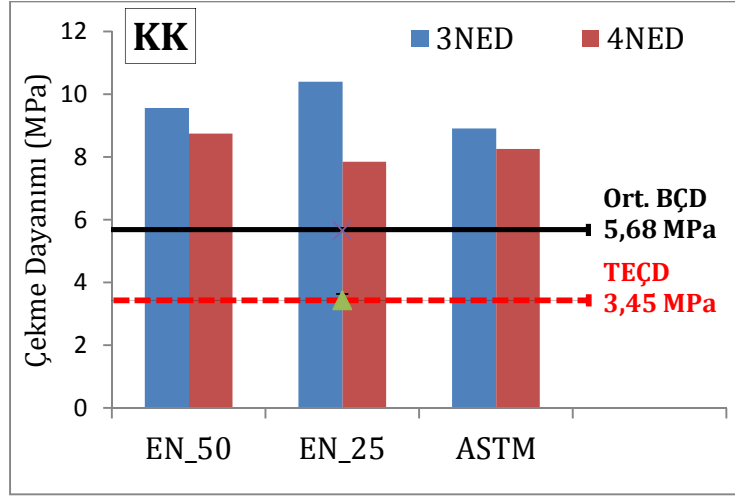
arasında değişen oranlarda daha düşük çıktığı, bu bakımdan da kayaçların gerçek ÇD değerlerini tahmin etmekte daha başarılı olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle 4NED deney sonuçları, TEÇD deney sonuçlarına daha yakın bulunmuştur. Ayrıca nümerik analiz sonuçlarına göre 4NED deneyinde gerilme, 2 boyutlu düzlemde 2 kuvvetin etkidiği aralıkta bir hat boyunca meydana gelmiştir. 3NED deneyinde ise tek bir noktada maksimum gerilme oluşmaktadır. Özellikle homojen olmayan kayaçlarda 4NED deneyinde yük daha uniform uygulanabilmektedir. SS ve DK değerleri incelendiğinde tüm eğilme deneylerinde birbirine yakın sonuçlar bulunduğu anlaşılmaktadır. Ancak numune hazırlama kolaylığı da düşünüldüğünde, eğilme deneyleri arasında dolaylı yöntem olarak 4N_EN_25 kodlu deney önerilebilir.

4.11. TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçlarının karşılaştırılması

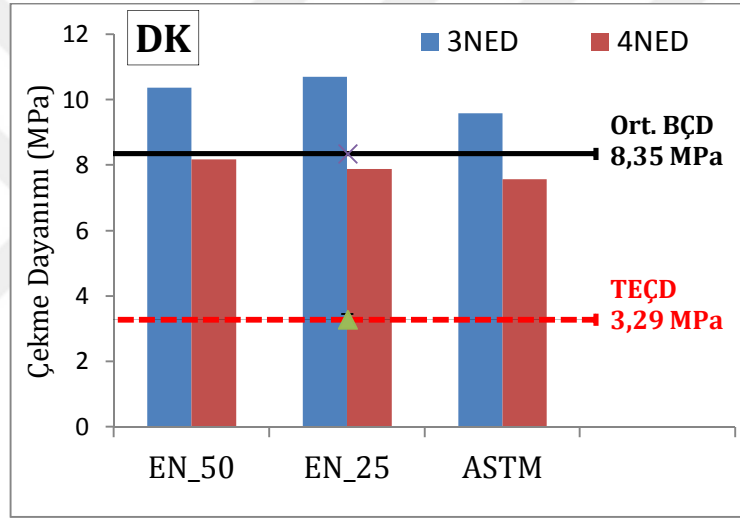
Tez kapsamında incelenen 9 farklı kayaç türü için yapılan doğrudan ve dolaylı çekme dayanımı deneylerinin sonuçları Şekil 4.49-4.57'deki grafiklerde bir arada verilmiştir. BÇD deneyleri üç farklı boy/çap oranında yapılmış ancak grafiklerde üçünün ortalaması alınarak (Ort. BÇD) verilmiştir. Çünkü önceki bölümlerde de belirtildiği üzere boy/çap oranı değişiminin BÇD sonuçlarında önemli bir etkisi olmamıştır.



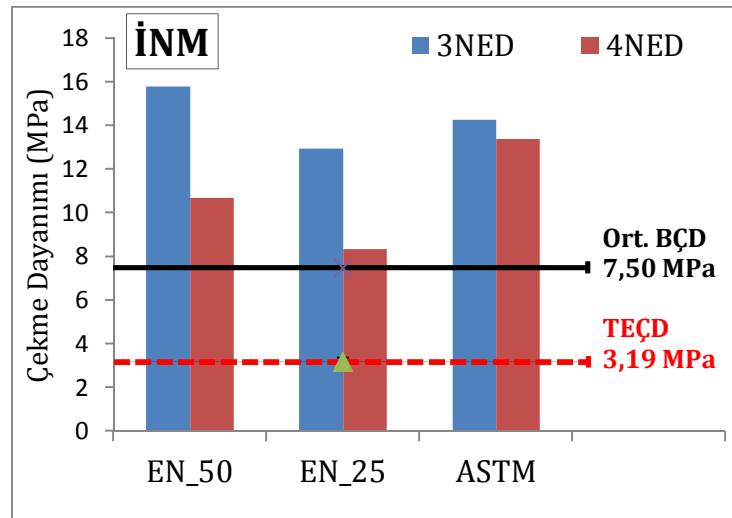
Şekil 4.49. Kireçtaşı numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları



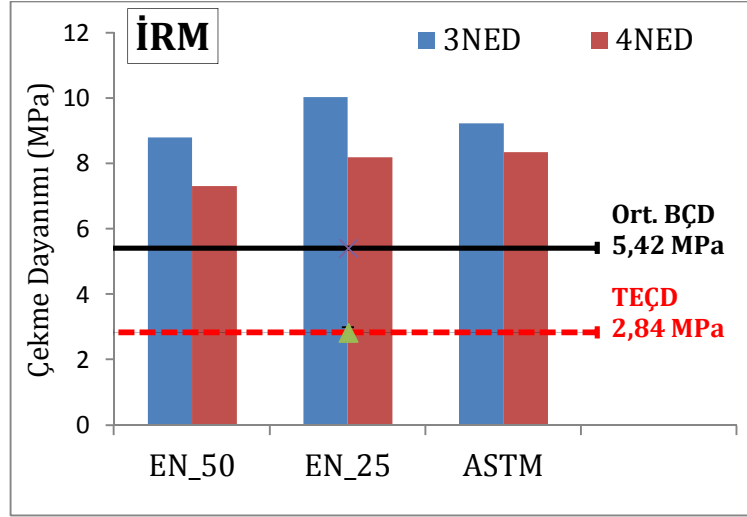
Şekil 4.50. Killi Kireçtaşı numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları



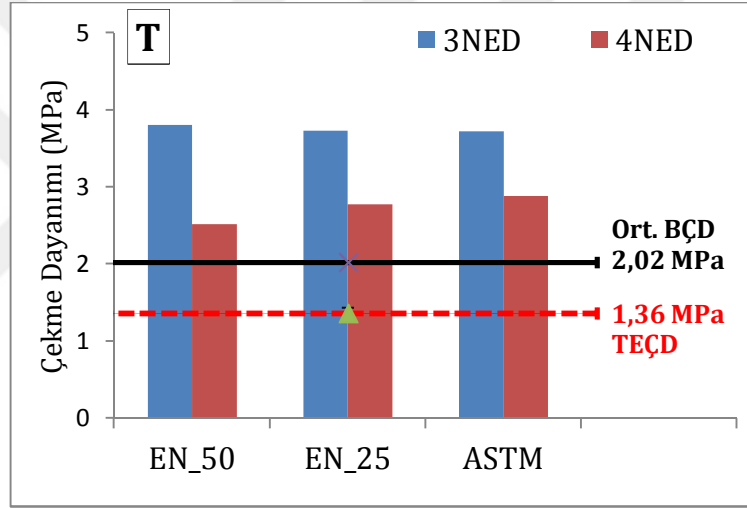
Şekil 4.51. Dolomitik Kireçtaşı numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları



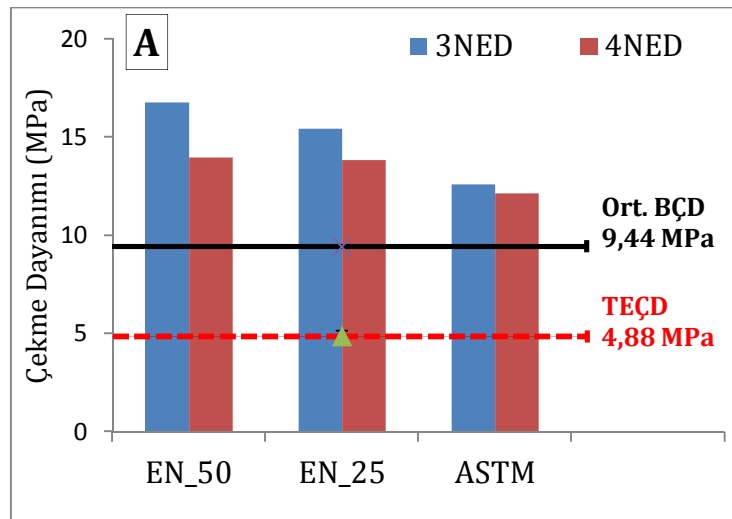
Şekil 4.52. İnce Kristalli Mermer numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları



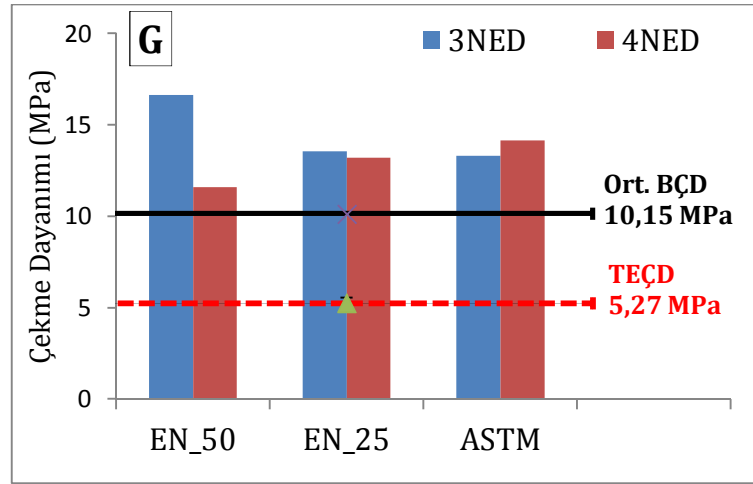
Şekil 4.53. İri Kristalli Mermer numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları



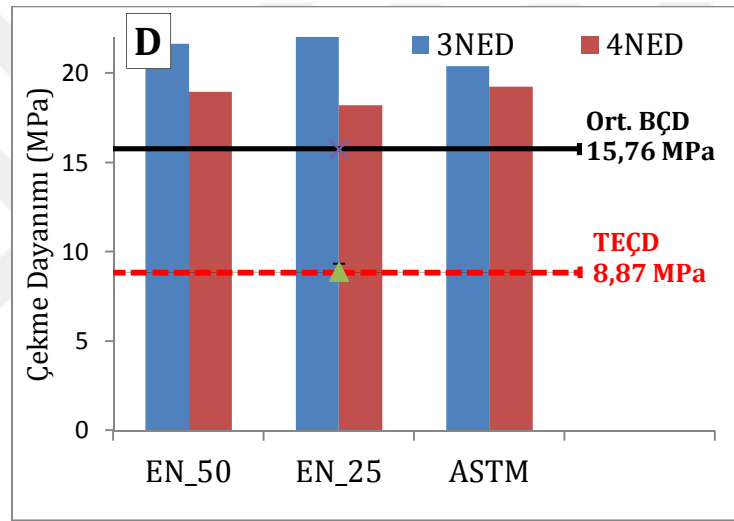
Şekil 4.54. Tüf numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları



Şekil 4.55. Andezit numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları



Şekil 4.56. Granit numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları



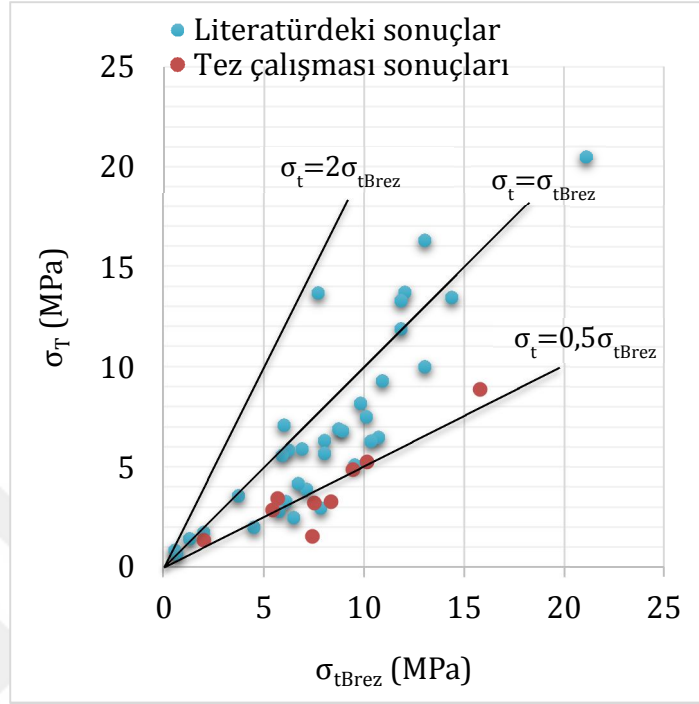
Şekil 4.57. Diyabaz numunesinin TEÇD ve dolaylı ÇD sonuçları

Şekil 4.49-4.57'deki grafikler incelendiğinde (tüm kayaç türleri için) hiçbir dolaylı çekme dayanımı belirleme yönteminin, gerçek çekme dayanımını (TEÇD) temsil etmediği görülmektedir. Genel olarak eğilme dayanımı deneylerinden elde edilmiş olan veriler, BÇD ve TEÇD deneylerinden elde edilen verilere göre yüksek çıkmıştır. 3NED ise, diğer yöntemlere kıyasla kayaçlarda ÇD'nı en yüksek bulan dolaylı yöntem olarak karşımıza çıkmıştır. Sadece K ve DK kodlu kayaçlarda BÇD değerleri 4NED değerlerinden yüksek bulunmuştur. Diğer kayaçlarda BÇD değerleri 4NED değerlerinden düşük çıkmıştır. TEÇD değerleri, diğer tüm dolaylı yöntemlere kıyasla oldukça düşük bulunmuştur.

Geçmişte yapılan çalışmaların birçoğunda, bu tez kapsamında elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar bulunmuştur. Pandey ve Singh (1986) çekme gerilmelerindeki deformasyon karakteristiğini analiz etmişler ve Brezilya testinden elde edilen çekme gerilmelerinin doğrudan yöntemden elde edilen değerlerden 2 kat daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Coviello vd., (2005) ise 3 ve 4 nokta eğilme dayanımı deneylerinin, doğrudan ÇD değerini olduğundan yüksek tahmin ettiğini bulmuşlardır. Klanphumeesri, (2010) BÇD/TEÇD oranını kumtaşı için 1.64, mermer için 1.27 ve kireçtaşı için 1.17 bulmuştur. Fuenkajorn ve Klanphumeesri (2011) ise kireçtaşı, mermer ve kumtaşı üzerinde yaptıkları çalışmada BÇD sonuçlarını, doğrudan ÇD değerlerine kıyasla 1.17 ile 1.65 kat daha yüksek bulmuştur. Erarslan ve Williams (2012) Brisbane tufünde doğrudan ÇD'ndan elde ettikleri sonuçların Brezilya deneyinden elde edilen sonuçlara göre düşük çıktığını bulmuşlardır. Li ve Wong (2013) yaptıkları çalışmada Brezilya testinde, tek eksenli çekme gerilmesi yerine iki eksenli gerilmeden dolayı kayaçların çekme gerilmelerinin değerinden fazla tahmin edilebildiğini belirtmişlerdir. Perras ve Diederichs, (2014) BÇD'nın kayaç türüne bağlı olarak 0,7-0,9 gibi bir katsayı ile çarpılarak düzeltilmesini önermişlerdir. Ünlü ve Yılmaz (2014) yaptıkları çalışmada BÇD/doğrudan ÇD oranlarını kayaçlarda 1 ile 1,82, yapay kayalarda ise 1,84 ile 2,59 arasında bulmuşlardır. Briševac vd. (2015) TEÇD/BÇD oranı için literatür incelendiğinde genel bir trendin olmadığı belirtmişlerdir. Jensen (2016) çalışmasında BÇD sonuçlarını TEÇD sonuçlarına göre yüksek bulmuştur. Cacciari ve Futai (2018) tarafından yapılan çalışmada mermer, beyaz granit, kırmızı granit ve andezit numunelerinde BÇD değerleri, doğrudan ÇD değerlerine kıyasla 1,17 ile 1,59 kat daha yüksek bulunmuştur. Wang ve Cao (2018) kumtaşı ve granit üzerinde yaptıkları çalışmada, kavisli yükleme çeneleri ile yapılan BÇD deneylerinde gerçek ÇD'ndan daha yüksek sonuçlar bulunduğu işaret etmişlerdir.

Bu tez çalışması Çizelge 2.1'de bazı araştırmacılarca derlenen BÇD ve TEÇD deney sonuçları verilmiştir (Ünlü ve Yılmaz, 2014; Briševac vd., 2015; Cacciari ve Futai, 2018). Çizelge 2.1'de verilen deneysel sonuçlar ile bu tez çalışması kapsamında bulunan sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.58'de sunulmuştur.

Şekil 4.58 incelendiğinde bu tez çalışmasında bulunan BÇD/TEÇD oranlarının geçmişte yapılan çalışmaların bazıları ile örtüştüğü görülmektedir.



