

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAYA MALZEMESİNİN NOKTA YÜKÜ DAYANIM İNDEKSİ, TEK EKSENLİ  
BASINÇ DAYANIMI VE DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EMRE GÜNAY**

**NİSAN 2017**

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAYA MALZEMESİNİN NOKTA YÜKÜ DAYANIM İNDEKSİ, TEK EKSENLİ  
BASINÇ DAYANIMI VE DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emre GÜNAY**

**DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Özgür YILMAZ**

**ZONGULDAK**

**Nisan 2017**

**KABUL:**

Emre GÜNAY tarafından hazırlanan “Kaya Malzemesinin Nokta Yüğü Dayanım İndeksi, Tek Eksenli Basınç Dayanımı ve Dolaylı Çekme Dayanımı Arasındaki İlişkinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 21/04/2017

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Özgür YILMAZ

Bülent Ecevit Üniversitesi, ZMYO, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü

**Üye:** Doç. Dr. G. Gülsev UYAR

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Doç. Dr. Melih GENİŞ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

---

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylım.

.../.../20...

  
Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



Emre GÜNAY

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **KAYA MALZEMESİNİN NOKTA YÜKÜ DAYANIM İNDEKSİ, TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI VE DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Emre GÜNAY**

**Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Özgür YILMAZ**

**Nisan 2017, 105 sayfa.**

Gelişen bilim ve teknolojinin etkisiyle, yapıların önceden planlama ve projelendirilmesi birçok mühendislik alanının bir araya gelip sistemli düşünmesini ve ekip çalışmasını gerektirmektedir. Bu birlikte çalışma en uygun ve en ekonomik projeyi ortaya çıkarmaktadır. Yeraltı ve yerüstü yapıları için en uygun ve en ekonomik projeyi ortaya çıkarmak için bu yapıların mekanik özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Bu mekanik parametrelerin en önemli tek eksenli basınç dayanımıdır.

Bu çalışmada; öncelikle yol göstermesi, karşılaştırma ve konunun önemini anlatmak için daha önce yapılmış ve literatürde kabul görmüş çalışmalara yer verilmiştir. Daha sonra deneylerde kullanılmak üzere çoğunluğu Zonguldak ili ve çevresi olmak üzere Türkiye'nin 14 farklı bölgesinden laboratuvar ortamına getirilen kayaçlar, petrografik olarak sınıflandırılmış ve getirilen bu kayaçlardan hazırlanacak örneklerin hangi standartlarda nasıl hazırlanacağı anlatılmıştır.

## ÖZET (devam ediyor)

Bu tez çalışmasını 2 kısımda incelemek mümkündür. İlk kısımda doğrudan belirlenmesi çok güç, önem isteyen ve zaman alıcı olan tek eksenli basınç dayanımını, nokta yükü dayanım indeksinden tahmin etme çalışmaları yapılmıştır ve tahmin eşitlikleri sunulmuştur. Daha sonra yükleme şekilleri basınç olan dolaylı çekme dayanımı deneyi, nokta yükü dayanım indeksi deneyi ve tek eksenli basınç dayanımı deneyi arasındaki ilişki araştırılmış ve üç deney için aralarındaki ilişkiyi gösteren tahmin eşitlikleri verilmiştir.

İkinci kısımda ise tez kapsamında yapılan 3 deney için yükleme koşullarına göre aralarındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu kapsamda, nokta yükü dayanım indeksi deneyinin geleneksel yolların aksine hidrolik katı yükleme makinesi kullanılarak deformasyon ve yük kontrollü olarak yapılmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi ve dolaylı çekme dayanımı deneyi ise sadece yük kontrollü olarak yapılmıştır. Deformasyon kontrollü olarak yapılan deneylerde yükleme 1,5 mm/dk, yük kontrollü olarak yapılan deneylerde ise yükleme 200 N/sn olarak yapılmıştır. Yükleme koşullarına göre; tek eksenli basınç dayanımı deneyi ile nokta yükü dayanım indeksi deneyi arasındaki ilişkiyi yükleme şeklinin değişmesinin etkilemediği görülmüştür. Fakat dolaylı çekme dayanımı deneyi ile nokta yükü dayanım indeksi deneyi arasında yükleme şeklinin değişmesi farklı sonuçları ortaya çıkarmıştır. İki deney arasında aynı yükleme koşullarında ilişkinin daha yüksek çıktığı görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Nokta yükü dayanım indeksi, tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, deformasyon kontrollü, yük kontrollü

**Bilim Kodu:** 607.01.02

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP AMONG THE POINT LOAD INDEX, UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH AND BRAZILIAN TENSILE STRENGTH OF THE INTACT ROCK**

**Emre GÜNAY**

**Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural Applied Sciences  
Department of Mining Engineering**

**Thesis Advisor: Assist. Prof. Özgür YILMAZ**

**April 2017, 105 pages**

Preplanning and projecting of structures necessitates multidisciplinary work and team work with the advancing science and technology. This multidisciplinary effort brings out the most suitable and economic project. In order to produce the most suitable and economic project for underground and surface structures knowing the mechanical properties of such structures is quite important. The most important of these properties is uniaxial compressive strength.

In this study, studies found in the literature were given to explain the importance of the subject and for guidance and comparison purposes. Then, the rocks obtained from 14 different regions, most from Zonguldak province, were petrographically classified and how these samples are to be prepared were explained.

## **ABSTRACT (continued)**

It is possible to examine this study in two parts. The first part contains predicting uniaxial compressive strength, direct determination of which is troublesome, from the point load index. Then, the relationships between indirect tensile strength test, point load index test and uniaxial compressive strength test whose loading type is pressure were investigated.

In the second part of the study, the relations among the three tests performed within the scope of the study was investigated according to the loading conditions. In this context, point load index test was done by a hydraulic loading machine, on the contrary to conventional methods, with controlling deformation and load. Uniaxial strength and indirect tensile strength tests were conducted only by controlling the load. The loading was chosen as 1.5 mm/min for the deformation controlled tests and 200 N/s for the load controlled tests. According to the loading conditions; it was observed that a change in the type of loading does not change the relationship between the uniaxial strength test and point load index test. However, it was found that there is a higher statistical relationship between the indirect tensile strength test and point load index tests at the same loading conditions.

**Keywords:** Point load index test, uniaxial compressive strength, indirect tensile strength, deformation controlled, load controlled

**Science Code:** 607.01.02



## TEŞEKKÜR

Yazar, tez alıŐmalarına yn veren ok değerli grŐ ve katkılarından dolayı Yrd. Do. Dr. zgr YILMAZ'a (BE Tez Danışmanı); rneklerin toplanması ve hazırlanması sırasındaki yardımlarından dolayı ArŐ. Gör. Ekin KÖKEN (BE), Burçak KARA, Muhammet ÖZTÜRK, Murat UYSAL, Tuncay GEDİK ve Deniz ÇOLAK'a; laboratuvar çalışmaları sırasında aletlerin bakım onarımı için TTK Merkez Atölyesi Müdürlüğü ve çalıŐanlarına; tez jürisi olarak katkılarından dolayı Doç. Dr. Güzin Gülsev UYAR (H) ve Doç. Dr. Melih GENİŞ'e (BE) ve daima maddi manevi destek oldukları için ailesine sonsuz teşekkür borçludur.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 KONUNUN ÖNEMİ.....	1
1.2 TEZİN AMACI .....	2
1.3 TEZİN KAPSAMI.....	3
BÖLÜM 2 KAYA MALZEMESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BİRBİRLERİYLE OLAN KARŞILIKLI İLİŞKİSİ .....	5
BÖLÜM 3 ÖRNEK HAZIRLAMA VE DENEYDE KULLANILAN KAYAÇLARIN SINIFLANDIRILMASI.....	11
3.1 ÖRNEK HAZIRLAMA VE DENEYLERDE KULLANILAN ALETLER.....	11
3.1.1 Örnek Hazırlamada Kullanılan Aletler.....	12
3.1.1.1 Karot Alma Makinası .....	12
3.1.1.2 Taş Kesme Testeresi.....	14
3.1.1.3 Yüzey Düzeltme Frezesi.....	14

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.1.2 Deneylerde Kullanılan Yükleme Makinesi.....	15
3.2 DENEYDE KULLANILAN KAYAÇLARIN SINIFLAMASI.....	18
3.2.1 Magmatik Kayaçlar.....	18
3.2.2 Metamorfik Kayaçlar.....	18
3.2.3 Sedimanter Kayaçlar.....	19
BÖLÜM 4 LABORATUVAR ÇALIŞMALARINI.....	23
4.1 NOKTA YÜKÜ DAYANIM İNDEKSİ.....	23
4.1.1 Deneyin Amacı ve Kullanıldığı Yerler.....	23
4.1.2 Deneyde Kullanılan Araç ve Gereçler.....	24
4.1.3 Deneyin Yapılışı.....	25
4.1.3.1 Çapsal Deney.....	25
4.1.3.2 Eksenel Deney.....	26
4.1.4 Hesaplamalar.....	28
4.1.5 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	29
4.1.6 Nokta Yüğü Dayanım İndeksi Deneyi Laboratuvar Çalışmaları.....	30
4.2 TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI DENEYİ.....	34
4.2.1 Deneyin Amacı ve Kullanım Alanları.....	34
4.2.2 Deneyde Kullanılan Araç-Gereçler.....	35
4.2.3 Deneyin Yapılışı.....	36
4.2.4 Hesaplamalar.....	39
4.2.5 Sonuç ve Yorumlar.....	40
4.2.6 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi Laboratuvar Çalışmaları.....	43
4.3 DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI (BRAZILIAN) DENEYİ.....	47
4.3.1 Deneyin Amacı ve Kullanım Alanları.....	49
4.3.2 Deneyde Kullanılan Araç-Gereçler.....	49
4.3.3 Deneyin Yapılışı.....	50
4.3.4 Hesaplamalar.....	53
4.3.5 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	54

