

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**SIKIŞMA VE ÇEKME GERİLMELERİNİN KAYA
MALZEMESİNİN ELASTİSİTE MODÜLÜ VE POISSON
ORANINA ETKİSİ**

Alperen CANPOLAT

Yüksek Lisans Tezi

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Uygulamalı Jeoloji Bilim Dalı

OCAK 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**SIKIŞMA VE ÇEKME GERİLMELERİNİN KAYA MALZEMESİNİN
ELASTİSİTE MODÜLÜ VE POISSON ORANINA ETKİSİ**

Tez Yazarı

Alperen CANPOLAT

Danışman

Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK

OCAK 2022

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Sıkışma ve Çekme Gerilmelerinin Kaya Malzemesinin Elastisite Modülü ve Poisson Oranına Etkisi

Yazarı: Alperen CANPOLAT

İlk Teslim Tarihi: 22.12.2021

Savunma Tarihi: 28.01.2022

TEZ ONAYI

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

İmza

Danışman: Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK Onayladım
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Başkan: Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ Onayladım
Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mesut GÖR Onayladım
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

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

İmza
Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Sıkışma ve Çekme Gerilmelerinin Kaya Malzemesinin Elastisite Modülü ve Poisson Oranına Etkisi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

28.01.2022

Alperen CANPOLAT



ÖNSÖZ

Kaya malzemesinin elastik parametrelerinden önemlileri elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν)'dır ve jeoteknik tasarımın önemli girdi parametreleridir. Bu parametrelerin belirlenmesinde genel olarak kullanılan yöntem, tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi yaparken örnekte meydana gelen enine ve boyuna deformasyonları ölçmek ve bu değerleri kullanarak çizilen gerilme-deformasyon eğrisinin eğiminden E değerini, birim gerilmeye karşılık gelen enine deformasyon (ϵ_e) miktarını boyuna deformasyon (ϵ_b) miktarına oranlayarak da ν değerini hesaplamaktır. Elde edilen bu değerler, kaya malzemesinin sıkışma gerilmesi altındaki parametre değerleridir. Ancak, çekme gerilmesinin etkin olması durumunda, aynı kaya malzemesi için sıkışma gerilmesi altında belirlenen sıkışma elastisite modülü (E_c) ve sıkışma Poisson oranı (ν_c) değerlerinin aynısı elde edilemez. Yani, sıkışma gerilmesi altında belirlenen E_c ve ν_c değerleri, çekme gerilmesi altında belirlenen çekme elastisite modülü (E_t) ve çekme Poisson oranı (ν_t) değerlerinden farklıdır. Tasarım sıkışma gerilmesini içeriyor ise sıkışma gerilmesi altında kolaylıkla belirlenen E_c ve ν_c değerleri güvenle kullanılmaktadır. Ancak, çekme gerilmesinin etkin olduğu durumlarda yapılacak tasarımlarda kullanılacak olan E ve ν değerlerinin çekme gerilmesi altında belirlenmiş olması gereklidir. Aksi durumda yapılan tasarım güvenilir olamaz. Ancak, çekme gerilmesi altında bu değerlerin belirlenmesi oldukça zor olduğundan, tasarımcılar kaya malzemesinin sıkışma gerilmesi altındaki E ve ν değerlerini çekme gerilmesinin etkin olduğu durumlar için de kullanmaktadırlar. Bu şekilde yapılan tasarımların güvenli olmadığı açıktır. Bu nedenle, kaya malzemesinin sıkışma ve çekme gerilmeleri altındaki E ve ν değerlerinin nasıl değiştiğinin belirlenmesi önemlidir. Farklı gerilmeler altındaki E ve ν değerleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi ile ampirik formüller önerilebilir ve tasarımcılar bu ampirik formülleri kullanarak, daha kolay olan sıkışma gerilmesi altındaki E_c ve ν_c değerlerini kullanarak çekme gerilmesi altındaki E_t ve ν_t değerlerini tahmin edebilirler. Böylece, yapılan tasarımlardaki hata payı en aza indirgenmiş, güvenilirlik ise daha artırılmış olacaktır.

Çalışmalarım süresince yardımlarını benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, tezimin her aşamasında bana yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarımın her aşamasında bana yardımcı olan, laboratuvar ve büro çalışmalarında yardımlarından, bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım hocam Sayın Arş. Gör. Dr. Mustafa KANIK'a teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarımın yardımlarından faydalandığım değerli ağabeyim Jeoloji Yüksek Mühendisi Fatih Mehmet DEMİRBAĞ'a ve değerli arkadaşım Jeoloji Mühendisi Güven KIRMIZITARLA'ya teşekkür ederim. Yüksek lisans tezimin tamamlanabilmesine maddi açıdan destek sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP)'ne teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.20.24 protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Alperen CANPOLAT
ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER	xi
KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. GERİLME VE DEFORMASYON	9
4. ELASTİK PARAMETRELER	15
4.1. Elastisite (Young) Modülü (E)	16
4.2. Poisson Oranı (ν)	18
4.3. Kayma (Rijidite) Modülü (G).....	19
4.4. Hacimsel Sıkışma (Bulk) Modülü (K).....	20
5. MATERYAL VE METOT	22
5.1. Örneklerin Derlenmesi ve Hazırlanması.....	22
5.2. Laboratuvar Deneyleri.....	24
5.2.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi ve Elastisite Modülü (E_c) ile Poisson Oranı (ν_c)'nın Belirlenmesi.....	25
5.2.2. Doğrudan Çekme Dayanımı Deneyi ve Elastisite Modülü (E_t) ile Poisson Oranı (ν_t)'nın Belirlenmesi.....	29
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
6.1. A Grubu Örnekler İçin Değerlendirme	35
6.2. B Grubu Örnekler İçin Değerlendirme	37
6.3. C Grubu Örnekler İçin Değerlendirme	40
6.4. D Grubu Örnekler İçin Değerlendirme	43
6.5. Tüm Gruplar için Değerlendirme	45
6.6. Regresyon Analizleri	46
6.6.1. Basit Regresyon Analizleri.....	47
6.6.2. Çoklu Regresyon Analizleri	50
7. SONUÇLAR.....	53
ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Sıkışma ve Çekme Gerilmelerinin Kaya Malzemesinin Elastisite Modülü ve Poisson Oranına Etkisi

Alperen CANPOLAT

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2022, Sayfa: xiii + 59

Elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) jeoteknik tasarımlarda sıklıkla kullanılan kaya malzemesinin en önemli iki elastik parametresidir. Bu parametre değerlerinin güvenilir olması ancak standartlara uygun şekilde belirlenmesi ile mümkündür. Güvenilir olmayan değerler ve yanlış kullanımlar hem tasarımın maliyetini hem de güvenilirliğini etkilemektedir. En yaygın hatalı kullanımlardan birisi çekme elastisite modülü (E_t) ve Poisson oranı (ν_t) yerine daha kolay belirlenebildiği için sıkışma elastisite modülü (E_c) ve Poisson oranı (ν_c)'nın kullanılmasıdır. Ancak, yapılan çalışmalar bu parametreler arasında önemli farkların olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, orta ve düşük dayanımlı kaya malzemesinin E_c ve ν_c parametreleri ile E_t ve ν_t parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla, 4 farklı litolojiye sahip kaya malzemesinden karot örnekler derlenmiş ve bu örneklerde tek eksenli sıkışma ve doğrudan çekme deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sırasında örneklerin boyunda ve eninde meydana gelen deformasyonlar ölçülmüş ve elde edilen değerler kullanılarak örneklerin E_c , ν_c , E_t ve ν_t değerleri belirlenmiştir. Son aşamada ise deneysel çalışmalardan elde edilen değerler istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve bu parametreler arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla basit ve çoklu regresyon analizleri yapılmıştır.

İstatistiksel değerlendirmelere göre kaya malzemesinin E_c değerinin, E_t değerinden %36, ν_c değerinin ise ν_t değerinden %27 daha büyük olduğu belirlenmiştir. Yapılan regresyon analizlerine göre; kaya malzemesinin E_c , ν_c ve tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c)'nın bağımsız değişken olarak kullanıldığı çoklu regresyon analizi en yüksek korelasyon katsayısına (R) sahiptir. Bu çalışma sonucunda kaya malzemesinin E_t ve ν_t değerlerinin tahmin edilebileceği ampirik eşitlikler önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elastisite modülü, Poisson oranı, Sıkışma gerilmesi, Çekme gerilmesi, Kaya malzemesi

ABSTRACT

Effect of Compression and Tensile Stresses on Elasticity Modulus and Poisson's Ratio of Rock Material

Alperen CANPOLAT

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geological Engineering

January 2022, Pages: xiii + 59

Modulus of elasticity (E) and Poisson's ratio (ν) are the two most important elastic parameters of rock material that are frequently used in geotechnical designs. The reliability of these parameter values is only possible if they are determined in accordance with the standards. Unreliable values and wrong uses affect both the cost and reliability of the design. One of the worst uses is the use of compression modulus of elasticity (E_c) and Poisson's ratio (ν_c) as they can be determined more easily instead of the tensile modulus of elasticity (E_t) and Poisson's ratio (ν_t). However, studies show that there are important differences between these parameters.

In this study, the relationships between E_c and ν_c parameters and E_t and ν_t parameters of medium and low strength rock material were investigated. For this purpose, core samples were collected from 4 different lithologies, and uniaxial compression and direct tensile tests were performed on these samples. During these experiments, the axial and lateral deformations in the samples were measured and the E_c , ν_c , E_t and ν_t values of the samples were determined using the obtained deformation values. In the last stage, the obtained values from experiments studies were evaluated statistically, simple and multiple regression analyzes were performed to determine the relationships between these parameters.

According to the statistical evaluations, it was determined that the E_c value of the rock material was 36% higher than the E_t value, and the ν_c value was 27% higher than the ν_t value. According to the regression analysis; Multiple regression analyzes using the rock material E_c , ν_c and uniaxial compressive strength (σ_c) as independent variables have the biggest correlation coefficient (R). As a result of this study, empirical equations were suggested to predict the E_t and ν_t values of the medium and weak strength rock materials.

Keywords: Modulus of elasticity, Poisson's ratio, Compressive stress, Tensile stress, Rock material

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Birim alana etkiyen kuvvetin şematik gösterimi.....	9
Şekil 3.2. Sıkışma gerilmesinin şematik gösterimi	10
Şekil 3.3. Çekme gerilmesinin şematik gösterimi	10
Şekil 3.4. Kayma gerilmesinin şematik gösterimi.....	11
Şekil 3.5. Burulma gerilmesinin şematik gösterimi	11
Şekil 3.6. Eğilme gerilmesinin şematik gösterimi.....	12
Şekil 3.7. x ve y boyutundaki normal ve makaslama birim deformasyonlar	13
Şekil 3.8. x, y ve z boyutundaki normal ve makaslama birim deformasyonlar.....	14
Şekil 4.1. Kaya malzemesinde σ - ε ilişkisi ve E'nin belirlenmesi	17
Şekil 4.2. Kaya malzemelerinde σ - ε ilişkisi.....	17
Şekil 4.3. σ - ε eğrisine göre tanjant (a), ortalama (b) ve sekant (c) elastisite modüllerinin belirlenmesi	18
Şekil 4.4. σ - ε eğrilerinden statik ortalama v'nün belirlenmesi	19
Şekil 4.5. Kayma gerilmeleri altındaki şekil değişikliği	20
Şekil 5.1. Tüfit (a) ve killi kireçtaşı (b) örneklerinin derlendiği karot sandıkları	22
Şekil 5.2. Karot örneklerinin kesimi	24
Şekil 5.3. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinin yapılışı ve deformasyonların ölçümü	26
Şekil 5.4. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sırasında meydana gelen boyuna ve enine deformasyonların şematik gösterimi.....	26
Şekil 5.5. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinde $\sigma - \varepsilon_b$ ve ε_e grafikleri.....	27
Şekil 5.6. Örneklerle deformasyon ölçerlerin yapıştırılması.....	28
Şekil 5.7. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sırasında boyuna ve enine deformasyonların ölçümü ..	28
Şekil 5.8. Doğrudan çekme deneyi yöntemleri (a) Hoek, (b) Brace, (c) ISRM ve ASTM, (d) Gorski ve Klanphumesri.....	29
Şekil 5.9. Doğrudan çekme dayanımı deneyinin yapılışı ve deformasyonların ölçümü	30
Şekil 5.10. Doğrudan çekme dayanımı deneyi sırasında meydana gelen boyuna ve enine deformasyonların şematik gösterimi.....	31
Şekil 5.11. Doğrudan çekme dayanımı deneyinde $\sigma - \varepsilon_b$ ve ε_e grafikleri.....	32
Şekil 5.12. Çelik başlıkların yapıştırıldığı örneklerin vakumlu ortamda bekletilmesi	33
Şekil 5.13. Örneklerle deformasyon ölçerlerin yapıştırılması.....	33
Şekil 5.14. Doğrudan çekme dayanımı deneyi sırasında boyuna ve enine deformasyonların ölçümü.....	34
Şekil 6.1. A-1 numaralı örneklerle ait σ - ε grafikleri.....	36
Şekil 6.2. A-2 numaralı örneklerle ait σ - ε grafikleri.....	36

Şekil 6.3.	A-3 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	37
Şekil 6.4.	B-1 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	38
Şekil 6.5.	B-2 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	38
Şekil 6.6.	B-3 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	39
Şekil 6.7.	B-4 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	39
Şekil 6.8.	B-5 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	40
Şekil 6.9.	C-1 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	41
Şekil 6.10.	C-2 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	42
Şekil 6.11.	C-3 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	42
Şekil 6.12.	D-1 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	43
Şekil 6.13.	D-2 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	44
Şekil 6.14.	D-3 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	44
Şekil 6.15.	D-4 numaralı örneklere ait σ - ε grafikleri	45
Şekil 6.16.	E_t ve E_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği	47
Şekil 6.17.	E_t ve v_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği	48
Şekil 6.18.	E_t ve σ_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği	48
Şekil 6.19.	v_t ve E_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği	48
Şekil 6.20.	v_t ve v_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği	49
Şekil 6.21.	v_t ve σ_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği	49

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Laboratuvar çalışmaları için derlenen örneklere ait bilgiler	23
Tablo 5.2. Tek eksenli sıkışma ve doğrudan çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan örnek sayıları ...	24
Tablo 5.3. Her grup için geçerli deney sayıları	34
Tablo 6.1. A grubu örneklere ait deney sonuçları ve sonuçların istatistiksel değerlendirmesi	35
Tablo 6.2. B grubu örneklere ait deney sonuçları ve sonuçların istatistiksel değerlendirmesi	37
Tablo 6.3. C grubu örneklere ait deney sonuçları ve sonuçların istatistiksel değerlendirmesi	41
Tablo 6.4. D grubu örneklere ait deney sonuçları ve sonuçların istatistiksel değerlendirmesi	43
Tablo 6.5. Tüm deney sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesi	46
Tablo 6.6. Parametre çiftlerine ait eşitlikler, R değerleri ve ilişkilerin kuvvet dereceleri	49
Tablo 6.7. E_t , E_c ve v_c parametreleri kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizine ait çıktılar	50
Tablo 6.8. E_t , E_c , v_c ve σ_c parametreleri kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizine ait çıktılar	50
Tablo 6.9. v_t , E_c ve v_c parametreleri kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizine ait çıktılar	51
Tablo 6.10. v_t , E_c , v_c ve σ_c parametreleri kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizine ait çıktılar	51

SİMGELER

a	: Regresyon sabiti
A	: Yüzey alanı
b	: Regresyon katsayısı
δ_h	: h boyutundaki birim değişim miktarı
δ_u	: u boyutundaki birim değişim miktarı
δ_x	: x boyutundaki birim değişim miktarı
δ_v	: v boyutundaki birim değişim miktarı
δ_y	: y boyutundaki birim değişim miktarı
δ_w	: w boyutundaki birim değişim miktarı
δ_z	: z boyutundaki birim değişim miktarı
ΔV	: Malzemenin hacminde meydana gelen azalma
$\Delta \varepsilon_b$	: Birim gerilmeye karşılık gelen boyuna birim deformasyon
$\Delta \varepsilon_e$	: Birim gerilmeye karşılık gelen enine birim deformasyon
$\Delta \sigma$	: Gerilme artışı
E	: Elastisite modülü
$E_{average}$	: Ortalama elastisite modülü
E_c	: Sıkışma elastisite modülü
E_m	: Deformasyon modülü
E_{sekant}	: Sekant (Kiriş) elastisite modülü
E_t	: Çekme elastisite modülü
$E_{tangent}$	: Tanjant elastisite modülü
ε	: Deformasyon
ε_x	: x boyutundaki normal birim deformasyon
ε_y	: y boyutundaki normal birim deformasyon
ε_z	: z boyutundaki normal birim deformasyon
F	: Yenilme anındaki kuvvet
γ	: Meydana gelen açısal değişim
γ_{xy}	: xy boyutlarındaki makaslama birim deformasyon
γ_{yz}	: yz boyutlarındaki makaslama birim deformasyon
γ_{zx}	: zx boyutlarındaki makaslama birim deformasyon
J_o	: Cismin kutupsal atalet momenti
J_x	: x eksenine göre atalet momenti
k	: Malzeme sabiti
M_x	: Eğilme momenti
M_z	: Momentin şiddeti
ν	: Poisson oranı
ν_c	: Sıkışma Poisson oranı
ν_t	: Çekme Poisson oranı
r	: İncelenen diferansiyel alanın burulma ekseninden olan uzaklığı
R	: Korelasyon katsayısı
σ	: Normal gerilme
σ_c	: Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı
$\sigma_{eğilme}$	: Eğilme gerilmesi

σ_t	: Kaya malzemesinin çekme dayanımı
T	: Kayma kuvveti
τ	: Kayma gerilmesi
τ_{Burulma}	: Burulma gerilmesi
V	: Malzemenin son hacmi
V_0	: Malzemenin ilk hacmi
V_p	: P dalga hızı
V_s	: S dalga hızı
X	: Bağımsız değişken
x	: Esneme miktarı
y	: İncelenen diferansiyel alanın tarafsız eksene olan uzaklığı
Y	: Bağımlı değişken



KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
BS	: British Standard
FDM	: Sonlu farklar yöntemi
ISRM	: International Society for Rock Mechanics
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
G	: Rijidite modülü
K	: Kompresibilite modülü



1. GİRİŞ

Elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) kaya malzemesinin en önemli iki elastik parametresidir ve bu parametreler baraj, tünel, köprü gibi birçok mühendislik projelerinde, şev tasarımı, kazılabilirlik, patlatma tasarımı gibi çalışmalarda ana girdi parametreleri olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca, kaya kütlelerinin karakterize edilmesinde süreksizliklerin mühendislik özellikleri ile birlikte kaya malzemesinin mekanik ve elastik özellikleri birlikte kullanılırlar. Bu elastik özelliklerden en önemlileri olan E ve ν , son yıllarda jeoteknik tasarımların ayrılmaz bir parçası haline gelen sayısal analizlerin de en önemli girdi parametreleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Jeoteknik çalışmalarda oldukça sık olarak kullanılan bu parametrelerin sağlıklı bir şekilde belirlenmesi yapılacak olan mühendislik tasarımının hem güvenilir, hem de ekonomik olmasını sağlayacaktır.

Gerilme altında kalan kaya malzemesi, etkin olan bu gerilmenin sonucunda deformasyona uğrar ve meydana gelen bu deformasyon sonucunda şekil, bazen de hem şekil hem de hacim değişimleri oluşur. Kaya malzemesinde meydana gelen bu deformasyonları kontrol eden en önemli parametreler E ve ν 'dür. Günümüzde, bu parametrelerin belirlenmesine yönelik olarak TSE (Türk Standartları Enstitüsü), BS (British Standard), ASTM (American Society for Testing and Materials), ISRM (International Society for Rock Mechanics) gibi ulusal ve uluslararası kurum veya topluluklar tarafından önerilmiş birçok standart ve yöntem mevcuttur. Araştırmacılar, bu standartları veya yöntemleri kullanarak kaya malzemesinin E ve ν değerlerini laboratuvarlarda belirleyebilmektedirler. Laboratuvar ortamında kaya karotları üzerine etkiyen gerilmeler sonucunda, örneğin boyunda ve eninde meydana gelen deformasyonlar ölçülmekte, daha sonra elde edilen veriler kullanılarak gerilme (σ) - deformasyon (ϵ) grafikleri yardımıyla kaya malzemesinin E ve ν değerleri hesaplanmaktadır. Bu parametrelerin belirlenmesinde genellikle kullanılan yöntem, kaya malzemesinde tek eksenli sıkışma deneyi yaparken örnekte meydana gelen enine ve boyuna deformasyonları ölçmek ve bu değerleri kullanarak çizilen σ - ϵ eğrisinin eğiminden E değerini, birim gerilmeye karşılık gelen yanal deformasyon miktarını boyuna deformasyon miktarına oranlayarak ν değerini hesaplamaktır. Elde edilen bu değerler, kaya malzemesinin sıkışma gerilmesi altındaki parametre değerleridir. Gerilme türünün çekme gerilmesi olması durumunda, yapılacak çekme deneyleri sonucunda elde edilen çekme elastisite modülü (E_t) ve Poisson oranı (ν_t) değerleri, sıkışma elastisite modülü (E_c) ve Poisson oranı (ν_c) değerlerinden farklılık sunmaktadır. Bu farklılık konusunda yapılmış fazla çalışma olmaması nedeniyle tasarımcılar proje özelliklerine bakmaksızın E_c ve ν_c değerlerini kullanılmaktadırlar. Ancak, güvenilir bir tasarım yapabilmek için çekme gerilmesinin etkin olduğu tasarımlarda E ve ν değerlerinin çekme gerilmesi altında belirlenmiş olan değerler olması gereklidir.

Bu nedenle, kaya malzemesinin E_c ve v_c değerleri ile E_t ve v_t değerlerinin araştırılması ve bu parametreler arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılması önem taşımaktadır.