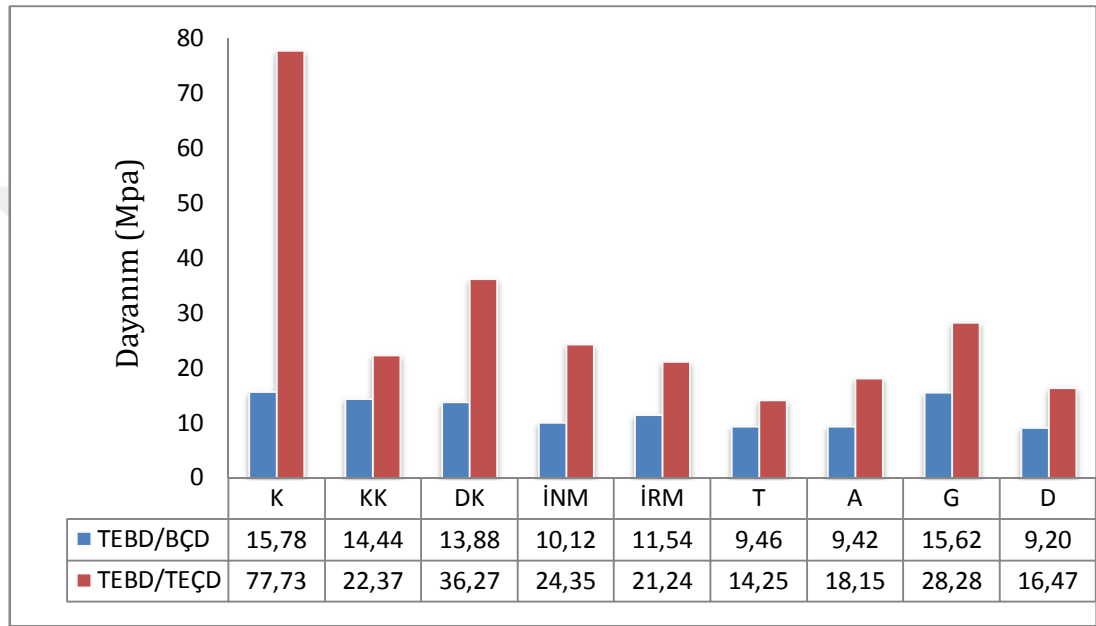
Şekil 4.58. Literatürdeki veriler ile tez çalışmasının sonuçlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.14'te sonuçlar toplu bir şekilde gösterilmiştir. Burada BÇD ve eğilme dayanımı değerlerinin kendi içlerinde ortalamaları alınarak verilmiştir. Çizelge incelendiğinde en yüksek sonuçların 3 nokta eğilme dayanımı deneylerinden, en düşük sonuçların ise TEÇD deneylerinden elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.14. Tek eksenli ve dolaylı ÇD dayanımı sonuçları (MPa)

Numune Kodu	TEÇD	BÇD	3NED	4NED
K	1,559	7,402	9,291	7,582
KK	3,448	5,682	9,626	8,289
DK	3,289	8,355	10,228	7,884
İNM	3,194	7,497	14,336	10,800
İRM	2,845	5,420	9,361	7,953
T	1,360	2,019	3,754	2,726
A	4,880	9,443	14,932	13,297
G	5,271	10,151	14,507	12,986
D	8,870	15,758	21,576	18,814

Şekil 4.59’da ise kayaç türlerine ait tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) değerleri ile BÇD ($t/D:0,5$) ve TEÇD değerlerinin oranları verilmiştir. Şekil incelendiğinde, $TEBD/\sigma_{tBrez}$ değerlerinin 9,20 ile 15,78 arasında değiştiği gözlemlenirken, $TEBD/TEÇD$ değerlerinin en düşük 12,83, en yüksek 77,73 olduğu görülmektedir. Genel trendi bozan K kodlu kayaç çıkarılırsa; $TEBD/TEÇD$ oranları, $TEBD/\sigma_{tBrez}$ oranlarına göre yaklaşık 1,5 ila 2,6 kat daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.59. Basma dayanımının çekme dayanımına oranları

4.12. İstatistiksel Analizler

Bu bölümde doğrudan ve dolaylı ÇD deney sonuçlarının aralarındaki ilişkiler istatistiksel olarak incelenmiş ve elde edilen verilerin anlamlı olup olmadığı araştırılmıştır. Bu kapsamda Minitab 16 ve Excel paket programları kullanılmıştır. İlk olarak TEÇD değerleri ile dolaylı ÇD değerleri arasında doğrusal regresyon eğrileri çizilerek regresyon katsayıları belirlenmiştir.

Regresyon analizi bağımlı değişken ile bir veya daha çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir. Tek bağımsız değişken kullanılırsa tek değişkenli regresyon analizi, birden fazla bağımsız değişken kullanılırsa çok değişkenli regresyon analizi olarak

adlandırılmaktadır. Bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi açıklayan tek değişkenli regresyon modeli aşağıdaki (Eşitlik 4.10) gibidir (Montgomery ve Runger, 2013).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (4.10)$$

Burada; Y: Bağımlı değişkenin değeri

β_0 : Regresyon doğrusunun kesişim değeri (Sabit değer) ya da X:0 olduğunda Y'nin aldığı değeri,

β_1 : Bağımsız değişkendeki 1 birimlik değişime karşılık bağımlı değişkende meydana gelecek değişim. (Regresyon doğrusunun eğimi)

X : Bağımsız değişkenin değerini göstermektedir.

Tez çalışmasının bu bölümünde yapılan tek değişkenli regresyon analizlerinde bağımlı değişken olarak TEÇD seçilmiş, bağımsız değişken olarak dolaylı ÇD değerleri belirlenmiştir. Bu sayede dolaylı yöntemlerden TEÇD değerinin tahmin edilebilirliği araştırılmıştır. Regresyon denklemleri oluşturulurken eğilim çizgileri sıfırdan (kesim noktası) başlatılmıştır. Bunun nedeni X sıfır değerini aldığı anda Y'nin de sıfır değerini almasını sağlamak ve analizler sonucunda tek bir katsayı elde etmektir. Böylelikle Eşitlik 4.10'da verilen denklem aşağıdaki şekilde (Eşitlik 4.11) dönüştürülerek dolaylı ÇD değerleri için katsayılar belirlenmiştir.

$$\sigma_T = \beta_1 * \sigma_{\text{dolaylı}\text{ÇD}} \quad (4.11)$$

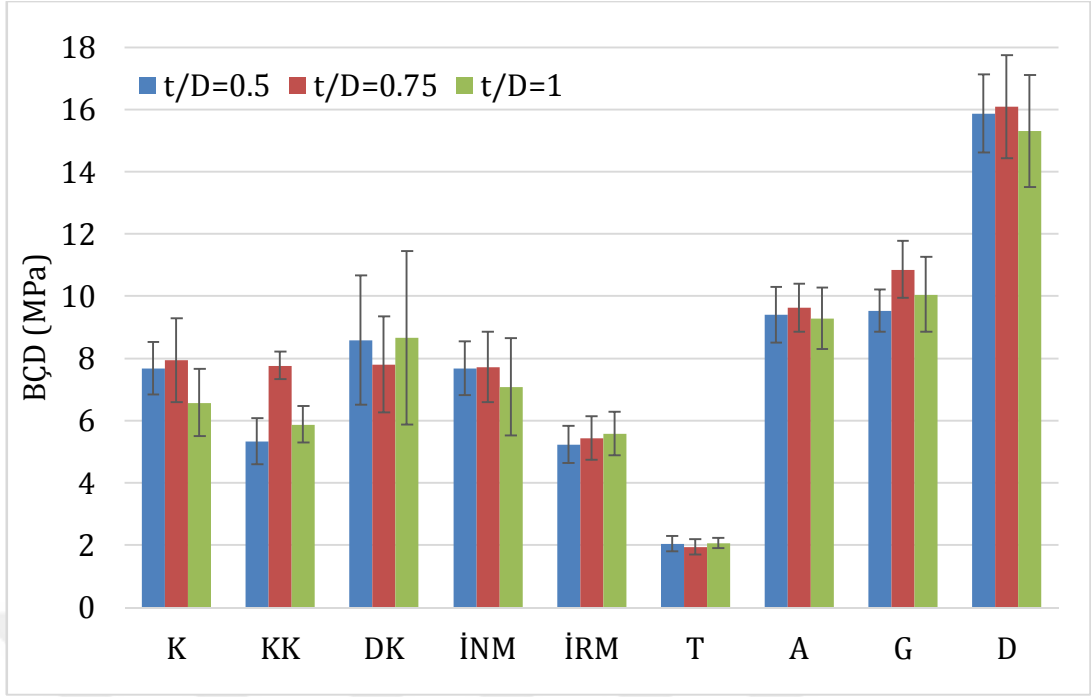
Bu amaçla tez çalışmasında incelenen kayalar Karbonat kökenli (K, KK, DK, İNM, İRM) ve Magmatik kökenli (T, A, G, D) olmak üzere iki ana gruba ayrılmış ve her iki ana grup için ayrı ayrı regresyon katsayıları belirlenmiştir. Daha sonra dolaylı ÇD değerleri, her bir kayaç için regresyon denklemlerine göre dönüştürülerek düzeltilmiş "d-" dolaylı ÇD değerleri belirlenmiştir. Dolaylı ÇD değerleri-TEÇD değerleri ve düzeltilmiş dolaylı ÇD değerleri-TEÇD değerleri tek yönlü varyans analizi testi ile karşılaştırılmış olup gruplar arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı %95 güven seviyesinde test edilmiştir. Böylece $p < 0,05$ için grup ortalama değerleri arasındaki farklar istatistiksel

olarak anlamlı aksi halde anlamsız kabul edilmiştir. Ayrıca tablolarda p değerlerinin yanında F değerleri de verilmiştir. Düzeltmiş dolaylı ÇD ile TEÇD değerlerinin istatistiksel karşılaştırılmasında gruplar arasında farkın olmaması F değerlerin 0'a veya p değerinin 1'e yaklaştığı ölçüde başarılı kabul edilmiştir.

Deneyler sırasında Kireçtaşı (K kodlu kayaç) TEÇD değerleri çok düşük bulunmuştur. Bunun nedenini, numunelerin bir kısmının süreksizlik düzlemlerinden kopması olarak açıklamak mümkündür. Mineralojik ve petrografik analiz sonuçlarına göre de K kodlu kayaçta çok yoğun bir şekilde kırık, çatlak ve erime boşlukları geliştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan fiziksel gözlemler de bu durumu doğrulamıştır. Dolaylı yöntemlerde tek eksenli gerilme (çekme) durumu olmadığı düşünüldüğünde, kayacın bünyesindeki yapısal bir takım kusurların dayanım sonucunu, TEÇD deneylerinde olduğu kadar etkilememesi olağandır. Bu nedenle K kodlu kayaç, genel eğilimi belirten regresyon analizine dahil edilmemiştir. Ancak diğer Karbonat kökenli kayaçlardan elde edilen regresyon katsayıları bu kayaca da uygulanarak dönüşüm yapılmıştır.

4.12.1. Brezilya dolaylı çekme dayanımı

Farklı kayaç türleri için yapılan Brezilya deneylerinden elde edilen ortalama dayanım ve standart sapma değerleri Şekil 4.60'da gösterilmiştir. Farklı t/D oranlarında yapılan deney sonuçlarının tek yönlü varyans analizi ise Çizelge 4.15'te verilmiştir. Yu vd. (2006) Brezilya diskinin numune kalınlığı dikkate alınmadığında dolaylı ÇD için sunulan formülün hatalı olduğuna dikkat çekmiştir. Ancak yapılan deneysel ve istatistiksel analiz çalışmalarına göre t/D oranının değişiminin BÇD değeri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir ($P>0,05$). Bu nedenle t/D=0,5 oranı hem malzeme sarfiyatının az olması hem de numune hazırlama işlemi süresinin kısa olması nedeniyle tercih edilebilir bulunmuştur.

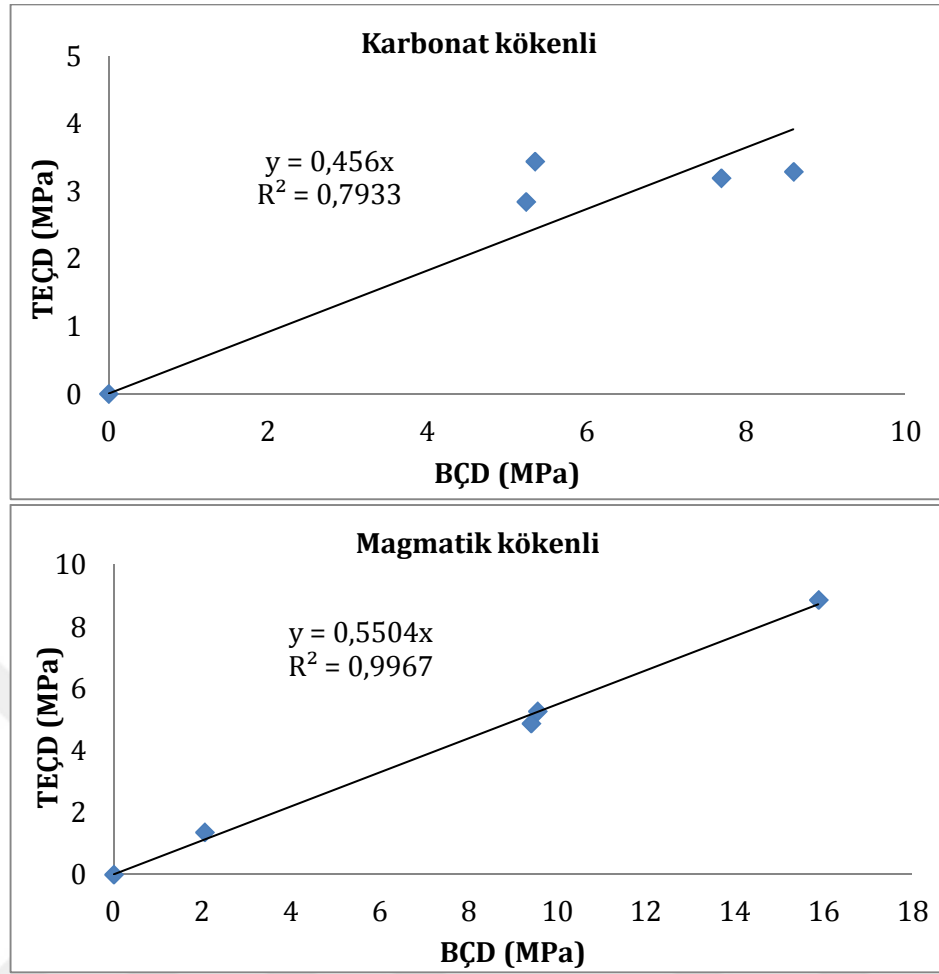


Şekil 4.60. Brezilya deneyleri için ortalama ve standart sapma değerleri

Çizelge 4.15. Farklı t/D oranlarında yapılan Brezilya deney sonuçları için tek yönlü Anova tablosu

t/D Oranı	N	Ortalama	SS	F	p
0,50	96	7,70	3,67	0,23	0,793
0,75	76	8,07	3,86		
1,00	73	7,43	3,76		

Kayaç türlerine (veya kökenine) bağlı olarak Brezilya disk ve doğrudan çekme deneylerinden elde edilen veriler için ayrı ayrı regresyon eğrileri çizilmiştir. Regresyon eğrileri çizilirken kayaçlardan elde edilen çekme dayanımı değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu amaçla Şekil 4.61’de karbonat kökenli kayaçlar ve magmatik kayaçlar için çizilen regresyon eğrileri ve doğrusal regresyon denklemleri (katsayılar) görülmektedir.



Şekil 4.61. TEÇD ve BÇD için doğrusal regresyon grafikleri

BÇD ve yukarıda hesaplanan regresyon denklemlerine göre düzeltilmiş değerler (d-BÇD) ile TEÇD ortalama değerleri ve standart sapmaları Şekil 4.62’de gösterilmiştir. BÇD ve TEÇD deneylerinden elde edilen her bir kayaç türüne ait ÇD değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile karşılaştırması sonucu elde edilen p değerleri Çizelge 4.15’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.61’de sunulan regresyon denklemlerine göre dönüştürülmüş BÇD (d-BÇD) değerleri ile TEÇD değerlerinin tek yönlü varyans analizi sonuçları da Çizelge 4.15’de gösterilmiştir.

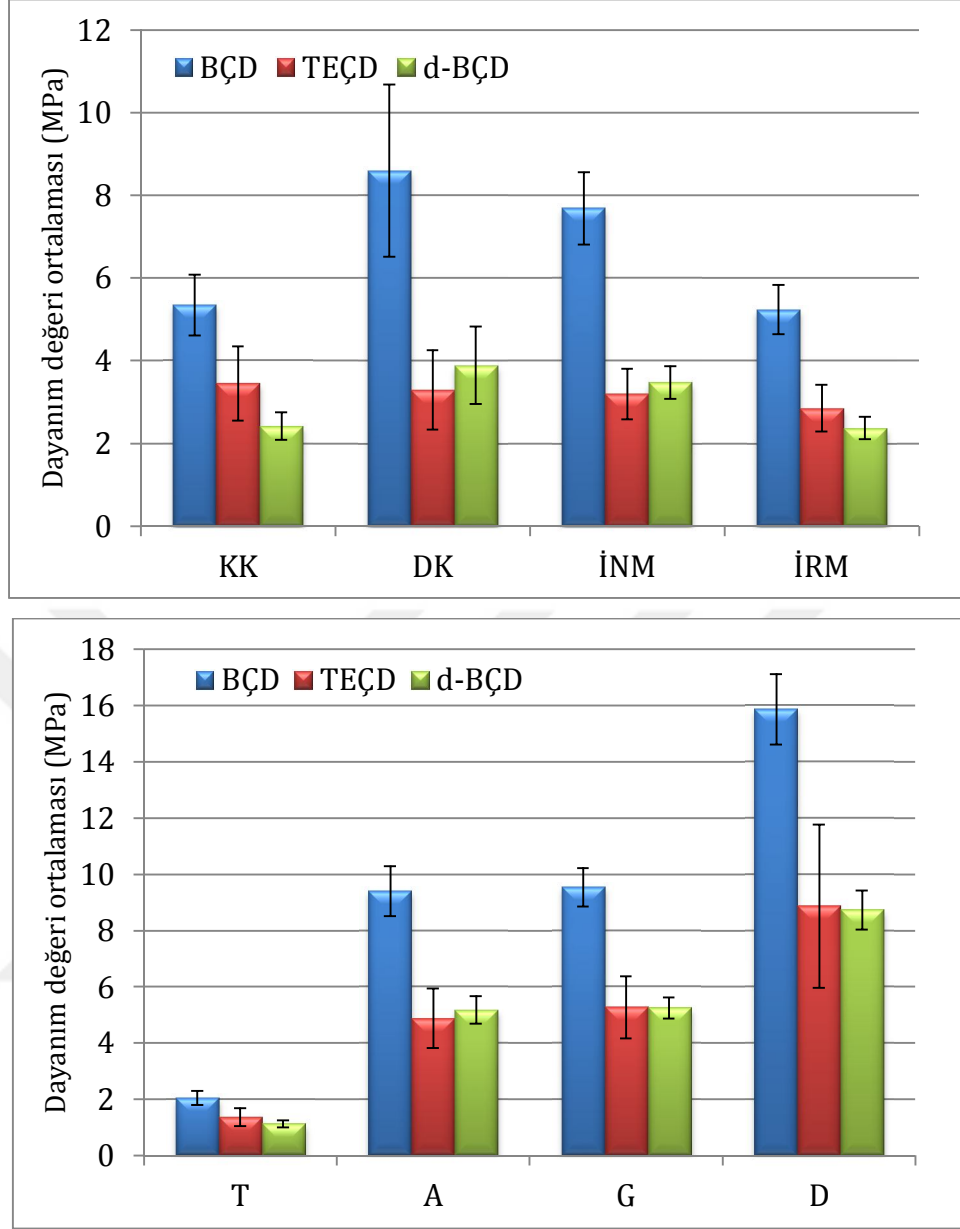
Tüm kayaçlar için BÇD ve TEÇD karşılaştırmalarında p değerlerinin 0 hesaplandığı, yani deney türlerinin birbirinden tamamen farklı ÇD değerleri verdiği görülmektedir. BÇD değerleri dönüştürüldüğünde TEÇD değerlerine oldukça yaklaşıldığı görülmekle birlikte (Şekil 4.62) K ve KK kodlu kayaçlarının

TEÇD ve d-BÇD değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar görülmektedir. Ancak diğer bütün kayaçlarda $p \geq 0,05$ olarak hesaplanmıştır. Bu, BÇD sonuçlarına bakarak TEÇD değerlerinin tahmin edilebileceğini göstermektedir. Özellikle magmatik grupta yer alan kayaçların kıyaslanmasında p değerinin 1'e doğru yaklaşması tahminlerin bu tür kayaçlar için daha tutarlı olacağını göstermektedir. TEÇD/d-BÇD karşılaştırmalarındaki F değerlerine bakıldığında en iyi korelasyonu G ($F=0,0$) ve D ($F=0,02$) kodlu kayaçların gösterdiği söylenebilmektedir.