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.3.6 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi Laboratuvar Çalışmaları .....	55
<b>BÖLÜM 5 GÖZ ÖNÜNDE BULUNDURULAN DENEYLERİN İSTATİSTİKSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>	<b>59</b>
5.1 TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI İLE NOKTA YÜKÜ DAYANIM İNDEKSİ ARASINDAKİ İLİŞKİ.....	60
5.2 NOKTA YÜKÜ DAYANIM İNDEKSİ VE DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI ARASINDAKİ İLİŞKİ.....	68
5.3 DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI VE TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI ARASINDAKİ İLİŞKİ.....	72
5.4 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	73
<b>BÖLÜM 6 SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>77</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>81</b>
<b>BİBLİYOGRAFYA .....</b>	<b>85</b>
<b>EK AÇIKLAMALAR A .....</b>	<b>87</b>
<b>EK AÇIKLAMALAR B .....</b>	<b>95</b>
<b>EK AÇIKLAMALAR C .....</b>	<b>99</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>105</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Doğrusal ilişki modeli ve regresyon katsayıları. ....	7
3.1 Karot alma makinesi ile karot örneklerinin alınması.....	13
3.2 Taş Kesme makinasının önden (A) ve yandan görünüşü (B). ....	14
3.3 Yüzey düzeltme frezesi kullanımı .....	15
3.4 Katı yükleme makinası. ....	16
3.5 Yumuşak yükleme aleti çalışma prensibi grafiği.....	17
3.6 Katı yükleme aleti çalışma prensibi grafiği. ....	17
3.7 Deneyde kullanılan kayaçların litolojik yüzdesel dağılım.....	21
3.8 Alınan kayaçların Türkiye haritası üzerinde gösterilmesi. ....	22
4.1 Hidrolik prese yerleştirilmiş konik yükleme uçları. ....	24
4.2 Nokta yükü dayanım indeksi deneyinde kullanılan uçların şematik gösterimi. ....	25
4.3 Laboratuvar ortamında yapılan çapsal nokta yükü deneyi. ....	26
4.4 Laboratuvar ortamında yapılan eksenel nokta yükü deneyi. ....	27
4.5 Çapsal (a) ve eksenel (b) örnek şekilleri.....	28
4.6 Tezde kapsamında kullanılan eksenel nokta yükü dayanım indeksi deney örnekleri. ....	31
4.7 TTK merkez atölyesinde nokta yükü dayanım indeksi için hazırlanan yükleme başlıkları.....	31
4.8 Nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçlarının grafik gösterimi. ....	33
4.9 Eksenel yüklenen nokta yükü örneklerinin kırılması.....	34
4.10 Tek eksenli basınç deneyi yükleme düzeneğinin şematik gösterimi. ....	35
4.11 Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde örneğin yenilmesinin şematik gösterimi.....	38
4.12 Deneyin Yapılışı. ....	38
4.13 Bazı kaya dayanımı sınıflandırmalarının karşılaştırılması .....	41
4.14 Deneyde karşılaşılan tipik kırılma şekillerinden örnek. ....	43
4.15 Tek eksenli basınç dayanımı deney örnekleri.....	43
4.16 Tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçlarının grafik gösterimi.....	46
4.17 Tek eksenli basınç dayanımı deney sonucunda farklı kayaçlarda gözlenen yenilme tipleri.....	47

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.18 Dolaylı çekme dayanımı deneyi yükleme başlıkları.....	50
4.19 Deneyde kullanılan örneklerin görünümü .....	51
4.20 Örneğin ve yükleme çenelerinin hidrolik prese yerleştirilmesi.....	52
4.21 Dolaylı çekme dayanımı deneyindeki yükleme anında örneğin ilk kırılma anının tespit edilmesi. ....	53
4.22 Dolaylı çekme dayanımı deney sonuçlarının grafik gösterimi .....	55
4.23 Dolaylı çekme dayanımı deney sonucunda örneklerin kırılmış halleri .....	57
5.1 Sedimanter kayalar için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki. ....	61
5.2 Kireçtaşları için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki.....	62
5.3 Sedimanter olmayan kayalar için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki.....	63
5.4 Göz önünde bulundurulan tüm kayalar için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki.....	64
5.5 Deformasyon kontrollü (1,5 mm/dk) nokta yükü dayanım indeksi ile yük kontrollü (0,5 MPa/sn) tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	66
5.6 Yük kontrollü (200 N/sn) nokta yükü dayanım indeksi ile yük kontrollü (0,5 MPa/sn) tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	67
5.7 Göz önünde bulundurulan tüm kayalar için dolaylı çekme dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki.....	69
5.8 Deformasyon kontrollü (1,5 mm/dk) nokta yükü dayanım indeksi ile yük kontrollü (200 N/sn) dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki. ....	70
5.9 Yük kontrollü (200 N/sn) nokta yükü dayanım indeksi ile yük kontrollü (200 N/sn) dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki. ....	71
5.10 Göz önünde bulundurulan kayalar için dolaylı çekme dayanımı ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	72



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1	Nokta yükü dayanım indeksi deneyinden tek eksenli basınç dayanımı kestiriminde yaygın olarak kullanılan tahmin eşitlikleri. .... 8
3.1	Deneyde kullanılan kayaçların sınıflandırılması ve alındıkları bölgeler .....20
4.1	Kayaçların nokta yükü dayanımına göre sınıflandırılması .....30
4.2	Her bir kayaç için elde edilen nokta yükü dayanım indeksi sonuçlarının ortalamaları ve dayanımlarına göre sınıflandırılması. ....32
4.3	Tek eksenli basınçlı dayanımı deneyi sonuçları ortalaması ve ISRM'e (1981) göre sınıflandırılması. ....45
4.4	Dolaylı çekme dayanımının tek eksenli basınç dayanımı ile karşılaştırmalı olarak sınıflandırılması .....54
4.5	Dolaylı çekme dayanımı deney sonuçlarının ortalaması ve dayanım sınıflaması. ....56
5.1	Yapılan istatistiksel değerlendirme çalışmalarının daha önce yapılan bazı çalışmalarla karşılaştırılması.....74
5.2	Sedimanter kayaçların tahmin değerlerinin karşılaştırılması.....74
A.1	Andezit için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları. ....85
A.2	Bazalt için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.....85
A.3	Çilimli kireçtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları. ....86
A.4	Gökgöl kireçtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları. ....86
A.5	Gnays için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.....87
A.6	İncivez kireçtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.....87
A.7	İnce taneli kumtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.....88
A.8	Manyezit için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.....88
A.9	Orta taneli kumtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları. ....89
A.10	Sapça kireçtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları. ....89
A.11	Silttaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.....90
A.12	Tüf için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları. ....90
A.13	Üzülmez kireçtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.....91
A.14	Velibey Kumtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.....91

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
B.1 Andezit için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları. ....	93
B.2 Bazalt için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	93
B.3 Gnays için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	94
B.4 Çilimli kireçtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları. ....	94
B.5 Gökgöl kireçtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları. ....	95
B.6 İnce taneli kumtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	95
B.7 İncivez kireçtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	96
B.8 Manyezit için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları. ....	96
B.9 Orta taneli kumtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları. ....	97
B.10 Sapça kireçtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	97
B.11 Silttaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	98
B.12 Tüf için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları. ....	98
B.13 Üzülmez kireçtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları. ....	99
B.14 Velibey kumtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.....	99
C.1 Andezit için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları .....	101
C.2 Bazalt için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.....	101
C.3 Gnays için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.....	102
C.4 İncivez kireçtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.....	102
C.5 Sapça kireçtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.....	103
C.6 Üzülmez kireçtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.....	103
C.7 Çilimli kireçtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları. ....	104
C.8 Gökgöl kireçtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları. ....	104
C.9 İnce taneli kumtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları. ....	105
C.10 Orta taneli kumtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları. ....	105
C.11 Manyezit için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.....	106
C.12 Silttaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.....	106
C.13 Tüf için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları. ....	107
C.14 Velibey kumtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.....	107

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### SİMGELER

$\sigma_c$	: Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı
$I_{S50}$	: Kaya malzemesinin nokta yükü dayanım indeksi
D	: Çap
L	: Uzunluk
W	: Genişlik
A	: Kesit alanı
$I_s$	: Düzeltilmemiş nokta yükü dayanım indeksi
F	: Yenilme yükü
$D_e$	: Eşdeğer karot çapı
f	: Nokta yükü dayanımı düzeltme katsayısı
E	: Elastisite modülü
$\nu$	: Poisson oranı
$\sigma_t$	: Kaya malzemesinin çekme dayanımı
$\sigma_{tb}$	: Kaya malzemesinin dolaylı çekme dayanımı

### KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
BEÜ	: Bülent Ecevit Üniversitesi
IAEG	: International Association for Engineering Geology and the Environment: Uluslararası Mühendislik Jeolojisi ve Çevre Birliği
ISRM	: International Society of Rock Mechanics: Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği
TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

#### 1.1 KONUNUN ÖNEMİ

Yeraltı (tünel, galeri, yeraltı santral vb.) ve yerüstü (baraj, gölet, açık ocak madenciliği vb.) yapılarının planlama ve projelendirilmesi maden, inşaat, jeoloji, makine, elektrik, ziraat, hidroloji, ekonomi gibi bilim dallarındaki uzman ve mühendislerin sistemli düşünme ve ekip çalışmalarını gerektirir. Bu sistemli düşünme ve ekip çalışmasında en önemli nokta planlanacak olan yapının sahip olduğu kayaçların mekanik özelliklerinin bilinmesidir. Bu mekanik özelliklerden en yaygın olarak kullanılan parametre tek eksenli basınç dayanımıdır (Karaman vd. 2011).