Literatürde kaya malzemesinin E_c ve v_c değerlerinin araştırıldığı ve diğer jeomekanik özellikleri ile bu değerler arasındaki ilişkilerin incelendiği birçok çalışma [1-27] mevcut olmasına karşın, kaya malzemesinin E_t ve v_t değerlerinin araştırıldığı, sıkışma ve çekme altında bu değerlerin nasıl değiştiği konusunda yapılmış olan çalışma [28] yok denecek kadar azdır.

Bu çalışmada, literatürde mevcut olan bu eksikliği az da olsa giderebilmek amacıyla, farklı litolojilere ve düşük dayanıma sahip kaya malzemesinin sıkışma ve çekme gerilmeleri altındaki E ve v değerleri incelenmiş ve bu değerler arasında herhangi bir ilişkinin var olup olmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, 4 farklı litolojide (tüfit, killi kireçtaşı, marn ve andezit) rnekler derlenmiş, bu örneklerde sıkışma ve çekme gerilmeleri altında boyuna ve enine deformasyonlar ölçülmüş, bu değerler yardımıyla σ – ϵ grafikleri çizilerek örneklerin sıkışma ve çekme gerilmeleri altındaki E ve v değerleri belirlenerek bu değerler arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kaya malzemesinin deformasyon özellikleri, bu özellikleri kontrol eden E ve v parametreleri ve kayanın diğer jeomekanik özellikleri ile bu parametreler arasındaki ilişkilerin incelendiği çalışmalar literatür taraması yapılarak belirlenmiş ve bu çalışmalara ait amaç ve sonuçlar aşağıda kısaca verilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, araştırmaların daha çok kaya malzemesinin sıkışma gerilmesi altında belirlenen E ve v değerleri ile bu değerlerin diğer jeomekanik özellikler kullanılarak tahmin edilmesine yönelik olduğu görülmektedir. Diğer önemli bir amaç ise statik ve dinamik E ve v değerleri arasındaki ilişkilerin araştırıldığı çalışmalardır. Bu çalışmanın ana konusu olan, kaya malzemesinin sıkışma ve çekme gerilmeleri altındaki E ve v değerleri arasındaki ilişkilerin incelendiği çalışmalar ise oldukça sınırlıdır.

Clark [29] kaya malzemesinin E değerinin dinamik ve statik olarak belirlenmesi hakkında yaptığı çalışmada, dinamik E 'nin statik olandan daha büyük olduğunu, bunun nedeninin örneğin çok kısa süreli gerilme ve düşük stres seviyesinde tamamen elastik davranması olduğunu belirtmektedir.

Deere ve Miller [1] tarafından yapılmış olan bu çalışma, kaya malzemesinin E 'si ile diğer fiziko-mekanik özellikler arasındaki ilişkilerin ortaya konulduğu ilk çalışmalardan birisi olması bakımından dikkat çekicidir. Araştırmacılar, kaya malzemesinin E 'si, Schmidt sertliği ve yoğunluğu arasındaki ilişkileri kullanarak, bu üç parametre arasındaki ilişkileri ifade eden bir korelasyon kartı önermişlerdir.

Eissa ve Kazi [2] kaya malzemesinin statik ve dinamik yöntemler ile belirlenen E değerlerini karşılaştırdıkları çalışmadan elde ettikleri sonuçlar, statik yöntemlerle hesaplanan E 'nin homojen malzemeler için geçerli olduğundan dolayı, dinamik yöntemlerle hesaplanan E 'den farklı olduğunu göstermiştir.

Sachpazis [3] karbonatlı kayaçların sıkışma dayanımı, Young Modülü ve Schmidt sertliği arasındaki ilişkileri incelemiş ve bu parametrelerin tahmin edilmesinde kullanılabilecek basit ampirik eşitlikler önermiştir.

Arioğlu ve Tokgöz [30] tortul kayaçlarda E ile basınç dayanımı arasındaki ilişkileri basit regresyon analizleri ile incelemişlerdir.

Christaras vd. [5] yaptıkları çalışmada, kaya malzemesinin dinamik ve statik yöntemler kullanılarak belirlenen E ve v değerlerini karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre dinamik ve statik olarak belirlenen E ve v arasında anlamlı bir korelasyonun olduğunu, tahribatsız yöntem olarak adlandırdıkları dinamik yöntemler kullanılarak da bu parametrelerin belirlenebileceğini ifade ederek ampirik eşitlikler önermişlerdir.

Chen vd. [7] çalışmalarında çoğu kayanın çekme ve sıkışma gerilmeleri altındaki elastik modüllerinin farklı olduğunu, bu nedenle, izotropi varsayımı altında Brazilian çekme dayanımı

için önerilen eşitliklerin anlamlı olmadığını belirtmektedirler. Araştırmacılar, kayadaki gerilme dağılımlarını ölçmek için disk şeklindeki düz kaya örnekleri ve diskin merkezine yapıştırılmış gerilme ölçerler ile Brazilian deneyleri yapmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda, örnekte oluşan hem çekme hem de sıkışma gerilmeleri nedeniyle meydana gelen deformasyon değerlerini kullanarak hem sıkışma hem de çekme durumundaki elastik modüllerin hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Araştırmacılar örneğin merkezindeki asal gerilme, asal deformasyon ve sıkışma modülünün çekme modülüne oranı arasındaki ilişkileri kullanarak çekme ve sıkışma modülleri (E ve ν değerleri) ile doğrudan çekme dayanımının tahmin edilebildiği yeni eşitlikler önermişlerdir.

Palchik [8] kırılğan ve poroziteli kumtaşlarında porozite, E ve tane boyunun etkisini incelediği araştırmasında, istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler veren analizlere göre porozite oranının artması ile birlikte tek eksenli sıkışma dayanımının ve E 'nin azaldığını ifade etmektedir.

Kumar vd. [10] izotropik özellikteki malzemelerde kayma dalga (V_p) hızı ile ν arasındaki ilişkileri incelemişler ve artan ultrasonik hız ile ν 'nün düştüğünü, tane boyu, sıcaklık ve mikro yapının bu durumu etkilediğini ve kayma dalgası hızının boyuna dalga hızına göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Al-Shayea [11] kireçtaşlarının E ve ν değerlerini hem statik hem de dinamik yöntemlerle belirlediği çalışmasında, farklı gerilme seviyelerinde küçük boşaltma-yükleme döngüleri yaparak elde ettiği değerleri analiz ederek stres-deformasyon seviyesinin sekant ve tanjant modülleri üzerindeki etkisinin yanı sıra ν üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Araştırmacı, elde ettiği sonuçları literatürde kireçtaşları için mevcut olan benzer sonuçlarla karşılaştırmış ve hem kohezyonlu hem de kohezyonlu olmayan malzemeler için kullanılabilecek ampirik eşitlikler önermiştir.

Ciccotti ve Mulargia [12] İtalya Apenin'lerindeki tipik sismojenik kaya olan Calcare Massiccio çamurtaşı-kireçtaşının statik ve dinamik elastik modüllerini, standart bir tek eksenli statik sıkıştırma deneyi, salınım testi ve elastik dalga hızlarının ölçümünü kullanarak belirlemişlerdir. Bu deneyler sonucunda, E (75 +/- 7 GPa) ve ν (0.28 +/- 0.02) sağlayan, önemli bir frekans bağımlılığı ve belirgin bir deformasyon genliği bağımlılığının gözlemlenmediğini belirtmişlerdir.

Sönmez vd. [13] Ankara aglomeralarından derledikleri kaya malzeme örnekleri üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı, E ve birim hacim ağırlık deneyleri yapmışlar ve deneylerden elde ettikleri verileri regresyon analizleri ve bulanık mantık yöntemleri ile değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları değerlendirmeler sonucunda, kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı ile birim ağırlığını kullanarak E 'yi tahmin etmede kullanılabilecek ampirik bir eşitlik üretmişlerdir.

Sönmez vd. [15] tarafından yapılan çalışmada, literatürde daha önce farklı litolojiye sahip kaya malzemelerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilere ek olarak grovak ve

aglomera litolojisine sahip karot örneklerde tek eksenli sıkışma dayanımı, birim ağırlık ve E deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar bu verileri yapay sinir ağıları yöntemi ile değerlendirerek kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımından ve birim ağırlığından, E'nin tahmin edilebileceği bir abak önermişlerdir.

Garagon [17] laminalı kumtaşlarında gerçekleştirdiği çalışmada, kumtaşlarının deformasyon ve dayanım anizotropisini incelemiştir. Araştırmacı, yaptığı çalışmadan elde ettiği değerleri basit ve çoklu regresyon modelleri ile analiz etmiş ve tek eksenli sıkışma dayanımının tahmininde kullanılabilecek olan ve anizotropiyi dikkate alan ampirik eşitlikler önermiştir.

Gerçek [18] yapılan çalışmalarda v'nün kayanın diğer mekanik özelliklerine göre daha az dikkate alınmasına karşılık, bu parametrenin çok farklı alanlarda bilinmesine ihtiyaç duyulduğunu belirterek, v'nün kaya mekaniğindeki değerlerini ve uygulamalarını inceleyen bir çalışma yapmıştır. Araştırmacı bu çalışmada, v konusunda yapılan çalışmaların tarihsel özetini gözden geçirmiş ve malzemelerin, bozulmamış kaya malzemesinin, kaya kütlelerinin elastik deformasyonunda v'nün etkilerini incelemiştir. Ayrıca, bazı element, malzeme ve mineraller için v'nün rapor edilen değerlerini derlemiş ve bazı kayaçlar ile daneli zeminler için tipik değer aralıkları vermiştir. Araştırmacı son olarak, izotropik taze kaya malzemeleri için v'yü dikkate alan sınıflamalar önermiştir.

Ocak [19, 31] yaptığı çalışmalarda, İstanbul'daki metro kazıları kapsamında yapılan sondajlardan alınan 9 farklı litolojiye sahip kaya malzemesi örneklerinde E ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirmiştir. Elde ettiği verileri basit regresyon analizleri ile değerlendiren araştırmacı, litolojik bazda ve formasyon bazında olmak üzere, kayanın E'sinin tek eksenli sıkışma dayanımından ve birim ağırlıktan tahmin edilebileceği ampirik eşitlikler önermiştir.

Zhang vd. [20] kumtaşlarından derlenen kaya malzemesi örneklerinin üç eksenli sıkışma gerilmesi altındaki deformasyonunu incelemişlerdir. Araştırmacılar, deneylerden elde ettikleri sonuçlara göre, yanıl basıncın artmasıyla hem E'nin hem de v'nün arttığını, elde edilen verilerin sabit çevre basıncı ile yapılan geleneksel deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, E'nin sabit çevre basıncının değerinden daha yüksek iken, artan yanıl basınç koşullarında v'nün azaldığını ifade etmişlerdir.

Jianhong vd. [21] bir kayanın çekme E'sinin homojen olmama ve mikro çatlaklar nedeniyle sıkışma E'sinden farklı olduğunu, ancak bunu belirlemek için doğrudan çekme deneyleri dışında herhangi bir yöntem bulunmadığını, gerilme konsantrasyonları ve deneyin zorluğu nedeniyle, kaya malzemeleri için doğrudan çekme testinin gerçekleştirilmesinin zor olduğunu ifade etmektedirler. Araştırmacılar kaya malzemelerinin çekme E'sini kolay ve rahat bir şekilde belirlemek için geliştirdikleri yeni yöntemde, bir Brazilian diskinin iki yan yüzünün orta kısmına, çekme deformasyonlarını kaydetmek için hat yüküne dik yön boyunca iki deformasyon ölçer

yapıştırılmışlar ve uygulanan kuvveti kaydetmek için bir kuvvet sensörü kullanmışlardır. Daha sonra, çekme E'yi hesaplayabilmek için deney verilerini kullanarak elde ettikleri σ - ϵ eğrisinden Hoek yasasını dikkate alarak eşitlikler üretmişlerdir. Araştırmacılar, mermer, kumtaşı, kireçtaşı ve granit için yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, çekme E değerinin sıkışma E değerinden küçük olduğunu ve oranların genellikle 0.6 ile 0.9 arasında olduğunu ifade etmişlerdir.

Atıcı ve Yünsel [22] yaptıkları çalışmada, yurt içi ve yurtdışından çeşitli bölgelerden derledikleri 11 farklı türdeki kuru ve doymuş granitik kaya örneklerinde ultrasonik dalga hızları (V_p ve V_s), yoğunluk, ağırlıkça ve hacimce su emme, Schmidt sertliği ve porozite gibi fiziksel özellikler ile birlikte örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımlarını, statik ve dinamik E değerleri ile ν değerlerini belirlemişlerdir. Deneysel çalışmalardan elde ettikleri verileri basit regresyon analizleri ile değerlendiren araştırmacılar, kuru örneklerin dinamik ve statik E'leri arasında anlamlı bir ilişkinin bulunmadığını, suya doymuş örneklerde ise statik ve dinamik E'ler arasında oldukça kuvvetli bir korelasyon olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, bu çalışmada hem kuru hem de suya doymuş örneklerin statik ve dinamik ν 'leri arasında herhangi bir ilişkinin söz konusu olmadığı sonucuna varmışlardır.

Fuenkajorn ve Klanphumeesri [28] tarafından yapılmış olan çalışma, kaya malzemesinin sıkışma ve çekme gerilmeleri altındaki deformasyonlarının incelendiği önemli çalışmalardan birisidir. Araştırmacılar, kumtaşı, kireçtaşı ve mermerlerden derledikleri kaya örneklerinden hazırladıkları dog-bone (kemik şekilli) örneklerde sıkışma, doğrudan ve dolaylı çekme deneyleri yaparak, hem doğrudan çekme ile dolaylı çekme dayanımları arasındaki ilişkileri, hem de sıkışma ve doğrudan çekme gerilmeleri altında bu örneklerde meydana gelen deformasyonları incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde ettikleri verileri Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) ile değerlendiren araştırmacılar, Brazilian ve halka (disk) deneylerinden elde edilen çekme dayanımı değerlerinin doğrudan çekme deneyi ile elde edilenden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, sıkışma ve çekme altında kaya örneklerinin E ve ν değerlerini inceleyen araştırmacılar, bu değerlerin çekme gerilmesi altında sıkışmaya göre önemli ölçüde düşük olduğunu, bu konuda Gerçek [18] tarafından yapılan varsayımlara katıldıklarını belirtmişlerdir. Araştırmanın sonuçlarına göre, zayıf çimentolu ve poroziteli kumtaşlarında E_t değerinin E_c 'nin yaklaşık %40'ı kadar olduğu görülmüştür. Yoğun ve iyi çimentolanmış kireçtaşlarında ise bu değer %70-80'dir. Doğrudan çekme gerilmesi altındaki ν_t 'nin yalnızca eksenel çekme gerilmesinin daha büyük olmasından değil aynı zamanda enine çekme gerilmelerinin sıkışma altındaki gerilmelere oranla daha küçük olması nedeniyle sıkışma gerilmesi altındaki ν_c 'den daha düşüktür. Araştırmacılar, bu durumu kaya matrisindeki gözeneklerin muhtemelen çekme gerilmesi altında, sıkışma gerilmesi altında olduğundan daha kolay genişlemektedir şeklinde açıklamışlardır.

Martinez-Martinez vd. [23] çalışmalarında homojen kireçtaşlarından bol stilolit, damar ve çatlaklara sahip kayalara kadar değişen özellikteki hem tuz kristalizasyonu hem de termal ayrışmaya maruz bırakılan kaya örneklerinin dinamik ve statik E değerlerini incelemişlerdir. Hem taze hem de bozunmamış örneklerde yapılan deneyler sonucunda statik ve dinamik modüller arasındaki ilişkinin zayıf olduğunu belirten araştırmacılar, statik E'nin doğru bir tahminini sağlamak için hem dinamik E hem de V_p 'yi kullanan yeni bir ampirik eşitlik önermişlerdir.

Brotons vd. [24] San Julian (İspanya) tarihi yapısının inşasında kullanılan tortul kayanın statik ve dinamik E'leri arasındaki ilişkileri incelemek için yaptıkları çalışmada, 24 örnek farklı ayrışma seviyeleri üretmek için farklı sıcaklıklarda ısıtma işlemlerine tabi tutulmuştur. Her bir örneğin statik ve dinamik E değerleri ISRM standardı ve ultrasonik testler vasıtasıyla belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, araştırmacılar tarafından bu tortul kaya için statik ve dinamik E'ler arasındaki ilişkiyi ifade eden iki analitik formül önerilmiştir.

Fei vd. [25] çalışmalarında aynı kayanın dinamik ve statik elastik parametrelerinde farklılıklar olduğunu ifade etmişlerdir. Dinamik ve statik elastik parametreler arasındaki dönüşüm fonksiyonlarını elde etmek için deneyler yapmışlardır. Deney sonuçları statik elastik parametrelerin (statik E ve statik v), dinamik elastik parametrelerden (dinamik E ve dinamik v) farklı olduğunu göstermiştir. Bu fenomenin mekanizması üzerinde analizler yapan araştırmacılar, farklı sıcaklık veya basınç altında dinamik ve statik elastik parametreler arasındaki dönüşüm fonksiyonları elde etmişlerdir.

Akkaya vd. [26] yaptıkları çalışmada ultrasonik hız yöntemi ile belirlenen V_p ve V_s değerlerini kullanarak, farklı mineraloji ve dokuya sahip sedimanter, magmatik ve volkanik kayalardan oluşan 25 adet kaya malzemesi örneği üzerinde dinamik v değerlerini hesaplamışlardır. Araştırmacılar v 'nün 0.18 ile 0.33 arasında değiştiğini, boşluk ve yapısı farklı fakat kimyasal bileşimi birbirine yakın olan traverten ve kireçtaşı örneklerinde v değerlerinin genelde 0.25'ten büyük olduğunu, bu değerın kalsit minerali için literatürde verilen v değerine yakın olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, ultrasonik hız yöntemine göre belirlenen dinamik v ile kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri arasında herhangi bir ilişkinin var olmadığını, en anlamlı ilişkinin ise dinamik v ile malzemenin mineral özelliğini belirleyen CaO oranı arasında olduğunu ifade etmişlerdir.

Kayabaşı [27] yaptığı çalışmada kaya malzemesinin E'si ile kaya kütlelerinin deformasyon modülü (E_m) arasındaki ilişkileri incelemiştir. Araştırmacı, plaka yükleme deneylerinden belirlenen yerinde deformasyon modülleri ile yerinde deneylerin yapıldığı litolojilerden alınan kaya örneklerinin statik E değerlerini karşılaştırdığı çalışmada, bu değerler arasındaki ortalama modül oranını 0.55 olarak belirlemiş ve statik E'nin daima yerinde deformasyon modülünden büyük olduğunu ifade etmiştir.

Demirbağ [32] ise zayıf kaya malzemesinin doğrudan ve Brazilian çekme dayanımları arasındaki ilişkileri incelediği tez çalışmasında, Brazilian çekme dayanımı değerlerini kullanarak kaya malzemesinin doğrudan çekme dayanımını tahmin etmede kullanılabilir ampirik eşitlikler önermiştir.

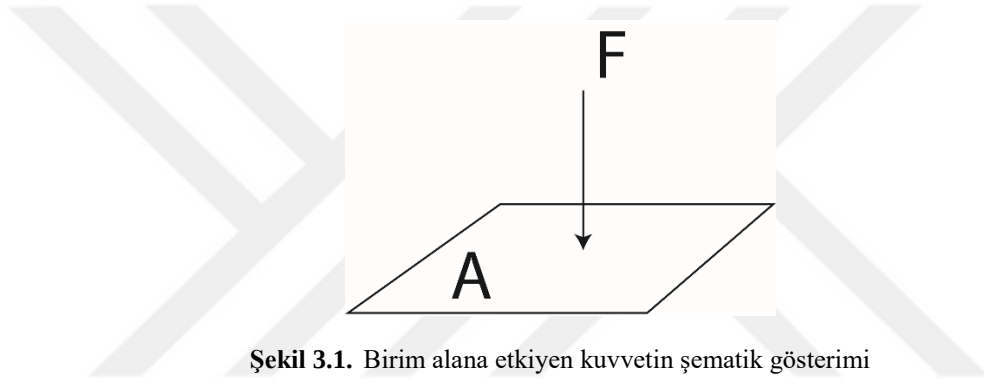


3. GERİLME VE DEFORMASYON

Kaya mekaniği prensiplerini ve uygulamalarının alt yapısını oluşturan gerilme, en basit şekilde birim alana etkiyen kuvvetin (Şekil 3.1) şiddeti olarak tanımlanmaktadır [33]. Bu alan, bir yapının sınırlarını oluşturan dış yüzey, fay, eklem gibi süreksizlik yüzeyleri, ya da farazi bir içsel yüzey olabilir ve gerilme aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

Gerilmenin simgesi σ , birimi ise kgf/cm^2 , N/mm^2 , kN/m^2 'dir. Etkidiği yüzey dikkate alındığında normal bileşen (σ_N) ve teğetsel bileşen (τ_N) olarak iki bileşene ayrılmaktadır.

$$\sigma = \frac{dF \text{ (kuvvet)}}{dA \text{ (Alan)}} \quad (3.1)$$

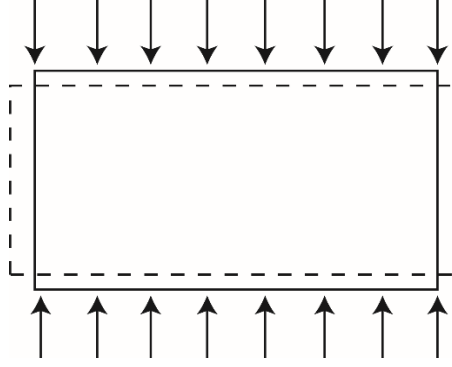


Şekil 3.1. Birim alana etkiyen kuvvetin şematik gösterimi

Etkiyen kuvvet ile kuvvetin etkiği yüzey dikkate alındığında, gerilmenin 4 farklı türü mevcuttur. Bunlar;

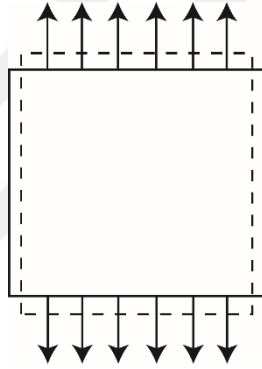
1. Normal gerilme
2. Kayma (Makaslama) gerilmesi
3. Burulma gerilmesi
4. Eğilme gerilmesidir.