Bazı kayaçların TEÇD ve d-BÇD karşılaştırmalarında $p < 0,05$ değerleri elde edildiği ve düzeltme işleminden sonra bile gruplar arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Örneğin İRM kodlu kayaç için bu değer $p=0,035$ ($F=5,43$) olarak görülmektedir ve düzeltme işleminin bu kayaç için geçerli olup olmadığı sorusunu gündeme getirmektedir. İRM için TEÇD ve d-BÇD ortalamaları birbirine yaklaştığı halde (Şekil 4.62) p değerinin 0.05'den düşük çıkması; deneylerde bu gruptaki numunelerden birbirine yakın değerler elde edilmesinden, yani grubun standart hatasının düşük çıkmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 4.15'ten de görüleceği üzere İRM için BÇD/TEÇD karşılaştırmasında $F=68,3$ iken d-BÇD/TEÇD karşılaştırmasında $F=5,43$ 'e kadar düşmüştür. Dolayısıyla elde edilen katsayının İRM kayacı için kullanılması büyük bir hataya neden olmayacaktır.

Çizelge 4.16. BÇD/TEÇD ve TEÇD/d-BÇD değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve (F) değerleri

Kayaç Türü	BÇD		TEÇD		d-BÇD	
	p	F	p	F	p	F
K	0,000	303,13	0,000	134,02		
KK	0,000	31,63	0,001	16,34		
DK	0,000	35,05	0,206	1,71		
İNİM	0,000	116,04	0,309	1,13		
İRM	0,000	68,3	0,034	5,43		
T	0,000	22,8	0,054	4,44		
A	0,000	85,9	0,469	0,55		
G	0,000	98,93	0,951	0,00		
D	0,000	42,04	0,894	0,02		

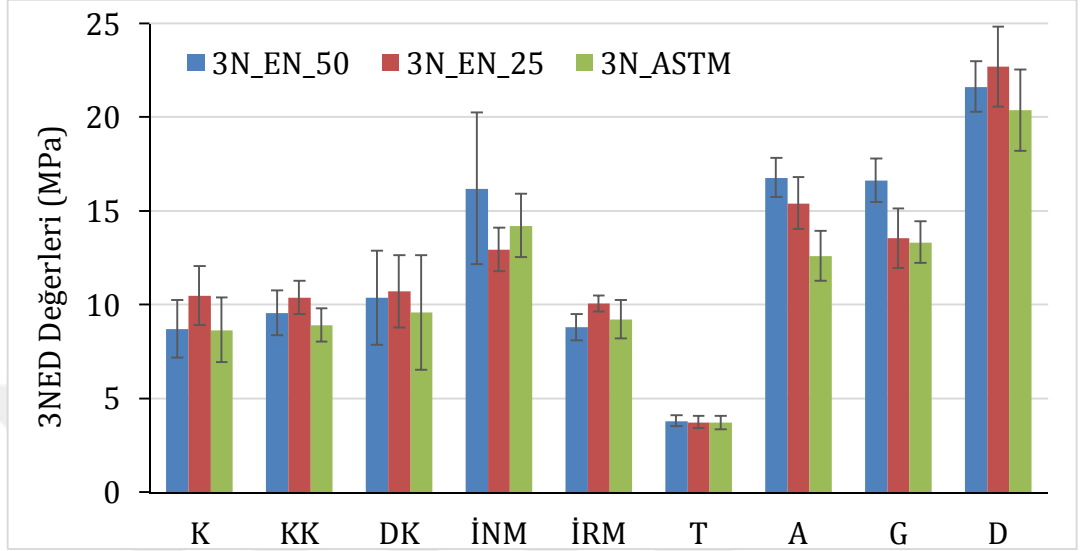


Şekil 4.62. BÇD, TEÇD ve d-BÇD ortalamalar ve standart sapmaları

4.12.2. 3 Nokta eğilme dayanımı

Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere 3 nokta eğilme dayanımı (3NED) deneyleri 3 farklı geometrideki numuneler üzerinde ilgili standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiş ve 3N_EN_50, 3N_EN_25, 3N_ASTM olarak kodlanmıştır. Deneylerden elde edilen ortalama dayanım ve standart sapma değerleri Şekil 4.63'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarının tek yönlü varyans analizi Çizelge 4.16'da verilmiştir. Yapılan istatistiksel analiz sonuçlarına göre numune geometrisinin ve standart farklılığının, 3NED'na kısmi olarak etkisinin olduğu

görülmektedir ($P>0,05$). Ancak regresyon katsayıları belirlenirken 3 deneyin ortalamaları alınmış; karbonat kökenli kayalar için tek bir katsayı, magmatik kökenli kayalar için tek bir katsayı bulunmuştur.

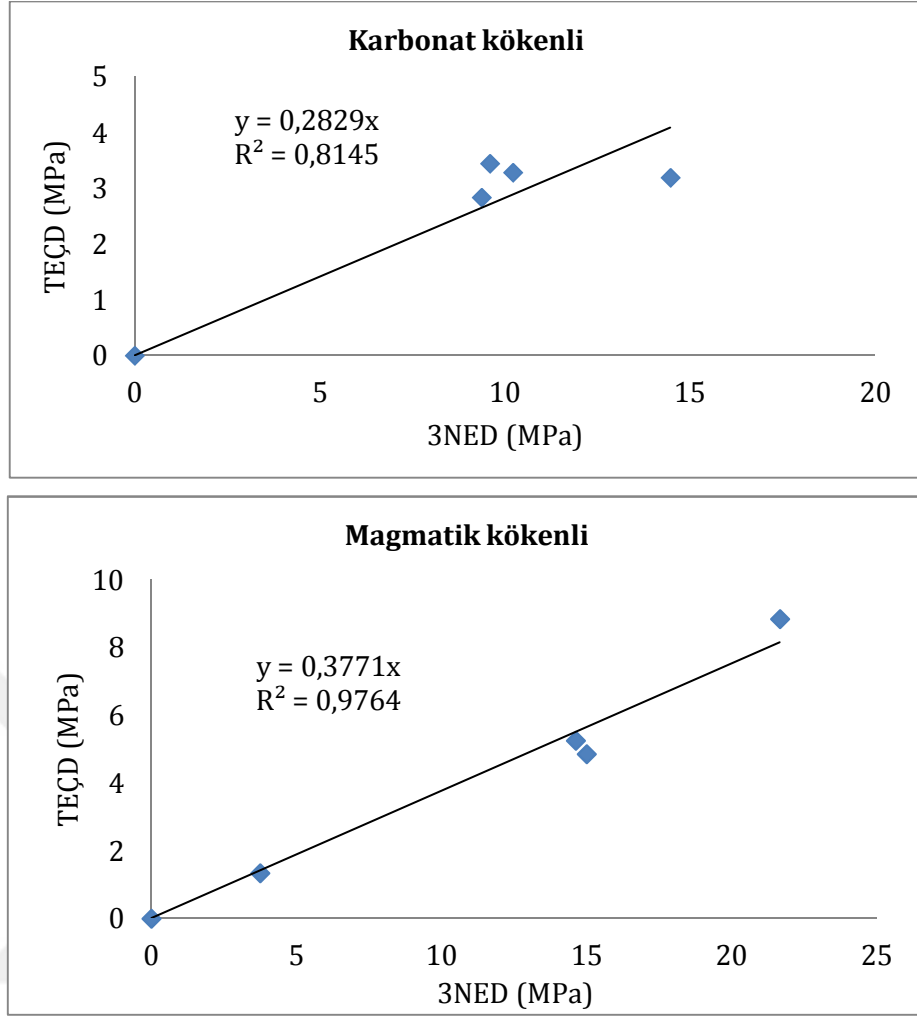


Şekil 4.63. 3NED deneylerine ait ortalamalar ve standart sapmalar

Çizelge 4.17. 3NED deney sonuçları için tek yönlü Anova tablosu

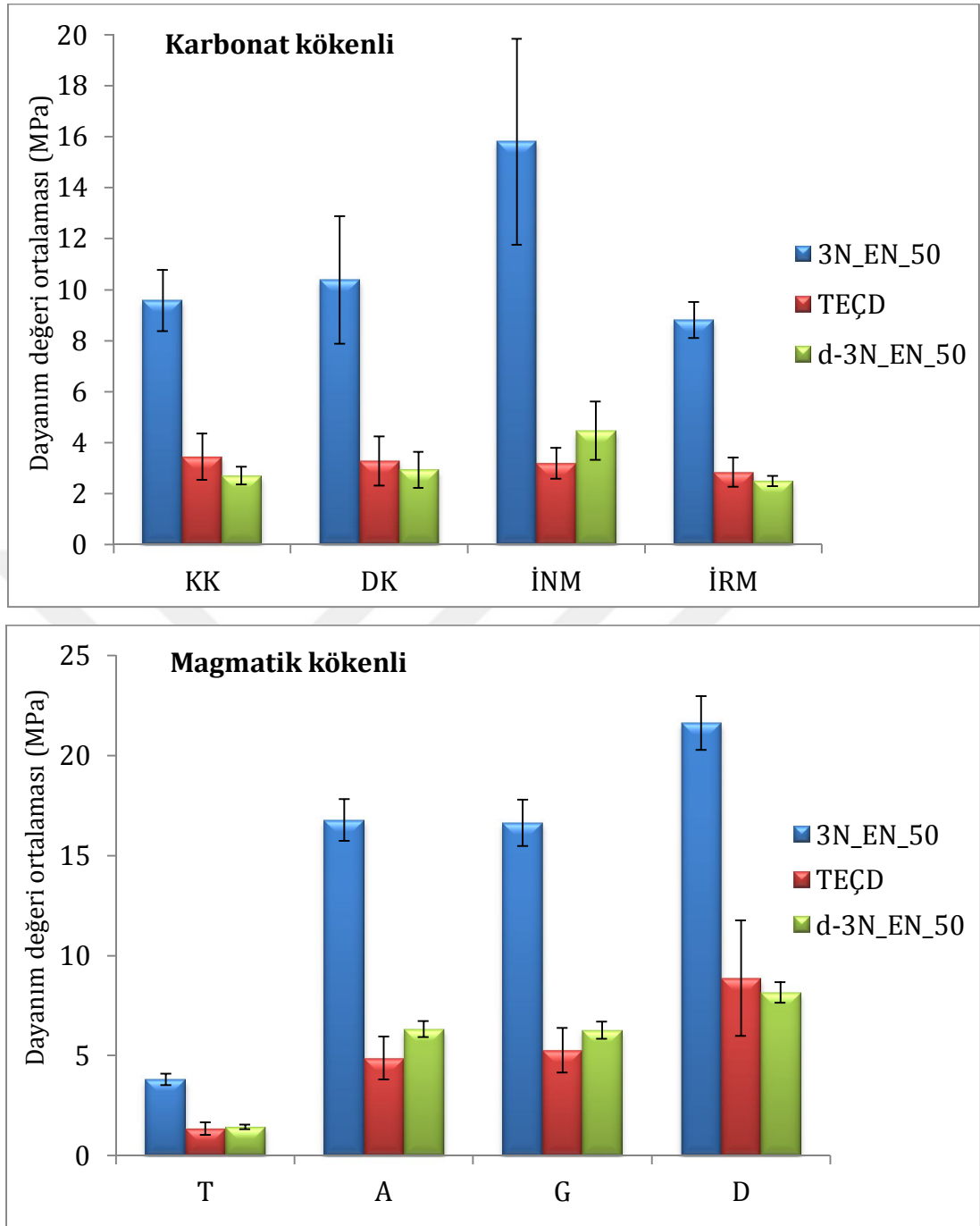
Deney tipi	N	Ortalama	SS	F	p
3N_EN_50	106	12,54	5,64	2,56	0,079
3N_EN_25	100	12,35	5,18		
3N_ASTM	97	11,01	4,66		

Şekil 4.64'te tüm 3NED deneylerinden elde edilen değerlerin ortalamaları kullanılarak karbonat kökenli ve magmatik kökenli kayalar için çizilen regresyon eğrileri ve katsayıları görülmektedir.

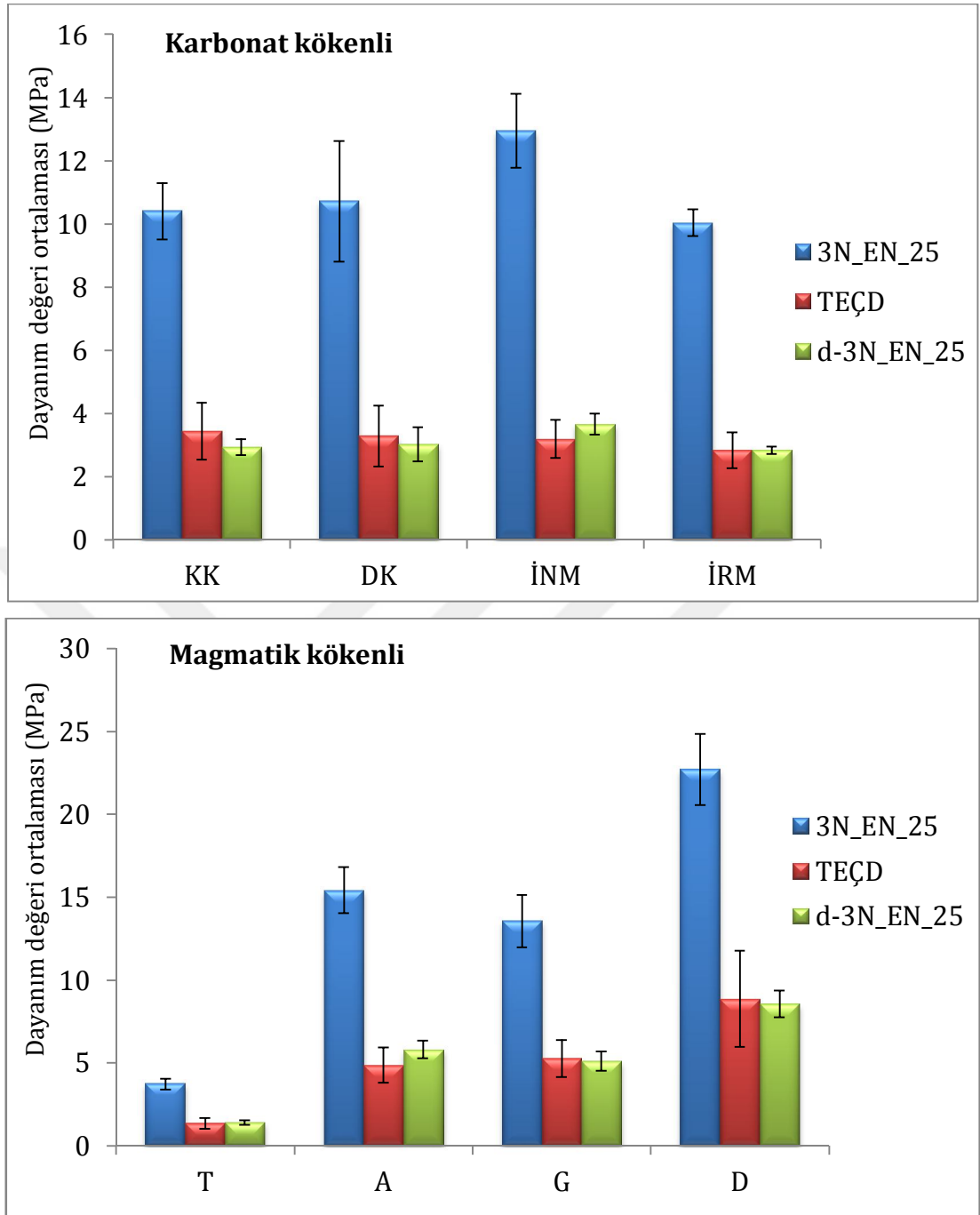


Şekil 4.64. 3NED deneyleri için regresyon eğrileri ve katsayıları

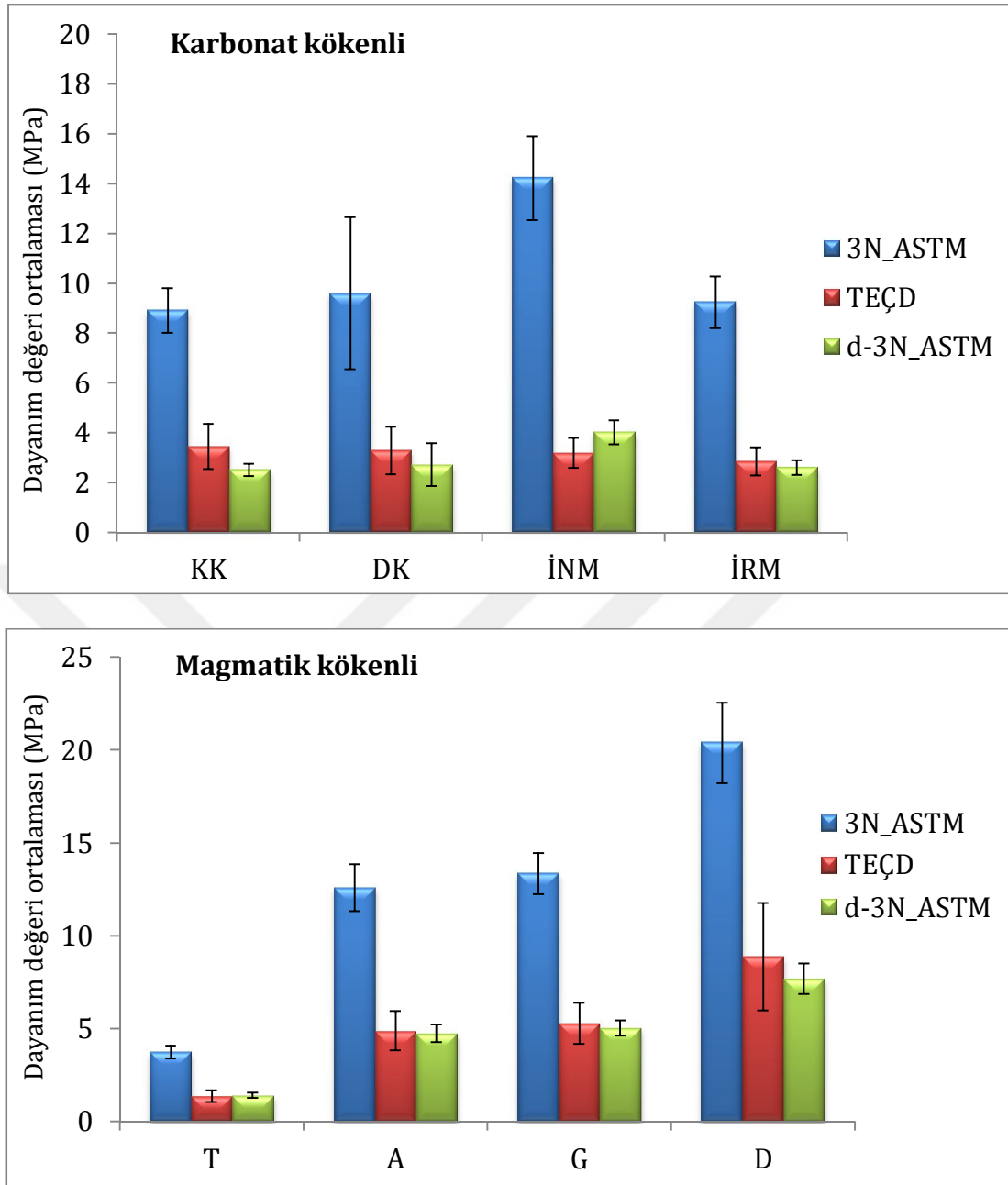
TEÇD, 3NED ve 3NED deneylerinden elde edilen doğrusal regresyon katsayıları kullanılarak hesaplanan düzeltilmiş (d-) 3NED değerleri; 3N_EN_50 kodlu deney için Şekil 4.65'te, 3N_EN_25 için Şekil 4.66'da, 3N_ASTM için Şekil 4.67'de gösterilmiştir. Regresyon denklemleri (katsayıları) bulunurken 3 farklı deneyden elde edilen ortalama değerler kullanılmış olmasına karşın düzeltilmiş (d-) 3NED değerleri her standart için ayrı ayrı hesaplatılmıştır. Buradaki amaç elde edilen katsayıların kullanılabilirliğini irdelemektir.