Tüm bu parametreler ve özellikler kesin, doğru ve açıklıkla belirlendikten sonra proje mühendisleri yapıya en uygun ve ekonomik yöntemi uygulayarak veya tasarlarlar. Bu şekilde yapılan çalışma sonucu doğru ve düzgün bir mühendislik çalışması ortaya çıkar.

Yukarıda anlatılan başarılı mühendislik çalışmasının temel noktası kayaçların sahip olduğu mekanik özelliklerin iyi bilinmesidir ve bunun en önemli parametresi tek eksenli basınç dayanımıdır. Ancak kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değerlerini belirlemede kullanılan deney aleti oldukça pahalı olup, yüksek kalitede karot örneklerine ihtiyaç duyulmakta ve özellikle örneklerin deneye hazırlanması zaman almaktadır (Fener vd. 2005).

Ayrıca çok zayıf, ince tabakalı ve çok sık eklemli kaya kütlelerinde istenilen geometride karot örneklerinin elde edilmesi oldukça zor olmaktadır (Gökçeoğlu ve Zorlu 2004).

Tek eksenli basınç dayanımı deneyinin bu zorluklarından dolayı bilim adamları tek eksenli basınç dayanımını daha basit yollardan bulma ya da tahmin etme yoluna gitmişlerdir. Nokta

yükü dayanım indeksi deneyi, schmidt çekici, dolaylı çekme, görünür porozite gibi deneyler bu yöntemlerden bazılarıdır.

Nokta yükü dayanım indeksi deneyinin arazi şartlarında dahi kolayca yapılabilmesi, ucuz ve basit bir deney düzeneğine sahip olması nedeniyle tek eksenli basınç dayanımını tahmin etmede kullanılan en önemli yöntem olmuştur. Birçok araştırmacı bu konu üzerinde çalışmalar yapmış ve çeşitli sonuçlara ulaşmıştır.

Dolaylı çekme dayanımı deneyi; çekme dayanımının doğrudan belirlenmesinde tek eksenli basınç dayanımında olduğu gibi zorlukları nedeniyle dolaylı olarak tahmin etmek için kullanılan bir deney yöntemidir. Fakat dolaylı çekme dayanımı deneyinde yükleme basınç olmasına rağmen örneğin kırılması merkezde oluşan yatay çekme gerilmesi nedeniyle olmaktadır. Bu durum dolaylı çekme dayanımının basınç yüküyle yapılan deneylerle arasındaki ilişki var mı sorusunu ortaya çıkarmaktadır.

## **1.2 TEZİN AMACI**

Bu tez çalışmasının ana amacı olarak kaya malzemesinin en önemli mekanik parametresi olan tek eksenli basınç dayanımını nokta yükü dayanım indeksinden tahmin etmek ve dolaylı çekme dayanımı deneyi ile nokta yükü dayanım indeksi deneyi ile tek eksenli basınç dayanımı deneyi arasındaki ilişkiyi araştırmaktır.

Tez çalışmasının amaçlarından bir diğeri ise, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden alınan farklı kayaç türlerinin laboratuvar koşullarında tek eksenli basınç dayanımını belirlemek ve daha sonra aynı kayaç türleri için nokta yükü dayanım indeksi deneyini yaparak iki deney arasındaki ilişkiyi araştırmaktır. Diğer amacı ise bu kayaçlar için tek eksenli basınç dayanımını nokta yükü dayanım indeksi deneyinden tahmin etmek için gerekli katsayıları belirlemektir.

Bu çalışma kapsamında hedeflenen bir diğeri ise, yükleme şekli basınç olan dolaylı çekme dayanımı deneyi ile yine yükleme şekilleri basınç olan tek eksenli basınç dayanımı deneyi ve nokta yükü dayanım indeksi deneyi arasındaki ilişkiyi incelemektir.

### 1.3 TEZİN KAPSAMI

“Kaya malzemesinin nokta yükü dayanım indeksi, tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişkinin araştırılması” başlıklı tez çalışması 6 bölüm olarak düzenlenmiştir. Bu bölümlerde ayrıntılı olarak işlenen konular aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Birinci bölümde; tez çalışmasının önemi, amacı, kapsamı ve içeriğine ilişkin genel bilgiler yer almaktadır.
- İkinci bölümde; kaya malzemesinin mekanik özelliklerinin birbirleriyle olan karşılıklı ilişkilerine yer verilmiş ve bu ilişkiler için daha önce yapılmış bilimsel çalışmalara yer verilmiştir.
- Üçüncü bölümde; deneyde kullanılacak kayaçların petrografik özellikleri anlatılmış ve kayaçların hangi bölgelerden alındığı gösterilmiştir. Deneyde kullanılacak örneklerin nasıl hazırlanacağı ve standartları gösterilip örnek hazırlamada ve deneylerde kullanılacak aletler tanıtılmıştır.
- Dördüncü bölümde; nokta yükü dayanım indeksi, tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı deneyleri anlatılmıştır. Deneylerin tarihçesi, önemi, amacı, kullanıldığı yerler, deney esnasında kullanılacak araç gereçler, deneyin yapılışı, sonuçların hesaplanması ve değerlendirilmesine yer verilmiştir. Daha sonra bu deneyler için laboratuvar çalışmalarına yer verilmiştir.
- Beşinci bölümde; laboratuvar çalışmaları sonucu elde edilen verilere göre deneylerin birbirleriyle etkileşimi istatistiksel olarak incelenmiştir. Deney çalışmaları esnasında göze çarpan durumlar incelenmiştir ve sonuçlarına yer verilmiştir.
- Son bölümde ise; tez sonuçlarına yer verilmiştir ve sonuçlar yorumlanmıştır.





## BÖLÜM 2

### KAYA MALZEMESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BİRBİRLERİYLE OLAN KARŞILIKLI İLİŞKİSİ

Kaya malzemesinin mekanik özellikleri birçok yapının nerede, nasıl ve hangi şartlarda yapılacağına belirlenmesinde en önemli etkidir. Örneğin; galeri, tüneller, kuyular ve binalar gibi her türlü yeraltı ve yerüstü yapılarının duraylılığı, kayanın yapısına, kaya kütesine etkileyen gerilmelere, yeraltı suyu akışına, süreksizliklere ve kazı tekniğine bağlıdır. Bahsi geçen bu yapıların duraylılığının değerlendirilmesinde; sağlam kaya malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleriyle birlikte kayacın arazideki durumunun (süreksizlik ve dolgu durumu, su içeriği, birincil gerilmeler vb.) bilinmesi önemli bir kılavuzdur.

Kaya kütleleri içerisinde oluşan çekme, basınç ve kayma gerilmeleri ve bu gerilmelerin birbirleriyle olan etkileşimleri, birçok farklı türde duraysızlık problemlerine yol açarak kaya kütlelerinin yenilmesine neden olurlar. Bu nedenle, duraylılık açısından, sağlam kaya malzemesinin ve/veya kaya kütesinin tek eksenli basınç dayanımı ve tek eksenli çekme dayanımlarının belirlenmesi başta tasarım ve güvenlik olmak üzere birçok hususta oldukça önem taşımaktadır.

Kaya malzemesinin mekanik özelliklerini belirlemek için; nokta yükü dayanım indeksi deneyi, tek eksenli basınç dayanımı deneyi, doğrudan çekme dayanımı deneyi, schmidt çekici, dolaylı çekme dayanımı deneyi gibi çeşitli kaya mekaniği laboratuvar deney yöntemleri kullanılmaktadır. Bu deney yöntemlerinden en önemlisi tek eksenli basınç dayanımı deneyidir. Sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı, kaya mekaniği pratiğinde en yaygın kullanılan jeomekanik özelliktir. Bu özellik, sağlam kaya malzemesinin ve kısmen de kaya kütesinin dayanımını belirlemektedir. Bununla birlikte, bu değer elde edilmesinde deney örneklerinin hazırlanmasının zahmetli ve zaman alıcı olması, kullanılan deney aletini diğer deney aletlerine göre kısmen daha pahalı oluşu ve sadece laboratuvar ortamında yapılabilmesi gibi bir takım zorluklar mevcuttur. Bu nedenle, birçok araştırmacılar tarafında

kaya mekaniği deneyleri arasındaki ilişkileri pratiklik açısından incelemiş olup (D' andrea et al. (1965), Bieniawski (1975), Chau and Wong (1996), Singh at al. (2012)) özellikle arazi koşullarında elde edilmesi zor olan mekanik özellikleri tahmin etme yoluna gitmişlerdir. Bu bölümde, öncelikle ikili değerler arasındaki istatistiksel ilişkinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi kısaca açıklamış, daha sonra ise literatürde bulunan kaya malzemesinin mekanik özelliklerinin birbirleriyle olan karşılıklı ilişkilerini bulmak için daha önce yapılmış olan çalışmalara yer verilmiştir.