Normal Gerilme: Herhangi bir düzleme dik olarak etkiyen, normal kuvvetin birim alana düşen şiddeti olarak tanımlanan normal gerilme, sıkışma ve çekme gerilmesi olmak üzere iki tipe ayrılmaktadır. Eğer kuvvet, aynı doğrultuda, zıt yönlü ve birbirlerine doğru ise bu durumda oluşan gerilme cisme sıkıştırıcı yönde etki etmektedir ve sıkışma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Sıkışma gerilmesi, kaya mekaniğinde pozitif (+) olarak alınır ve etkiği doğrultuda kayanın boyunda kısalmaya, eninde ise genişlemeye neden olur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Sıkışma gerilmesinin şematik gösterimi

Aynı doğrultuda, zıt yönlü ve birbirlerinden uzaklaşan kuvvetlerin oluşturduğu gerilme çekme gerilmesi olarak adlandırılır (Şekil 3.3). Bu gerilmeler kaya mekaniğinde negatif (-) olarak alınır ve etkidiği doğrultuda boy uzamasına neden olur.



Şekil 3.3. Çekme gerilmesinin şematik gösterimi

Kayma (Makaslama) Gerilmesi: Cismin yüzeyine paralel yönde etkiyen, doğrultuları aynı, yönleri zıt kuvvet çiftlerinin oluşturduğu gerilmelerdir (Şekil 3.4) ve kayada şekil değişikliğine neden olurlar. Kayma gerilmesi τ simgesi ile gösterilir ve Eşitlik 3.2 ile hesaplanır.

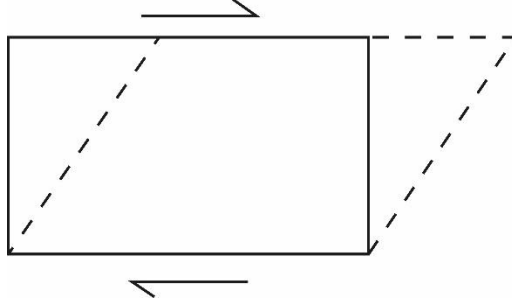
$$\tau = \frac{T}{A} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte;

τ : Kayma gerilmesi (MPa)

T : Kayma(teğetsel) kuvveti (N)

A : Alandır (mm²).



Şekil 3.4. Kayma gerilmesinin şematik gösterimi

Burulma Gerilmesi: Bir cisme farklı iki noktadan cisimde dönme oluşturacak şekilde etki eden teğetsel gerilmelerdir (Şekil 3.5) Bu gerilme τ_{burulma} simgesi ile ifade edilir ve Eşitlik 3.3 ile hesaplanır.

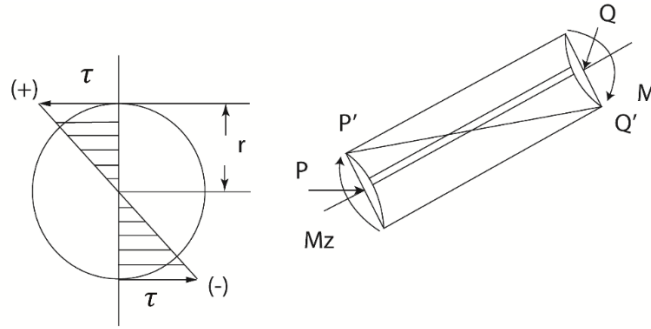
$$\tau_{\text{burulma}} = \frac{M_z}{J_o} r \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte;

M_z : Momentin şiddeti

J_o : Cismin kutupsal atalet momenti

r : İncelenen diferansiyel alanın burulma ekseninden olan uzaklığıdır.



Şekil 3.5. Burulma gerilmesinin şematik gösterimi

Eğilme Gerilmesi: Cisme iki ucundan etkiyen ve aynı eğilme düzlemi içerisinde bulunan M_x kuvvet çiftinin oluşturduğu, eğilme düzlemi içinde yer alan tarafsız eksene dik çekme ve sıkışma gerilmeleridir (Şekil 3.6). Bu gerilme türünün simgesi $\sigma_{\text{eğilme}}$ 'dir ve Eşitlik 3.4 ile hesaplanır.

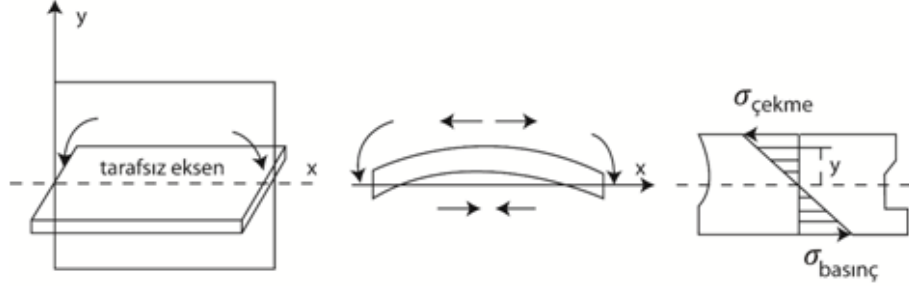
$$\sigma_{\text{eğilme}} = \frac{M_x}{J_x} y \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte;

M_x : Eğilme momenti

J_x : x eksenine göre atalet momenti

y : İncelenen diferansiyel alanın tarafsız eksene olan uzaklığıdır.



Şekil 3.6. Eğilme gerilmesinin şematik gösterimi

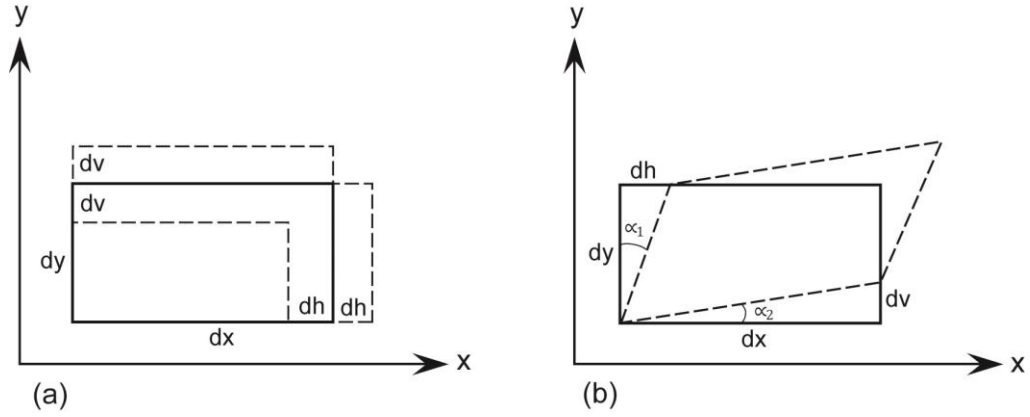
Kuvvet altındaki bir cismin içindeki noktaların göreceli veya mutlak yer değiştirmesi sonucunda cisimde meydana gelen şekil ve boyut değişiklikleri olarak tanımlanan deformasyon [34], boyutsuzdur ve ε simgesi ile gösterilir. Kaya mekaniği hesaplamalarında kolaylık sağlaması açısından birim deformasyon cinsinden ifade edilir. İki tip birim deformasyon vardır. Bunlar;

1. İki boyutlu (x ve y) normal ve makaslama birim deformasyon
2. Üç boyutlu (x, y ve z) normal ve makaslama birim deformasyondur.

İki boyutlu normal birim deformasyon: Normal kuvvetlere maruz kalan bir cisimde x ve y yönlerinde meydana gelen ve sadece boyut değişiminin söz konusu olduğu deformasyondur. Cismin şeklinde bir yönde meydana gelen uzama veya kısalmanın cismin o yöndeki ilk boyutuna oranı olarak tanımlanır (Şekil 3.7a). x ve y boyutlarında meydana gelen normal birim deformasyonlar Eşitlik 3.5 ve 3.6 ile ifade edilir.

$$\varepsilon_x = \frac{\delta_h}{\delta_x} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\delta_v}{\delta_y} \quad (3.6)$$



Şekil 3.7. x ve y boyutundaki normal ve makaslama birim deformasyonlar

İki boyuttaki makaslama birim deformasyon: Makaslama kuvvetlerine maruz kalan cisimde açısal değişikliğe bağlı olarak meydana gelen şekil değişimi olarak tanımlanır. Bu deformasyon, x ve y düzlemlerindeki açısal değişimin toplamına eşittir (Şekil 3.7b). Cisimde x ve y boyutlarında meydana gelen makaslama deformasyonları ise aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilir.

$$\tan_{\alpha_1} = \frac{\delta_h}{\delta_y} \quad (3.7)$$

$$\tan_{\alpha_2} = \frac{\delta_v}{\delta_x} \quad (3.8)$$

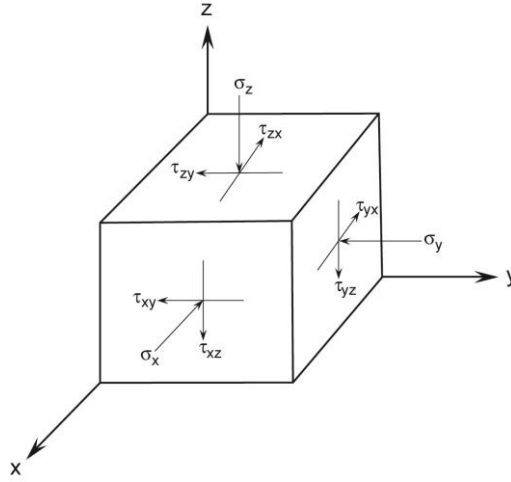
$$\gamma_{xy} = \frac{\delta_h}{\delta_x} + \frac{\delta_v}{\delta_y} \quad (3.9)$$

Üç boyutlu normal ve makaslama birim deformasyon: Üç boyutlu gerilme ortamında bulunan bir cisimde meydana gelen normal ve makaslama birim deformasyonları ifade eder. Bu birim deformasyon x, y ve z koordinatları esas alınarak Şekil 3.8'deki gibi gösterilebilir. x, y ve z boyutlarında meydana gelen normal birim deformasyonlar Eşitlik 3.10, 3.11 ve 3.12, makaslama birim deformasyonlar ise Eşitlik 3.13, 3.14 ve 3.15 ile ifade edilir.

$$\epsilon_x = \frac{\delta_u}{\delta_x} \quad (3.10)$$

$$\epsilon_y = \frac{\delta_v}{\delta_y} \quad (3.11)$$

$$\epsilon_z = \frac{\delta_w}{\delta_z} \quad (3.12)$$



Şekil 3.8. x, y ve z boyutundaki normal ve makaslama birim deformasyonlar

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta_u}{\delta_y} + \frac{\delta_v}{\delta_x} \quad (3.13)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\delta_v}{\delta_z} + \frac{\delta_w}{\delta_y} \quad (3.14)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\delta_w}{\delta_x} + \frac{\delta_u}{\delta_z} \quad (3.15)$$

Bu eşitliklerdeki;

ϵ_x : x boyutundaki normal birim deformasyon

ϵ_y : y boyutundaki normal birim deformasyon

ϵ_z : z boyutundaki normal birim deformasyon

γ_{xy} : xy boyutlarındaki makaslama birim deformasyon

γ_{yz} : yz boyutlarındaki makaslama birim deformasyon

γ_{zx} : zx boyutlarındaki makaslama birim deformasyon

δ_h : h boyutundaki birim değişim miktarı

δ_x : x boyutundaki birim değişim miktarı

δ_v : v boyutundaki birim değişim miktarı

δ_y : y boyutundaki birim değişim miktarı

δ_u : u boyutundaki birim değişim miktarı

δ_z : z boyutundaki birim değişim miktarı

δ_w : w boyutundaki birim değişim miktarıdır.

4. ELASTİK PARAMETRELER

Farklı gerilme koşulları altında cisimler esas olarak üç farklı davranış biçimi gösterirler. Bunlar, elastik davranış, plastik davranış ve viskoz davranıştır. Ayrıca, elasto-plastik, elastiko-viskoz ve visko-plastik olmak üzere üç geçiş davranış tipi de vardır [35]. Elastik davranışta belli bir gerilme değerine kadar oluşan deformasyonlar, yükün kaldırılması ile ortadan kalkıyor ise bu davranış türüne elastik davranış, bu tür cisimlere ise elastik cisimler adı verilir. Ancak, cisme etkiyen gerilme sonucunda cisimde kalıcı deformasyon oluşuyor ise bu davranış türüne plastik davranış, bu cisimlere de plastik cisim adı verilmektedir. Viskoz davranış, elastik ve plastik davranıştan farklı olarak, cisme herhangi bir gerilme etkisinin söz konusu olmadığı, cismin kendi ağırlığı altında deformasyona uğradığı davranış tipidir ve bu tür malzemeler viskoz malzemeler olarak adlandırılırlar.

Özellikle taze kaya malzemelerinin büyük çoğunluğu, belli bir gerilme değerine kadar elastik davranabilmekte ve kayada çok küçük değerlerde elastik deformasyonlar oluşmaktadır. Bu tür kaya malzemesine ait σ - ϵ diyagramının başlangıç kısmı olan elastik bölgede σ ile ϵ arasında doğru orantıyla açıklanabilen bir ilişki vardır. Bu ilişki İngiliz matematikçi Robert Hooke (1653-1703) tarafından ortaya konmuştur ve Hooke Yasası olarak bilinmektedir. Bu yasaya göre mükemmel elastik bir cisimde deformasyon gerilmenin lineer bir fonksiyonudur. Hooke, yayların davranışı üzerine yaptığı deneylerde, bir ucunu tavana astığı farklı uzunluktaki yayların diğer uçlarına aynı ağırlığa sahip yükler asarak, yaylardaki esneme miktarlarını ölçmüş ve deneyler sonucunda oluşan esneme miktarlarını yayların ilk uzunlukları ile oranlandığında, bütün yayların aynı oranda esnediğini belirlemiştir. Yayın ucuna asılan yük ile uygulanan kuvvet F , oluşan esneme miktarı da x ile gösterilirse, yay denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$F = k * x \quad (4.1)$$

Bu denklemdeki k sabiti, yayın kalınlığı ve yayın yapıldığı malzeme gibi değişkenlere bağlı olarak değişiklik gösteren ve uygulanan kuvvet ile oluşan esneme miktarı arasındaki orantı sabitini temsil etmektedir. Robert Hooke tarafından çelik yaylar üzerinde yapılan bu deney silindirik şekilli bir malzeme üzerinde yapıldığı zaman, malzemenin altına asılan ağırlık malzemenin yüzey alanı üzerine etki edeceği için, malzemede oluşacak esneme, kuvvet olarak değil, gerilme olarak değerlendirilebilir. Elastik malzemelerde, gerilim ve deformasyon arasındaki ilişkinin doğrusallığını gösteren bu eşitliğe *Hooke Yasası* adı verilmektedir.

Bir kaya malzemesi üzerine etkiyen kuvvet sonucunda malzeme içinde dış kuvvetlere karşı koyan iç kuvvetler oluşur ve bunlar gerilmeler olarak adlandırılır ve bu iç kuvvetler deformasyonlara yani malzemenin şekil ve boyutunda değişime neden olur.

Gerilmeler sonucunda elastik cisimlerde meydana gelen bu deformasyonları kontrol eden parametreler elastik parametreler olarak bilinir. Bu parametreler;

1. Elastisite (Young) Modülü (E)
2. Poisson Oranı (ν)
3. Kayma (Rijidite) Modülü (G)
4. Hacimsel Sıkışma (Kompresibilite) Modülü (K)'dür.

4.1. Elastisite (Young) Modülü (E)

Elastisite modülü, malzeme konusunda yapılan çalışmalarda ve mühendislik tasarımlarında en önemli girdi parametrelerinden birisi olup, malzemenin şekil değiştirmeye karşı koyabilme kapasitesi yani rijitliğinin bir ölçütüdür ve E simgesi ile ifade edilmektedir. Robert Hooke tarafından ortaya konan ve mükemmel elastik malzemeler için Eşitlik 4.1 ile ifade edilen Hooke Yasası'ndaki k sabiti, Thomas Young (1773-1829) isimli bilim insanının bu konuda yaptığı çalışmalar sonucunda Elastisite veya Young Modülü olarak tanımlanmıştır.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.2)$$

Bu eşitlikte;

σ : Malzemeye etki eden gerilme

E : Malzeme sabiti

ε : Malzemenin boyunda meydana gelen deformasyondur.

Mükemmel elastik malzemeler yüke hemen deforme olarak cevap verir ve yük kalktığında ise tekrar eski şeklini alır. Oluşan deformasyon gerilmeyle doğru orantılıdır ve Hooke Yasası'na göre bu tür malzemelerde gerilme ile birim deformasyon arasındaki ilişki sabittir. Lineer olarak bu orantı elastisite modülü olarak isimlendirilir ve E ile gösterilir. Bir kaya malzemesinin E'si tek eksenli sıkışma deneyi ve çekme deneyi ile belirlenebilir. Deney sırasında uygulanan gerilme ve meydana gelen deformasyon miktarları dikkate alınarak çizilen σ - ε grafiği, kayadaki gerilme-deformasyon ilişkisini gösterir ve bu grafikteki gerilme ile deformasyonu ifade eden eğrinin tanjant cinsinden değeri kaya malzemesinin E değeridir (Şekil 4.1). Bu değer aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

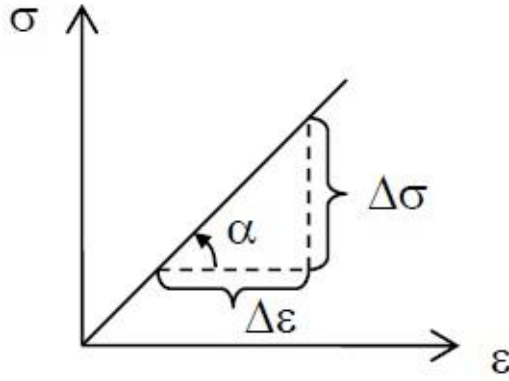
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \tan\alpha \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte;

E : Elastisite modülü

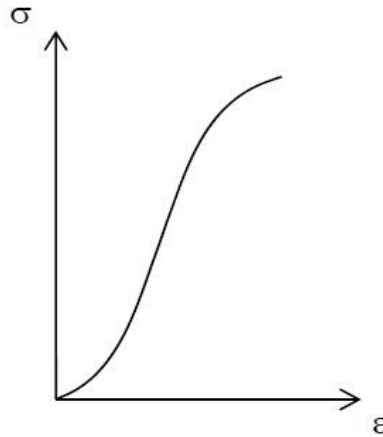
σ : Normal gerilme

ε : Boyda meydana gelen deformasyondur.



Şekil 4.1. Kaya malzemesinde σ - ϵ ilişkisi ve E 'nin belirlenmesi

Bir malzemenin E değeri arttıkça belirli bir gerilme etkisiyle malzemede oluşan deformasyon azalacaktır. Buna göre, E değeri yüksek olan malzemeler göreceli olarak daha dayanımlıdır. Mükemmel elastik malzemelerde sıkışma ve çekme gerilmeleri altındaki E değerleri aynıdır. Ancak, çok sert, yoğun, kristalize ve boşluksuz magmatik ve metamorfik kaya malzemeleri bazen mükemmel elastik davranış gösterebilmektedir. Kaya malzemelerinde σ - ϵ ilişkisini gösteren eğri genellikle Şekil 4.2'deki gibidir.

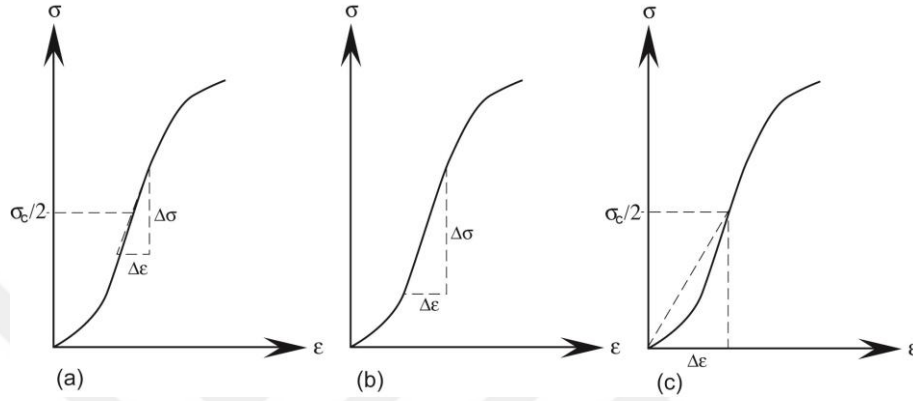


Şekil 4.2. Kaya malzemelerinde σ - ϵ ilişkisi

Kaya malzemelerinde σ - ϵ eğrisi başlangıçtan yenilme noktasına kadar eğrilik gösterir. Bu durumda E 'nin belirlenebildiği farklı yöntemler vardır. Bu yöntemler ile belirlenen E değerleri şu şekildedir;

- 1) Tanjant Elastisite Modülü (E_{tanjant}) : Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımının %50'si gibi sabit bir gerilim değeri için σ - ϵ eğrisine teğet olan doğrunun eğiminden hesaplanır (Şekil 4.3a).

- 2) Ortalama Elastisite Modülü ($E_{average}$) : σ - ϵ eğrisinin doğrusal bölümünün eğiminden hesaplanır (Şekil 4.3b).
- 3) Sekant (Kiriş) Elastisite Modülü (E_{sekant}) : σ - ϵ grafiğinin apsisi ile tek eksenli sıkıştırma dayanımının %50'sine eşit bir σ değeri arasındaki doğru parçasının eğiminden hesaplanır (Şekil 4.3c).