Şekil 4.65. 3N_EN_50, TEÇD ve d-3N_EN_50 için ortalamalar ve standart sapmalar



Şekil 4.66. 3N_EN_25, TEÇD ve d-3N_EN_25 için ortalamalar ve standart sapmalar



Şekil 4.67. 3N_ASTM, TEÇD ve d-3N_ASTM için ortalamalar ve standart sapmalar

3NED ham değerlerinin ve düzeltilmiş değerlerin TEÇD değerleri ile istatistiksel karşılaştırması 3N_EN_50 kodlu deney için Çizelge 4.18’de, 3N_EN_25 kodlu deney için Çizelge 4.19’da, 3N_ASTM kodlu deney için Çizelge 4.20’de verilmiştir. Tüm değerler incelendiğinde genel olarak magmatik kayaçların daha yüksek p değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Üç deney türünün kendi içlerindeki karşılaştırılmasında ise ASTM standardı, diğerlerinden daha yüksek p değerleri sergilemiştir (özellikle magmatik kayaçlar için). Karşılaştırmalardaki F değerlerine bakıldığında en iyi korelasyonu TEÇD/d-3N_EN_50 için DK

(F=0,75) ve D (F=0,72) kodlu kayaçların, TEÇD/d-3N_EN_25 için İRM (F=0,0) ve D (F=0,12) kodlu kayaçların, TEÇD/d-3N_ASTM için A (F=0,14) ve T (F=0,17) kodlu kayaçların gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.18. 3N_EN_50/TEÇD ve TEÇD/d-3N_EN_50 değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri

Kayaç Türü	3N_EN_50		TEÇD / d-3N_EN_50	
	p	F	p	F
K	0,000	120,89	0,001	20,10
KK	0,000	205,29	0,011	7,87
DK	0,000	43,39	0,399	0,75
İNM	0,000	59,82	0,015	7,58
İRM	0,000	367,59	0,054	4,26
T	0,000	289,40	0,185	1,91
A	0,000	585,61	0,000	19,78
G	0,000	397,98	0,013	7,82
D	0,000	169,19	0,408	0,72

Çizelge 4.19. 3N_EN_25/TEÇD ve TEÇD/d-3N_EN_25 değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri

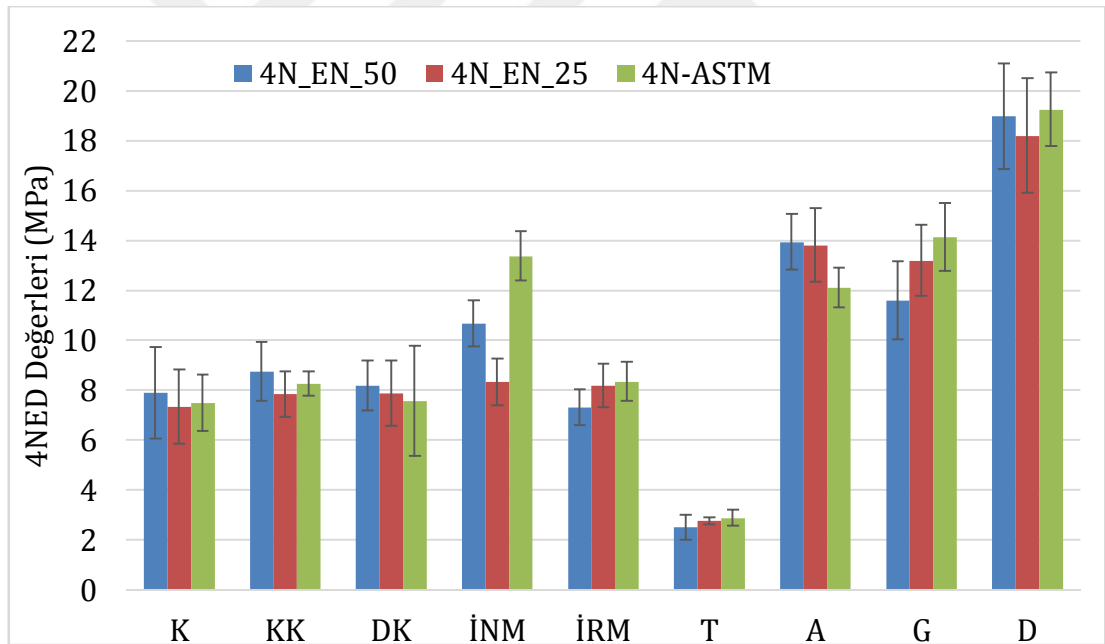
Kayaç Türü	3N_EN_25		TEÇD / d-3N_EN_25	
	p	F	p	F
K	0,000	199,12	0,000	57,69
KK	0,000	285,75	0,106	2,91
DK	0,000	76,95	0,500	0,48
İNM	0,000	358,99	0,054	4,37
İRM	0,000	1039,14	0,978	0,00
T	0,000	188,81	0,647	0,22
A	0,000	302,66	0,016	7,07
G	0,000	127,18	0,702	0,15
D	0,000	132,74	0,731	0,12

Çizelge 4.20. 3N_ASTM/TEÇD ve TEÇD/d-3N_ASTM değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri

Kayaç Türü	3N_ASTM		TEÇD / d-3N_ASTM	
	p	F	p	F
K	0,000	114,84	0,001	21,17
KK	0,000	192,51	0,003	11,70
DK	0,000	23,73	0,226	1,60
İNM	0,000	231,15	0,009	9,26
İRM	0,000	180,70	0,251	1,41
T	0,000	167,48	0,689	0,17
A	0,000	183,26	0,717	0,14
G	0,000	199,71	0,537	0,40
D	0,000	82,72	0,236	1,53

4.12.3. 4 Nokta eğilme dayanımı

Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere 4 nokta eğilme dayanımı (4NED) deneyleri 3 farklı geometrideki numuneler üzerinde ilgili standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiş ve 4N_EN_50, 4N_EN_25, 4N_ASTM olarak kodlanmıştır. Deneylerden elde edilen ortalama dayanım ve standart sapma değerleri Şekil 4.68’de gösterilmiştir. Deney sonuçlarının tek yönlü varyans analizi Çizelge 4.21’de verilmiştir. Yapılan istatistiksel analiz sonuçlarına göre numune geometrisinin ve standart farklılığının, 4NED’na kısmi olarak etkisinin olduğu görülmektedir ($P>0,05$). Ancak regresyon katsayıları belirlenirken 3NED analizlerinde olduğu gibi 3 deneyin ortalamaları alınmış; karbonat kökenli kayalar için tek bir katsayı, magmatik kökenli kayalar için tek bir katsayı bulunmuştur.

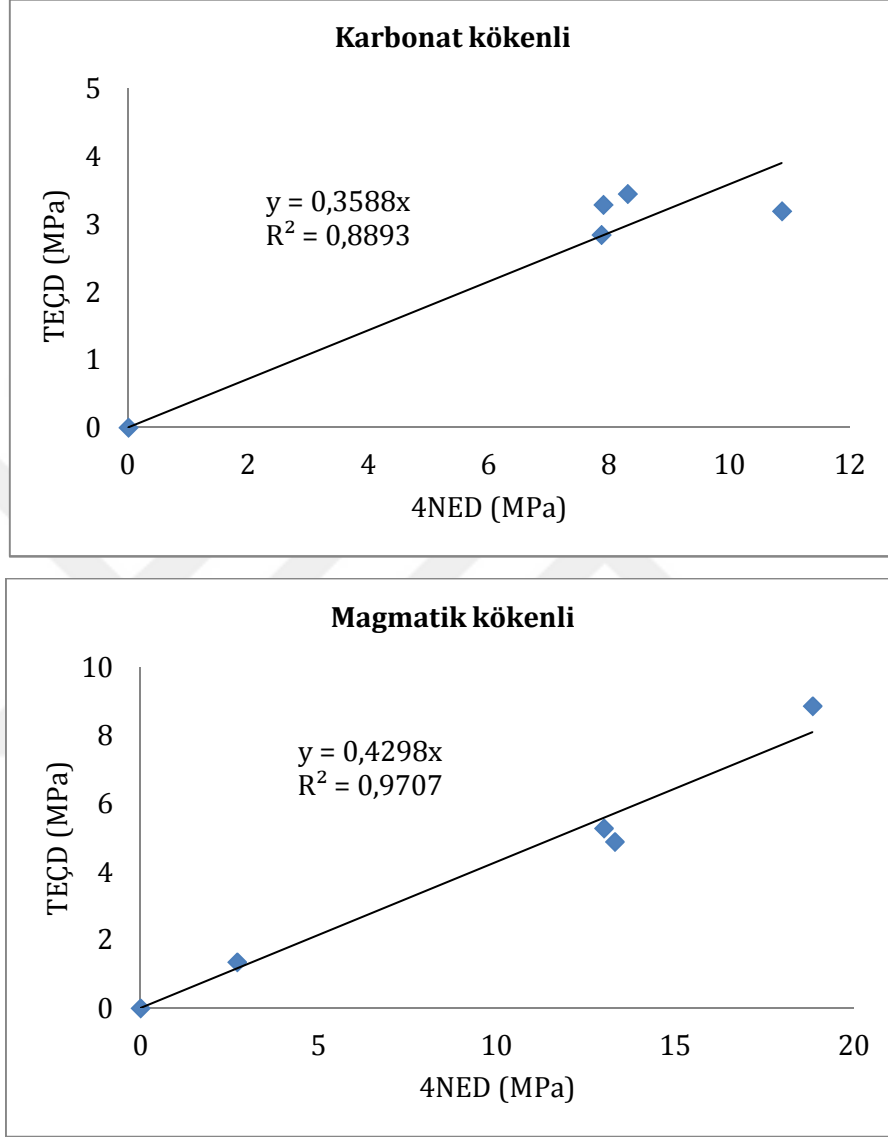


Şekil 4.68. 4NED deneylerine ait ortalamalar ve standart sapmalar

Çizelge 4.21. 4NED deney sonuçları için tek yönlü Anova tablosu

Deney tipi	N	Ortalama	Std. Sapma	F	P
4N_EN_50	119	9,92	4,66	0,26	0,774
4N_EN_25	94	9,76	4,46		
4N_ASTM	99	10,22	4,69		

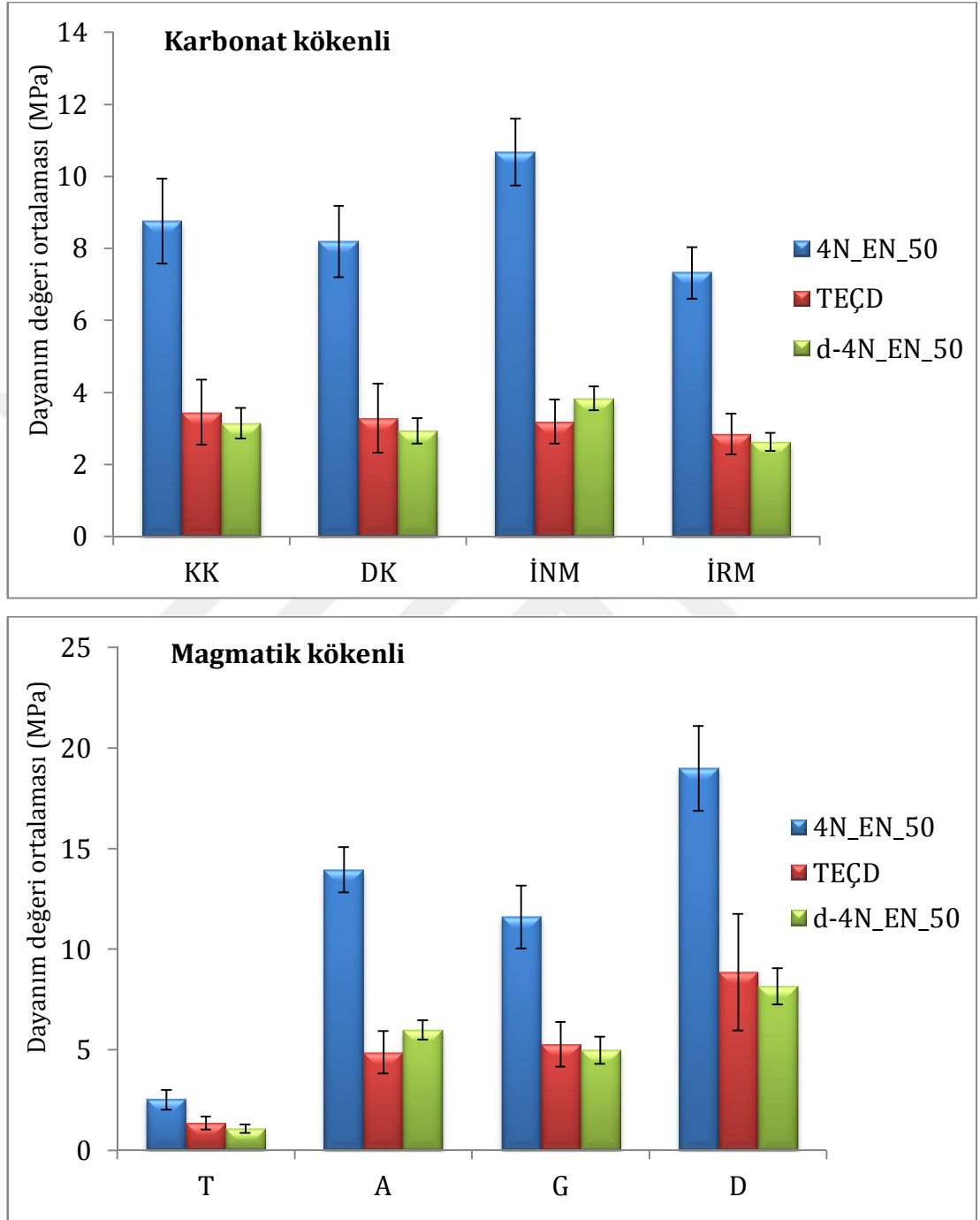
Şekil 4.69'da tüm 4NED deneylerinden elde edilen değerlerin ortalamaları kullanılarak karbonat kökenli ve magmatik kökenli kayalar için çizilen regresyon eğrileri ve katsayıları görülmektedir.



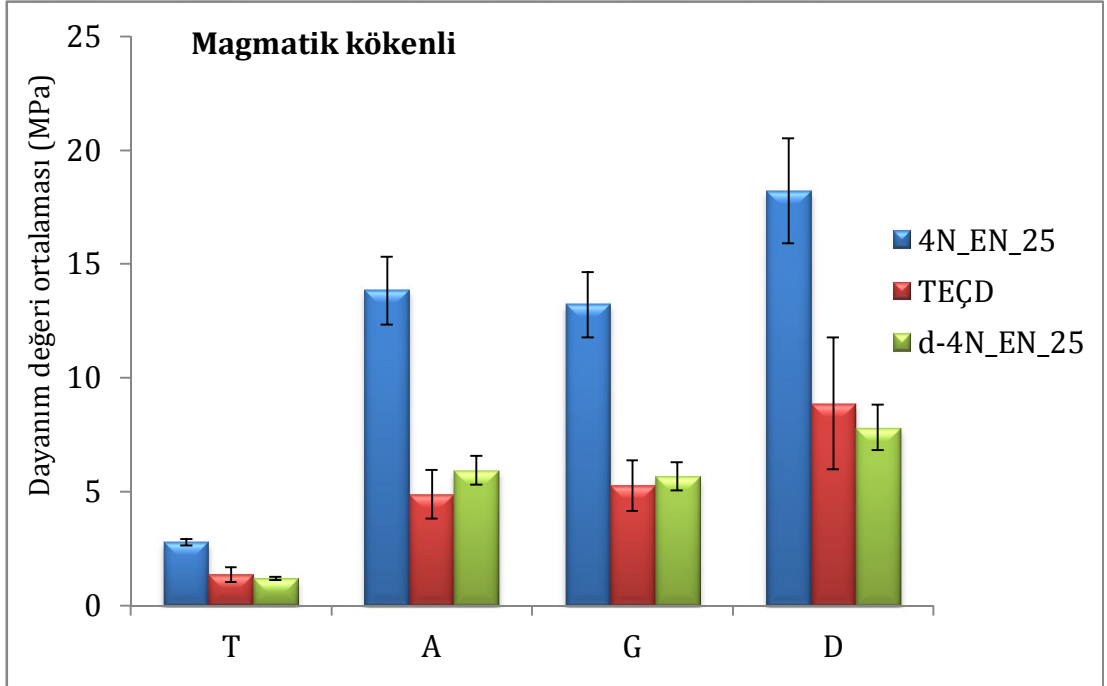
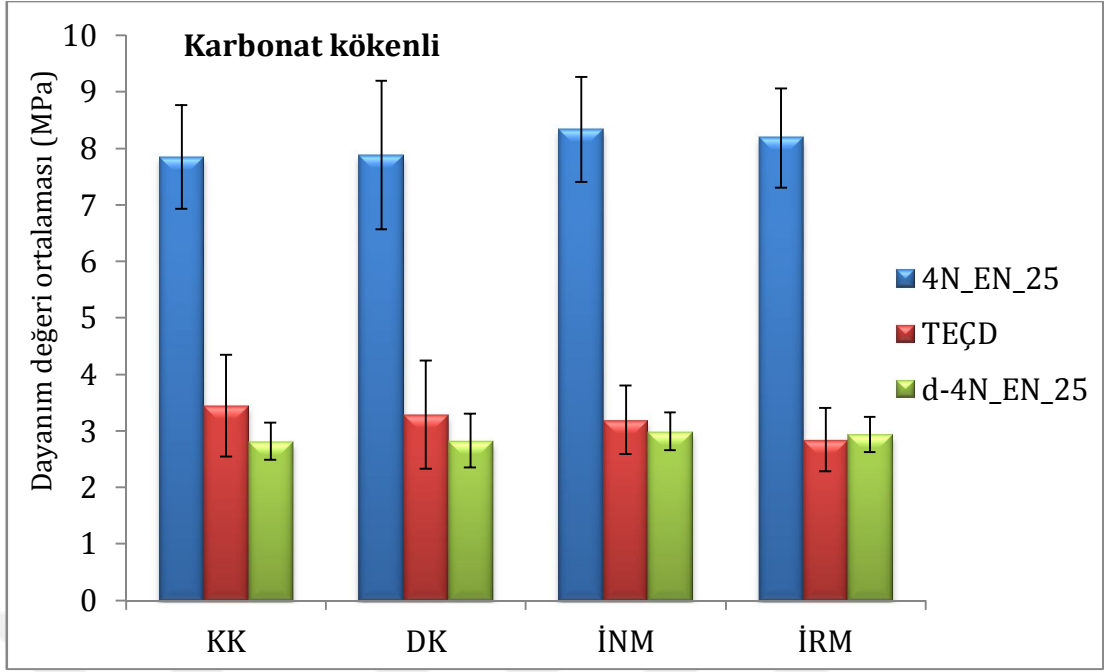
Şekil 4.69. 4NED deneyleri için regresyon eğrileri ve katsayıları

TEÇD, 4NED ve 4NED deneylerinden elde edilen doğrusal regresyon katsayıları kullanılarak hesaplanan düzeltilmiş (d-) 4NED değerleri; 4N_EN_50 için Şekil 4.70'de, 4N_EN_25 için Şekil 4.71'de, 4N_ASTM için Şekil 4.72'de gösterilmiştir. Regresyon denklemleri (katsayıları) bulunurken 3 farklı deneyden elde edilen ortalama değerler kullanılmış olmasına karşın düzeltilmiş (d-) 4NED değerleri