İstatistiksel olarak, iki ya da daha çok değişken arasında ilişki olup olmadığını, ilişki varsa yönünü ve gücünü inceleyen yöntem *korelasyon analizi*, değişkenlerden birisi belirli bir birim değiştiğinde diğerinin nasıl bir değişim gösterdiğini inceleyen yöntem ise *regresyon analizi* denilmektedir. Bu bağlamda korelasyon katsayısı  $r$ , bir örnekteki  $X$  ve  $Y$  ikili değerleri arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü ölçmektedir. Bu değer  $-1$  ile  $1$  arasında değişmektedir. Mükemmel pozitif doğrusal ilişki olduğunda  $r = 1$  olur. Mükemmel negatif doğrusal ilişki olduğunda  $r = -1$  olur. Doğrusal ilişki yok ise  $r = 0$  olur. Ancak korelasyon değişkenler arasındaki sebep sonuç ilişkilerini açıklamaz.  $x$  ile  $y$  arasında anlamlı bir korelasyon olmadığı halde, aralarında farklı şekilde bir ilişki olabilir. Başka bir deyişle, değişkenler istatistiksel olarak bağımsız ise korelasyon  $0$ 'dır fakat bunun tersi doğru değildir, çünkü korelasyon katsayısı yalnızca doğrusal olan ilişkiyi belirler.

Diğer yandan regresyon analizi, iki ya da daha çok değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan analiz metodudur. Eğer tek bir değişken kullanılarak analiz yapılıyorsa buna tek değişkenli (basit) regresyon, birden çok değişken kullanılıyorsa çok değişkenli regresyon analizi olarak isimlendirilir. İsminde de anlaşılacağı üzere doğrusal regresyon analizlerinde değişkenler arasında doğrusal bir ilişki vardır. Ayrıca bağımlı ve bağımsız iki değişken arasında eğrisel bir ilişki var ise değişkenler arasındaki ilişki eğrisel regresyon modeli ile açıklanır. Regresyon analizi ile değişkenler arasındaki ilişkinin varlığı, eğer ilişki var ise bunun gücü hakkında bilgi elde edilebilir.

Yukarıda bahsedildiği gibi, bir bağımlı ve bir bağımsız değişkeni olan regresyon modelleri basit regresyon modeli olarak adlandırılmaktadır. Bu tür regresyon denklemi genel ifadesi;

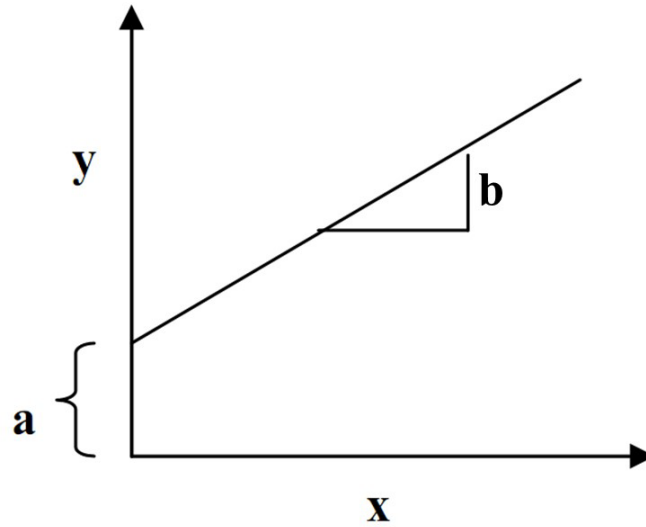
$$Y = a + b X \quad (2.1)$$

şeklindedir. Burada, X seçilen bağımsız değişken değeri, Y seçilmiş bağımlı değişken, a doğrunun Y eksenini kestiği değer ve b doğrunun eğimidir (Şekil 2.1). İstatiksel olarak a ve b regresyon katsayıları olarak adlandırılır.

Eğer, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi temsil eden doğru, koordinat ekseninin kesim noktasından (orijin) geçerse kesim değeri 0 olacaktır ( $a=0$ ). Bu durumda Eşitlik 2.1’de verilen bağıntı en basit haliyle,

$$Y = b X \quad (2.2)$$

şeklini almaktadır.



**Şekil 2.1** Doğrusal ilişki modeli ve regresyon katsayıları.

Belirleme Katsayısı ( $r^2$ ) Y’deki değişkenliğin ne kadarının regresyon doğrusu tarafından açıklanabildiğini söyler. Örneğin,  $r^2$  değeri 95 ise y’deki değişmelerin %95’i regresyon doğrusu ile açıklanabilmektedir.

Tek eksenli basınç dayanımı değerinin tahmin edilmesinde en çok yararlanılan deney yöntemi nokta yükü dayanım indeksi deneyidir. Esas olarak kaya malzemesinin dayanım sınıflamasının kestirimini amaçlayan nokta yükü dayanım indeksi deneyi daha sonra yaygın olarak kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde kendine yer bulmaya başlamış ve günümüzde yaygın olarak kullanılan uluslararası bir yöntem haline gelmiştir (Bieniawski 1973, ISRM 1985).

Birçok araştırmacı tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükü dayanım indeksi değeri arasındaki ilişkiyi incelemiş ve çeşitli sonuçlar elde etmişlerdir. Yapılan bu çalışmalarda tek eksenli basınç dayanımı değeri bağımlı değişken (Y), nokta yükü dayanım indeksi değeri ise bağımsız değişken (X) olmaktadır. Literatürde yapılan araştırmalar incelendiği zaman, araştırmacılar tarafından bu iki değer arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak çoğunlukla doğrusal şekilde elde edildiği göze çarpmaktadır. Bunların bazısında kesen (a) değeri 0 olarak kabul edilmiş bazısında ise edilmeyip bunun yerine bir değer elde edilmiştir. Yapılan doğrusal regresyon modellerindeki doğrunun eğiminin ifade eden b değeri ise geleneksel olarak k sembolü ile ifade edilmektedir. Çizelge 2.1’de nokta yükü dayanım indeksinden tek eksenli basınç dayanımı tahminine yönelik literatürde yapılan çalışmalar kronolojik sıra ile sunulmaktadır.

**Çizelge 2.1** Nokta yükü dayanım indeksi deneyinden tek eksenli basınç dayanımı kestiriminde yaygın olarak kullanılan tahmin eşitlikleri.

Araştırmacı	Tahmin Eşitliği
D'andrea vd. (1965)	$\sigma_c = 15,3 I_{s50} + 16,3$
Deer ve Miller (1966)	$\sigma_c = 20,7 I_{s50} + 29,6$
Broch ve Franklin (1972)	$\sigma_c = 23,7 I_{s50}$ (eşitli Kayaçlarda)
Bieniawski (1975)	$\sigma_c = 23,9 I_{s50}$ (Kumtaşı)
Wilson (1976)	$\sigma_c = 8 I_{s50}$ (ok zayıf amurtaşı)
Carter ve Sneddon (1977)	$\sigma_c = 24 I_{s50}$ (Kireçtaşı) $\sigma_c = 28 I_{s50}$ (Kumtaşı)
Al-Jassar ve Hawkins (1979)	$\sigma_c = 22 I_{s50}$ (Kumtaşı)
Cavagnaro (1980)	$\sigma_c = 14 I_{s50}$ (Kömür)
Hassani vd. (1980)	$\sigma_c = 29 I_{s50}$ (Sedimanter Kayaçlarda)
Read vd. (1980)	$\sigma_c = 20 I_{s50}$ (Sedimanter Kayaçlarda)
Singh (1981)	$\sigma_c = 18,7 I_{s50} - 13,2$
Forster (1983)	$\sigma_c = 14 I_{s50}$
Gunsallus ve Kulhawy (1984)	$\sigma_c = 16,5 I_{s50} + 51$
ISRM (1985)	$\sigma_c = 22 I_{s50}$
Das (1985)	$\sigma_c = 14,7 I_{s50}$ (Silttaşı)
	$\sigma_c = 18 I_{s50}$ (Kumtaşı)
	$\sigma_c = 12,6 I_{s50}$ (şist)
Norbury (1986)	$\sigma_c = 25 I_{s50}$ (Silttaşı)
	$\sigma_c = 22,5 I_{s50}$ (Kumtaşı)
	$\sigma_c = 26 I_{s50}$ (amurtaşı)
	$\sigma_c = 24 I_{s50}$ (şeyl)
	$\sigma_c = 27 I_{s50}$ (Magmatik ve metamorfik kayaçlar) $\sigma_c = 39 I_{s50}$ (Kristalize kiretaşı) $\sigma_c = 8 I_{s50}$ (Taneli kireçtaşı)