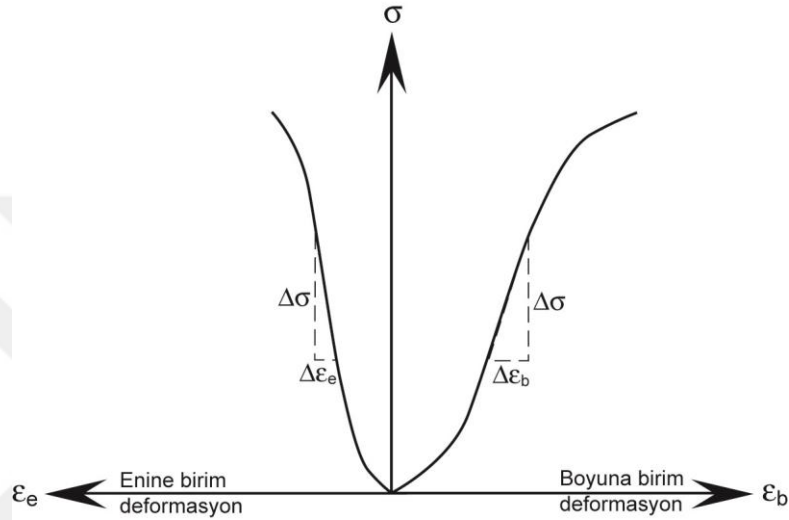


Şekil 4.3. σ - ϵ eğrisine göre tanjant (a), ortalama (b) ve sekant (c) elastisite modüllerinin belirlenmesi

4.2. Poisson Oranı (ν)

İlk olarak Thomas Young tarafından 1807'de yayımlanan Course of Lectures adlı eserinde çubukların çekme ve sıkıştırma deneyleri sırasında, boyuna deformasyonlara her zaman bazı özellikler eşlik ettiğine dikkat çekmesinden sonra [36] bu konu birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. 1829 yılında Sime'on Denis Poisson, sonraki yıllarda oldukça tartışılacak olan bir elastik sabit önermiştir. Araştırmacı, orijinal uzunluğu l ve yarıçapı r olan izotropik ve elastik silindirik bir çubuğun çekme gerilmesine maruz kalması sonucu oluşan deformasyon nedeniyle uzunluk $l(1+\delta)$ olduğundan yarıçapın $r(-0.25\delta)$ olması gerektiğini öne sürmüştür. Bu yaklaşım, şimdi Poisson oranı (ν)'nın elastik sabitin $1/4$ değerini alacağını öngörmektedir [18]. Sonraki yıllarda Guillaume Wertheim (1815–1861), Kupffer (1799–1865), Franz Ernst Neumann (1798–1895), Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887), Barre' de Saint-Venant (1797–1886), Marie Alfred Cornu (1841–1902) ve Woldemar Voigt (1850–1919) gibi araştırmacılar farklı malzemeler üzerinde farklı yöntemler kullanarak ν 'yü incelemişlerdir [36, 37]. Son olarak 1908'de Eduard August Gruneisen (1877–1949) tarafından yapılan çalışmada, ν 'nün tek eksenli çekme deneylerinde yanıl ve boyuna şekil değiştirmelerin oranı olduğu deneysel olarak ortaya konulmuş ve bu yaklaşım sonraki yıllarda ν değerinin statik deneyler ile belirlenmesinde ana yöntem olarak kabul görmüştür. Bu yaklaşım daha sonra Poisson oranının statik testlerle ölçülmesi için ortak bir yöntem haline gelmiştir [38].

Sıkışma ve çekme gerilmeleri ile kayada boyuna (eksenel) ve enine (çapsal) deformasyonlar meydana gelir. Aynı gerilme değeri aralığında boyuna (ϵ_b) ve enine (ϵ_e) birim deformasyon değerleri değişmektedir. Buna bağlı olarak boyuna ve enine E değerleri de farklılık göstermektedir (Şekil 4.4). Enine E değeri direkt olarak hesaplanmamakla birlikte, boyuna ortalama eğri eğimi olan boyuna E'nin enine ortalama eğri eğimi olan enine E'ye oranı ν olarak tanımlanmaktadır ve Eşitlik 4.4 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 4.4. σ - ϵ eğrilerinden statik ortalama ν 'nün belirlenmesi

$$\nu = \frac{\Delta\epsilon_e}{\Delta\epsilon_b} \quad (4.4)$$

Bu eşitlikte;

ν : Poisson oranı

$\Delta\epsilon_e$: Enine birim deformasyon farkı

$\Delta\epsilon_b$: Boyuna birim deformasyon farkı

$\Delta\sigma$: Eksenel gerilme farkıdır.

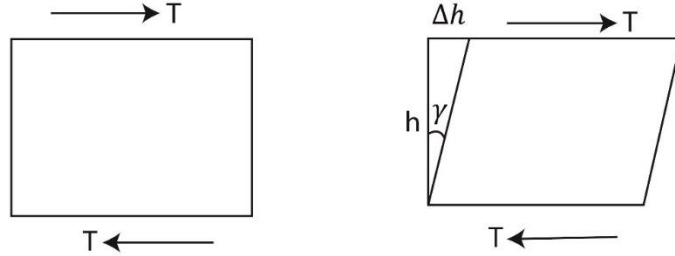
4.3. Kayma (Rijidite) Modülü (G)

Homojen ve izotropik bir malzeme üzerine etkiyen ve cismin kesme dayanımını aşmayan teğetsel gerilme değeri ile oluşan teğetsel deformasyon arasında lineer bir ilişki vardır ve bu ilişkideki elastik sabit ise kayma veya rijidite modülüdür. Bu modül G simgesi ile ifade edilir.

Malzeme üzerine etkiyen kesme gerilmeleri Şekil 4.5'te görüldüğü gibi bir şekil değişikliği meydana getirir. Yani malzemenin boyutları değişmemekle beraber yüzeyler arasındaki açılar bozulur ve yüzeyler arasındaki 90° 'lik açılarda γ kadar bir değişim meydana gelir. Radyan

cinsinden ifade edilen çok küçük bir açı olan γ 'nın değeri aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir [39].

$$\gamma = \frac{\Delta h}{h} = \tan \gamma \quad (4.5)$$



Şekil 4.5. Kayma gerilmeleri altındaki şekil değişikliği

Kayma gerilmesinin, meydana gelen γ açısına oranı ise kayanın G değerini verir.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4.6)$$

G değeri E ve ν ile doğrudan ilişkilidir ve bu parametreler arasındaki ilişki ise aşağıdaki gibidir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.7)$$

Bu eşitliklerde;

G : Rijidite (kayma) modülü

τ : Kayma gerilmesi

γ : Meydana gelen açısal değişim

E : Elastisite modülü

ν : Poisson oranıdır.

4.4. Hacimsel Sıkışma (Bulk) Modülü (K)

Bulk Modülü olarak da isimlendirilen bu modül, hidrostatik basınç altında kalan bir malzemenin hacminde oluşacak değişime karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır ve K simgesi ile ifade edilir. Bu durumda malzemenin hacmi azalır ancak şekli değişmez. Etkiyen gerilmeler sonucunda ilk hacmi V olan bir malzemenin hacminde ΔV kadar bir değişim meydana gelir. Malzemedeki hacim değişikliği Eşitlik 4.8, malzemenin K değeri ise Eşitlik 4.9 ile ifade edilir [39].

$$\Delta V = V_0 - V \quad (4.8)$$

$$K = \frac{\Delta\sigma}{\Delta V} \quad (4.9)$$

Bu eşitliklerde;

V_0 : Malzemenin ilk hacmi

V : Malzemenin son hacmi

ΔV : Malzemenin hacminde meydana gelen azalma

$\Delta\sigma$: Gerilme artışıdır.



5. MATERYAL VE METOT

Düşük dayanımlı kaya malzemesinin sıkışma ve çekme dayanımları altındaki E ve v değerleri arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar sırasıyla şu şekildedir;

1. Kaya malzemesi örneklerinin derlenmesi ve deneylere hazır hale getirilmesi,
2. Hazırlanan örneklerde tek eksenli sıkışma ve çekme deneyleri yapılarak sıkışma ve çekme gerilmeleri altında karot örneklerinde meydana gelen boyuna ve enine deformasyonların ölçülmesi,
3. Laboratuvar deney sonuçlarından örneklerin E ve v değerlerinin hesaplanması ve bu değerler arasındaki ilişkilerin istatistiksel olarak ortaya konulması.

5.1. Örneklerin Derlenmesi ve Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılacak olan kaya malzemesi örnekleri DSİ 9. Bölge Müdürlüğü'nün eski projelerinde yapılmış olan araştırma sondajlarına ait karot sandıklarından derlenmiştir. Bu çalışmanın amacına uygun örnekler bulmak amacıyla öncelikle eski projeler gözden geçirilmiş ve araştırma sondajlarına ait karot sandıkları incelenmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Tüfit (a) ve killi kireçtaşı (b) örneklerinin derlendiği karot sandıkları

Yapılan incelemeler sonucunda Malatya ve Tunceli bölgelerinde DSİ 9. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılmış olan araştırma sondajlarına ait karotlardan tüfit, killi kireçtaşı, marn ve andezit olmak üzere 4 farklı litolojiye sahip formasyonlardan örnekler derlenmiştir. Örneklemenin yapıldığı yer, proje ve formasyon isimleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Laboratuvar çalışmaları için derlenen örneklerle ait bilgiler

Grup	Proje Adı	Formasyon Adı	Litoloji
A	Malatya/Boztepe Barajı	Yamadağ Volkanitleri	Tüfit
B	Malatya/Ansur Göleti	Ansurçay Formasyonu	Killi Kireçtaşı
C	Malatya/Ansur Göleti	Ansurçay Formasyonu	Marn
D	Tunceli/Cevizlidere Göleti	Karabakır Formasyonu	Andezit

A grubundaki tüfitler, Malatya İli Yazihan İlçesi sınırlarındaki tarım alanlarının sulanması amacıyla inşa edilen Boztepe Barajı eksen yerinde yaptırılmış olan araştırma sondajlarına ait karotlardan derlenmiştir. Bu tüfitler, Yazihan İlçesi'nin kuzey kesimlerinden başlayıp Malatya Yamadağı bölgesine kadar uzanan çok geniş bir bölgede yüzeyleme veren Miyosen yaşlı volkanik ürünlerdir. Bölgede geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda [40-43] bu volkanitlerin jeolojik ve jeomekanik özellikleri incelenmiştir. Genel olarak Yamadağ Volkanitleri olarak isimlendirilen bu volkanik kayalar, kilaşı, bazalt, tüfit, aglomera üyelerine ayrılmaktadır.

B grubuna ait killi kireçtaşları ile C grubu olarak kodlanan marnlar, yine Malatya İli Yazihan ilçesi yakınlarında sulama amaçlı olarak inşa edilen Ansur Göleti projesine ait araştırma sondajlarına ait karotlardan derlenmiş örneklerdir. Bölgede farklı araştırmacıların yaptığı çalışmalarda [44-46] Ansurçay Formasyonu olarak isimlendirilen ve Burdigaliyen yaşı verilen bu formasyon, litolojik olarak kırıntılı kireçtaşları, gri renkli, az tutturulmuş, masif ya da kalın tabakalanmalı marnlar ile sarımsı beyaz renkli iyi pekişmiş, kalın–çok kalın tabakalanmalı killi kireçtaşlarından oluşmaktadır

D olarak gruplandırılan andezitler, Tunceli İli Ovacık İlçesi sınırları içerisinde, sulama amaçlı olarak inşa edilmiş olan Cevizlidere Göleti projesi kapsamında yapılmış olan araştırma sondajlarına ait karotlardan derlenmiştir. Bu kayalar, bölgede önceki yıllarda yapılmış olan jeolojik çalışmalarda [47-51] Karabakır Formasyonu olarak adlandırılan ve tuf, bazalt, andezit ve aglomera gibi litolojilere sahip üyelerden oluşan, Orta-Üst Miyosen olarak yaşlandırılan formasyona aittir.

Laboratuvar deneyleri için karot sandıklarından derlenen karot örnekler ilk olarak kesim için hazırlanmıştır. Bu örneklerin boyutlandırılmasında ISRM [52] tarafından tek eksenli sıkışma dayanımı ve doğrudan çekme deneyleri için önerilen boyutlar dikkate alınmış ve kesimler gerçekleştirilmiştir. ISRM [52] tek eksenli sıkışma dayanımı ve doğrudan çekme deneylerinde kullanılacak olan örneklerin boy ve çap oranlarının (L/D) 2.5 ile 3.00 arasında olmasını önermektedir. Ayrıca, tek eksenli sıkışma ve doğrudan çekme dayanımı deneylerinde kullanılacak örneklerin aynı karottan kesilmesine dikkat edilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Karot örneklerinin kesimi

Bu çalışmada, yarısı tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde, diğer yarısı ise doğrudan çekme dayanımı deneylerinde kullanılmak üzere toplam 70 adet örnek hazırlanmıştır (Tablo 5.2). Her bir gruba ait toplam örnek sayıları Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Tek eksenli sıkışma ve doğrudan çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan örnek sayıları

Grup	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Doğrudan Çekme Dayanımı Deneyi
A	10	10
B	7	7
C	11	11
D	7	7

5.2. Laboratuvar Deneyleri

Bu çalışmanın ana amacı sıkışma ve çekme gerilmeleri altında kaya malzemesinin E ve ν değerlerindeki değişimlerdir. Bu nedenle, laboratuvar çalışmaları bu amaçlara yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışmalarında gerçekleştirilen deneyleri iki ana başlıkta toplamak mümkündür. Bunlar tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri ile doğrudan çekme deneyleridir. Örnekler için E ve ν değerlerinin belirlenebilmesi için bu deneyler gerçekleştirilirken örneklerde meydana gelen boyuna ve enine deformasyonlar da ölçülmüştür. Yapılan deney ve ölçümlere ait detaylar alt bölümlerde verilmiştir.

5.2.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi ve Elastisite Modülü (E_c) ile Poisson Oranı (ν_c)'nın Belirlenmesi

Bu deney, silindirik şekilli kaya malzemesi örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımını belirlemek amacıyla yapılır ve deney sırasında örnekte meydana gelen boyuna ve enine deformasyonlar da ölçülebilir. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi ile ilgili olarak birçok standartta (TS, BS, ve ASTM gibi) farklı yöntemler önerilmesine karşın, günümüzde en yaygın olarak kabul görmüş öneri ISRM [52] tarafından önerilen yöntemdir. ISRM'ye [52] göre tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi boy (L)/çap (D) oranı 2.5-3.0 olacak şekilde hazırlanan karot örneklerine hidrolik pres yardımıyla sıkışma kuvveti uygulanmakta ve yenilme anındaki yük (F) gerilmenin uygulandığı yüzey alanına (A) bölünerek (Eşitlik 5.1) kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c) hesaplanmaktadır.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte,

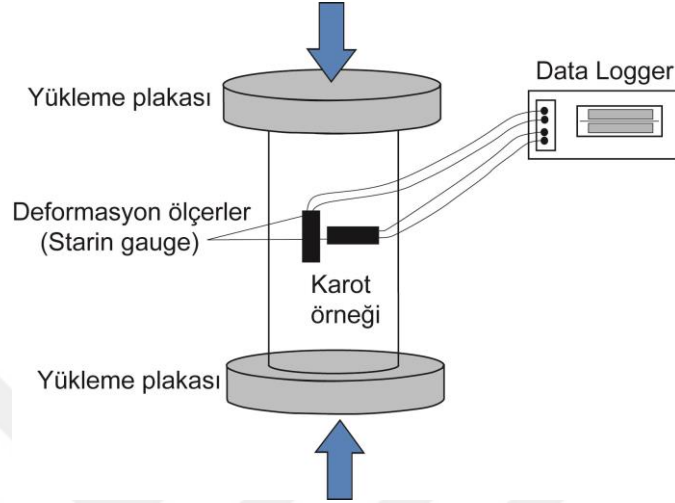
- σ_c : Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (kN/m²)
F : Yenilme anındaki kuvvet (kN)
A : Kuvvetin etki ettiği alandır (m²).

ISRM'ye [52] göre deney şu şekilde yapılmaktadır.

1. Deneyde tercihen 54 mm çaplı karot örnekler kullanılır ve bu örnekler boy/çap oranı 2.5-3.0 arasında olacak şekilde, alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel olacak şekilde kesilir ve bu yüzeyler parlatılır.
2. Örneğin çapı, boyu kumpas yardımıyla ölçülür ve kayıt edilir.
3. Örnek 5-10 dk aralığında yenilecek şekilde veya saniyede 0.5-1.0 MPa'lık bir gerilme hızıyla yüklenir.
4. Örneğin yenildiği andaki yük kayıt edilir.

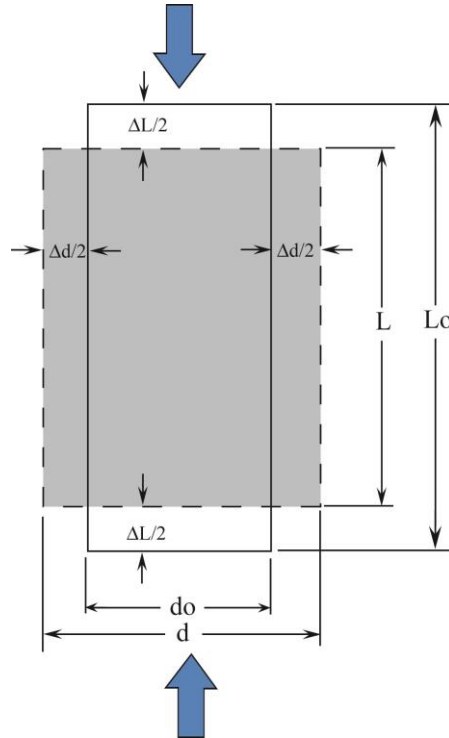
Bu çalışma kapsamında derlenen kaya örnekleri kullanılarak, Şekil 5.3'te şematik olarak verilen ve ISRM [52] tarafından önerilen yöntemle göre tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında sıkışma gerilmesi altındaki kaya örneklerinde meydana gelen boyuna ve enine deformasyonları ölçmek için Şekil 5.3'te şematik olarak verildiği gibi örneklerle deformasyon ölçerler yapıştırılmış ve deney sırasında örnekteki deformasyonlar data logger ile kayıt altına alınmıştır. Örnekte meydana gelen boyuna ve enine deformasyonları ölçebilmek için de ISRM [52] tarafından önerilen yöntemler dikkate alınmıştır. Karot örneğinin deformasyon ölçerler (strain gauges) yapıştırılacak orta kesimi zımpara ile temizlendikten sonra, boydaki deformasyonu ölçmek için örneğin uzun eksenine paralel, enine deformasyonları ölçmek için ise örneğin uzun eksenine dik doğrultuda deformasyon ölçerler (strain gauges)

yapıştırılmıştır. Bu deformasyon ölçerler ise kablolar vasıtasıyla data loggera bağlanmıştır. Böylece, sıkışma gerilmeleri altında örneğin boyunda ve eninde meydana gelen deformasyonlar ölçülmüştür.



Şekil 5.3. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinin yapılışı ve deformasyonların ölçümü

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi sıkışma gerilmesi altında kalan kaya malzemesinin boyunda ΔL kadar kısalma, eninde ise Δd kadar genişleme meydana gelmektedir.



Şekil 5.4. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sırasında meydana gelen boyuna ve enine deformasyonların şematik gösterimi

Deney sırasında ölçülen boyuna ve enine deformasyon değerleri ile bu deformasyonların oluştuğu gerilme değerleri kullanılarak Şekil 5.5'teki gibi σ - ϵ eğrileri çizilerek, bu eğrilerden eksenel deformasyon eğrisinde birim gerilmeye karşılık gelen birim eksenel deformasyon değerleri belirlendikten sonra, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak örneğin sıkışma elastisite modülü (E_c) belirlenmektedir.

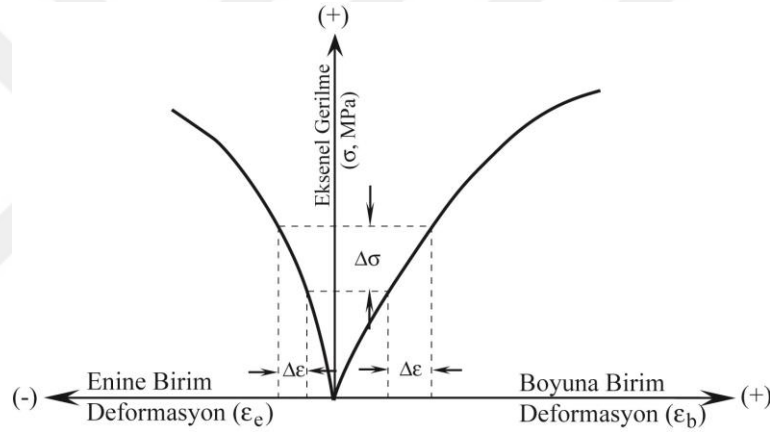
$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte,

E_c : Kaya malzemesinin sıkışma elastisite modülü (MPa)

$\Delta\sigma$: Birim gerilme (MPa)

$\Delta\epsilon$: Eksenel birim deformasyondur.



Şekil 5.5. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinde $\sigma - \epsilon_b$ ve ϵ_e grafikleri

Örneğin sıkışma Poisson oranı (ν_c) ise, Şekil 5.5'te şematik olarak verilen σ - ϵ eğrilerinden belirlenen, $\Delta\sigma$ 'ya karşılık gelen $\Delta\epsilon_b$ ve $\Delta\epsilon_e$ değerleri kullanılarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\nu_c = \frac{\Delta\epsilon_e}{\Delta\epsilon_b} \quad (5.3)$$

Bu eşitlikte;

ν_c : Sıkışma Poisson oranı

$\Delta\epsilon_e$: Birim gerilmeye karşılık gelen enine birim deformasyon

$\Delta\epsilon_b$: Birim gerilmeye karşılık gelen boyuna birim deformasyondur.