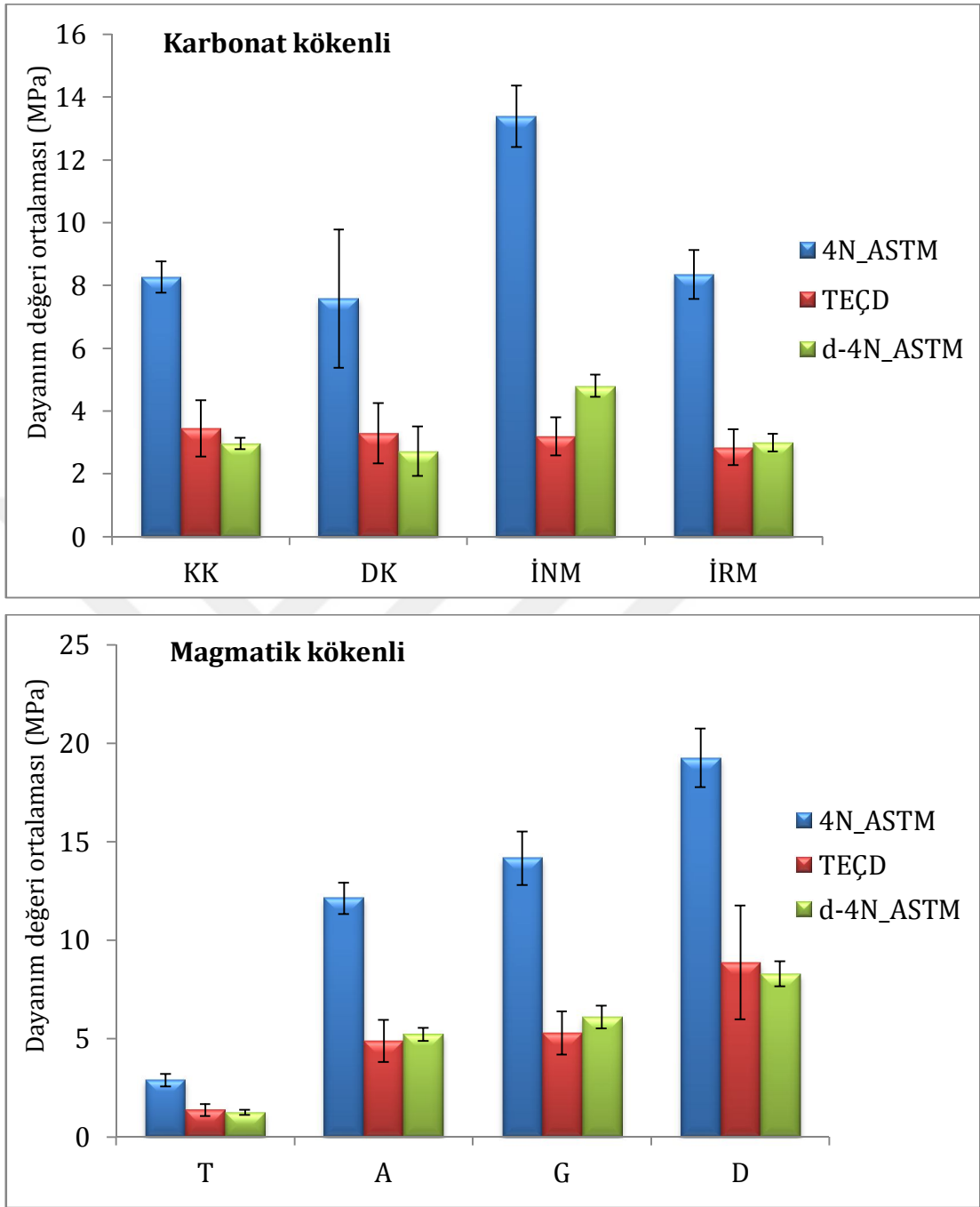
her standart için ayrı ayrı hesaplatılmıştır. Burada amaç 3NED analizlerinde olduğu gibi elde edilen katsayıların kullanabilirliğini irdelemektir.



Şekil 4.70. 4N_EN_50, TEÇD ve d-4N_EN_50 için ortalamalar ve standart sapmalar



Şekil 4.71. 4N_EN_25, TEÇD ve d-4N_EN_25 için ortalamalar ve standart sapmalar



Şekil 4.72. 4N_ASTM, TEÇD ve d-4N_ASTM için ortalamalar ve standart sapmalar

4NED ham değerlerinin ve düzeltilmiş değerlerin TEÇD değerleri ile istatistiksel karşılaştırması 4N_EN_50 kodlu deney için Çizelge 4.22’de, 4N_EN_25 kodlu deney için Çizelge 4.23’te, 4N_ASTM kodlu deney için Çizelge 4.24’te verilmiştir. Tüm değerler incelendiğinde genel olarak magmatik kayaçların daha yüksek p değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Üç deney türünün kendi içlerindeki karşılaştırılmasında ise ASTM standardı, diğerlerinden daha yüksek p değerleri sergilemiştir (özellikle magmatik kayaçlar için). Karşılaştırmalardaki F değerlerine bakıldığında en iyi korelasyonu TEÇD/d-4N_EN_50 için İRM (F=0,19) ve İNM (F=0,71) kodlu kayaçların, TEÇD/d-4N_EN_25 için G (F=0,47) ve D (F=0,68) kodlu kayaçların, TEÇD/d-4N_ASTM için D (F=0,40) ve İRM (F=0,50) kodlu kayaçların gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.22. 4N_EN_50/TEÇD ve TEÇD/d-4N_EN_50 değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri

Kayaç Türü	4N_EN_50		TEÇD / d-4N_EN_50	
	p	F	p	F
K	0,000	88,59	0,000	23,06
KK	0,000	115,56	0,044	4,69
DK	0,000	55,95	0,199	1,81
İNM	0,000	141,43	0,415	0,71
İRM	0,000	198,59	0,670	0,19
T	0,000	167,60	0,283	1,25
A	0,000	177,49	0,021	6,62
G	0,000	140,67	0,328	1,02
D	0,000	50,99	0,306	1,13

Çizelge 4.23. 4N_EN_25/TEÇD ve TEÇD/d-4N_EN_25 değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri

Kayaç Türü	4N_EN_25		TEÇD / d-4N_EN_25	
	p	F	p	F
K	0,000	69,71	0,000	21,38
KK	0,000	126,32	0,309	1,09
DK	0,000	104,52	0,241	1,47
İNM	0,000	322,25	0,008	9,01
İRM	0,000	205,95	0,233	1,52
T	0,000	22,99	0,043	4,77
A	0,000	301,18	0,006	9,99
G	0,000	78,28	0,502	0,47
D	0,000	74,61	0,420	0,68

Çizelge 4.24. 4N_ASTM/TEÇD ve TEÇD/d-4N_ASTM değerlerinin tek yönlü varyans analizi ile elde edilen p ve F değerleri

Kayaç Türü	4N_ASTM / TEÇD		TEÇD / d-4N_ASTM	
	p	F	p	F
K	0,000	175,80	0,000	42,54
KK	0,000	247,30	0,084	3,32
DK	0,000	20,37	0,197	1,81
İNM	0,000	519,38	0,000	46,05
İRM	0,000	246,12	0,492	0,50
T	0,000	81,57	0,285	1,23
A	0,000	274,60	0,348	0,94
G	0,000	190,67	0,055	4,27
D	0,000	91,75	0,535	0,40

4.12.4. Düzeltme katsayıları

Bir önceki bölümde düzeltme katsayıları (regresyon denklemi) ve belirlilik katsayıları (R^2) değerleri tüm deneyler için verilmiştir. Burada ise ortalama değerlerin birbirine oranlanması sonucu elde edilen katsayılar yer almaktadır. Kayaçlarda çekme dayanımının dolaylı yöntemler ile belirlenmesi durumunda kullanılması gereken formül ve katsayı (**k**) Eşitlik 4.13'te önerilmiştir. Buna göre dolaylı yöntemlerden elde edilen sonuçların Çizelge 4.25'te yöntem ve kayaç türüne bağlı olarak verilen *k* katsayılarından uygun olanı ile çarpılması, ÇD gerçek değerinin daha doğru tahmin edilmesine olanak sağlayacak pratik bir yaklaşımdır. Önceki bölümlerde verilen ve regresyon denklemlerinden elde edilen katsayılar ile burada yer alan katsayılar neredeyse aynı çıkmıştır.

K kodlu kayacın TEÇD değerleri, bünyesinde barındırdığı kırık-çatlak sistemleri nedeniyle oldukça düşük çıkmış ve genel eğilimden sapmıştır. Bu nedenle bu bölümde değerlendirmeye alınamamış ve düzeltme katsayısı önerilmemiştir. Diğer 8 kayaç ise kendi aralarında karbonat kökenli ve magmatik kökenli olmak üzere 2'ye ayrılarak değerlendirilmiştir. Bunun nedeni ise; magmatik kayaçlarda regresyon katsayıları ve eğilimin kendi içlerinde daha tutarlı olmasıdır. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre her kayaç türü için regresyon denklemleri kullanılarak dönüşüm yapmak daha doğru sonuçlara götürecektir. Ancak bu tez çalışmasının ana amacı herkes tarafından kabul edilebilecek en

pratik yaklaşımı sunmaktır. Bu nedenle Çizelge 4.25'te sunulan katsayıların kullanılması ayrıca önerilmektedir.

$$\sigma_t = k * \sigma_{\text{dolaylı}\text{ÇD}} \quad (4.13)$$

Çizelge 4.25. Dolaylı çekme dayanımı yöntemleri için önerilen düzeltme katsayıları

Yöntem	Dolaylı ÇD Ortalama (MPa)		TEÇD (Dambıl) σ_t (MPa)	Düzeltilme Katsayısı <i>k</i>
Karbonat Kökenli Kayaçlar için				
Brezilya t/D=0,50	6,71	6,74	3,19	0,47
Brezilya t/D=0,75	6,70			
Brezilya t/D=1,00	6,81			
3N_EN_50	11,14	10,89		0,29
3N_EN_25	11,02			
3N_ASTM	10,50			
4N_EN_50	8,74	8,73		0,37
4N_EN_25	8,06			
4N_ASTM	9,40			
Magmatik Kökenli Kayaçlar için				
Brezilya t/D=0,50	9,22	9,34	5,10	0,55
Brezilya t/D=0,75	9,63			
Brezilya t/D=1,00	9,18			
3N_EN_50	14,71	13,69		0,37
3N_EN_25	13,85			
3N_ASTM	12,51			
4N_EN_50	11,76	11,96		0,43
4N_EN_25	12,00			
4N_ASTM	12,11			

Çizelge 4.24'te önerilen düzeltme katsayıları; Brezilya dolaylı ÇD için karbonat kökenli kayaçlarda 0,47, magmatik kökenli kayaçlarda 0,55 bulunmuştur. Daha pratik bir yaklaşım olması açısından BÇD'nda tüm kayaçlar için uygulamada kullanılabilecek ortak düzeltme katsayısı 0,50 alınabilir.

Bu durumda katsayı BÇD formülünde yerine konulursa;

$$\sigma_t = k * \sigma_{tBrez} \quad (4.14)$$

$$\sigma_t = k * \frac{2F}{\pi Dt} = \frac{1}{2} * \frac{2F}{\pi Dt} = \frac{F}{\pi Dt} \quad (4.15)$$

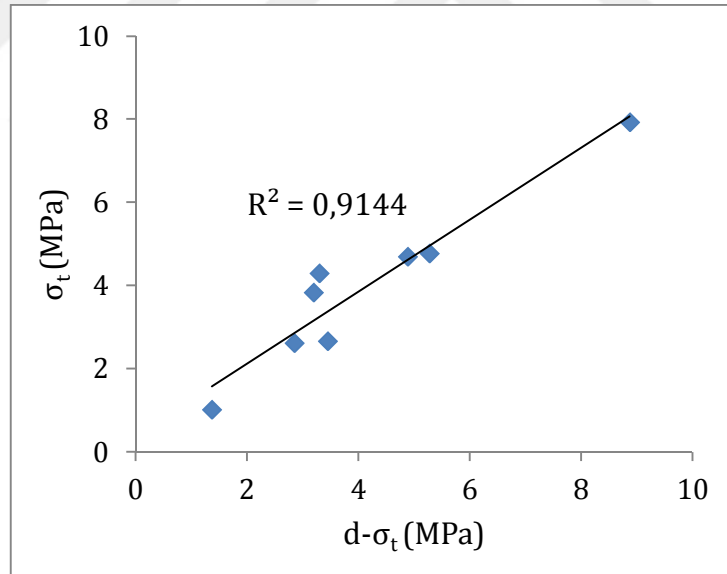
Burada σ_t : kayacın TEÇD,

F : Brezilya deneyinde yenilme yükü,

D : Brezilya deneyinde numune çapı ve

T : numune kalınlığıdır.

BÇD deneylerinden elde edilen sonuçlar Eşitlik 4.15'de verilen düzeltilmiş formülde yerine konulduğunda hesaplanan $(d-\sigma_t)$ ÇD değerleri ile deneyler sonucu elde edilen TEÇD değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.73'te gösterilmiştir. Burada verilen R^2 değeri Eşitlik 4.15' teki denklemin başarılı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.73. TEÇD ile dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişki (BÇD)

Düzeltilme katsayıları 3NED için karbonat kökenli kayalarda 0,29, magmatik kökenli kayalarda 0,37 bulunmuştur. Bu durumda ortak düzeltme katsayısı 3NED'nda tüm kayalar için 0,33 (1/3) olarak alınabilir.

Katsayı 3NED formülünde yerine konulursa;

$$\sigma_t = k * \sigma_{3N\text{eğ}} \quad (4.16)$$

$$\sigma_t = k * \frac{3Fl}{2bh^2} = \frac{1}{3} * \frac{3Fl}{2bh^2} = \frac{Fl}{2bh^2} \quad (4.17)$$

Burada σ_t : kayacın TEÇD,

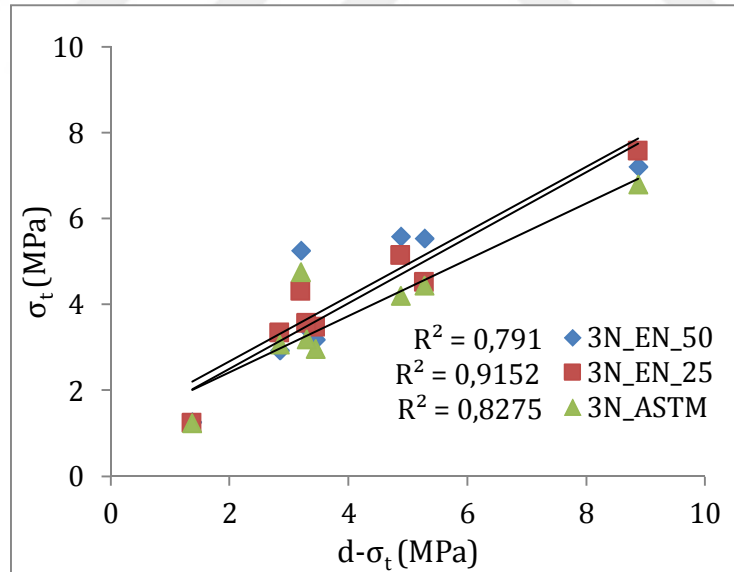
F : 3NED deneyinde yenilme yükü,

l : mesnetler arası açıklık,

b : numunenin eni,

h : numunenin kalınlığıdır.

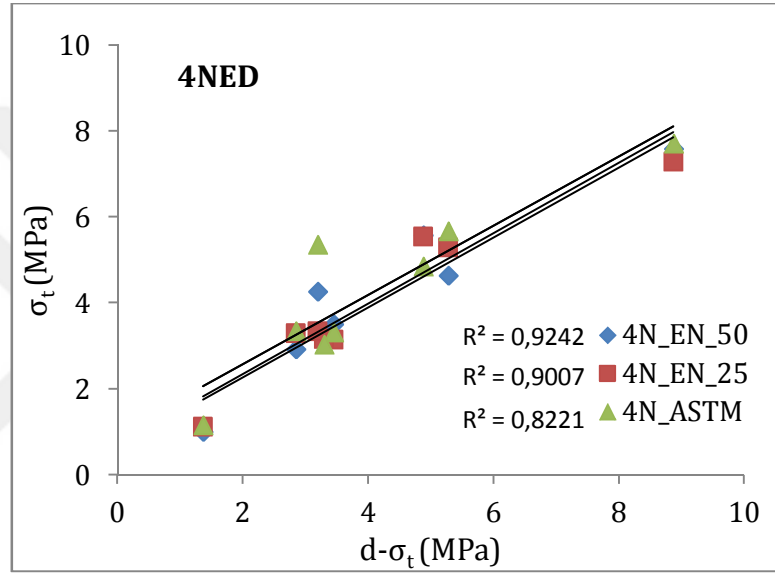
3NED deneylerinden elde edilen sonuçlar Eşitlik 4.17’de verilen düzeltilmiş formülde yerine konulduğunda hesaplanan (d- σ_t) ÇD değerleri ile deneyler sonucu elde edilen TEÇD değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.74’te gösterilmiştir. Şekilde, tez kapsamında incelenen 3 farklı 3NED deneyine ait belirlilik katsayıları (R^2) verilmiştir. Buna göre R^2 değeri en yüksek çıkan yöntem 3N_EN_25 kodlu deneydir.



Şekil 4.74. TEÇD ile dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişki (3NED)

Düzeltilme katsayıları 4NED için karbonat kökenli kayalarda 0,37, magmatik kökenli kayalarda 0,43 bulunmuştur. Bu durumda ortak düzeltme katsayısı 4NED’nda tüm kayalar için 0,40 olarak alınabilir. 4NED deneylerinde dayanımın hesaplandığı formül EN ve ASTM standartlarına göre değişiklik

göstermekte, 3NED deneylerinde olduğu gibi tek bir formülle hesaplanmamaktadır. Bu nedenle dayanımın hesaplandığı formül ile ilgili herhangi bir değişiklik önerilmemiştir. Onun yerine 4NED deneylerinden elde edilen sonuçlar düzeltme katsayısı (0,40) ile çarpılarak ($d-\sigma_t$) ÇD değerleri bulunmuş ve deneyler sonucu elde edilen TEÇD değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.75'te gösterilmiştir. Şekilde, tez kapsamında incelenen 3 farklı 4NED deneyine ait belirlilik katsayıları verilmiştir. Buna göre R^2 değeri en yüksek çıkan yöntem 4N_EN_50 kodlu deneydir.