**Çizelge 2.1** (devam ediyor).

Araştırmacı	Tahmin Eşitliği
Hawkins ve Olver (1986)	$\sigma_c = 26,5 I_{s50}$ (Kireçtaşı) $\sigma_c = 24,8 I_{s50}$ (Kumtaşı)
O'Rourke (1988)	$\sigma_c = 30 I_{s50}$ (Sedimanter Kayaçlar)
Vallejo vd. (1989)	$\sigma_c = 17,4 I_{s50}$ (Kumtaşı) $\sigma_c = 12,6 I_{s50}$ (Şist)
Leung ve Radhakrishnan (1990)	$\sigma_c = 6 I_{s50}$ (Ayrışmış tortul kayaçlar)
Caargill ve Shakoor (1990)	$\sigma_c = 23 I_{s50} + 13$
Tsidzi (1991)	$\sigma_c = 48 I_{s50}$
Ghosh ve Srivastava (1991)	$\sigma_c = 16 I_{s50}$ (Granit)
Grasso vd. (1992)	$\sigma_c = 25,7 (I_{s50})^{0,57}$ (Üssel İlişkisi) $\sigma_c = 9,3 I_{s50} + 20,04$ (Doğrusal İlişki)
Singh ve Singh (1993)	$\sigma_c = 23,4 I_{s50}$ (Kuvars)
Ulusay vd. (1994)	$\sigma_c = 19 I_{s50} + 12,7$ (Kumtaşı)
Chau ve Wong (1996)	$\sigma_c = 12,5 I_{s50}$
Anıl vd. (1996)	$\sigma_c = 24 I_{s50}$ (Mermer)
Kahraman (1996)	$\sigma_c = 25 I_{s50}$ (Çeşitli Kayaçlarda)
Hawkins (1998)	$\sigma_c = 17,5 I_{s50}$ (Sedimanter kayaçlar) $\sigma_c = 12,5 I_{s50}$ (Marn)
Rusnak ve Mark (1999)	$\sigma_c = 21,8 I_{s50}$ (Şist) $\sigma_c = 20,2 I_{s50}$ (Silttaşı) $\sigma_c = 20,6 I_{s50}$ (Kumtaşı) $\sigma_c = 21,9 I_{s50}$ (Kireçtaşı)
Kahraman (2001)	$\sigma_c = 8,41 I_{s50} + 9,51$ (Diğer Kayaç Çeşitleri) $\sigma_c = 23,6 I_{s50} - 2,69$ (Kömür Kayaçları)
Quane ve Russel (2003)	$\sigma_c = 24,4 I_{s50}$ (Güçlü Kayaçlar) $\sigma_c = 3,86 (I_{s50})^2 + 5,65 I_{s50}$ (Zayıf Kayaçlar)
Tsiambaos ve Sabatakakis (2004)	$\sigma_c = 7,3 I_{s50}^{1,71}$ (Üssel İlişkisi) $\sigma_c = 23 I_{s50}$ (Doğrusal İlişki)
Fener vd. (2005)	$\sigma_c = 9,08 I_{s50} + 39,3$ (Çeşitli Kayaçlarda)
Kahraman vd. (2005)	$\sigma_c = 10,9 I_{s50} + 27,4$ (Çeşitli Kayaçlarda)
Basu ve Aydın (2006)	$\sigma_c = 15 I_{s50}$ (İleri Derecede Ayrışmış Granit) $\sigma_c = 18,5 I_{s50}$ (Orta Derece Ayrışmış Granit) $\sigma_c = 19,5 I_{s50}$ (Az Ayrışmış Granit) $\sigma_c = 24 I_{s50}$ (Ayrışmamış Granit)
Akram ve Bakar (2007)	$\sigma_c = 11 I_{s50}$ (Kaya tuzu)
Heidari vd. (2012)	$\sigma_c = 5,58 I_{s50} + 21,9$ (Jips)
Karaman ve Kesimal (2012)	$\sigma_c = 20,4 I_{s50} - 5,15$ (Çeşitli Kayaçlarda)

$\sigma_c$  : Tek Eksenli Basınç Dayanımı

$I_{s50}$  : Nokta Yüklü Dayanım İndeksi

Çizelge 2.1 incelendiğinde, literatürde yapılan çalışmaların hemen hemen hepsinde tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükü dayanım indeksi arasındaki istatistiksel ilişkinin doğrusal olarak modellendiği görülmektedir. Bu araştırmaların sadece bir tanesinde (Tsiambaos and Sabatakakis 2004) üssel ve doğrusal ilişki aynı cins kayaç için ayrı ayrı ele

alınmıştır. 1965 yılında D'andrea vd. (1965) başlayan bu kestirim çalışmaları konunu öneminden ötürü günümüzde hala devam etmektedir. Yine Çizelge 2.1'de sunulan konu ile alakalı literatür çalışmaları incelendiğinde, tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükü dayanım indeksi arasında kayaç türü ve cinsine bağlı kesin ve birbiriyle tutarlı bir ilişkinin kurulamadığı görülmektedir. Bu bağlamda, aynı cins kayaç türünde bile yapılan kestirim eşitliklerinin farklılık göstermesi göz önünde bulundurulursa, konunun öneminden dolayı mühendislik çalışmalarının gerektirdiği her bir bölge için ayrı bir çalışmanın yapılması oldukça önem taşımaktadır.

## BÖLÜM 3

### ÖRNEK HAZIRLAMA VE DENEYDE KULLANILAN KAYAÇLARIN SINIFLANDIRILMASI

Bu bölümde öncelikle yapılması planlanan kaya mekaniği deneyleri için örneklerin hazırlanması ve deneylerde kullanılan alet ve makineler genel olarak anlatılmış ve daha sonra ise, deneylerde kullanılmak üzere çoğunluğu Zonguldak ili ve çevresi olmak üzere Türkiye'nin 14 farklı bölgesinden laboratuvar ortamına getirilen kayaçların petrografik olarak sınıflandırılmasına yer verilmiştir.

#### 3.1 ÖRNEK HAZIRLAMA VE DENEYLERDE KULLANILAN ALETLER

Kaya mekaniği deneylerinde sağlıklı ve tekrarlanabilir sonuçlar alınabilmesi ve doğru bir şekilde kıyaslama yapılabilmesi amacıyla belirli standartlarda örnek hazırlanması gerekmektedir. Örnek hazırlanmasında dikkate alınacak öneriler ve standartlar sırasıyla ISRM (International Society of Rock Mechanics: Uluslararası Kaya Mekaniği Deneği) (1981) ve ASTM (American Society for Testing and Materials: Amerikan Test ve Malzeme Derneği) (1994) tarafından verilmektedir. Bahsi geçen bu öneriler ve standartlara göre başlıca üç ayrı tipte örnek geometride mevcut olup bu örneklerin özellikleri aşağıda verildiği gibi olmalıdır;

- a) Gelişi güzel olanlar: Bu tip olanlar arazi örnekleridir. Şekilsiz parçalardan, çekiç ya da keskiyle basitçe şekil verilmiş bloklara veya karot parçalarına kadar değişen şekillerde ve değişik boyutta olabilirler.
- b) Basit geometride olanlar: Silindir, kare prizma, küp şeklindeki laboratuvar örnekleridir.
  - Dairesel dik silindir: ISRM'nin önerdiği ve temel mekanik özelliklerle ilgili deneylerde kullanılması gereken standart geometridir. Mevcut karotların kesilmesi ve düzeltilmesiyle veya arazi örneklerinde laboratuvar da karot alınmasıyla elde edilirler (Gerçek 1990).

Örnek çapı (D) minimum 54 mm (NX tipi karot) veya en büyük tane boyutunun 10 katından büyük olmalıdır. Bu iki koşudan büyük olanı seçilmelidir. Örnek yüksekliği (H) için ise H/D oranı önemlidir. Bu oran ISRM için:  $H/D \approx 2,5 - 3$  ASTM için:  $H/D \approx 2 - 2,5$  olarak verilmiştir.

- Prizma veya Küp: Standart geometri değildir. Ancak, karot alınması zor kayalar bu geometride hazırlanabilir. Araziden alınan bloklardan kesilerek hazırlanırlar. Paralel yüzeylerin hazırlanması zordur. Kenarların ve köşelerin varlığı, örnek içindeki gerilme dağılımını etkiler. Prizmanın en küçük boyutu ya da küpün kenarı, en büyük tane boyutunun 10 katından büyük olmalıdır.

c) Özel geometride olanlar: Bazı özel deneyler için özel geometride örnekler hazırlanır. Hazırlaması zaman alıcı ve masraflı olabilir.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen kaya mekaniği deneylerinde dairesel dik silindir şeklinde örnekler kullanılmış olup bu tip örneklerin alınması ve hazırlanmasında yararlanılan alet ve makineler takip eden bölümde tanıtılmıştır.

### **3.1.1 Örnek Hazırlamada Kullanılan Aletler ve Makineler**

Bu tez çalışması kapsamında çoğunluğu Zonguldak ili ve çevresi olmak üzere Türkiye'nin 14 farklı bölgesinden alınan kayaç örnekleri öncelikli olarak laboratuvar ortamına getirilmiştir. Laboratuvar ortamına getirilen bu kayaçları istenilen standartlara hazırlamak için çeşitli laboratuvar alet ve makineleri kullanılmaktadır. Bunlar;

- Karot alma makinesi
- Taş kesme testeresi
- Yüzey düzeltme frezesidir.

#### **3.1.1.1 Karot Alma Makinesi**

Örnek hazırlamanın ilk işlemi kaya bloklarından karot örneklerinin alınmasıdır. Sondajlardan alınmış numunelerin bulunmadığı durumlarda, örneklerin kaya bloklarından hazırlanması



amacıyla kullanılmaktadır. Araziden gelen kayalardan istenilen standartlarda hazırlamak için dairesel dik silindir şekline numuneler almamızı sağlayan makinadır.