Bu çalışma kapsamında ISRM [52] önerileri dikkate alınarak hazırlanan toplam 35 kaya örneğine enine ve boyuna deformasyonları ölçmek için deformasyon ölçerler yapıştırılmıştır (Şekil 5.6)



Şekil 5.6. Örneklere deformasyon ölçerlerin yapıştırılması

Deformasyon ölçerler yapıştırılarak hazırlanan örneklerde yenilme oluncaya kadar tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş (Şekil 5.7) ve deney sırasında belli yük kademelerinde örneğin boyunda ve eninde meydana gelen deformasyonlar kayıt altına alınmıştır.

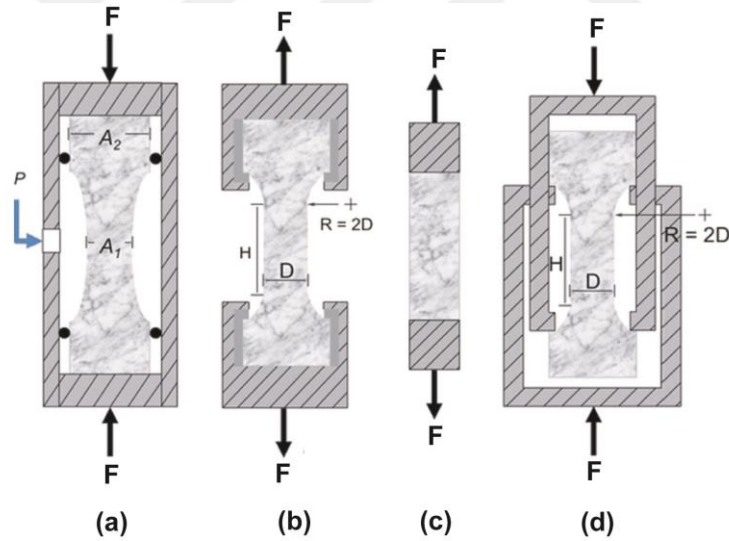


Şekil 5.7. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sırasında boyuna ve enine deformasyonların ölçümü

Deneyler sonucunda, standart dışı yenilen örneklere ait deney sonuçları dikkate alınmamış, standartlara uygun yenilmelerin gerçekleştiği deneylere ait sonuçlar kullanılarak çizilen σ - ε grafikleri ise Şekil 6.1-6.15'te verilmiştir. Her bir örneğe ait σ - ε grafikleri kullanılarak, örneklerin E_c ve ν_c değerleri hesaplanmıştır.

5.2.2. Doğrudan Çekme Dayanımı Deneyi ve Elastisite Modülü (E_t) ile Poisson Oranı (ν_t)'nın Belirlenmesi

Kayanın çekme gerilmesine gösterdiği direnç olarak tanımlanan çekme dayanımı, silindirik kaya malzemesi üzerinde laboratuvarında yapılan deneyler ile belirlenebilmektedir. Bu deneyler doğrudan ve dolaylı çekme olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir. Bu konuda farklı araştırmacı veya kuruluşlar [52-58] tarafından önerilmiş yöntemler mevcuttur (Şekil 5.8). Günümüzde doğrudan çekme dayanımının belirlenmesinde ISRM [52] ve ASTM [56] tarafından önerilen ve benzer özellikler taşıyan yöntemler (Şekil 5.8c) tercih edilmekte ve bu yöntemlere göre deneyler gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.8. Doğrudan çekme deneyi yöntemleri (a) Hoek [53], (b) Brace [55], (c) ISRM [52] ve ASTM [56], (d) Gorski [54] ve Klanphumeesri [57]

Bu yöntemlere göre, kaya malzemesine doğrudan çekme gerilmesi uygulanmakta ve yenilme anındaki yük (F) örnek yüzey alanına (A) bölünerek (Eşitlik 5.4) kayanın çekme dayanımı belirlenmektedir.

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (5.4)$$

Bu eşitlikte;

σ_t : Kaya malzemesinin çekme dayanımı (kN/m²)

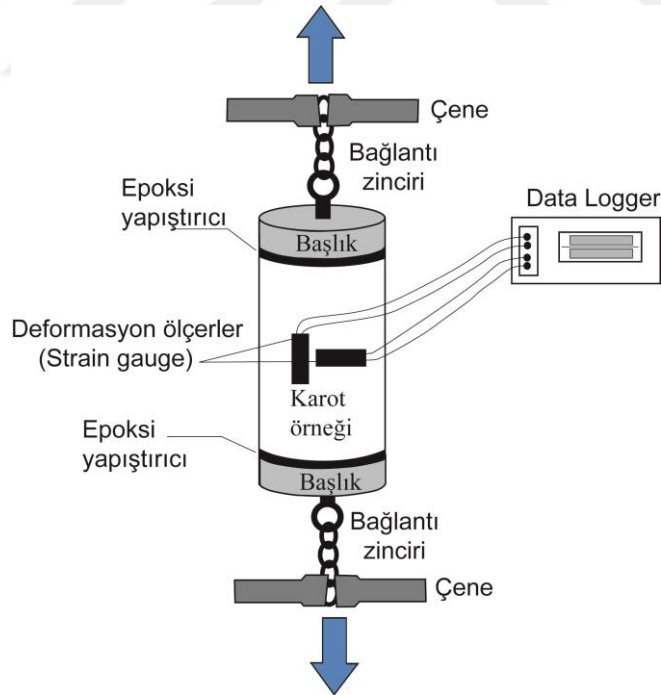
F : Yenilme anındaki kuvvet (kN)

A : Kuvvetin etki ettiği alandır (m²).

ISRM'ye [52] göre deneyin yapılışı aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çapı tercihen 54 mm'den büyük silindirik kaya örnekleri boy (L)/çap (D) oranı 2.5-3.0 arasında olacak şekilde, alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel olacak şekilde kesilir.
- Çekme başlıkları örnekler yapıştırıcı kalınlığı en fazla 15 mm olacak şekilde çimento ya da epoksi yardımıyla yapıştırılır.
- Örnek, yapıştırıcının sertleşmesi için $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %50 nemli bir ortamda, 5-6 gün bekletilir.
- Yükleme hızı örneğin 5 dk içerisinde yenilecek şekilde ayarlanarak deney gerçekleştirilir.

Çekme gerilmesi altındaki kaya örneklerinde meydana gelen boyuna ve enine deformasyonları ölçmek Şekil 5.9'da şematik olarak verildiği gibi örnekler deformasyon ölçerler yapıştırılır ve deney sırasında örnekteki deformasyonlar data logger ile kayıt altına alınır.



Şekil 5.9. Doğrudan çekme dayanımı deneyinin yapılışı ve deformasyonların ölçümü

Şekil 5.10'da şematize edildiği gibi, çekme gerilmesi altında kalan kaya malzemesinin boyunda ΔL kadar uzama, eninde ise Δd kadar daralma meydana gelmektedir. Deney sırasında ölçülmüş olan boyuna ve enine deformasyon değerleri ile bu deformasyonların oluştuğu gerilme

değerleri kullanılarak Şekil 5.11'deki gibi σ - ϵ eğrileri çizilerek, bu eğrilerden eksenel deformasyon eğrisinde birim gerilmeye karşılık gelen birim eksenel deformasyon değerleri belirlendikten sonra, Eşitlik 5.5 kullanılarak örneğin çekme E_t değeri belirlenir.

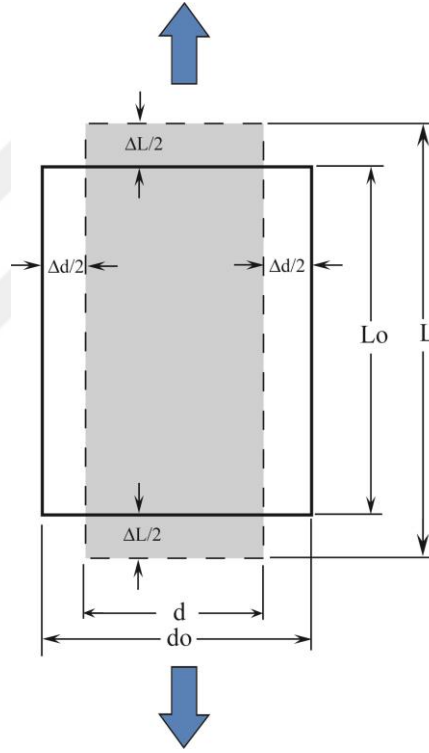
$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_b} \quad (5.5)$$

Bu eşitlikte;

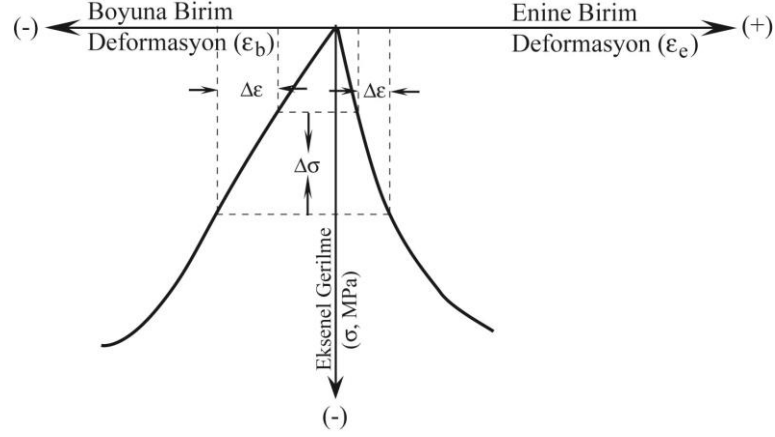
E_t : Kaya malzemesinin çekme elastisite modülü (MPa)

$\Delta\sigma$: Birim gerilme (MPa)

$\Delta\epsilon_b$: Boyuna birim deformasyondur.



Şekil 5.10. Doğrudan çekme dayanımı deneyi sırasında meydana gelen boyuna ve enine deformasyonların şematik gösterimi



Şekil 5.11. Doğrudan çekme dayanımı deneyinde $\sigma - \epsilon_b$ ve ϵ_e grafikleri

Örneğin çekme Poisson oranı (ν_t) ise, Şekil 5.11’de şematik olarak verilen σ – ϵ eğrilerinden belirlenen, $\Delta\sigma$ ’ya karşılık gelen $\Delta\epsilon_b$ ve $\Delta\epsilon_e$ değerleri kullanılarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$\nu_t = \frac{\Delta\epsilon_e}{\Delta\epsilon_b} \quad (5.6)$$

Bu eşitlikte;

ν_t : Çekme Poisson oranı

$\Delta\epsilon_e$: Birim gerilmeye karşılık gelen enine birim deformasyon

$\Delta\epsilon_b$: Birim gerilmeye karşılık gelen boyuna birim deformasyondur.

Bu çalışma kapsamında ISRM [52] önerileri dikkate alınarak hazırlanan örnekler çekme başlıkları yapıştırılmadan önce 24 saat 60°C sıcaklıkta etüvde bekletilmiş ve etüvden çıkarılan örnekler Loctite EA340 epoksi yapıştırıcı kullanılarak çelik çekme başlıklarına yapıştırılmıştır. Bu işlemten sonra çekme başlıklarının hareket etmesini önlemek amacıyla örnek ve çelik başlıklar kağıt koli bandı ile sarılmış ve havası alınmış ortamda 5 gün bekletilerek (Şekil 5.12), epoksinin tam olarak kuruması ve yeterli çekme dayanımına ulaşması sağlanmıştır.



Şekil 5.12. Çelik başlıkların yapıştırıldığı örneklerin vakumlu ortamda bekletilmesi

Bu deney için toplam 35 kaya örneğine enine ve boyuna deformasyonları ölçmek için deformasyon ölçerler yapıştırılmıştır (Şekil 5.13) ve bu örneklerde yenilme oluncaya kadar doğrudan çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.14). Yenilme gerçekleşinceye kadar belli yük kademelerinde örneğin boyunda ve eninde meydana gelen deformasyonlar kayıt edilmiştir.



Şekil 5.13. Örneklere deformasyon ölçerlerin yapıştırılması



Şekil 5.14. Doğrudan çekme dayanımı deneyi sırasında boyuna ve enine deformasyonların ölçümü

Deneyler sonucunda, standart dışı yenilen örneklerle ait deney sonuçları dikkate alınmamış, standartlara uygun yenilmelerin gerçekleştiği deneylere ait sonuçlar kullanılarak çizilen σ - ϵ grafikleri ise Şekil 6.1-6.15'te verilmiştir.

Hazırlanan 35'er adet örnekte gerçekleştirilen deneyler sırasında, örneklerin düşük dayanımlı olması nedeniyle bazı örneklerde standart dışı yenilmeler meydana gelmiş, bazı örneklerde ise deney sırasında meydana gelen deformasyonlar sağlıklı bir şekilde okunamamıştır. Bu deneylere ait sonuçlar değerlendirme dışı bırakılmış ve geriye kalan örneklere ait değerler değerlendirmeye alınmıştır. Bu örneklere ait bilgiler Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Her grup için geçerli deney sayıları

Grup	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi	Doğrudan Çekme Dayanımı Deneyi
A	3	3
B	5	5
C	3	3
D	4	4
Toplam	15	15

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Laboratuvar çalışmaları için hazırlanmış olan örneklerde gerçekleştirilen tek eksenli sıkışma ve doğrudan çekme dayanımı deneyleri sırasında ölçülen boyuna ve enine deformasyon değerleri kullanılarak her bir örneğin σ - ε_b ve σ - ε_e grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerde σ - ε_b eğrisinin doğrusallık sunduğu kısmın eğimi dikkate alınmış, örneklerin E_c ve E_t değerleri Eşitlik 5.2 ve 5.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

Kaya örneklerinin v_c ve v_t değerleri ise tek eksenli sıkışma ve doğrudan çekme deneyleri sırasında örneklerde meydana gelen ε_e ve ε_b değerlerinin Eşitlik 5.3 ve 5.6'da kullanılmasıyla hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar grup bazında ve tüm gruplar olmak üzere değerlendirilmiş ve alt bölümlerde verilmiştir.

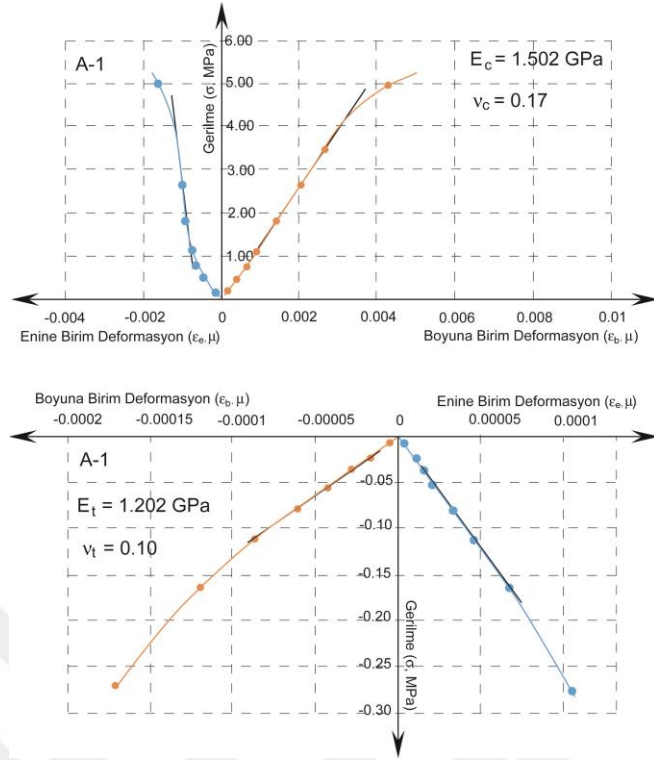
6.1. A Grubu Örnekler İçin Değerlendirme

Bu çalışmada A grubu olarak isimlendirilen örnekler litolojik olarak tüfittir. Bu kayalarda gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda çizilen σ - ε_b ve σ - ε_e grafikleri Şekil 6.1-6.3'te verilmiştir. Ayrıca, bu örneklerle ait σ_c , σ_t , E_c , E_t , v_c ve v_t değerleri ile bu değerlere ait istatistiksel değerlendirmeler Tablo 6.1'de sunulmuştur.

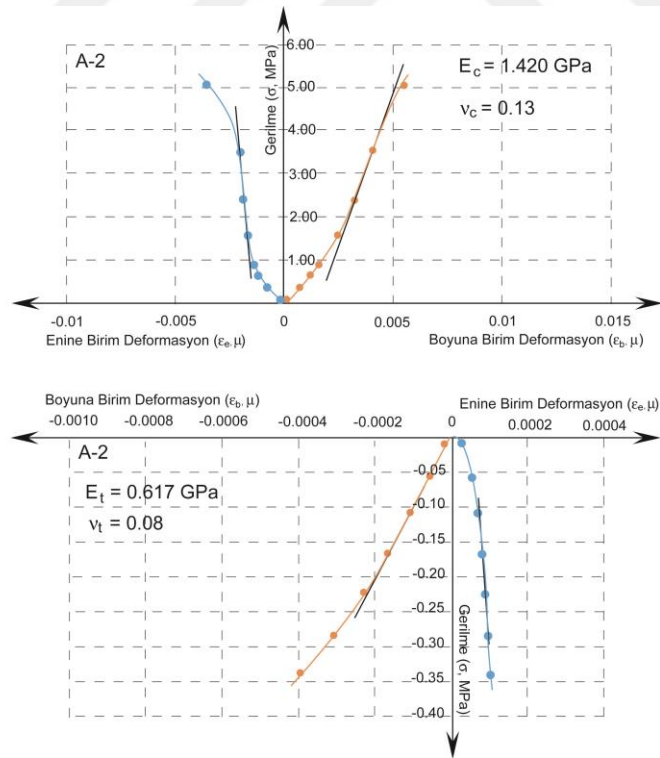
Tablo 6.1. A grubu örneklerle ait deney sonuçları ve sonuçların istatistiksel değerlendirmesi

Örnek No	Sıkışma Elastisite Modülü (E_c , GPa)	Sıkışma Poisson Oranı (v_c)	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c , MPa)	Çekme Elastisite Modülü (E_t , GPa)	Çekme Poisson Oranı (v_t)	Doğrudan Çekme Dayanımı (σ_t , MPa)
A-1	1.502	0.17	5.034	1.202	0.10	0.279
A-2	1.420	0.13	6.335	0.617	0.08	0.619
A-3	1.778	0.21	5.656	1.333	0.13	0.676
Ortalama	1.567	0.17	5.675	1.051	0.10	0.525
Standart Sapma	0.18756	0.04000	0.65071	0.38124	0.02517	0.21465

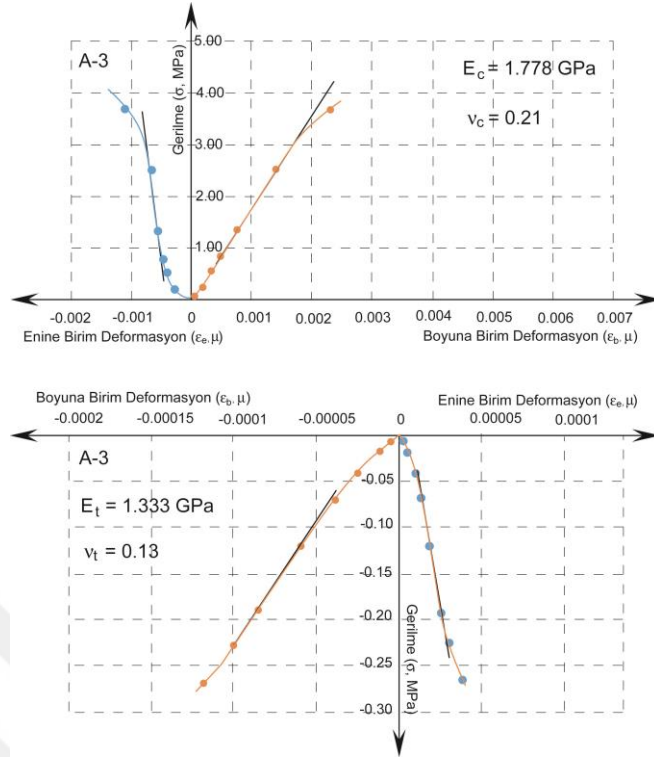
Bu gruptaki örneklerin ortalama E_c ve v_c değerleri 1.567 GPa ve 0.17; E_t ve v_t değerleri ise 1.051 GPa ve 0.10'dur. Örneklerle ait değerler karşılaştırıldığında; E_c değerlerinin E_t 'den %25-56; v_c değerlerinin ise v_t 'den %38-41 oranları arasında daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 6.1. A-1 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri



Şekil 6.2. A-2 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri



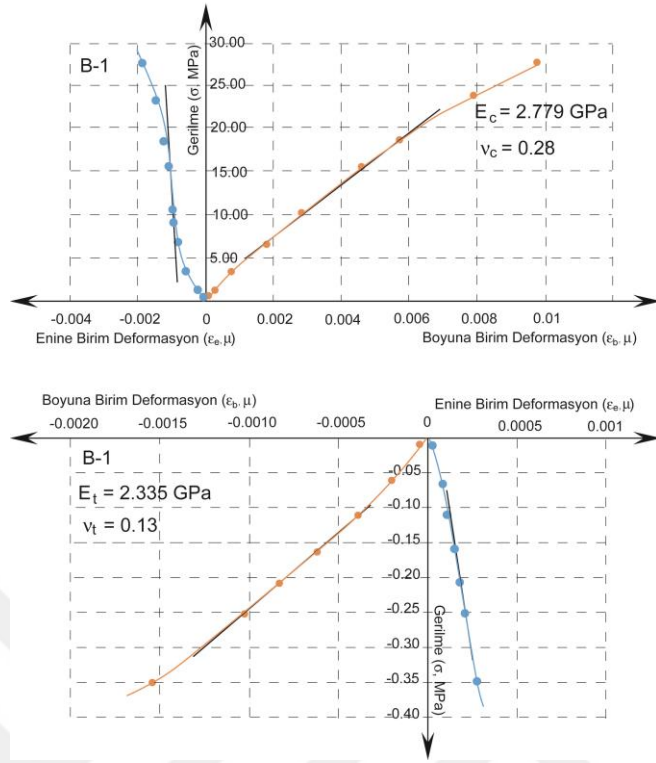
Şekil 6.3. A-3 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri

6.2. B Grubu Örnekler İçin Değerlendirme

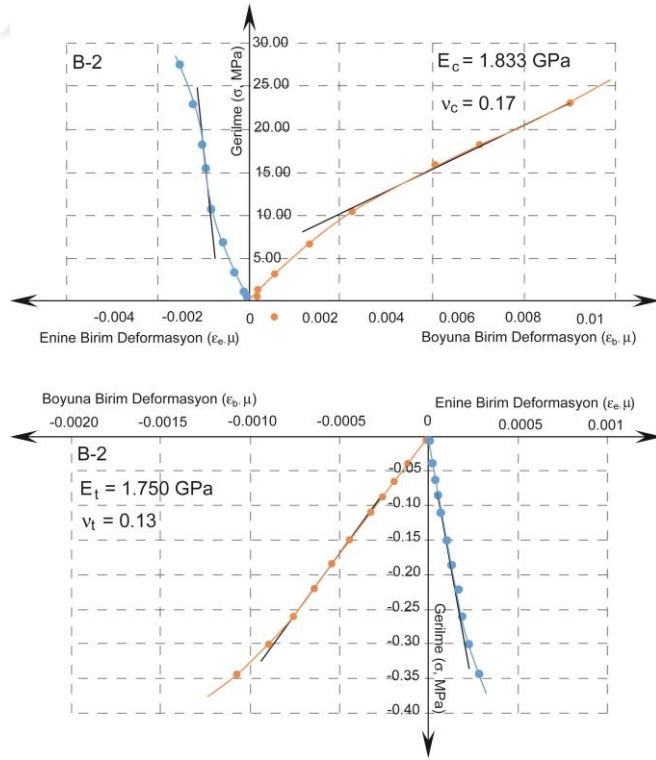
Bu çalışmada B grubu olarak isimlendirilen örnekler litolojik olarak killi kireçtaşıdır. Bu kayalarda gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda çizilen σ - ϵ_b ve σ - ϵ_e grafikleri Şekil 6.4-6.8’de verilmiştir. Ayrıca, bu örneklere ait σ_c , σ_t , E_c , E_t , ν_c ve ν_t değerleri ile bu değerlere ait istatistiksel değerlendirmeler Tablo 6.2’de sunulmuştur.