Şekil 4.75. TEÇD ile dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişki (4NED)

4.12.5. Çoklu doğrusal regresyon analizi

Önceki bölümlerde yapılan istatistiksel analizlerde tek değişkenli regresyon modelleri kullanılmış ve düzeltme katsayıları önerilmiştir. Ancak bu tez kapsamında kayaçların ÇD dışındaki diğer bazı fiziksel ve mekanik özellikleri de belirlenmiştir. Ayrıca TEÇD değerini tahmin edebilmek için yalnızca dolaylı ÇD değerlerinin bilinmesinin yeterli olmadığı durumlar da olabilir. Örneğin bu tez kapsamında incelenen K kodlu kayacın dolaylı ÇD değerleri diğer kireçtaşları ile benzer aralıklarda çıkarken TEÇD oldukça düşük bulunmuştur. Bu nedenle TEÇD'nı daha doğru tahmin edebilecek en uygun dolaylı yöntemi ve modeli bulabilmek amacıyla tez kapsamında deneysel olarak belirlenen tüm fiziksel ve

mekanik özellikleri de içeren ilave bir dizi istatistiksel analiz daha yapılmıştır. Bu amaçla MINITAB 16 paket programı kullanılarak çoklu doğrusal regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizlerinde, değişkenler arasındaki ilişkiyi fonksiyonel olarak açıklamak ve bu ilişkiyi bir modelle tanımlayabilmek amaçlanmıştır. Bir başka ifadeyle her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki kısmi etkisinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Çoklu doğrusal regresyon denklemi k sayıda bağımsız değişken için ana kütleyle ilişkin olarak aşağıdaki şekilde (Eşitlik 4.18) ifade edilmektedir (Montgomery ve Runger, 2013).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (4.18)$$

Burada β_0 : bağımsız değişkenlerin sıfır değerini almaları durumundaki etkiyi,

β_1 : bağımsız değişken (X_1)’deki 1 birimlik değişimin bağımlı değişken üzerindeki kısmi etkisini,

β_2 : bağımsız değişken (X_2)’deki 1 birimlik değişimin bağımlı değişken üzerindeki kısmi etkisini göstermektedir.

Tez kapsamındaki ana hedef kayaçlarda gerçek TEÇD’nı en iyi tahmin eden dolaylı yöntemi ve modeli bulmaktır. Bu nedenle çoklu doğrusal regresyon analizinde bağımlı değişken olarak TEÇD seçilmiştir. Diğer tüm dolaylı yöntemlerden (σ_{tBrez} , σ_{3NED} , σ_{4NED}) ve fiziko-mekanik testlerden (d_0 , Σ_{por} , V_p , $TEBD$, E , E_t , v) elde edilen veriler bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir. Analizlerde 9 kayaca (K kodlu kayaç dahil) ait ortalama değerler kullanılmıştır. Oluşturulan çok değişkenli regresyon modelleri içerisinde belirlilik katsayısı (R^2) en yüksek olan (1’e en yakın) model bulunmaya çalışılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre TEÇD’nı en iyi açıklayan model Eşitlik 4.19’da yer almaktadır. Önceki bölümlerde verilen analizlerde BÇD deneylerinde t/D oranının 0,50 olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Ancak çoklu doğrusal regresyon analizlerine göre, BÇD’nda t/D oranı 1,0 olduğunda ve P-dalga hızı (V_p , **km/s**) değerleri kullanıldığında elde edilen modelin R^2 değeri (R-Sq) %98,7, düzeltilmiş R^2 değeri (R-Sq(adj)) ise %98,2 bulunmuştur. t/D oranı 0,50 olan deneylerin verileri kullanıldığında R^2 değeri %95,1 olarak bulunmaktadır.

P-dalga hızı, kayaçların bünyesinde bulunan boşluk ve kırık-çatlak sistemleri ile ilgili bir özellik olup kayacın kütlesinin bütünü hakkında bilgi edinmemizi sağlayabilmektedir. Bu analizde V_p (km/s) değerlerini içeren bir model önerildiği için K kodlu kayaç da dahil edilmiştir. Çizelge 4.26’da bu analizde kullanılan değişkenlerin değerleri, Çizelge 4.27’de varyans analizi tablosu, Şekil 4.76’da ise doğrusal regresyon analizine ait normal olasılık grafiği yer almaktadır. Bu durumda V_p değeri bilinen ya da ölçülen kayaçlarda BÇD deney sonucu Eşitlik 4.16’daki formülde yerine konularak kayacın TEÇD’na ulaşmak mümkün olacaktır.

Çizelge 4.26. Çoklu doğrusal regresyon analizinde kullanılan veriler (BÇD)

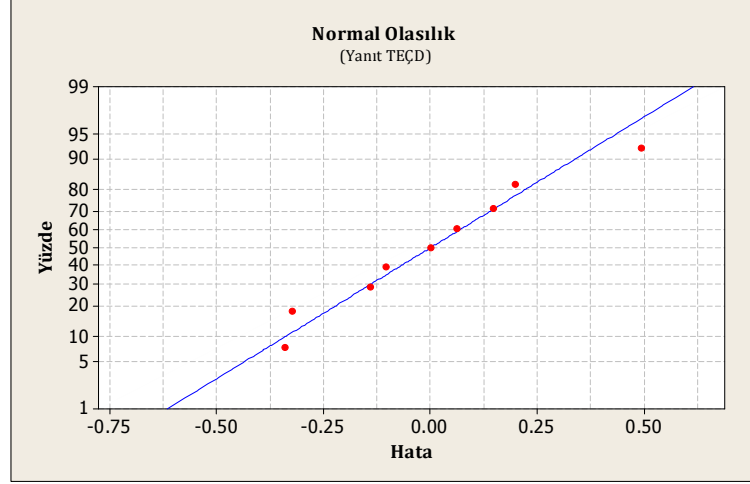
Numune Kodu	TEÇD (MPa)	BÇD (t/D:1,0) (MPa)	V_p (km/s)
K	1,559	6,583	6,361
KK	3,448	5,884	3,924
DK	3,289	8,667	6,261
İNM	3,194	7,085	5,301
İRM	2,845	5,585	4,827
T	1,360	2,073	2,436
A	4,880	9,290	4,935
G	5,271	10,059	5,215
D	8,870	15,312	5,136

$$\sigma_t = 2,10 + 0,705 \sigma_{tBrez} - 0,764 * V_p \quad (4.19)$$

$$S = 0,305439 \quad R-Sq = 98,7\% \quad R-Sq(adj) = 98,2\%$$

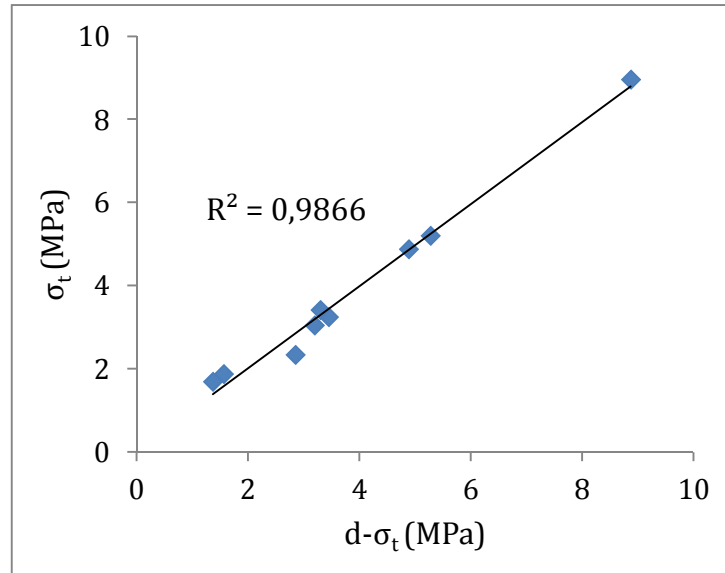
Çizelge 4.27. Varyans analizi tablosu (BÇD)

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F	P
Regresyon	2	41,090	20,545	220,22	0.000
Hata	6	0,560	0,093		
Toplam	8	41,650			



Şekil 4.76. Çoklu doğrusal regresyon modeli için normal olasılık grafiği (BÇD)

Eşitlik 4.19'da verilen formülden hesaplanan dönüştürülmüş TEÇD ($d-\sigma_t$) değerleri ile deneyler sonucu bulunan TEÇD (σ_t) değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.77'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde önerilen modelin (kırık-çatlak sistemleri içeren kayalar da dahil) pratikte kullanabileceği ve BÇD- V_p verilerinin, TEÇD'nı çok yüksek bir belirlilik katsayısı ($R^2=0,99$) ile açıkladığı görülmektedir.



Şekil 4.77. TEÇD ve Dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişkiler (BÇD)

Dolaylı yöntem olarak 3NED deneyi kullanıldığı takdirde çoklu doğrusal regresyon analizlerine göre TEÇD'nı en iyi açıklayan model Eşitlik 4.20'de

verilmiştir. 3N_EN_25 kodlu deneyi ve V_p (km/s) değerini içeren modelin R^2 değeri %92,6, düzeltilmiş R^2 değeri ise %90,2'dir. Çizelge 4.28'de bu analizde kullanılan değişkenlerin değerleri, Çizelge 4.29'da varyans analizi tablosu, Şekil 4.78'de doğrusal regresyon analizine ait normal olasılık grafiği yer almaktadır. Bu durumda V_p değeri bilinen ya da ölçülen kayalarda 3NED deney sonucu aşağıdaki formülde (Eşitlik 4.20) yerine konularak kayacın gerçek çekme dayanıma ulaşmak mümkün olacaktır.

Çizelge 4.28. Çoklu doğrusal regresyon analizinde kullanılan veriler (3NED)

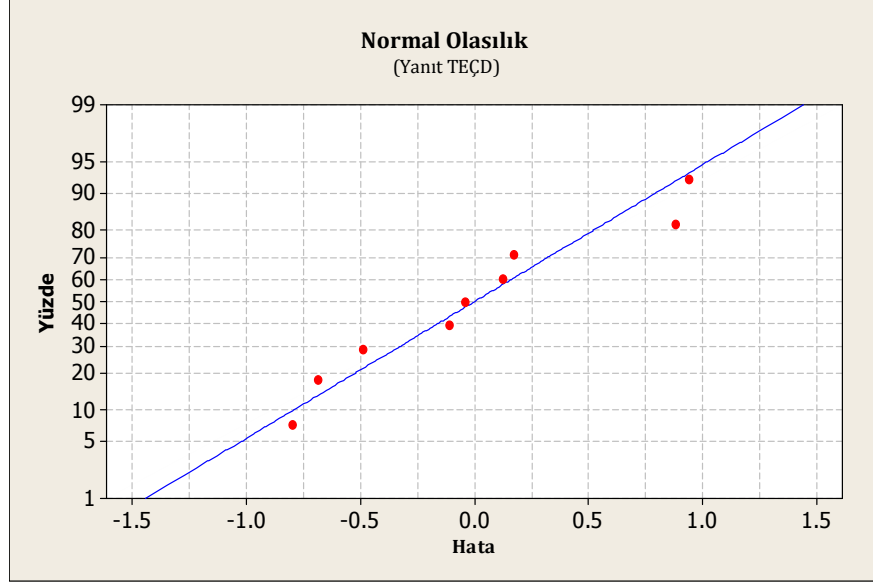
Numune Kodu	TEÇD (MPa)	3N_EN_25 (MPa)	V_p (km/s)
K	1,559	10,490	6,361
KK	3,448	10,402	3,924
DK	3,289	10,714	6,261
İNM	3,194	12,944	5,301
İRM	2,845	10,040	4,827
T	1,360	3,734	2,436
A	4,880	15,421	4,935
G	5,271	13,555	5,215
D	8,870	22,706	5,136

$$\sigma_t = 0,82 + 0,473 \sigma_{3Neğ} - 0,556 * V_p \quad (4.20)$$

$$S = 0,715469 \quad R-Sq = 92,6\% \quad R-Sq(adj) = 90,2\%$$

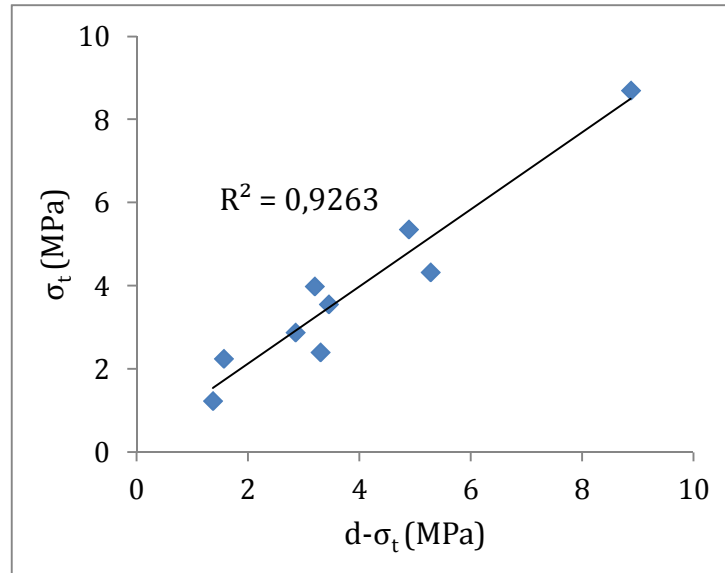
Çizelge 4.29. Varyans analizi tablosu (3NED)

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F	P
Regresyon	2	38,578	19,289	37,68	0,000
Hata	6	3,071	0,512		
Toplam	8	41,650			



Şekil 4.78. Çoklu doğrusal regresyon modeli için normal olasılık grafiği (3NED)

Eşitlik 4.20’de verilen formülden hesaplanan dönüştürülmüş TEÇD ($d-\sigma_t$) değerleri ile deneyler sonucu bulunan TEÇD (σ_t) değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.79’da verilmiştir. Şekil incelendiğinde önerilen modelin (kırık-çatlak sistemleri içeren kayaçlar da dâhil) pratikte kullanabileceği ve 3NED- V_p verilerinin, TEÇD’nı çok yüksek bir belirlilik katsayısı ($R^2=0,93$) ile açıkladığı görülmektedir.



Şekil 4.79. TEÇD ve Dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişkiler (3NED)

Dolaylı yöntem olarak 4NED deneyi kullanıldığı takdirde ise çoklu doğrusal regresyon analizlerine göre TEÇD'nı en iyi açıklayan model Eşitlik 4.21'de verilmiştir. 4N_EN_25 kodlu deneyi ve V_p (km/s) değerini içeren modelin R^2 değeri %92,8, düzeltilmiş R^2 değeri ise %90,4'tür. Çizelge 4.30'da bu analizde kullanılan değişkenlerin değerleri, Çizelge 4.31'de varyans analizi tablosu, Şekil 4.80'de doğrusal regresyon analizine ait normal olasılık grafiği yer almaktadır. Bu durumda V_p değeri bilinen ya da ölçülen kayalarda 4NED deney sonucu aşağıdaki formülde (Eşitlik 4.21) yerine konularak kayacın gerçek çekme dayanıma ulaşmak mümkün olacaktır.

Çizelge 4.30. Çoklu doğrusal regresyon analizinde kullanılan veriler (3NED)

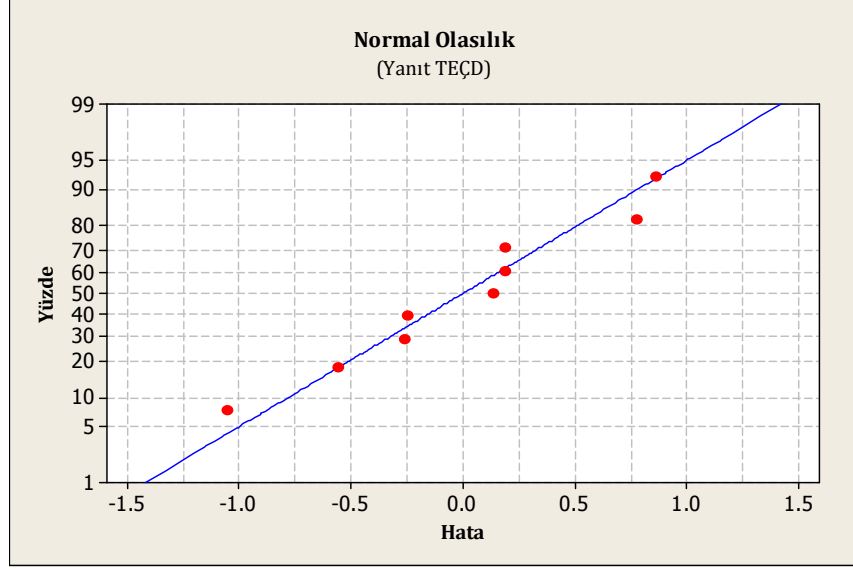
Numune Kodu	TEÇD (MPa)	4N_EN_25 (MPa)	V_p (km/s)
K	1,559	7,342	6,361
KK	3,448	7,849	3,924
DK	3,289	7,880	6,261
İNM	3,194	8,334	5,301
İRM	2,845	8,187	4,827
T	1,360	2,773	2,436
A	4,880	13,821	4,935
G	5,271	13,205	5,215
D	8,870	18,205	5,136

$$\sigma_t = 0,70 + 0,509 \sigma_{4Neğ} - 0,365 * V_p \quad (4.21)$$

$$S = 0,705503 \quad R-Sq = 92,8\% \quad R-Sq(adj) = 90,4\%$$

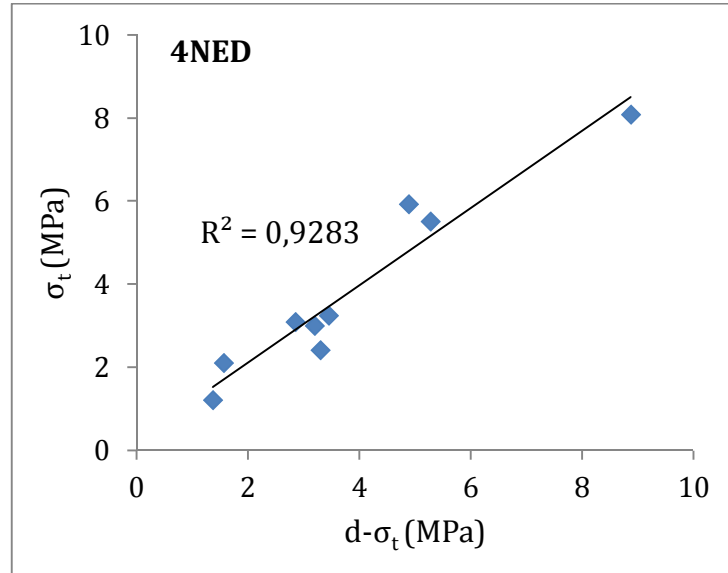
Çizelge 4.31. Varyans analizi tablosu (4NED)

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F	P
Regresyon	2	38,663	19,332	38,84	0,000
Hata	6	2,986	0,498		
Toplam	8	41,650			



Şekil 4.80. Çoklu doğrusal regresyon modeli için normal olasılık grafiği (4NED)

Eşitlik 4.21’de verilen formülden hesaplanan dönüştürülmüş TEÇD ($d-\sigma_t$) değerleri ile deneyler sonucu bulunan TEÇD (σ_t) değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.81’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde önerilen modelde 4NED- V_p verilerinin, TEÇD’nı çok yüksek bir belirlilik katsayısı ($R^2=0,93$) ile açıkladığı görülmektedir.



Şekil 4.81. TEÇD ve Dönüştürülmüş TEÇD arasındaki ilişkiler (4NED)

İstatistiksel analizler bölümünde; elde edilen deneysel verilerin analizi yapılarak en doğru yaklaşım ya da model belirlenmeye çalışılmıştır. İlk olarak aynı tür deneyler için kullanılan farklı standartlarda (ya da numune geometrileri) yapılan deney sonuçlarının arasında fark olup olmadığı incelenmiştir. Daha sonra tek değişkenli doğrusal regresyon analizleri yapılarak dolaylı ÇD sonuçlarından TEÇD'nı tahmin etmeye yarayacak denklemler ve katsayılar bulunmuştur. Elde edilen ÇD değerleri tek yönlü varyans analizi testi ile karşılaştırılarak gruplar arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı %95 güven seviyesinde test edilmiştir. Bunun yanı sıra deney sonuçları ortalamalarının birbirine oranlanması ile ilave düzeltme katsayıları bulunmuş ve ham veriler ile düzeltilmiş değerler arasındaki ilişkiler de incelenmiştir. Son olarak tez çalışmasında yapılan tüm deneyleri içeren çoklu doğrusal regresyon analizleri yapılarak TEÇD'nı tahmin edecek en uygun denklemler elde edilmeye çalışılmıştır. Tüm istatistiksel analizlerde olduğu gibi çoklu regresyon analizlerinde de ham veriler ile düzeltilmiş veriler arasındaki ilişkiler tanımlanmıştır. Bu tez çalışmasının istatistiksel analizler bölümünde önerilen tüm katsayı ve denklemler, yine bu çalışmada incelenen kayaçların özellikleri ile sınırlıdır. Örneğin V_p değerleri bu çalışmada en düşük tuf numunesinde 2,435 km/s olarak bulunmuştur. Bu değerden daha düşük V_p değerleri gösteren kayaçlar için tezde önerilmiş olan katsayı ve eşitliklerin kullanılması doğru bir yaklaşım olmayabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kayaçların çekme dayanımları belirlenirken kullanılan doğrudan yöntemlerde, deney numunesi hazırlanması hem zaman alıcı ve hem de maliyetlidir. Aynı zamanda deneyde başarı oranı oldukça düşüktür. Bunun yanı sıra deney uygulaması bakımından zordur ve hatalı sonuçlar verebilmektedir. Dolaylı yöntemler ise daha basit, ucuz ve uygulanması kolaydır. Bu nedenle de dolaylı yöntemler daha çok tercih edilmektedir. Fakat dolaylı yöntemlerden elde edilen sonuçların TEÇD'nı temsil edip etmediği bilim dünyası tarafından halen tartışılan bir konudur.