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, karot alma makinesine takılan farklı çap ve boyuttaki karot alıcılar (karotiyerler) ile kaya bloklarından örnek alınması işlemi yapılır. Delme işlemi sırasında matkabın soğutulması ve kırıntıların atılması için, sisteme sürekli su verilmektedir. Bu sayede karotiyer takılmadan karot alma işlemini yapar.

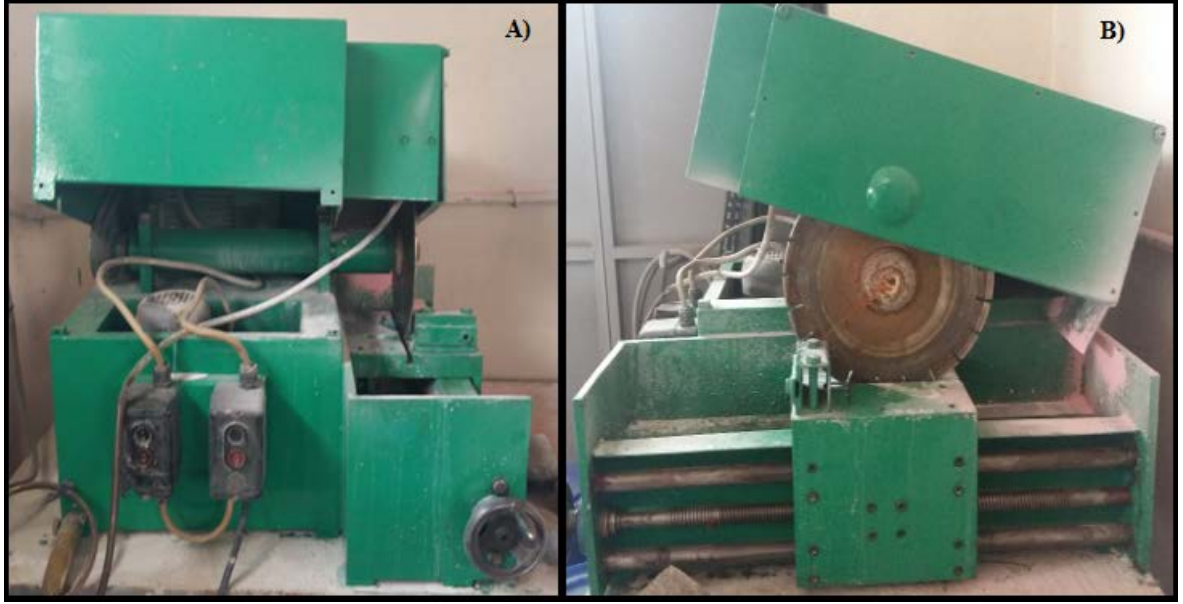


**Şekil 3.1** Karot alma makinesi ile karot örneklerinin alınması.

Karot alma işlemi bittikten sonra karot alma makinası durdurulur ve karotlar kaya örneklerinden alınır.

### 3.1.1.2 Taş Kesme Testeresi

Araziden getirilen kayaç örneklerinden karotlar alındıktan sonra, tez çalışmasının bir sonraki bölümünde anlatılacak olan kaya mekaniği deneylerinin yapılabilmesi için her bir deneyin gereksinimine göre, karotlar kesilerek boyutlandırma işlemi yapılmaktadır. Bu işlem için Şekil 3.2’de gösterilen taş kesme testeresi kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 Taş kesme testeresinin önden (A) ve yandan görünüşü (B).

### 3.1.1.3 Yüzey Düzeltme Frezesi

Deney standartlarında istenilen boyutlara getirilen kayaç örneklerine; deneylerin kusursuz ve tam sonuç vermesi, yüklemenin düzgün ve eşit yapılabilmesi için deney aletinin yükleme kısmına temas edecek yüzeylerin düzeltilmesi gerekir.

Örneklerin;

- Alt ve üst yüzeyleri 0,02 mm’ ye kadar düzgün olmalıdır,
- Alt ve üst yüzeyleri paralel ve düşey eksene dik olmalıdır,
- Yanal yüzeyleri örneğin uzunluğu boyunca 0,3 mm’ye kadar düzgün olmalıdır, ani geometri değişikliği göstermemelidir.

Örnekleri yukarıda yazan standartlara getirmek için Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarındaki yüzey düzeltme frezesi kullanılmıştır. Deneyde kullanılan yüzey düzeltme frezesi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Yüzey düzeltme frezesi kullanımı.

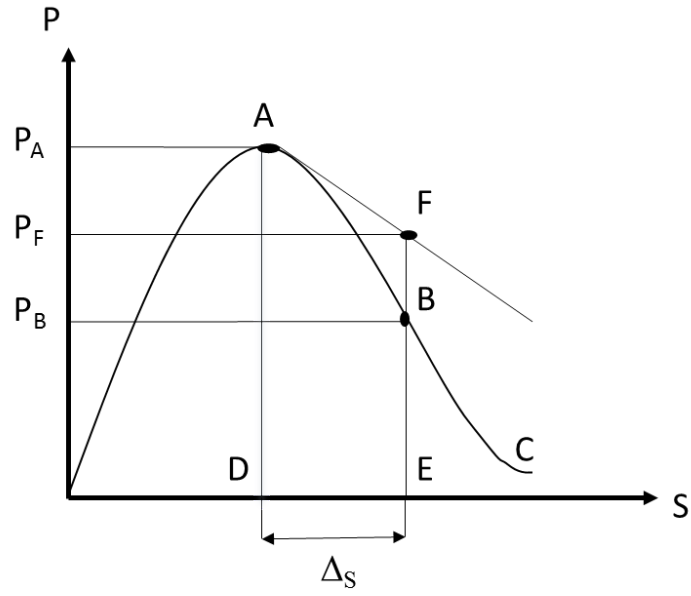
### 3.1.2 Deneylerde Kullanılan Yükleme Makinesi

Tez çalışması kapsamında yapılacak olan Nokta Yüğü Dayanım İndeksi, Tek Eksenli Basınç Dayanımı ve Dolaylı Çekme Dayanımı (Brazilian) deneylerinin yük ve deformasyon kontrollü olarak yapılabilmesi için Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Anabilim Dalına ait Kaya Mekaniği Laboratuvarındaki katı yükleme makinesi kullanılmıştır. 3500 kN yükleme kapasitesine sahip bu yükleme makinesi Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



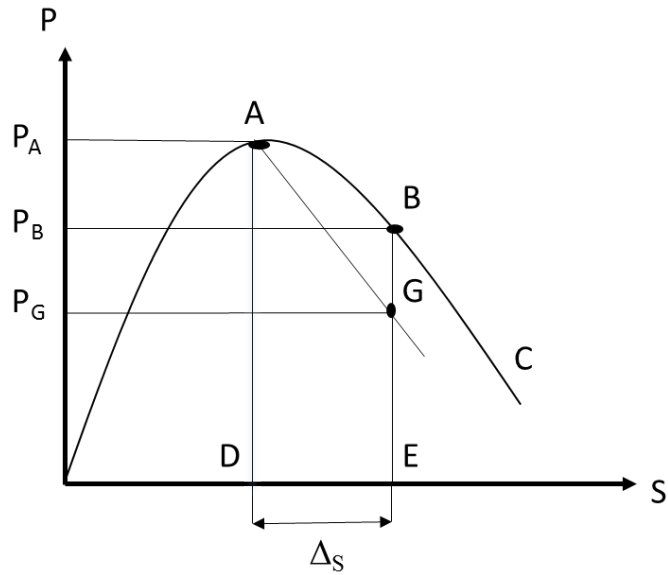
**Şekil 3.4** Katı yükleme makinesi.

Katı yükleme makinesi, yumuşak yükleme makinelerine göre daha avantajlıdır. Yumuşak yükleme makinesi Şekil 3.5'te gösterildiği gibi  $\Delta_s$  kadar kısalırken AFCD kadar bir enerjiyi serbest bırakır. Serbest bırakılan enerji kayacın absorbe edeceği enerji miktarından fazla olduğu için ani bir kırılma olur. Buda yenilmeden sonra örneğin üzerine bir miktar daha yükün binmesine yol açar. Bu sebeple kayacın dayanım sonrası davranışı belirlenemez (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Yumuşak yükleme aleti çalışma prensibi grafiği.

Katı yükleme makinesi ise Şekil 3.6'te gösterildiği gibi  $\Delta_S$  kadar kısalırken AFCD kadar bir enerjiyi serbest bırakır, serbest bırakılan enerji kayacın absorbe edebileceği enerji miktarından az olduğu için kayacı kısaltmak için ilave enerji gerekir. Bu durumda kırılma kontrollü olur ve kayacın dayanım yenilmesi sonrası davranışı belirlenebilir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Katı yükleme aleti çalışma prensibi grafiği.

## **3.2 DENEYDE KULLANILAN KAYAÇLARIN SINIFLANDIRILMASI**

Petrografik olarak magmatik, metamorfik ve sedimanter kökenli olmak üzere 3 ana kayaç grubu mevcuttur. Kayaçların petrografik olarak kökenleri genel olarak kayaçların dayanımı, delinebilirliği ve aşındırıcılığı gibi mekanik özellikleri üzerinde etkilidir. Bu nedenden dolayı, Türkiye'nin 14 farklı bölgesinden alınan kayaç örneklerinin petrografik kökenleri araştırılarak, deney yapılan kayaçlar petrografik gruplarına göre sınıflandırılmıştır.