Tablo 6.2. B grubu örneklere ait deney sonuçları ve sonuçların istatistiksel değerlendirmesi

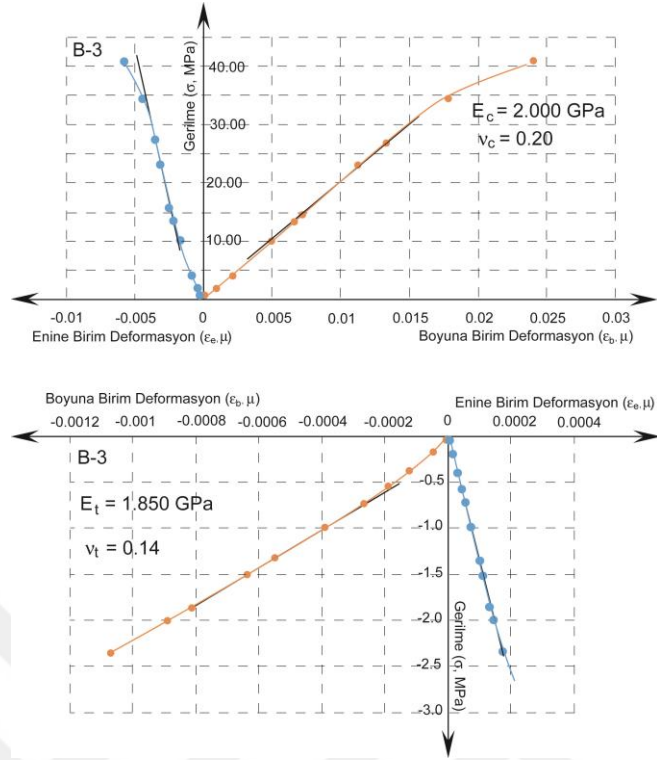
Örnek No	Sıkışma Elastisite Modülü (E_c , GPa)	Sıkışma Poisson Oranı (ν_c)	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c , MPa)	Çekme Elastisite Modülü (E_t , GPa)	Çekme Poisson Oranı (ν_t)	Doğrudan Çekme Dayanımı (σ_t , MPa)
B-1	2.779	0.28	41.178	2.335	0.13	3.505
B-2	1.833	0.17	31.677	1.750	0.13	3.449
B-3	2.000	0.20	49.551	1.850	0.14	3.053
B-4	1.510	0.17	49.721	1.720	0.11	1.525
B-5	3.600	0.22	74.043	2.063	0.16	2.883
Ortalama	2.344	0.208	49.234	1.944	0.134	2.883
Standart Sapma	0.84288	0.0455	15.72396	0.25675	0.01817	0.80317



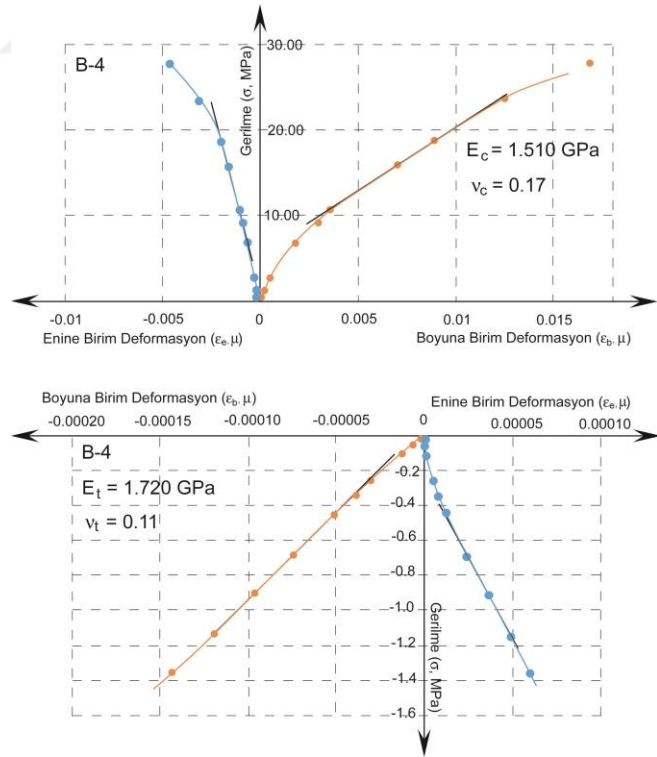
Şekil 6.4. B-1 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri



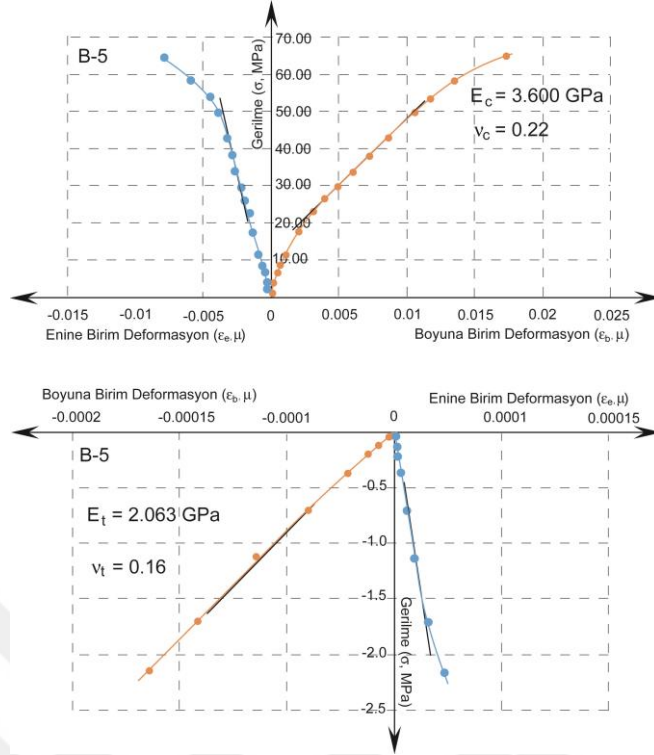
Şekil 6.5. B-2 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri



Şekil 6.6. B-3 numaralı örnekler için σ - ϵ grafikleri



Şekil 6.7. B-4 numaralı örnekler için σ - ϵ grafikleri



Şekil 6.8. B-5 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri

Tablo 6.2’de verilen ortalama değerlere bakıldığında, örneklerin ortalama E_c ve ν_c değerleri 2.344 GPa ve 0.208; E_t ve ν_t değerleri ise 1.944 GPa ve 0.134’tür. B-4 nolu örnek haricindeki örneklerin E_c değerleri E_t değerlerinden %5-43 oranında, ν_c değerleri ise ν_t değerlerinden %27-54 oranında daha büyüktür.

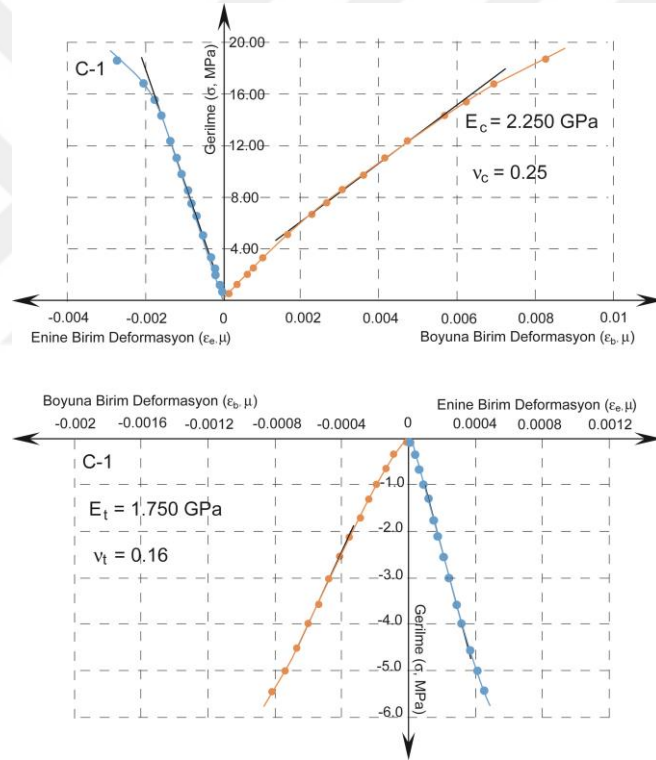
6.3. C Grubu Örnekler İçin Değerlendirme

Bu çalışmada C grubu olarak isimlendirilen örnekler litolojik olarak marndır. Bu kayalarda gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda çizilen σ - ϵ_b ve σ - ϵ_e grafikleri Şekil 6.9-6.11’de verilmiştir. Ayrıca, bu örneklere ait σ_c , σ_t , E_c , E_t , ν_c ve ν_t değerleri ile bu değerlere ait istatistiksel değerlendirmeler Tablo 6.3’te sunulmuştur.

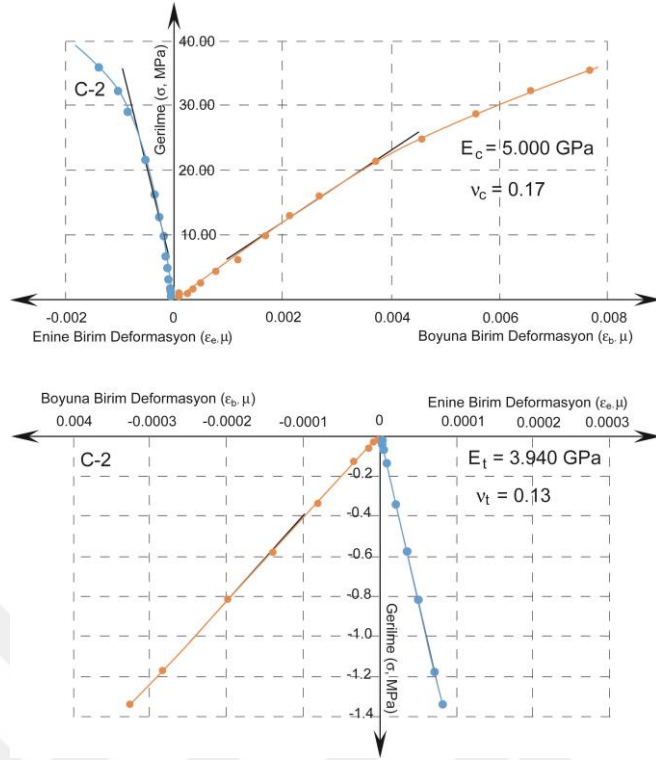
C grubu örneklerde ortalama E_c ve ν_c değerleri 3.528 GPa ve 0.217 iken, ortalama E_t ve ν_t değerleri 2.403 GPa ve 0.147’dir. Sıkışma değerleri çekme değerlerinden daha fazladır. Örneklerle ait değerler oranlandığında; örneklerin E_c değerlerinin E_t değerlerinden %21-54 oranında, ν_c değerlerinin ise ν_t değerlerinden %24-35 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6.3. C grubu örneklere ait deney sonuçları ve sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi

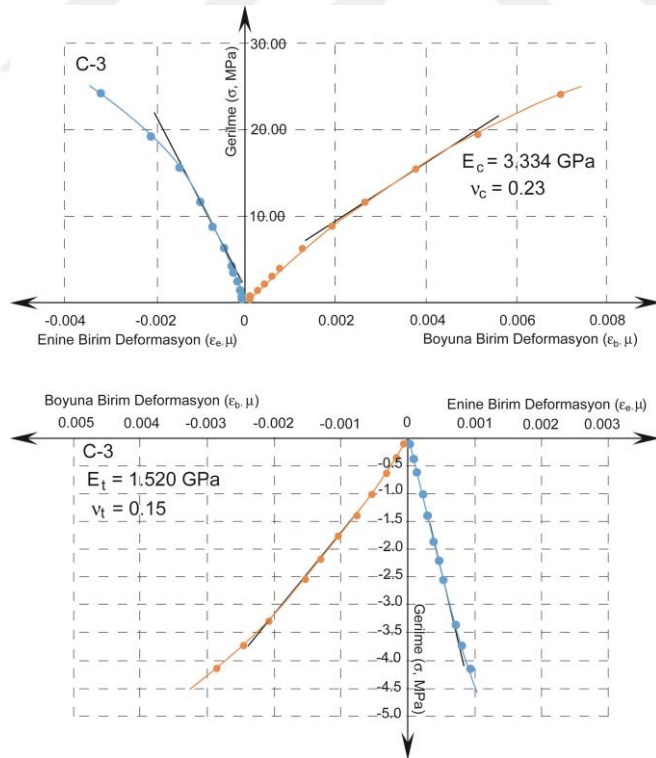
Örnek No	Sıkışma Elastisite Modülü (E_c , GPa)	Sıkışma Poisson Oranı (ν_c)	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c , MPa)	Çekme Elastisite Modülü (E_t , GPa)	Çekme Poisson Oranı (ν_t)	Doğrudan Çekme Dayanımı (σ_b , MPa)
C-1	2.250	0.25	25.285	1.750	0.16	5.430
C-2	5.000	0.17	57.131	3.940	0.13	8.298
C-3	3.334	0.23	23.926	1.520	0.15	4.468
Ortalama	3.528	0.217	35.447	2.403	0.147	6.065
Standart Sapma	1.38523	0.04163	18.7909	1.33575	0.01528	1.99248



Şekil 6.9. C-1 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri



Şekil 6.10. C-2 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri



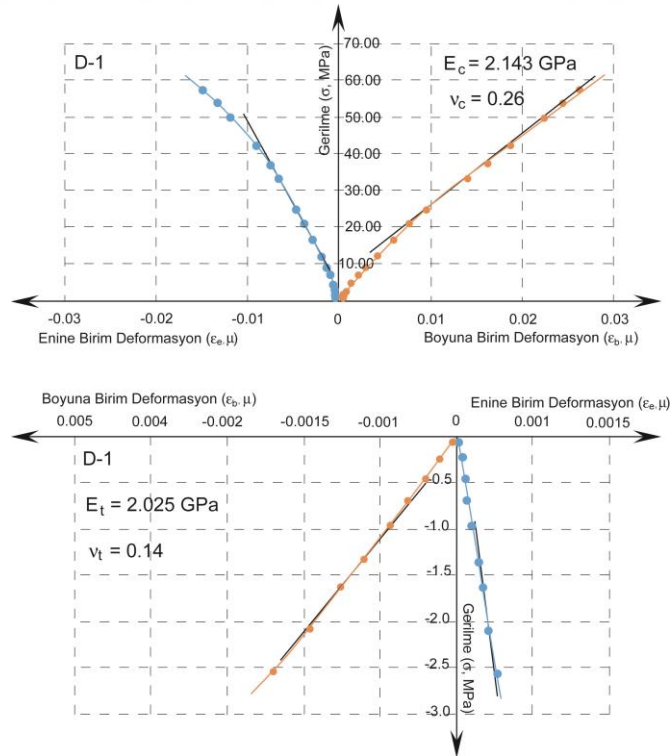
Şekil 6.11. C-3 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri

6.4. D Grubu Örnekler İçin Değerlendirme

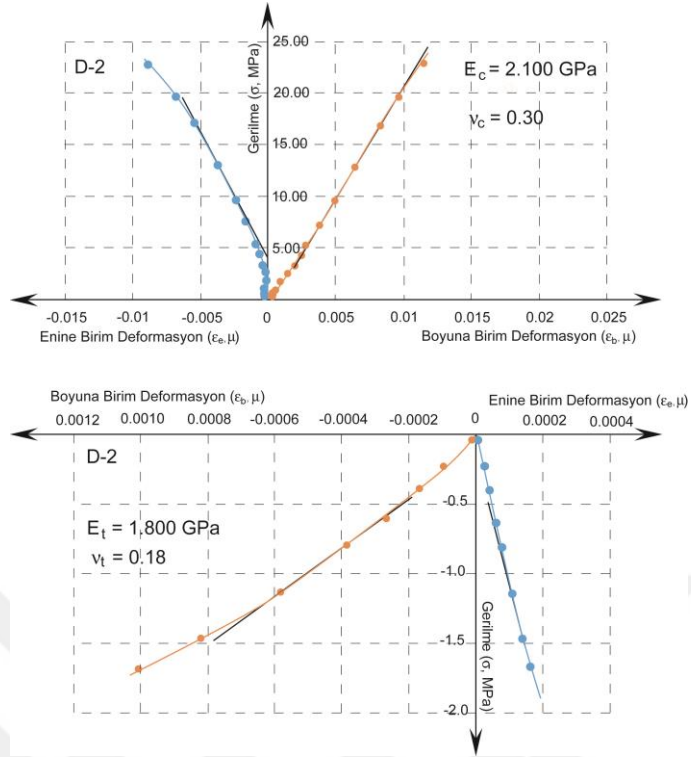
Bu çalışmada D grubu olarak isimlendirilen örnekler litolojik olarak andezittir. Bu kayalarla gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda çizilen σ - ϵ_b ve σ - ϵ_e grafikleri Şekil 6.12-6.15'te verilmiştir. Ayrıca, bu örneklerle ait σ_c , σ_t , E_c , E_t , ν_c ve ν_t değerleri ile bu değerlere ait istatistiksel değerlendirmeler Tablo 6.4'te sunulmuştur.