Bu tez çalışmasında kayaçların ÇD değerlerinin doğru bir biçimde belirlenebilmesine imkân sağlayacak yeni bir yaklaşımın geliştirilmesi amacıyla bir dizi nümerik, deneysel ve istatistiksel analiz çalışması yürütülmüştür. Bu kapsamda sedimanter (kireçtaşı, killi kireçtaşı (limra), ve dolomitik kireçtaşı), metamorfik (ince ve iri kristalli mermer) ve magmatik (tüf, andezit, granit ve diyabaz) kökenli 9 farklı kayaç türü üzerinde öncelikle temel fiziksel ve mekanik özellikler belirlenmiştir. Kayaçların kimyasal, mineralojik ve petrografik analizleri yapılarak tanımlanmıştır.

Bu çalışmada, dambıl şekilli numunelerde gerilme yığılmalarını azaltmak ve en uygun çekme deney numunesini belirleyebilmek amacıyla 3 farklı numune geometrisi tasarlanmıştır. Tasarımlar yapılırken ilk olarak Brace (1964) tarafından önerilmiş olan numune şekli baz alınmış ve ASTM D 2936 standardında belirtilen koşulların sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca bu farklı tasarımların direk çekme deneylerinde hepsi ile uyumlu ve Tüfekci vd. (2016) tarafından geliştirilen yeni bir çekme aparatı (çene) kullanılmıştır. Tasarımların gerilme analizleri ANSYS R18 paket programı ile yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerine göre en büyük gerilme yığılması nominal gerilmenin 2,84 katı ile tek kademeli numune kesitinde, en düşük gerilme yığılması ise nominal gerilmenin 1,87 katı ile sürekli değişken kesitli numunede meydana gelmiştir. İki kademeli numune kesitinde ise gerilme yığılması nominal gerilmenin 1,93 katı kadar çıkmıştır. Elde edilen nümerik ve deneysel sonuçlara göre en uygun

numune geometrisi **sürekli değişken kesitli** (Model 3) numune olarak belirlenmiştir.

Belirlenen numune geometrisi için ilave gerilme analizleri yapılmış ve numune kesiti boyunca gerilme dağılımının uniform olduğu, Elastisite modülünün değişiminin gerilme dağılımına etkisinin olmadığı, Poisson oranındaki değişimin gerilme dağılımında küçük sapmalara neden olsa da ihmal edilebilecek düzeyde olduğu sonuçlarına varılmıştır. TEÇD deneyinde sürekli değişken kesitli numune geometrisi için Elastisite modülü hesaplanırken kullanılması gereken düzeltme katsayısı **($k=0,8917$) matematiksel olarak belirlenmiştir**. Daha sonra tüm kayaçların TEÇD deneyleri gerçekleştirilmiş ve numunelerin birçoğunda yenilme numune orta bölgesinde meydana gelmiştir. Gerilme yığılmaları çap geçiş bölgesinin dış yüzeyinde yoğunlaşmış olup yatay ekseninde içe doğru gidildiğinde azalmıştır. Bu nedenle numuneler orta bölgelerinden kopmuştur. Ayrıca Tüfekci vd. (2016) tarafından geliştirilmiş olan çene başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Brezilya deneyi için yapılan sonlu elemanlar analizlerine göre numunenin orta kısmında maksimum asal gerilme ile yatay (X) yöndeki çekme gerilmesinin aynı değerleri aldığı, yani analitik hesaplarda olduğu gibi yenilmenin numune merkezinde dikey hat boyunca gerçekleştiği görülmüştür. Elde edilen nümerik analiz sonuçları sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış ve Jianhong vd. (2009) tarafından önerilen denklemlerin dikey eksen boyunca $P/2\pi R t$ eşitliğine dönüştüğü ve tek bir değer aldığı görülmüştür. Disk numunenin kenarlarına yaklaştıkça SEM sonuçlarından uzaklaşıldığı, bunun yanı sıra Hondros (1959) denkleminde SEM sonuçlarına daha yakın değerler hesaplandığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Brezilya deneyinde Elastisite modülü, Poisson oranı ve boy/çap oranı değişiminin gerilme dağılımında dikkate değer farklar oluşturmadığı SEM analizlerinden anlaşılmıştır.

Daha sonra tüm kayaçların 3 farklı boy/çap (0,50; 0,75; 1,0) oranında BÇD deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında yüksek hızlı çekim yapan kamera ile görüntü kayıtları alınmış ve sonrasında görüntüler yavaşlatılarak

çatlak başlangıçları belirlenmiştir. Üretilen yaklaşık 4500 adet fotoğraf karesinin analizi sonucunda **BÇD deneyinde ilk çatlak başlangıcının genellikle numune eksenine boyunca ve numune merkezine yakın bir bölgede gerçekleştiği** deneysel olarak belirlenmiştir. Yu (2005) ve Markides vd. (2010, 2011) tarafından yapılan çalışmaların aksine nümerik analiz çalışmaları ile uyumlu sonuçlar bulunarak literatüre katkıda bulunulmuştur.

Eğilme deneyleri için yapılan nümerik analizlere göre; 4NED deneyinden elde edilen sayısal sonuçlar, 3NED deneyinden elde edilen sayısal sonuçlara göre analitik sonuçlara daha yakın bulunmuştur. 3NED deneyinde maksimum gerilmenin 2 boyutlu düzlemde tek bir nokta şeklinde olduğu, 4NED deneyinde ise 2 kuvvetin etkidiği aralıkta ve bir hat boyunca olduğu görülmüştür. Bu nedenle özellikle süreksizlikler içeren ve heterojen kayalarda **4NED deneyinin uygulanması olası hataların önüne geçilmesini sağlayacaktır.**

Yapılan tüm deneysel sonuçlar incelendiğinde en düşük dayanım değerleri T kodlu numunelerde, en yüksek dayanım değerleri D kodlu numunelerde bulunmuştur. Kireçtaşlarının dayanım değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Bu tez kapsamında doğrudan ve dolaylı tüm ÇD deneyleri aynı cihazda yapılmış, deney numuneleri aynı kaya bloğundan temin edilmiştir. **Buna karşın hiçbir dolaylı ÇD belirleme yönteminin, gerçek ÇD'nı (TEÇD) temsil etmediği deneysel olarak bulunmuştur.** Genel olarak eğilme dayanımı verileri, BÇD ve TEÇD verilerine kıyasla yüksek çıkmıştır. 3NED ise ÇD'nı en yüksek bulan yöntem olarak belirlenmiştir. TEÇD değerleri, diğer tüm yöntemlere göre çok düşük çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar geçmişte yapılan çalışmaların bazıları ile benzerlik göstermiştir.

Tez kapsamında elde edilen tüm verileri içeren istatistiksel analizler yapılmıştır. K kodlu kayaç bünyesinde bulunan kırık-çatlak sistemleri nedeniyle oldukça düşük TEÇD değerleri sergilediği için düzeltme katsayısı önerilmesi çalışmalarına dahil edilememiştir. Diğer kayaçlar kendi içlerinde karbonat kökenli (KK, DK, İNM, İRM) ve magmatik kökenli (T, A, G, D) olmak üzere ikiye

ayrılarak değerlendirilmiştir. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre BÇD deneyinde t/D oranı değişiminin dayanım değeri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Tek değişkenli doğrusal regresyon analizlerinden çıkarılan denklemlerden TEÇD'nın tahmin edilebileceği görülmüştür. Özellikle magmatik kayalarda çok yüksek belirlilik katsayısı elde edilmiştir ($R^2 = 0,99$). Ancak çoklu doğrusal regresyon analizlerine göre en iyi tahmin modeli t/D=1,0 olan deneyde bulunmuştur. P dalga hızını da (km/s) içeren bu model kullanılacak ise boy/çap oranı 1,0 olarak seçilmelidir.

3NED ve 4NED deneylerinde ise numune geometrisinin ve standart farklılığının dayanım değeri üzerinde kısmi bir etkisinin olduğu görülmüştür. İstatistiksel analizlerde 3NED için en yüksek p değerleri 3N_ASTM kodlu deneyde bulunmuştur. Düzeltme katsayılarına göre dönüştürülen verilerin regresyon analizlerine ve çoklu doğrusal regresyon analizlerine göre ise en yüksek R^2 değerleri 3N_EN_25 kodlu deneyde bulunmuştur. Numune hazırlama kolaylığı ve maliyet açısından değerlendirilirse 3NED için en uygun deney yöntemi 3N_EN_25 (25x50x150 mm) kodlu deneydir. 4NED için en yüksek p değerleri 4N_ASTM kodlu deneyde bulunmuştur. Çoklu doğrusal regresyon analizlerine göre ise en yüksek R^2 değerleri yine 4N_EN_25 kodlu deneyde bulunmuştur. Benzer şekilde numune hazırlama kolaylığı ve maliyet açısından değerlendirilirse 4NED için de en uygun deney yöntemi 4N_EN_25 (25x50x150 mm) kodlu deneydir. Ayrıca 25x50x150 mm boyutlarındaki numunenin hacmi, diğer deneylerdekilere kıyasla oldukça küçüktür. Bu sayede süreksizliklerden arındırılmış intakt numune hazırlamak ta nispeten daha kolay olmaktadır.

Hem regresyon analizlerine göre, hem de elde edilen verilerin birbirine oranlanması ile elde edilen düzeltme katsayıları aşağıdaki gibi bulunmuştur;

Karbonat kökenli kayalarda $\sigma_t = 0,47\sigma_{tBrez}$; $\sigma_t = 0,29\sigma_{3Neğ}$; $\sigma_t = 0,37\sigma_{4Neğ}$
Magmatik kökenli kayalarda $\sigma_t = 0,55\sigma_{tBrez}$; $\sigma_t = 0,37\sigma_{3Neğ}$; $\sigma_t = 0,43\sigma_{4Neğ}$
Tüm Kayalarda **$\sigma_t = 0,50\sigma_{tBrez}$; $\sigma_t = 0,33\sigma_{3Neğ}$; $\sigma_t = 0,40\sigma_{4Neğ}$**

Tez kapsamında incelenen kayaçlara ait tüm özellikleri içeren çoklu doğrusal regresyon analizlerine göre TEÇD'nı en iyi açıklayan modeller Eşitlik 4.19, 4.20 ve 4.21'de verilmiştir. V_p değerleri analizlerde kullanıldığı için K kodlu kayaç da dahil edilmiştir. Kayaçların diğer özelliklerinin (E , ν gibi) TEÇD'nı istatistiksel olarak tahmin etmekte etkili olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

$$\sigma_t = 2,10 + 0,705 \sigma_{tBrez} - 0,764 * V_p \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.19)$$

$$\sigma_t = 0,82 + 0,473 \sigma_{3Neğ} - 0,556 * V_p \quad (R^2 = 0,93) \quad (4.20)$$

$$\sigma_t = 0,70 + 0,509 \sigma_{4Neğ} - 0,365 * V_p \quad (R^2 = 0,93) \quad (4.21)$$

Bulunan ampirik eşitlikler V_p (km/s) değerlerini içermesi bakımından özellikle kırık-çatlak sistemleri gelişmiş kayaçlarda da kullanabilir. Bunun dışında, önerilen düzeltme katsayılarının da BÇD ve 3NED formüllerinde yerine konulması uygulamada pratik bir yaklaşım sunacaktır.

Tez kapsamında kullanılan kayaç örnekleri dikkatli bir biçimde seçilmiş ve hazırlanmış olsa da doğası gereği heterojen yapıdadır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında yapay kaya (beton, alçı vb.) örnekleri üzerinde benzer çalışmalar yürütülmelidir. Bu sayede özellikleri bilinen malzemelerde yukarıda önerilen katsayı ve eşitlikler test edilebilir.

Bu tez kapsamında 1500'e yakın numune kullanılmış ve uzun süreli bir deneysel çalışma yürütülmüştür. Ancak buna rağmen nokta yük dayanım indeksi gibi bazı önemli malzeme özellikleri çalışmaya dâhil edilememiştir. Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda bu tez kapsamında incelenemeyen diğer fiziko-mekanik özelliklerin de kullanılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- 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, 29, 777-787.
- Altındag, R., 2002. The Evaluation of Rock Brittleness Concept on Rotary Blast Hole Drills. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 102 (1), 61-66.
- Altındağ, R., 2008. Kazı Mekaniğinde Gevreklik ve Spesifik Enerji Arasındaki İlişkiler. IX. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 30-31 Ekim 2008, İzmir, 437-451.
- 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, 47, 974-982.
- Anderson, R., 2014. Kaya gazı üretimi her ülkede uygulanabilir mi? BBC Türkçe İnternet Sitesi: http://www.bbc.co.uk/turkce/haberler/2014/04/140407_kaya_gazi.shtml adresinden alınmıştır.
- Andreev, G.E., 1991. A Review Of The Brazilian Test For Rock Tensile Strength Determination. Part I: Calculation Formula. Mining Science and Technology, 13 (3), 445-456.
- ASTM C99 / C99M-15, 2015. Standard Test Method for Modulus of Rupture of Dimension Stone, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C880 / C880M-15, 2015. Standard Test Method for Flexural Strength of Dimension Stone, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 2936-08, 2008. Standard Test Method Direct Tensile Strength Of Intact Rock Core Specimens. ASTM International, West Conshohocken, USA.
- ASTM D 3967-08, 2008. Standard Test Method For Splitting Tensile Strength Of Intact Rock Core Specimens. ASTM International, West Conshohocken, USA.
- Aydin, A., Basu, A., 2006. The use of Brazilian Test as a Quantitative Measure of Rock Weathering. Rock Mechanics and Rock Engineering , 39 (1), 77-85.
- Bazant, Z.P., Kazemi, M.T., Hasegawa, T., Mazars, J., 1991. Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests. Measurements and Fracture Analysis. ACI Materials Journal, 88 (3), 325-332.
- Berrenbaum, R., Brodie, I., 1959. Measurement Of The Tensile Strength Of Brittle Materials. British Journal of Applied Physics, 10, 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 Experimental and Theoretical Results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 139-156.
- Brace, W.F., 1964. Brittle Fracture Of Rocks. In: Judd WR (ed) *Proceedings of the International Conference on State of Stress in the Earth's Crust*. Elsevier, New York, 111–174.
- Briševac, Z., Kujundžić, T., Čajić, S., 2015. Current Cognition of Rock Tensile Strength Testing By Brazilian Test. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, 30 (2), 101-114.
- Cacciari, P.P., Futai, M.M., 2018. Assessing the Tensile Strength of Rocks and Geological Discontinuities Via Pull-off Tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 105, 44–52.
- Cai, M., Kaiser, P.K., 2004. Numerical Simulation Of The Brazilian Test And The Tensile Strength Of Anisotropic Rocks And Rocks With Preexisting Cracks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (03), 01-06.
- Carneiro, F.L.L.B., 1943. A New Method To Determine The Tensile Strength Of Concrete. In: Paper presented at the Proceedings of the 5th meeting of the Brazilian Association for Technical Rules (“Associação Brasileira de Normas Técnicas—ABNT”), 3d. Section.
- Chen, R., Stimpson, B., 1993. Interpretation of Indirect Tensile Strength When Moduli Of Deformation in Compression and in Tension are Different. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26 (2), 183-189.
- Chen, C.S., Pan, E., Amadei, B., 1998. Determination of Deformability and Tensile Strength of Anisotropic Rock Using Brazilian Tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35 (1), 43–61.
- Chen, C.S., Hsu, S.C., 2001. Measurement of Indirect Tensile Strength of Anisotropic Rocks by the Ring Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 34 (4), 293-321.
- Chou, Y.C., Chen, C.S., 2008. Determining Elastic Constants of Transversely Isotropic Rocks Using Brazilian Test And Iterative Procedure. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32 (3), 219–234.
- Claesson, J., Bohloli, B., 2002. Brazilian Test: Stress Field And Tensile Strength of Anisotropic Rocks Using an Analytical Solution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39 (8), 991–1004.

- Colback, P. S. B., 1966. An Analysis Of Brittle Fracture Initiation And Propagation in The Brazilian Test. Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, vol. 1, 385–391.
- Coviello, A., Lagioia, R., Nova, R., 2005. On the Measurement of the Tensile Strength of Soft Rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 38 (4), 251-273.
- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. Engineering Classifications and Index Properties of Intact Rock. Technical report no. AFWL-TR 65-116, University of Illinois, p300.
- Diederichs, M.S., 1999. Instability of Hard Rock Masses: The Role of Tensile Damage and Relaxation. Universty of Waterloo, Ph.D. Thesis, 567p, Canada.
- Diederichs, M.S., 2007. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic Interpretation and Practical Application of Damage and Spalling Prediction Criteria for Deep Tunneling. Canadian Geotechnical Journal, 44 (9), 1082-1116.
- Dorogoy, A., Banks-Sills, L., 2005. Effect of Crack Face Contact and Friction on Brazilian Disk Specimens-A Finite Difference Solution. Engineering Fracture Mechanics, 72 (18), 2758–2773.
- Efimov, V.P., 2009. The Rock Strength in Different Tension Conditions. Journal of Mining Science, 45 (6), 569–575.
- Erarslan, N., Williams, D.J., 2011. Investigating the Effect of Cyclic Loading on The Indirect Tensile Strength of Rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 45 (3), 327-340.
- Erarslan, N., Liang, Z.Z., Williams, D.J., 2011. Experimental and Numerical Studies on Determination of Indirect Tensile Strength of Rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 45 (5), 739-751.
- Erarslan, N., Williams, D.J., 2012. Experimental, numerical and Analytical Studies on Tensile Strength of Rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 49, 21-30.
- Erarslan, N., 2017. Experimental and Numerical Studies on Tensile and Shear Fracturing of Brittle Materials . Ç.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32 (2), 173-181.
- Evans, I., 1958. Theoretical Aspects of Coal Ploughing, Mechanical Properties of Non-Metallic Brittle Materials. Butterworths, London, 451–468.