### **3.2.1 Magmatik Kayaçlar**

Magmatik kayaçlar mantodan türeyen ve yerkabuğundan yukarıya doğru çıkan magmanın basınç ve sıcaklığın giderek azalması sonucu katılaşması ile oluşurlar. Katılaşma eğer derinlerde ve yavaş soğuma sonucu gelişmiş ise tam kristalli plütonik kayaçlar, soğuma magmanın yeryüzünde veya yeryüzüne yakın derinliklerde hızlı ve çabuk oluşmuş ise volkanik ve damar kayaçları meydana gelir. Plütonik kayaçlara derinlik kayaçları da denir (Gündoğdu 2015).

Volkanik kayaçlara yüzey kayaçları da denir; bunlar yarı kristalli, porfirik yapılıdır. Çoğu kez gözle görülebilen çeşitli kristaller, kristal olmayan, genellikle camsı bir hamur içinde dağılmış, serpilmiş durumda bulunurlar (Gündoğdu 2015).

Magmatik kayaçların üçüncü bir grubu da damar kayaçlarıdır. Bunlar derinlik kayaçları ile yüzey kayaçları arasında bir geçiş safhası teşkil ederler. Bunların karakteristik özelliği, hamur maddelerinin camsı değil, küçük kristalli oluşu ve diğer kayaçların yarık ve çatlakları içinde yer almış bulunmalarındır (Gündoğdu 2015).

Tez çalışması kapsamında magmatik kayaç olarak; Zonguldak'ın Devrek ilçesi Bostandüzü köyünden alınan Andezit, Kütahya Merkez'den alınan Manyezit, yine Zonguldak'ın Ereğli ilçesi Yazıcılar köyünden alınan Bazalt ve Kayseri'nin Develi ilçesinden Tüf kullanılmıştır.

### **3.2.2 Metamorfik Kayaçlar**

Herhangi bir kayacın ilk oluştuğu basınç ve sıcaklık koşullarından farklı basınç ve sıcaklık koşullarına maruz kalması durumunda bu yeni koşullara uyum sağlayabilmek için bünyesinde

meydana gelen yapısal, dokusal ve minerolojik değişikliklere metamorfizma, bu şekilde oluşan kayaçlara da metamorfik kayaçlar denir. Genellikle kristallerden oluşmuş, paralel yapıli kayaçlardır (Günderdu 2015).

Metamorfizma, yerkabuğunun derinliklerinde hüküm süren değişik fiziksel ve kimyasal şartların etkisiyle kayaçlarda meydana gelen mineral değişikliği veya mineral transformasyonu olayıdır (Günderdu 2015).

Mineraller belirli bir sıcaklık ve basınç altında duraylı durumda bulunurlar. Her mineralin kendine öz bir duraylılık sıcaklığı ve basıncı vardır. Eğer sıcaklık ve basınç değerinde bir artma, bir değişme olursa, mineral de değişmeye başlar, mineral aynı kimyasal bileşimden başka bir duraylı minerale dönüşür, böylece bir mineral transformasyonu olur. Metamorfizmanın aslı da budur (Günderdu 2015).

Tez çalışası kapsamında metamorfik kayaç olarak sadece Denizli'nin Güney ilçesinden alınan Gnays kullanılmıştır.

### **3.2.3 Sedimanter Kayaçlar**

Sedimanter kayaçlar, sedimanter süreçler sonucu oluşmuş genellikle tabakalı ve fosilli olan kayaçlardır. Sedimanter kayaçlar içinde oluşan kömür, petrol, doğal gaz ve diğer madenler bu kayaçların daha iyi araştırılmasına sebep olmuşlardır (Günderdu 2015).

Sedimanların oluşumunda etkili fiziksel ve kimyasal süreçlerin gelişme alanı yeryüzüdür. Bu nedenle sedimanter kayaçlar kapladıkları alan bakımından yeryüzünde %75 oranında temsil edilmekte, magmatik ve metamorfik kayaçlar ise yeryüzünde %25 oranında bir alanı kaplamaktadırlar. Birçok türü bulunan sedimanter kayaçların ancak birkaçı yerkabuğunda yaygın olarak bulunmaktadır (Günderdu 2015).

Tez çalışması kapsamında sedimanter kayaç olarak; Zonguldak'ın Merkez ilçesinde Türkiye Taş Kömürü Karadon Müessesesine ait yeraltı ocağından İnce Taneli Kumtaşı ve Orta Taneli Kumtaşı, Zonguldak'ın Merkeze bağlı Sapça köyünden Velibey Kumtaşı ve yine Zonguldak Merkez'e bağlı Asma, Üzülmez ve İncivez mahallelerinden ve Gökgöl Mağarasından



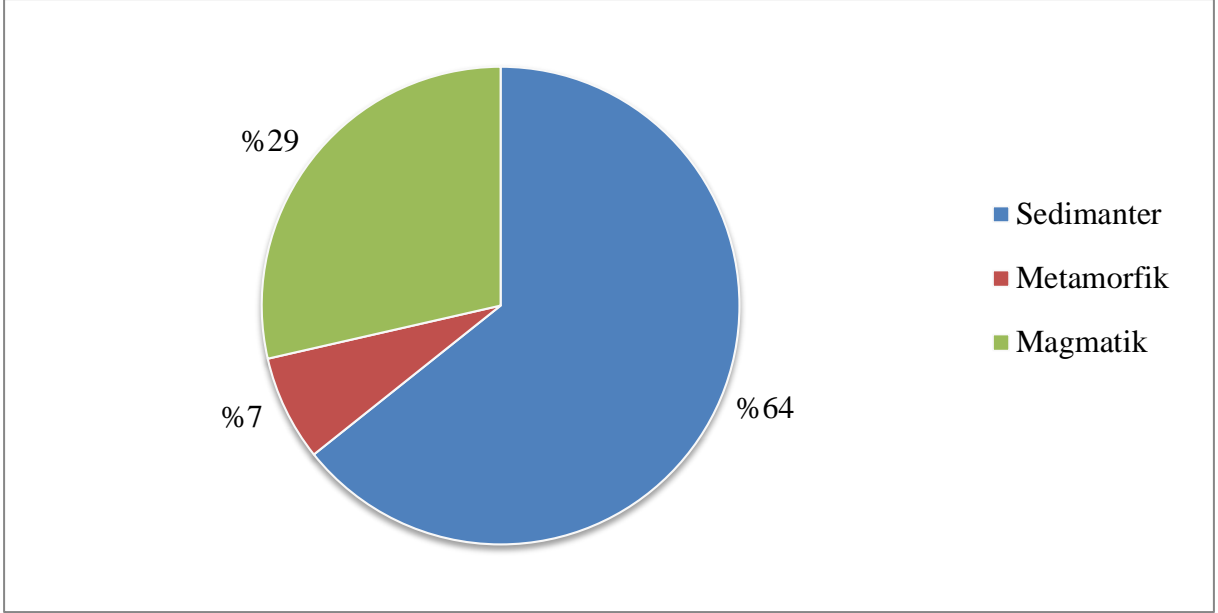
Kireçtaşları, Bartın'ın Amasra ilçesinden Silttaşı ve Düzce'nin Çilimli ilçesinden Kireçtaşı kullanılmıştır.

Çizelge 3.1'de kayaçlar oluşum özelliklerine göre sınıflandırılmıştır ve nereden alındıkları gösterilmiştir ve Şekil 3.7'de deneylerde kullanılan kayaçların petrografik genel kayaç sınıflamasına göre yüzdesel oranlarına yer verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Deneyde kullanılan kayaçların sınıflandırılması ve alındıkları bölgeler.

SINIFI	KAYAÇ ADI	ALINDIĞI YER
Sedimenter	İnce Taneli Kumtaşı	TTK Karadon Müessesesi/Zonguldak
	Orta Taneli Kumtaşı	TTK Karadon Müessesesi/Zonguldak
	Velibey Kumtaşı	Sapça/Zonguldak
	Silttaşı	Amasra/Bartın
	Kireçtaşı	Gökgöl Mağarası/Zonguldak
		Üzülmez/Zonguldak
		Çilimli/Düzce
		İncivez/Zonguldak
		Sapça/Zonguldak
Metamorfik	Gnays	Güney/Denizli
Magmatik	Andezit	Bostandüzü/Devrek/Zonguldak
	Manyezit	Merkez/Kütahya
	Bazalt	Yazıcılar Köyü/Ereğli/Zonguldak
	Tüf	Develi/Kayseri





**Şekil 3.7** Deneyde kullanılan kayaçların litolojik yüzdesel dağılımı.

Şekil 3.8' de ise deneylerde kullanılmak üzere Türkiye'nin 14 farklı bölgesinden alınan kayaçların, nerelerden alındığı Türkiye haritası üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Alınan kayaçların Türkiye haritası üzerinde gösterilmesi.

## BÖLÜM 4

### LABORATUVAR ÇALIŞMALARINI

Bu bölümde tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarına yer verilmiştir.