Tablo 6.4. D grubu örneklerle ait deney sonuçları ve sonuçların istatistiksel değerlendirmesi

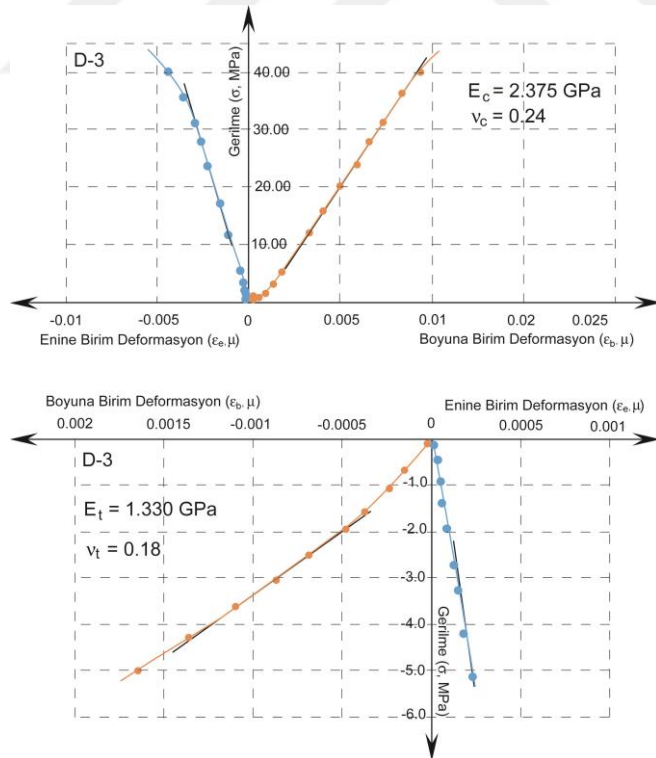
Örnek No	Sıkışma Elastisite Modülü (E_c , GPa)	Sıkışma Poisson Oranı (ν_c)	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c , MPa)	Çekme Elastisite Modülü (E_t , GPa)	Çekme Poisson Oranı (ν_t)	Doğrudan Çekme Dayanımı (σ_t , MPa)
D-1	2.143	0.26	71.047	2.025	0.14	3.562
D-2	2.100	0.30	29.017	1.800	0.18	1.694
D-3	2.375	0.24	53.226	1.330	0.18	5.826
D-4	1.900	0.20	32.016	1.120	0.11	1.059
Ortalama	2.130	0.25	46.3265	1.569	0.15	3.035
Standart Sapma	0.19493	0.04163	19.69023	0.41634	0.03403	2.14245



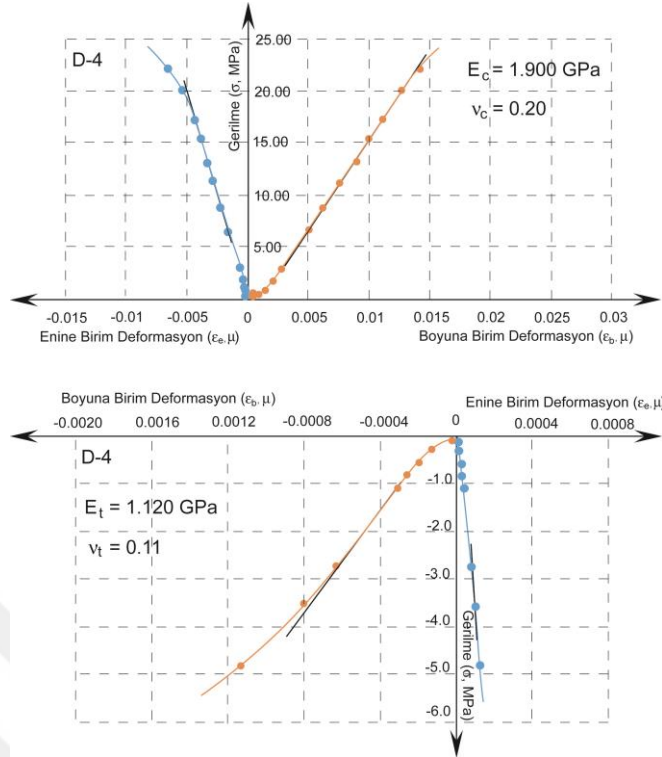
Şekil 6.12. D-1 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri



Şekil 6.13. D-2 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri



Şekil 6.14. D-3 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri



Şekil 6.15. D-4 numaralı örneklere ait σ - ϵ grafikleri

D grubunda yer alan örneklerin ortalama E_c ve ν_c değerleri 2.130 GPa ve 0.25'tir. Ortalama E_t ve ν_t değerleri ise 1.569 GPa ve 0.15'tir. Diğer gruplarda olduğu gibi, bu grupta da E_c ve ν_c değerleri E_t ve ν_t değerlerinden yüksektir. Değerler oranlandığında; E_c değerleri E_t değerlerinden %5-44 oranında, ν_c değerleri ise ν_t değerlerinden %25-45 oranında daha yüksektir.

6.5. Tüm Gruplar için Değerlendirme

Tüm gruplara ait değerlerin birlikte değerlendirildiği Tablo 6.5 dikkate alındığında; örneklere ait ortalama E_c ve E_t değerleri 2.368 GPa ve 1.757 GPa; ortalama ν_c ve ν_t değerleri ise 0.213 ve 0.135'tir. Bu değerler oranlandığında; örneklerin ortalama E_c değerlerinin E_t değerlerinden %26 oranında, ortalama ν_c değerlerinin ν_t değerlerinden ise ortalama %37 daha yüksek olduğu görülmektedir. Diğer bir ifade ile örneklerin ortalama E_t değeri E_c değerinin %74'ü, ortalama ν_t değeri ise ν_c değerinin %63'ü kadardır.

Tablo 6.5. Tüm deney sonuçlarının istatistiksel değeriendirmesi

Parametreler	Ortalama	Minimum	Maksimum	Standart Sapma ($\pm$)
Sıkışma Elastisite Modülü (E_c , GPa)	2.368	1.420	5.000	0.96575
Sıkışma Poisson Oranı (ν_c)	0.213	0.130	0.300	0.04731
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c , MPa)	36.99	5.034	74.043	22.2107
Çekme Elastisite Modülü (E_t , GPa)	1.757	0.617	3.940	0.74204
Çekme Poisson Oranı (ν_t)	0.135	0.080	0.180	0.02825
Doğrudan Çekme Dayanımı (σ_t , MPa)	3.088	0.279	8.298	2.25055

6.6. Regresyon Analizleri

İki veya daha fazla değışkene sahip serilerde değışkenler arasındaki ilişkinin şeklini, yönünü ve kuvvetini incelemek amacıyla kullanılan analiz yöntemine regresyon veya korelasyon analizi adı verilmektedir [59]. Regresyon analizi bir bağımlı değışkene karşılık işleme giren bağımsız değışken sayısı ve bağımsız değışken veya değışkenlerin üslerinin derecesine göre dört gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

- Basit regresyon
- Çoklu (multiple) regresyon
- Çok katlı regresyon
- Çoklu-çok katlı regresyondur.

İki parametre arasındaki ilişkilerin belirlenebilmesinde kullanılan en yaygın istatistiksel yöntem basit regresyon analizleridir. Aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan, iki veya daha fazla değışken arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi kullanarak o konu ile ilgili tahminler ya da ön kestirimler yapabilmek amacıyla yapılan bu analiz yönteminde iki veya daha fazla değışken arasındaki ilişkiyi açıklamak için matematiksel bir model kullanılır. Bu model regresyon modeli olarak adlandırılır. Eğer model bir bağımlı ve bir de bağımsız değışken içeriyor ise bu modele basit regresyon modeli, bir bağımlı ve birden fazla bağımsız değışken içeriyor ise bu modele de çoklu regresyon modeli adı verilmektedir [59].

Basit regresyon modeli;

$Y = a + bX$ şeklindeki bir modeldir ve bu modelde;

Y : Bağımlı (sonuç) değışkendir ve belli bir hataya sahip olduğu varsayılır.

X : Bağımsız (sebe) değışkendir ve hatasız ölçüldüğü varsayılır.

a : Regresyon sabiti değeriştir ve $X=0$ olduğunda Y'nin aldığı değeriştir.

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

Çoklu regresyon modeli;

$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$ şeklindeki bir modeldir [59] ve bu modelde;

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

X : Bağımsız (sebeup) değişkendir ve hatasız ölçüldüğü varsayılır.

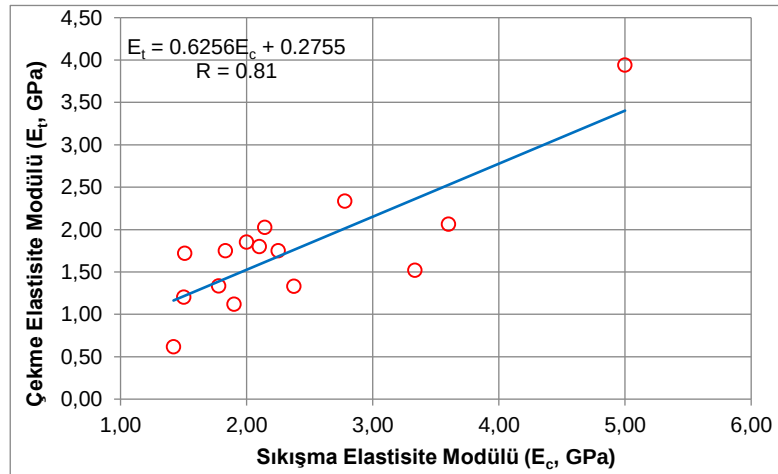
a : Regresyon sabiti değeridir ve $X=0$ olduğunda Y'nin aldığı değerdir.

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

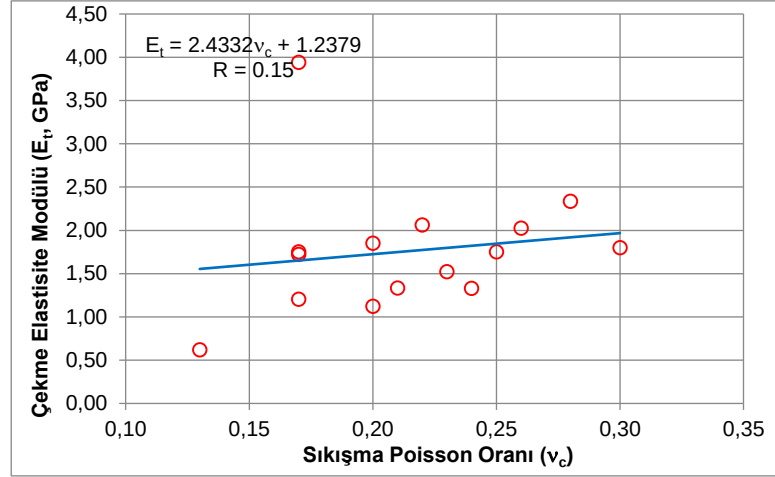
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilerek, E_c , E_t , ν_c ve ν_t değerleri arasındaki ilişkilerin belirlenebilmesi amacıyla basit ve çoklu regresyon yöntemleri kullanılmıştır.

6.6.1. Basit Regresyon Analizleri

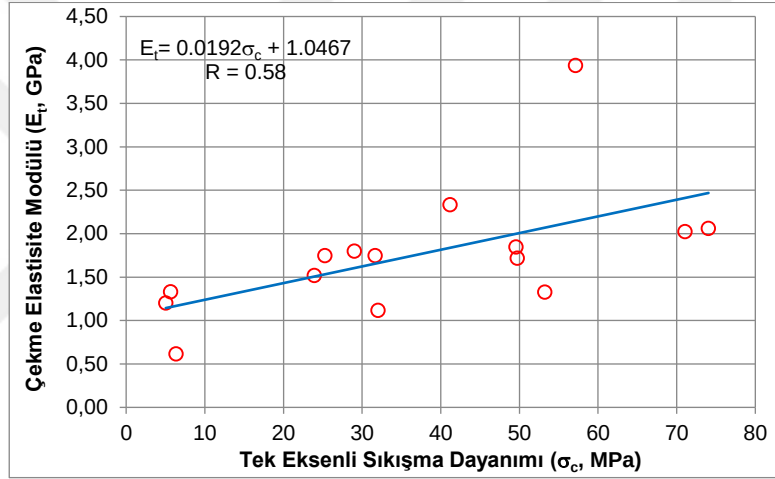
Kaya malzemesinin çekme gerilmeleri altındaki elastisite modülü ve Poisson oranı (E_t ve ν_t) parametreleri ile diğer parametreler (E_c , ν_c ve σ_c) arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılabilmesi için gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında, laboratuvar deneylerine ait sonuçlar basit regresyon analizleri ile değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde bağımlı değişken olarak E_t ve ν_t , bağımsız değişken olarak da E_c , ν_c ve σ_c parametreleri kullanılmıştır. Gruplara ait örnek sayısı az olduğu için her bir grup ayrı olarak analiz edilmemiş, tüm gruplara ait değerler birlikte değerlendirilmiştir. Yapılan basit regresyon analizleri sonucunda elde edilen ($E_t - E_c$), ($E_t - \nu_c$), ($E_t - \sigma_c$), ($\nu_t - E_c$), ($\nu_t - \nu_c$) ve ($\nu_t - \sigma_c$) parametre çiftlerine ait dağılım grafikleri Şekil 6.16-6.21'de, ilişkilere ait eşitlikler ve R değerleri ise Tablo 6.6'da verilmiştir.



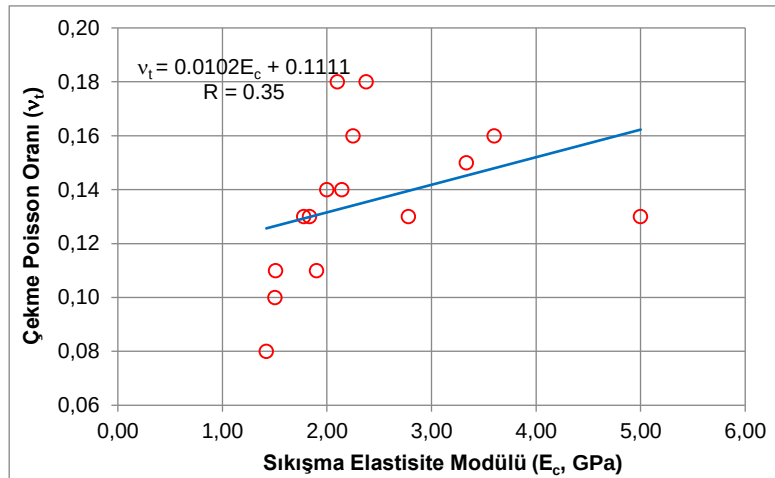
Şekil 6.16. E_t ve E_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği



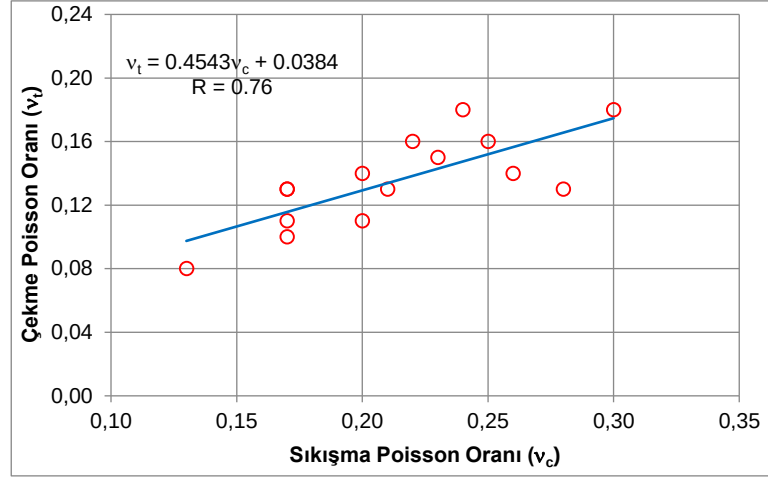
Şekil 6.17. E_t ve ν_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği



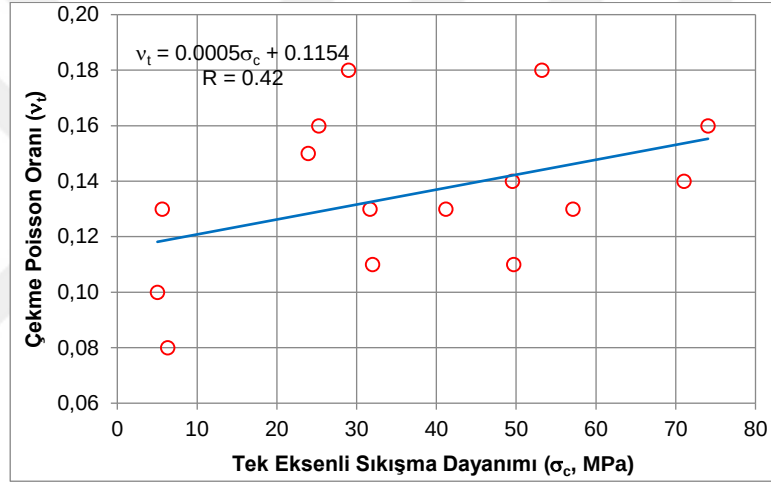
Şekil 6.18. E_t ve σ_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği



Şekil 6.19. ν_t ve E_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği



Şekil 6.20. v_t ve v_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği



Şekil 6.21. v_t ve σ_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait dağılım grafiği

Tablo 6.6. Parametre çiftlerine ait eşitlikler, R değerleri ve ilişkilerin kuvvet dereceleri

Parametre Çiftleri	Eşitlik	R değeri	İlişkinin Kuvvet Derecesi	Eşitlik No
$E_t - E_c$	$E_t = 0.6256E_c + 0.2755$	0.81	Kuvvetli pozitif	(6.1)
$E_t - v_c$	$E_t = 2.4332v_c + 1.2379$	0.15	İlişki yok	(6.2)
$E_t - \sigma_c$	$E_t = 0.0192\sigma_c + 1.0467$	0.58	Zayıf pozitif	(6.3)
$v_t - E_c$	$v_t = 0.0102E_c + 0.1111$	0.35	Çok zayıf pozitif	(6.4)
$v_t - v_c$	$v_t = 0.4543v_c + 0.0384$	0.76	Kuvvetli pozitif	(6.5)
$v_t - \sigma_c$	$v_t = 0.0005\sigma_c + 0.1154$	0.42	Çok zayıf pozitif	(6.6)

Tablo 6.6’da verilen basit regresyon analizlerine ait sonuçlara göre; en kuvvetli ilişkiler ($E_t - E_c$) ve ($v_t - v_c$) parametre çiftleri arasındadır. Bu ilişkiler kuvvetli pozitifdir ve R değerleri ise

sırasıyla 0.81 ve 0.76'dır. ($E_t - \sigma_c$) arasındaki ilişki zayıf pozitif, ($v_t - E_c$) ve ($v_t - \sigma_c$) çiftleri arasındaki ilişkiler çok zayıf pozitifdir. ($E_t - v_c$) arasında ise herhangi bir ilişki yoktur.

Bu analiz sonuçları, kaya malzemesinin E_t ve v_t parametreleri ile E_c ve v_c parametreleri arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ve sıkışma altında belirlenen E_c ve v_c değerlerini kullanarak E_t ve v_t değerlerinin tahmin edilebileceğini göstermektedir.

6.6.2. Çoklu Regresyon Analizleri

Kaya malzemesinin E_t ve v_t parametreleri ile diğer parametreler arasındaki ilişkilerin incelendiği çoklu regresyon analizleri, iki ve üç bağımsız değişkenli olmak üzere ve %95 anlamlılık düzeyinde iki şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, bağımlı değişken olarak E_t parametresi, bağımsız değişkenler olarak da E_c ve v_c parametreleri seçilerek analiz gerçekleştirilmiş, daha sonra değişken parametrelere σ_c parametresi de eklenerek üç bağımsız değişkenli çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Bu analizlere ait istatistiksel değerler Tablo 6.7 ve 6.8'de verilmiştir.

Tablo 6.7. E_t , E_c ve v_c parametreleri kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizine ait çıktılar

Parametreler	Katsayı	Standart Hata	t-Değeri	Anlamlılık Seviyesi (%95)
Sabit Değer	0.1468	0.6159	0.2383	1.4887
Bağımsız Değişkenler				
Sıkışma Elastisite Modülü (E_c , GPa)	0.6211	0.1297	4.7867	0.9038
Sıkışma Poisson Oranı (v_c)	0.6533	2.6487	0.2467	6.4243
Korelasyon Katsayısı (R)	0.82			

Tablo 6.8. E_t , E_c , v_c ve σ_c parametreleri kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizine ait çıktılar

Parametreler	Katsayı	Standart Hata	t-Değeri	Anlamlılık Seviyesi (%95)
Sabit Değer	0.2141	0.6090	0.3516	1.5544
Bağımsız Değişkenler				
Sıkışma Elastisite Modülü (E_c , GPa)	0.5390	0.1455	3.7041	0.8593
Sıkışma Poisson Oranı (v_c)	-0.0785	2.6805	-0.0293	5.8212
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c , GPa)	0.0077	0.0065	1.1764	0.0212
Korelasyon Katsayısı (R)	0.84			

Tablo 6.7’de sonuçları verilen çoklu regresyon analizine göre, kaya malzemesinin E_t parametresi ile E_c ve v_c parametreleri arasındaki ilişki kuvvetli ve pozitifdir. Bu ilişkinin R değeri ise 0.82’dir. Analiz çıktılarına göre ilişkiyi tanımlayan eşitlik ise aşağıdaki gibidir.

$$E_t = 0.6211E_c - 0.6533v_c + 0.1468 \quad (6.7)$$

σ_c parametresinin eklenerek bağımsız değişken sayısının üç olması durumunda yapılan çoklu regresyon analizi sonuçlarına (Tablo 6.8) göre de E_t parametresi ile diğer parametreler arasında kuvvetli pozitif bir ilişki olduğu belirlenmiştir. İlişkinin R değeri ise 0.84’tür ve iki bağımsız değişkenli analizden elde edilen R değerinden daha büyüktür. Bu ilişkiyi tanımlayan eşitlik ise aşağıda verilmiştir.

$$E_t = 0.5390E_c - 0.0785v_c + 0.0077\sigma_c + 0.2141 \quad (6.8)$$

Kaya malzemesinin v_t parametresi ile diğer parametreler arasındaki ilişkileri belirlemek için yapılan çoklu regresyon analizlerinde de bağımlı değişken olarak v_t parametresi seçilmiş ve ilk aşamada bağımsız değişken olarak E_c ve v_c parametreleri kullanılarak analizler yapılmıştır. Daha sonra bağımsız değişkenlere σ_c parametresi de eklenerek üç bağımsız değişkenli çoklu regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlere ait sonuçlar Tablo 6.9 ve 6.10’da verilmiştir.