- Exadaktylos, G.E., Kaklis, K.N., 2001. Applications of an Explicit Solution for the Transversely Isotropic Circular Disc Compressed Diametrically. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38 (2), 227-243.
- Fairhurst, C., 1961. Laboratory Measurement of Some Physical Properties of Rock. *Proc. 4th Symp. Rock Mech.*, Univ. Park, Pennsylvania, 105-118.
- Fairhurst, C., 1964. On The Validity of The Brazilian Test for Brittle Materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1, 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*, 37 (1), 1-11.
- Fish, J., Belytschko, T., 2007. *A First Course in Finite Elements*. John Wiley & Sons, Chichester, 336p., England.
- Fuenkajorn, K., Daemen, J.J.K., 1986. Shape Effect on Ring Test Tensile Strength. *Key to Energy Production: Proc. 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics*. University of Alabama, Tuscaloosa, 155-163.
- Fuenkajorn, K., Klanphumeesri, S., 2011. Laboratory Determination of Direct Tensile Strength And Deformability of Intact Rocks. *Geotechnical Testing Journal*, 34 (1), 97-102.
- García, V.J., Márquez, C.O., Zúñiga-Suárez, A.R., Zúñiga-Torres, B.C., Villalta-Granda, L.J., 2017. Brazilian Test of Concrete Specimens Subjected to Different Loading Geometries: Review and New Insights. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11 (2), 343-363.
- Gerçek, H., Özarslan, A., 2011. Kaya Malzemesinin Çekme Dayanımı Sınıflaması. *10. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, 8-9 Aralık, Ankara, 105-116.
- 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*, 36 (1): 37-49.
- Gorski, B., 1993. Tensile Testing Apparatus. *United States Patent*, 5193396.
- Guo, H., Aziz, N.I., Schmidt, L.C., 1993. Rock Fracture-Toughness Determination By The Brazilian Test. *Engineering Geology*, 33 (3), 177-188.
- Güler, M.S., Şen, S., 2015. Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5 (1), 56-66.
- 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*, 41, 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*, 4 (1), 63–77.
- Hawkes, I., Mellor, M., 1970. Uniaxial Testing in Rock Mechanics Laboratories. *Engineering Geology*, 4, 177-285.
- Hobbs, D.W., 1964. The Tensile Strength of Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomech. Abstr.*, 1 (3), 385–396.
- Hobbs, D.W., 1965. An Assessment of a Technique For Determining the Tensile Strength of Rock. *British Journal of Applied Physics*, 16 (2), 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, Geomech. Abstr.*, 4 (1), 115–127.
- Hoek, E., 1964. Fracture Of Anisotropic Rock. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 64 (10), 501–518.
- Hoek, E. 1964. Rock Fracture Around Mining Excavations. *Proc. 4th Int. Conf. on Strata Control and Rock Mech.*, New York.
- Hoek, E., 1966. Rock Mechanics an Introduction for the Practical Engineer Parts I, II and III. *Mining Magazine*, 67p., London.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Emprical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106 (GT9), 1013-1035.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34 (8), 1165-1186.
- Hondros, G., 1959. The Evaluation of Poisson's Ratio and The Modulus Of Materials of a Low Tensile Resistance By The Brazilian (Indirect Tensile) Test With Particular Reference To Concrete. *Australian Journal of Applied Science*, 10 (3), 243–268.
- 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*, 184, 249–258.

- Hucka, V., Das, B., 1974. Brittleness Determination of Rocks by Different Methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomech. Abstr.*, 11 (10), 389-392.
- Hudson, J. A., 1969. Tensile Strength And The Ring Test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 6, 91-97.
- ISRM, 1975. Terminology (English, French, German), ISRM, Lisbon, 83p.
- ISRM Commission on Testing Methods, 1978. Suggest Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomech. Abstr.*, 15, 101-103.
- ISRM, 1981. Rock Characterization Testing and Monitoring. Brown, E., Ed., Pergamon Press, Oxford, 211p.
- ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group Ankara, Turkey, 628p.
- Jaeger, J. C., Hoskins, E. R., 1966. Rock Failure Under The Confined Brazilian Test. *Journal of Geophysical Research*, 71, 2651-2659.
- Jaeger, J.C., 1967. Failure of Rocks Under Tensile Conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomech. Abstr.*, 4 (2), 219-227.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W., 2007. Fundamentals of Rock Mechanics (Fourth Edition). Blackwell Publishing, 475p, USA.
- Jensen, S.S., 2016. Experimental Study of Direct Tensile Strength in Sedimentary Rocks. Norwegian University of Science and Technology, M.Sc. Thesis, 95p, Oslo/Norway.
- 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*, 2: 16.
- Jianhong, Y., 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 & Mining Sciences*, 46, 568-576.
- Jimeno, C.L., Jimeno, E.L., Carcedo, F.J.A., 1995. Drilling and Blasting of rocks. A.A. Balkema Publishers, Brookfield, 390p, Rotterdam.

- 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*, 43, 711-723.
- Karaman, K., Kesimal, A., Ersoy, H., 2014. A Comparative Assessment of Indirect Methods For Estimating The Uniaxial Compressive and Tensile Strength Of Rocks. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 2393–2403.
- Karpuz, C., Hindistan, M.A., 2008. Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, 346s., Ankara.
- Klanphumeesri, S., 2010. Direct Tension Testing Of Rock Specimens. Suranaree University of Technology, Master of Engineering Thesis, 57p, Thailand.
- Komurlu, E., Kesimal, A., 2015. Evaluation of Indirect Tensile Strength of Rocks Using Different Types of Jaws. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 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*, 12 (6), 883-898.
- Krishnayya, A.V.G., Eisenstein, Z. 1974. Brazilian Tensile Test For Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 11 (4), 632-642.
- 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*, 51 (1), 5–21.
- Lajtai, E.Z., 1980. Tensile Strength and Its Anisotropy Measured By Point And Line-Loading Of Sandstone. *Engineering Geology*, 15(3–4), 163–171.
- 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*, 46 (3), 450–461.
- Lavrov, A., Vervoort, A., 2002. Theoretical Treatment of Tangential Loading Effects on the Brazilian Test Stress Distribution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39 (2), 275–283.
- Li, D., Wong, L.N.Y., 2013. The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 269-287.
- 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*, 188, 184-201.

- Liu, G.R., Quek, S.S., 2003. The Finite Element Method: a Practical Course. Butterworth Heinemann, Oxford, 348p., Boston.
- 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*, 34, 69–74.
- Ma, Y., Huang, H., 2018. DEM Analysis of Failure Mechanisms in the Intact Brazilian Test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 102, 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. *Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Procedia Engineering*, 191, 946 – 953.
- Mamurekli, D., Tekin, F., Hafizoğlu, E., 2006. Açık Ocak Madenciliğinde Patlatma. *Soma MYO Teknik Bilimler Dergisi*, 2, 20-32.
- Markides, C.F., Pazis, D.N., Kourkoulis, S.K., 2010. Closed Full-Field Solutions For Stresses And Displacements in the Brazilian Disk Under Distributed Radial Load. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47 (2), 227–237.
- 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*, 44 (1), 113–119.
- Markides, C.F., Kourkoulis, S.K., 2016. The Influence of Jaw's Curvature on the Results of the Brazilian Disc test. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 127-146.
- Mellor, M., Hawkes, I., 1971. Measurement Of Tensile Strength By Diametral Compression of Discs and Annuli. *Engineering Geology*, 5 (3), 173–225.
- Merchant, M.E., 1944. Basic Mechanics of the Metal Cutting Process. *Journal of Applied Mechanics*, 66, 168-175.
- Mishra, D.A., Basu, A., 2012. Use of the Block Punch Test to Predict The Compressive And Tensile Strengths Of Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomech. Abst*, 51, 119-127.
- Minaeian, B., Ahangari, K., 2017. Prediction of The Uniaxial Compressive Strength and Brazilian Tensile Strength of Weak Conglomerate. *International Journal of Geo-Engineering*, (2017), 8-19.
- Montgomery, D.C., Runger, G.C., 2013. Applied Statistics and Probability for Engineers (6th Edition). Wiley, 811p, USA.

- Newman, D.A., Bennett, D.G., 1990. The Effect Of Specimen Size And Stress Rate For The Brazilian Test - A Statistical Analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 23 (2), 123–134.
- Nishimatsu, Y., 1972. The Mechanics of Rock Cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9, 261-270.
- Nott, J.A., 2009. Tensile Strength And Failure Criterion Of Analog Lithophysal Rock. University of Nevada, Ph.D. Thesis, 116p, Las Vegas.
- Obert, L., Windes, S. L., Duvall, W. I., 1946. Standardized Tests For Determining The Physical Properties of Mine Rock. U.S. Bureau of Mines, U.S. Dept. of the Interior, 67p., USA.
- Ocak, İ., 2005. Metro Tünellerinde, Kayaç Özelliklerinin Tasman ve Konverjansa Etkilerinin Araştırılması. *İstanbul Üniversitesi Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, 18 (1), 45-52.
- Ozfirat, M.K., Yenice, H., Simsir, F., Yarali, O., 2016. A New Approach to Rock Brittleness and its Usability at Prediction of Drillability. *Journal of African Earth Sciences*, 119, 94-101.
- Özdoğan, M., 1986. Kayalarda Delme ve Patlatma. *Madencilik Dergisi*, 15, 7-15.
- Pandey, P., Singh, D.P., 1986. Deformation of a Rock in Different Tensile Tests. *Engineering Geology*, 22 (3), 281–292.
- Patel, S., Martin, C.D., 2018. Evaluation of Tensile Young's Modulus and Poisson's Ratio of a Bi-modular Rock from the Displacement Measurements in a Brazilian Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 361–373.
- Perras, M.A., Diederichs, M.S., 2014. A Review of The Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32 (2), 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* 28 (4), 5-12.
- Razavi, S.M.J., Aliha, M.R.M., Berto, F., 2018. Application Of An Average Strain Energy Density Criterion To Obtain The Mixed Mode Fracture Load Of Granite Rock Tested With The Cracked Asymmetric Four-Point Bend Specimens. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 97, 419-425.
- Satoh, Y., 1987. Position And Load of Failure in Brazilian Test; A Numerical Analysis by Griffith Criterion. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 36 (410), 1219–1224.

- Sulukcu, S., Ulusay, R., 2001. Evaluation of the Block Punch Index Test With Particular Reference to The Size Effect, Failure Mechanism And Its Effectiveness in Predicting Rock Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 1091–1111.
- Sundaram, P.N., Corrales, J.M., 1980. Brazilian Tensile Strength Of Rocks With Different Elastic Properties in Tension And Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomech. Abstr.*, 17 (2), 131–133.
- Şengün, N., Altındağ, R., 2010. Kayaçların Kırılma Tokluğu (Mod-I) ile Fiziko-Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkilerinin Değerlendirilmesi. *Yerbilimleri*, 31 (2), 127–140.
- Tang, C.A., Tham, L.G., Wang, S.H., Liu, H., Li, W.H., 2007. A Numerical Study of The Influence of Heterogeneity on The Strength Characterization of Rock Under Uniaxial Tension. *Mechanics of Materials*, 39, 326–339.
- Tavallali, Ai., Vervoort, A., 2010a. Effect Of Layer Orientation On The Failure Of Layered Sandstone Under Brazilian Test Conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (2), 313–322.
- Tavallali, A., Vervoort, A., 2010b. Failure Of Layered Sandstone Under Brazilian Test Conditions: Effect Of Micro-Scale Parameters On Macro-Scale Behaviour. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43 (5), 641–653.
- TS EN 12372, 2007. Doğal taşlar - Deney Metotları - Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 12407, 2013. Doğal taşlar - Deney yöntemleri - Petrografik inceleme. TSE, Ankara.
- TS EN 13161, 2014. Doğal taşlar - Deney Yöntemleri - Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 13755, 2014. Doğal taşlar-Deney yöntemleri - Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 14579, 2006. Doğal taşlar-Deney yöntemleri - Ses Hızı İlerlemesinin Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 15309, 2008. Atıkların ve toprağın nitelendirilmesi - X Işını Floresans Yöntemi Kullanılarak Elementel Bileşimin Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 1926, 2013. Doğal taşlar-Deney yöntemleri-Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 1936, 2010. Doğal taşlar - Deney yöntemleri- Gerçek yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini. TSE, 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 Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future, 29-31 August, Cappadocia/Turkey, 295-300.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Binal, A., 2005. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları:58, 167s, Ankara.
- Ünlü, T., Yılmaz, Ö., 2014. Kaya Malzemelerinin Doğrudan Çekme Dayanımının Belirlenmesi için Geliştirilen Yeni Bir Deney Düzenegi. 11. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 7-9 Mayıs, Afyonkarahisar, 97-106.
- Van der Schrier, J.S., 1988. The Block Punch Index Test. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 38, 121-126.
- Vutukuri, V.S., Lama, R.D., Saluja, S.S., 1974. Handbook on Mechanical Properties Of Rocks. Series On Rock And Soil Mechanics 2(1), Trans Tech Publications, Ohio, USA.
- 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, 94, 65-75.
- Wang, W., Shen, J., 2017. Comparison of Existing Methods and a New Tensile Strength Based Model in Estimating the Hoek-Brown Constant m_i for Intact Rocks. Engineering Geology, 224, 87-96.
- 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, 10 (9), 1324.
- Wang, M., Cao, P., 2018. Experimental Study on the Validity and Rationality of Four Brazilian Disc Tests. Geotechnical Geological Engineering, 36 (1), 63-76.
- Wang, P., Caia, M., Rena, F., 2018. Anisotropy and Directionality of Tensile Behaviours of a Jointed Rock Mass Subjected to Numerical Brazilian Tests. Tunnelling and Underground Space Technology, 73, 139-153.
- 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, 41, 197-211.
- 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, 51, 351-357.

- Xu, G., Chen, F., Xiao, J.Q., 2006. Influence Of Load Contact Condition On Rock Tensile Strength. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(1), 168–173 (in Chinese).
- 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, Geomech Abstr.*, 15 (5), 225–235.
- Yarali, O., Kahraman, S., 2011. The Drillability Assessment of Rocks Using The Different Brittleness Values. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 406-414.
- Yaşar, S., Yılmaz, A.O., Çapık, M., 2013. Kayaçların Mekanik Özellikleri ile Keski Kuvvetleri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi. 3. Uluslararası Ulaşımında Yeraltı Kazıları Sempozyumu, 29-30 Kasım, İstanbul.
- Yaşar, S., Yılmaz, A.O., 2016. Kayaç Kesme Teorilerinin Tarihsel Gelişimi: Kama Uçlu Kesimler. *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 5 (10), 31-41.
- 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*, 46 (3), 568–576.
- Yenice, H., 2002. Bazı Kayaçların Tek Eksenli Basınç Dayanımları ile Diğer Malzeme Özellikleri Arasındaki İlişkiler. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4 (2), 65-71.
- Yenice, H., Ozfirat, M.K., Kahraman, B., Ozdogan, M.V., 2009a. Examination of Drilling Rate Index (DRI) of Rocks. *Proceedings of the 3rd Balkan Mining Congress*, 1-3 October, Izmir.
- Yenice, H., Özfirat, M.K., Karaca, Z., Kahraman, B., 2009b. Investigation of the Parameters Effecting Drilling Rate Index (DRI) of Marbles. 2. Maden Makinaları Sempozyumu, 4-6 Kasım, Zonguldak.
- Yılmaz, Ö., 2013. Galerilerde Patlatma ile Parçalanma Mekanizmasının Sayısal Yöntemle Modellenmesi ve Arazi Uygulamalarıyla İrdelenmesi. *Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 405s, Zonguldak.
- Yu, Y., 2005. Questioning The Validity Of The Brazilian Test For Determining Tensile Strength Of Rocks. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24 (7), 1150–1157, (in Chinese).

- Yu, Y., Meng, C., 2005. 3-D Distribution Of Tensile Stress in Rock Specimens For The Brazilian Test. *Miner. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 12 (6), 495–499.
- 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*, 43 (4), 623–627.
- Yu, Y., Zhang, J., 2009. A Modified Brazilian Disk Tension Test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (2), 421–425.
- Yu, M., Wei, C., Niu, L., Li, S., Yu, Y., 2018. Calculation for Tensile Strength and Fracture Toughness of Granite With Three Kinds of Grain Sizes Using Three-Point-Bending Test. *Plos One*, 13(3), e0180880. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180880>
- Zhang, L., 2005. *Engineering Properties of Rocks*, 1st Edition. Elsevier, 208p, New York.
- Zhang, D., Ranjith, P.G., Perera, M.S.A., 2016. The Brittleness Indices Used in Rock Mechanics And Their Application in Shale Hydraulic Fracturing: A Review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 143, 158-170.
- 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*, 71, 298–308.
- Zhou, T., Zhu, J., 2017. An Experimental Investigation of Tensile Fracturing Behavior of Natural and Artificial Rocks in Static and Dynamic Brazilian Disc Tests. *Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Procedia Engineering*, 191, 992 – 998.
- 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*, 43 (2), 236–252.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tamer EFE
Doğum Yeri ve Yılı : Bergama, 1986
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : tamer.efe@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Bergama Akif Ersezgin Anadolu Lisesi, 2004
Lisans : SDÜ, Müh.-Mim. Fakültesi, Maden Mühendisliği, 2009
Yüksek Lisans : SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği ABD, 2011

Mesleki Deneyim

OKYAP A.Ş.	2009-2009
SDÜ Fen Bil. Ens. Maden Müh. ABD	2009-2015 (Araş. Gör.)
Burdur İl Özel İdaresi	2015-..... (halen)

Yayınları

Efe, T., Sengun, N., Demirdag, S., Tufekci, K., Altindag, R., 2019. The Effect of Sample Dimension on Three and Four Points Bending Tests of fine Crystalline Marble and Its Relationship with Direct Tensile Strength. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 221 (2019), 012093 IOP Publishing doi: 10.1088/1755-1315/221/1/012093.

Demirdag, S., Tufekci, K., Sengun, N., Efe, T., Altindag, R., 2019. Determination of the Direct Tensile Strength of Granite Rock by Using a New Dumbbell Shape and Its Relationship with Brazilian Tensile Strength. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 221 (2019), 012094 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/221/1/012094.

- Demirdağ, S., Sengun, N., Ugur, I., Efe, T., Akbay D., Altındağ R., 2014. Variation of Vertical and Horizontal Drilling Rates Depending On Some Rock Properties in The Marble Quarries. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(2), 269–273.
- Efe, T., Gül, S.S., 2017. Türkiye’de Doğal Taş Sanayinin Coğrafi ve Ekonomik Sürdürülebilirliği. *Akademia Sosyal Bilimler Dergisi*, 1(3), 173-181.
- Demirdağ, S., Efe, T., Şengün, N., Tüfekçi, K., Altındağ, R., 2018. Kayaçların Direkt Çekme Dayanımlarının Belirlenmesinde Kullanılacak En Uygun Dumbel Şekli Numune Geometrisinin Belirlenmesi. XII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 3-5 Ekim 2018, Trabzon/Türkiye, 305-315.
- Efe, T., Akbay, D., Demirdağ, S., Sengun, N., Altındağ, R., Ugur, I., Mutluturk, M., 2014. Investigation of The Cutting Performance of Some Carbonate Rocks with Circular Diamond Sawing Machine. 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS8), 14-16 October 2014, Sapporo/Japan.
- Efe, T., Şengün, N., Demirdağ, S., 2014. Bazı Kayaçlarda Tabakalanma Yönelimine Bağlı Olarak Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Değişimi. XI. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 07-09 Mayıs 2014, Afyonkarahisar, Türkiye, 391-396.
- Efe, T., Akbay, D., Demirdağ, S., Şengün, N., Altındağ, R., Uğur, İ., 2012. Bej Mermerlerde Epoksi Uygulamasının Atmosferik Şartlar Altında Kayacın Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisi. MERSEM’2012 8. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi, 13-15 Aralık 2012, Afyonkarahisar/Türkiye, 463-470.
- Akbay, D., Efe, T., Şengün, N., Demirdağ, S., Altındağ, R., Koçcaz, C.E., 2012. Donma-Çözülme ve Termal Şok Koşullarının Bazı Mermerler Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. MERSEM’2012 8. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi, 13-15 Aralık 2012, Afyonkarahisar/Türkiye, 391-396.