Tablo 6.9. v_t , E_c ve v_c parametreleri kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizine ait çıktılar

Parametreler	Katsayı	Standart Hata	t-Değeri	Anlamlılık Seviyesi (%95)
Sabit Değer	0.0257	0.0243	1.0557	0.0787
Bağımsız Değişkenler				
Sıkışma Elastisite Modülü (E_c , GPa)	0.0073	0.0051	1.4154	0.0184
Sıkışma Poisson Oranı (v_c)	0.4335	0.1046	4.1433	0.6614
Korelasyon Katsayısı (R)	0.80			

Tablo 6.10. v_t , E_c , v_c ve σ_c parametreleri kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizine ait çıktılar

Parametreler	Katsayı	Standart Hata	t-Değeri	Anlamlılık Seviyesi (%95)
Sabit Değer	0.0273	0.0250	1.0942	0.0823
Bağımsız Değişkenler				
Sıkışma Elastisite Modülü (E_c , GPa)	0.0053	0.0060	0.8803	0.0184
Sıkışma Poisson Oranı (v_c)	0.4156	0.1099	3.7812	0.6576
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c , GPa)	0.0002	0.0003	0.6996	0.0008
Korelasyon Katsayısı (R)	0.81			

Kaya malzemesinin v_t parametresi ile E_c ve v_c parametreleri arasındaki ilişkinin analizi sonucunda elde edilen ve Tablo 6.9’da verilen sonuçlar incelendiğinde, v_t parametresi diğer parametreler arasında R değeri 0.80 olan, kuvvetli pozitif bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Bu ilişkiyi tanımlayan eşitlik ise şu şekildedir;

$$v_t = 0.0073E_c - 0.4335v_c + 0.0257 \quad (6.9)$$

Bağımsız değişkenlere σ_c parametresinin eklenerek bağımsız değişken sayısının üç olarak seçilmesi durumunda yapılan çoklu regresyon analizi sonuçlarına göre (Tablo 6.10), v_t parametresi ile diğer parametreler arasındaki ilişki yine kuvvetli ve pozitifdir. İlişkinin R değeri ise 0.81 olarak belirlenmiştir. Bu ilişkiyi tanımlayan eşitlik ise aşağıda verilmiştir.

$$v_t = 0.0053E_c - 0.4156v_c + 0.0002\sigma_c + 0.0273 \quad (6.10)$$

7. SONUÇLAR

Kaya malzemesinin sıkışma ve çekme gerilmeleri altındaki elastisite modülleri (E_c ve E_t) ile Poisson oranları (ν_c ve ν_t) değerleri arasındaki ilişkilerin incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. A Grubu örneklerde E_c değerleri 1.420-1.778 GPa arasında, ν_c değerleri ise 0.13-0.21 arasında değişirken, E_t değerleri 0.617-1.333 GPa, ν_t değerleri ise 0.08-0.13 değerleri arasındadır. Bu gruptaki örneklerin ortalama E_c ve ν_c değerleri 1.567 GPa ve 0.17; E_t ve ν_t değerleri ise 1.051 GPa ve 0.10'dur. Örneklerle ait değerler oranlandığında; E_c değerlerinin E_t değerlerinden %25-56; ν_c değerlerinin ise ν_t değerlerinden %38-41 oranları arasında daha büyük olduğu belirlenmiştir.
2. B Grubu örneklerin E_c değerleri 1.510-3.600 GPa, ν_c değerleri 0.17-0.28 değerleri arasında değişirken; E_t değerleri 1.720-2.335 GPa, ν_t değerleri ise 0.11-0.16 değerleri arasındadır. Örneklerin ortalama E_c ve ν_c değerleri 2.344 GPa ve 0.208; E_t ve ν_t değerleri ise 1.944 GPa ve 0.134'tür. Bu gruptaki örneklerde, B-4 nolu örnek hariç, E_c değerleri E_t değerlerinden %5-43 oranında, ν_c değerleri ise ν_t değerlerinden %27-54 oranında daha büyüktür.
3. C Grubu örneklerde E_c ve ν_c değerleri 2.250-5.000 GPa ve 0.17-0.25 değerleri arasında değişmektedir. Örneklerin E_t ve ν_t değerleri ise 1.520-3.940 GPa ve 0.13-0.16 arasındadır. Ortalama değerlere bakıldığında; ortalama E_c değeri 3.528 GPa ve ortalama ν_c değeri 0.217 iken, ortalama değerler E_t için 2.403 GPa, ν_t için 0.147 olarak bulunmuştur. Örneklerin E_c değerleri E_t değerlerinden %21-54 oranında, ν_c değerleri ise ν_t değerlerinden %24-35 oranında daha büyüktür.
4. D grubundaki örneklerin E_c değerleri 1.900-2.375 GPa, ν_c değerleri ise 0.20-0.30 değerleri arasında değişirken; E_t değerleri 1.120-2.025 GPa, ν_t değerleri ise 0.11-0.18 arasındadır. Ortalama E_c ve ν_c değerleri 2.130 GPa ve 0.25; ortalama E_t ve ν_t değerleri ise 1.569 GPa ve 0.15 olarak belirlenmiştir. Bu grupta da E_c değerleri E_t değerlerinden %5-44 oranında, ν_c değerleri ise ν_t değerlerinden %25-45 oranında daha yüksektir.
5. Tüm grupların birlikte değerlendirildiği istatistiksel analiz sonuçlarına göre; maksimum E_c değeri 5.000 GPa, minimum E_c değeri ise 1.420 GPa iken, maksimum ν_c değeri 0.30, minimum ν_c değeri ise 0.13'tür. Örneklerde maksimum E_t değeri 3.940 GPa, minimum E_t değeri ise 0.617 GPa iken, maksimum ν_t değeri 0.18, minimum ν_t değeri ise 0.08 olarak belirlenmiştir. Örneklerin ortalama E_c ve E_t değerleri 2.368 GPa ve 1.757 GPa; ortalama ν_c ve ν_t değerleri ise 0.213 ve 0.135'tir. Bu değerlere göre E_c değeri E_t değerinden %26 oranında, ν_c değerleri ise ν_t değerinden %37 daha büyüktür.
6. Bu çalışmadan elde edilen istatistiksel sonuçlar, bu konudaki en önemli çalışma olan Fuenkajorn ve Klanphumeesri [28] tarafından yapılmış olan çalışmanın sonuçları ile uyum

göstermektedir. Araştırmacılar çalışmalarında kullandıkları zayıf çimentolu kumtaşılarının E_t değerlerinin, E_c değerlerinin yaklaşık %40'ı kadar olduğunu, daha iyi çimentolanmış mermer ve kireçtaşlarında ise E_t değerinin E_c değerinin yaklaşık %70-80'i kadar olduğunu belirtmektedirler. Bu çalışmada ise ortalama E_t değeri E_c değerinin % 74'ü, v_t değerleri ise v_c değerinin %63'ü kadardır.

7. Yapılan basit regresyon analizlerine ait sonuçlara göre; en kuvvetli ilişkiler ($E_t - E_c$) ile ($v_t - v_c$) parametreleri arasındadır ve ilişkiler kuvvetli pozitifdir. Bu ilişkilere ait korelasyon katsayıları (R) ise 0.81 ve 0.76 olarak belirlenmiştir.

8. $E_t - \sigma_c$ arasındaki ilişki zayıf pozitif, $v_t - E_c$ ve $v_t - \sigma_c$ arasındaki ilişkiler çok zayıf pozitifdir. Analizlere göre $E_t - v_c$ arasında ise herhangi anlamlı bir ilişki yoktur.

9. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen çoklu regresyon analizlerine ait sonuçlara göre; kaya malzemesinin E_t parametresi ile E_c ve v_c parametreleri arasında R değeri 0.82 olan, kuvvetli pozitif bir ilişki bulunmaktadır. σ_c parametresinin üçüncü bağımsız değişken olarak analize eklenmesi durumunda, E_t parametresi ile diğer parametreler arasında ilişki yine kuvvetli pozitifdir. Ancak, ilişkiye ait R değeri 0.84'e yükselmiştir.

10. v_t parametresi ile E_c ve v_c parametreleri arasındaki ilişkiye ait çoklu regresyon analizi sonucuna göre; v_t parametresi ile diğer parametreler arasında R değeri 0.80 olan, kuvvetli pozitif bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlere σ_c parametresinin eklenerek analizin yeniden yapılması durumunda ortaya çıkan durum önceki durumdan pek farklı değildir. v_t parametresi ile E_c , v_c ve σ_c parametreleri arasındaki ilişki yine kuvvetli pozitifdir ve R değerinde ise önemli bir artış olmamış ve 0.81 olarak belirlenmiştir.

11. Basit ve çoklu regresyon analizlerine ait sonuçları R değerleri açısından karşılaştırıldığında; çoklu regresyon analizlerinden elde edilen R değerlerinin basit regresyon analizlerinden elde edilenlere göre daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, çoklu regresyon analizlerine ait eşitliklerin daha yüksek hesaplama kapasitesine sahip olduğunu ifade etmektedir.

12. E_t parametresinin tahmininde kullanılabilecek, iyi hesaplama kapasitesine sahip eşitlik, bağımsız değişken olarak E_c , v_c ve σ_c parametrelerinin kullanıldığı eşitliktir ve bu ilişkinin R değeri 0.84'tür.

13. v_t parametresinin tahmininde kullanılabilecek, en iyi hesaplama kapasitesine sahip eşitlik ise yine E_c , v_c ve σ_c parametrelerinin bağımsız değişken olarak kullanıldığı eşitliktir. Bu ilişkinin R değeri ise 0.81 olarak belirlenmiştir.

14. Bu çalışma sonucunda önerilen ampirik eşitlikler, orta ve düşük dayanıma sahip zayıf kaya malzemesinin E_t ve v_t değerlerini tahmin etmek için kullanılabilir.

ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve istatistiksel değerlendirmeler ile ortaya çıkan sonuçlar, jeoteknik tasarımlarda kaya malzemesinin çekme gerilmesi altındaki E_t ve v_t değerlerine ihtiyaç duyulması durumunda, bu değerler yerine kaya malzemesinin E_c ve v_c değerlerinin kullanımının sağlıklı olamayacağını göstermektedir. E_t ve v_t değerlerinin doğrudan çekme deneyi yapılarak belirlenmesinin zor bir deneysel çalışma olduğu dikkate alındığında, daha sağlıklı bir tasarım için, bu çalışmada elde edilen eşitlikler kullanılarak kaya malzemesinin E_t ve v_t değerleri tahmin edilebilir. Ancak, bu durumda dikkate alınması gereken en önemli nokta, bu çalışmada önerilen eşitliklerin bazı sınırlamalara sahip olduğudur. Nitekim, bu ampirik eşitlikler σ_c değeri 74 MPa'dan daha düşük dayanıma sahip kaya malzemelerinin E_t ve v_t değerlerini tahmin etmede kullanılmalıdır. Ayrıca, önerilen eşitliklerden elde edilen değerlerin tahmini değerler olduğu ve gerçekte elde edilecek değerlere yakın olsa bile tam olarak bu değerleri yansıtmayacağı unutulmamalıdır.

Tasarımcıların güvenilir ve ekonomik bir tasarım için hangi proje türünde hangi tip E ve v değerlerini kullanması gerektiğini bilmesi önemlidir. Nitekim her tür proje için girdi parametresi olarak E_c ve v_c değerlerinin kullanılması yaygın olarak yapılan bir hatadır. Bu hatanın ortadan kaldırılabilmesi, proje özellikleri dikkate alınarak projede hangi tür gerilmenin etkin olacağı dikkate alınarak E ve v değerlerinin buna göre belirlenmesi ve tasarımın yapılması ile mümkündür. Özellikle, şev güçlendirme çalışmalarında, yeraltı kazılarındaki destekleme çalışmalarında ve patlatma tasarımlarında E_c ve v_c değerleri yerine E_t ve v_t değerlerinin kullanılması gerektiği unutulmamalıdır.

Bu çalışmadan elde edilen veriler, bu konuda veri tabanı oluşturması açısından önem taşımaktadır. Hem farklı litoloji, hem de daha fazla örnek sayısı ile yapılacak yeni çalışmalar ile bu veri tabanı daha da zenginleştirilmeli ve sınırlamaları olmayan veya daha az olan ampirik eşitlikler önerilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Deere, D.U. ve Miller, R.P. (1966). Engineering Classification And Index Properties For Intact Rock, Technical Reptort No AFWL-65-116, Air Force Base, New Mexico
- [2] Eissa, E.A. ve Kazi, A. (1988). Relation between Static and Dynamic Young's Moduli of Rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, cilt 25, ss. 479-482
- [3] Sachpazis, C.I. (1990). Correlating Schmidt Hardness with Compressive Strength and Young's Modulus of Carbonate Rocks, *Bulletin of International Association Engineering Geology*, cilt 42, ss. 75-83
- [4] Ramamurty, T. (1993). Strength and Modulus Responses of Anisotropic Rocks, *Compherensive Rock Engineering*, cilt 1, ss. 313-329
- [5] Christaras, B., Auger, F., Mosse, E., (1994). Determination of the Moduli of Elasticity of Rocks. Comparison of the Ultrasonic Velocity and Mechanical Resonance Frequency Methods with Direct Staticmethods, *Material and Structure*, cilt 27, ss. 222-228
- [6] Amadei, B. (1998). Determination of Deformability and Tensile Strength of Anisotropic Rock using Brezilian Tests, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 35, ss. 43-61
- [7] 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*, cilt 35, ss. 43-61
- [8] Palchik, V. (1999). Influence of Porosity and Elastic Modulus on Uniaxial Compressive Strength in Soft Brittle Porous Sandstones, *Rock Mechanic and Rock Engineering*, cilt 32(4), ss. 303-309
- [9] Hongkui, G., Yingsong, L., Shanzhou, M., Lili, S. (2001). Difference of Rock Elastic Parameters under Static and Dynamic Loading, *Frontiers of Rock Mechanics and Sustainable Development in the 21st Century, Proceeding of the 2001 ISRM International Symposium*, Beijing
- [10] Kumar, A., Jayakumar, T., Raj, B., Ray, K.K. (2003). Correlation between ultrasonic shear wave velocity and Poisson's ratio for isotropic solid materials, *Acta Mater*, cilt 51(8), ss. 2417-2426
- [11] Al-Shayea, NA. (2004). Effects of Testing Methods and Conditions on the Elastic Properties of Limestone Rock, *Engineering Geology*, cilt 74, ss. 139-156
- [12] Ciccotti, M. ve Mulargia, F. (2004). Differences between Static and Dynamic Elastic Moduli of A Typical Seismogenic Rock, *Geophysical Journal International*, cilt 157, ss. 474-477
- [13] Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Kasapoğlu, K.E., Tuncay, E., Zorlu, K. (2004). An Empirical Equation for Estimating Elasticity Modulus of Intack Rock, *ROCKMEC'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium*, Sivas
- [14] Sönmez, H., Tuncay, E., Gökçeoğlu, C. (2004). Models to Predict the Uniaxial Compressive Strength and the Modulus of Elasticity for Ankara Agglomerate, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 41, ss. 717-729
- [15] Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, H.A., Kayabaşı, A. (2006). Estimation of Rock Modulus: For İntact Rocks with an Artificial Neural Network and for Rock Masses with a new Empirical Equation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 43(2), ss. 224-235

- [16] Chang, C., Zoback, D.M., Khaksar, A. (2006). Empirical Relations between Rock Strength and Physical Properties in Sedimentary Rocks, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, cilt 51, ss. 223-237
- [17] Garagon, M. (2007). *Adana Baseni Tersiyer Birimlerinden Seçilmiş Kumtaşlarının Yönlere Bağlı Dayanım ve Deformasyon Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [18] Gercek, H. (2007). Poisson's Ratio Values for Rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, cilt 44(1), ss. 1-13
- [19] Ocak, İ. (2008) Tek Eksenli Basınç Dayanımını Kullanarak Kaya Malzemesinin Elastisite Modülünün Tahmini, *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, cilt 21(2), ss. 91-97
- [20] Zhang, H., Kang, Y., Chen, J., Han, L., Wnag, Y. (2007). Experimental Study on Mechanical Properties of Dense Sandstone under Different Confining Pressures, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, cilt 26(2), ss. 4227-4231
- [21] 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 and Mining Sciences*, cilt 46(3), ss. 568-576
- [22] Atıcı, Ü. ve Yünsel, T.Y. (2011). Granitlerde Kuru ve Suya Doygun Numuneler İçin Dinamik ve Statik Elastisite Modülünün Değerlendirilmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Dergisi*, cilt 26(1), ss. 1-10
- [23] Martinez-Martinez, J., Benavente, D., Garci'a-del-Cura, M.A. (2012). Comparison of the Static and Dynamic Elastic Modulus in Carbonate Rocks, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, cilt 71, ss. 263-268
- [24] Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A. (2014). Relationship between Static and Dynamic Elastic Modulus of Calcarene Heated at Different Temperatures: The San Julian's Stone, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, cilt 73(3), ss. 791-799
- [25] Fei, W., Huiyuan, B., Jun, Y., Yonghao, Z. (2016). Correlation of dynamic and Static Elastic Parameters of Rock, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, cilt 21(4), ss. 1551-1560
- [26] Akkaya, İ., Özvan, A., Tapan, M., Bor, M., Özvan, E.E. (2017). Farklı Kayalarda Ultrasonik Yöntem ile Belirlenen Poisson Oranının Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerle İlişkisinin Belirlenmesi, *MÜHJEO'2017: Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu*, Adana
- [27] Kayabaşı, A. (2019). Kaya Modülleri Arasında Farklılıklar: Deriner/Artvin ve Ermenek/Karaman Barajlarından Örnek Çalışmalar, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, cilt 43, ss. 233-258
- [28] Fuenkajorn, K. ve Klanphumeesri, S. (2011). Laboratory Determination of Direct Tensile Strength and Deformability of Intact Rocks, *Geotechnical Testing Journal*, cilt 34(1), ss. 97-102
- [29] Clark, G.B. (1966). Deformation Moduli of Rocks, *ASTM STP402*, ss. 133-174
- [30] Arıoğlu, E. ve Tokgöz, N. (1992) Tortul Kayaçalarda Elastisite Modülü ile Basınç Dayanımı Arasında Çıkarılan Regresyon İfadeleri, *Kaya Mekaniği Bülteni*, cilt 7, ss. 5-15
- [31] Ocak, İ. (2008). Estimating the Modulus of Elasticity of the Rock Material from Compressive Strength and Unit Weight, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, cilt 108, ss. 621-626

- [32] Demirbağ, F.M. (2021). *Zayıf Kaya Malzemesinin Doğrudan ve Dolaylı Çekme Dayanımları Arasındaki İlişkiler*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [33] Hudson, J.A. ve Harrison, J.P. (2000). *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*, Elsevier Science, Oxford
- [34] Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*, Fourth Edition, Wiley-Blackwell Publishing, New Jersey
- [35] Hatcher, R.D. (1995). *Structural Geology: Principles, Concepts, and Problems*, 2nd Edition, Macmillan Publication Cooperation, London
- [36] Timoshenko, S.P. (1983). *History of Strength of Materials*, Dover Publications, New York
- [37] Love, A.E.H. (1944). *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, 4th edition, Dover Publications, New York
- [38] Bell, J.F. (1984). The Experimental Foundations of Solid Mechanics, *Encyclopedia of physics- VI*, Springer Publications, Berlin
- [39] Gürocak, Z. (2018). Kaya ve Zemin Mekaniği İlkeleri Ders Notları
- [40] Akkuş, M.F. (1971). Darende-Balaban Havzasının (Malatya E-SE Anadolu) Jeolojik ve Stratigrafik İncelenmesi, *MTA Dergisi*, cilt 76, ss. 1-60
- [41] Bozkaya, O. ve Yalçın, H. (1991). Hekimhan Doğu ve Güney Kesimlerindeki Kretase-Tersiyer Yaşlı Sedimenter Yaşlı Birimlerin Minerolojisi ve Jeokimyası, *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, cilt 6, ss. 234-252
- [42] Ercan, T. ve Asutay, H.J. (1993). Malatya-Elazığ-Tunceli-Bingöl-Diyarbakır Dolaylarındaki Neojen Kuvaterner Yaşlı Volkanitlerin Petrolojisi, *A.Suat Erk Jeoloji Sempozyumu*, Ankara
- [43] Gürocak, Z. (1999). *Boztepe (Malatya) Barajı Eksen Yerindeki Kayaçların Jeomekanik Özelliklerinin ve Ayrışma Derecelerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [44] Örcen, S. (1986). Medik- Ebreme (KB Malatya) Dolayının Biyostratigrafisi ve Paleontolojisi, *MTA Dergisi*, cilt 18, ss. 1-37
- [45] Sevimli, U.İ. (2009). *Yazıhan (Malatya) Batısının Tektono-Stratigrafisi*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [46] Sevimli, U.İ., Zorlu, K., Bağcı, U. (2017). Yazıhan (Malatya) Dolayının Neotektonik Özellikleri Volkaniklerin Petrografisi ve Jeokimyası, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 20(4), ss. 143-157
- [47] Naz, H. (1979). Elazığ-Palu Dolayının Jeolojisi, TPAO raporu, Ankara
- [48] Bingöl, F.A. (1984). Geology of the Elazığ Area in the Eastern Taurus Region, *The International Symposium on The Geology of The Taurus*, Ankara
- [49] Turan, M. ve Bingöl, A.F. (1991). Kovancılar-Baskil (Elazığ) Arası Bölgenin Tektonostratigrafik Özellikleri, *Çukurova Üniversitesi Ahmet Acar Sempozyumu*, Adana
- [50] Altunbey, M. (1996). *Tuzbaşı-Kanatburun-Ayazpınar (Pertek/Tunceli) Yöresindeki Demir Cevherleşmelerinin Jeolojisi ve Kökeni*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

- [51] Gürocak, Z. ve Kürüm, E.B. (2020). Elazığ Bölgesinin Kırmataş Potansiyeli ve Kullanım Alanları, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, cilt 10(4), ss. 1007-1026
- [52] ISRM, (2007). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, Ankara
- [53] Hoek, E. (1964) Fracture of Anisotropic Rock, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, cilt 64(10), ss. 510-518
- [54] Gorski, B. (1993). *Tensile Testing Apparatus*, United States Patent
- [55] Brace, W.F. (1964). *Brittle Fracture of Rocks, State of Stress in the Earth's Crust*, American Elsevier, New York
- [56] ASTM D2936-08, (2008). Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, *Annual Book of ASTM Standards*, cilt 04.08, ss. 316–318
- [57] Klanphumeesri, S. (2010). *Direct Tension Testing of Rock Specimens*, Master of Engineering Thesis, Suranaree University of Technology
- [58] Perras, M.A. ve Diederichs, M.S. (2014). A Review of The Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing, *Geotechnical and Geological Engineering*, cilt 32(2), ss. 525-546
- [59] Temur, S. (2003). *Jeolojide Veri Analizleri*, 2. Basım, Çizgi Kitapevi, Konya

ÖZGEÇMİŞ

Alperen CANPOLAT

[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]

AKADEMİK FAALİYETLER

Projeler:

1. MF.20.24. Sıkışma ve Çekme Gerilmesi Altındaki Zayıf Kaya Malzemesinin Elastik Özellikleri Arasındaki İlişkiler