#### 4.1 NOKTA YÜKÜ DAYANIM İNDEKSİ DENEYİ

Nokta yükü dayanım indeksi deneyi ilk defa Broch ve Franklin (1972) tarafından önerilmiştir. Esas olarak kaya malzemesinin dayanım sınıflamasının kestirimini amaçlayan nokta yükü dayanım indeksi deneyi daha sonra yaygın olarak kaya kütle sınıflama sistemlerinde kendine yer bulmaya başlamıştır (Bieniawski 1973). Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalar çerçevesinde, günümüzde yaygın olarak kullanılan uluslararası yöntem (ISRM 1985) oluşmuştur.

##### 4.1.1 Deneyin Amacı ve Kullanıldığı Yerler

Nokta yükü dayanım indeksi deneyi günümüzde mühendislik jeolojisi ile ilgili çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu deney ile iki konik uç (platen) arasında sıkıştırılan kayaç örneğinin yenilme yükü ve boyutları kullanılarak nokta yükleme dayanım indeksinin hesaplanması amaçlanmaktadır.

Elde edilen nokta yükü dayanım indeksi,

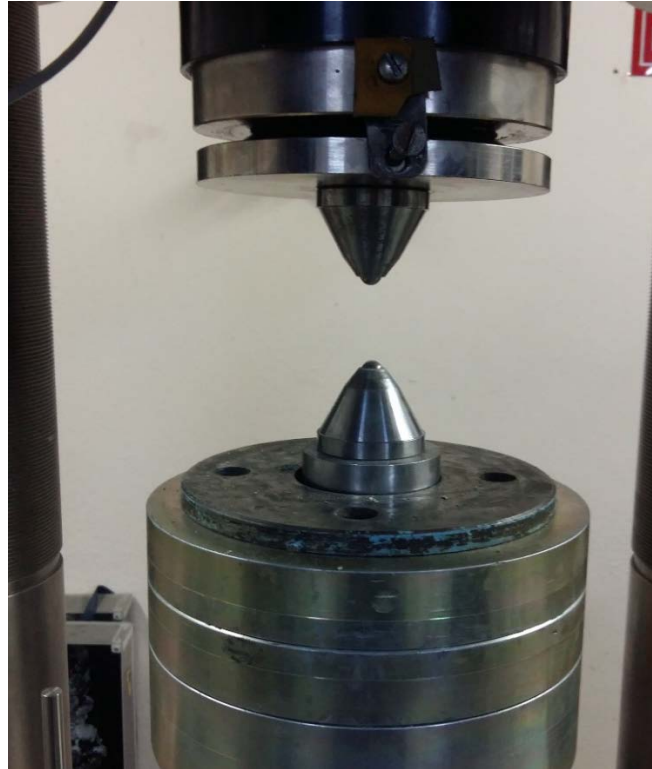
- Kayaçların tek eksenli basınç ve çekme dayanımlarının dolaylı olarak belirlenmesinde (Broch ve Franklin 1972; Bieniawski 1975; Al-Jassar ve Hawkins 1979; Norbury 1986),
- Kayaçların malzeme özelliği, açısından dayanımlarına göre sınıflandırılmasında (Bieniawski 1975),
- Kayaç anizotropisinin saptanmasında (Broch 1983),

- RMR kaya kütlesi sınıflamasında (Bieniawski 1989),
- Tünel açma makinası hızının tahmininde (McFeat ve Tarkoy 1979),
- Kayaçların kazılabilirlik açısından sınıflamalarında (Pettifer ve Fookes 1994),
- Kayaçların dış etkilere karşı dayanıklılığı ile ilgili çalışmalarda (Fookes vd. 1988) kullanılmaktadır.

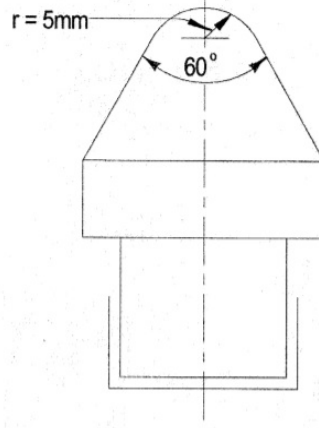
#### 4.1.2 Deneyde Kullanılan Araç ve Gereçler

Nokta yükü dayanım indeksi deneyinde kullanılacak araç gereçler aşağıda verildiği gibi sıralanabilir;

- Hidrolik yükleme makinesi (bu çalışmada Şekil 4.1’te gösterilen katı yükleme makinesi kullanılmıştır)
- Standartlarda önerilen özelliklere sahip konik yükleme uçları (Şekil 4.2).
- Kumpas
- Sıçramayı önlemek amacıyla alet etrafına yerleştirilen güvenlik plakası
- Numuneler



Şekil 4.1 Hidrolik prese yerleştirilmiş konik yükleme uçları.



**Şekil 4.2** Nokta yükü dayanım indeksi deneyinde kullanılan uçların şematik gösterimi.

### 4.1.3 Deneyin Yapılışı

Deney numuneleri karot şeklinde (çapsal veya eksenel) kesilmiş bloklar halinde veya düzgün olmayan parçalar şeklinde olabilir. Bu sebeple nokta yükü dayanım indeksi deneyi;

1. Çapsal deney (Karot eksenine dik yönde yükleme)
2. Eksenel deney (Karot eksenine paralel yönde yükleme)
3. Blok ve düzensiz örneklerle deney
4. Anizotropik kayalarda Deney olmak üzere 4 farklı şekilde yapılabilir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, laboratuvar ortamına getirilen kaya bloklarından alınan izotropik karot örnekleri kullanılmıştır. Başka bir ifadeyle, kayaç anizotropisi bu tez çalışması kapsamında incelenmemiş olup sadece çapsal ve eksenel deneyler göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenden dolayı takip eden bölümde sadece eksenel ve çapsal deney tipleri hakkında bilgi verilecektir.

#### 4.1.3.1 Çapsal Deney

Çapsal nokta yükü dayanım indeksi deneyi daha çok laboratuvar ortamında yapılan bir yöntemdir (Şekil 4.3). Bu deneyin yapılışı aşağıdaki gibidir;

- Bu deney için karot örneğinin uzunluğunun (L) çapına (D) oranı 1'den büyük olmalıdır. Başka bir ifadeyle;  $L/D > 1$  olmalıdır.

- Kayaç örneği heterojen ve anizotrop ise, deney en az 10 örnek üzerinde yapılmalıdır.
- Çapı ve uzunluğu ayarlanan örnek, konik uçların arasına eksenine dik olarak yerleştirilir. Konik uçlar ile örnek arasında açıklık kalmaması için pompa kullanılarak silindirik yükleme tablası yükseltilir.
- Örnek 10-60 saniye arasında yenilecek şekilde yükleme yapılır (Ulusay vd. 2001).
- Örnek yenildikten sonra numunenin kırıldığı değer yük göstergesinden okunur ve not edilir.



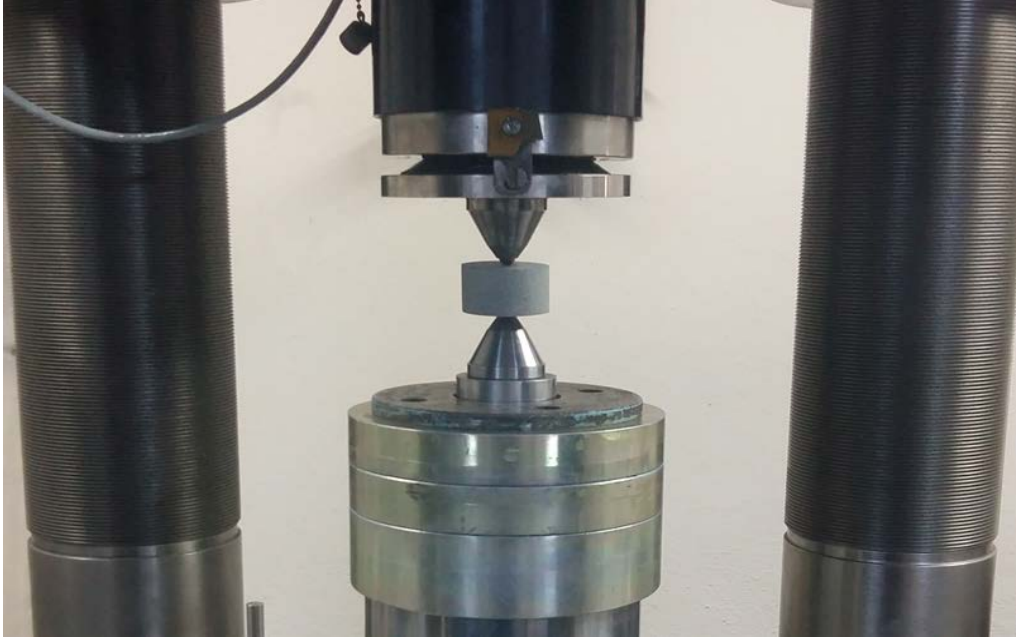
**Şekil 4.3** Laboratuvar ortamında yapılan çapsal nokta yükü deneyi.

#### 4.1.3.2 Eksenel Deney

Eksenel nokta yükü dayanım indeksi deneyi çapsal nokta yükü deneyi gibi örnek hazırlama gerektirdiğinden dolayı daha çok laboratuvar ortamında yapılan bir yöntemdir (Şekil 4.4). Bu deneyin yapılışı aşağıdaki gibidir;

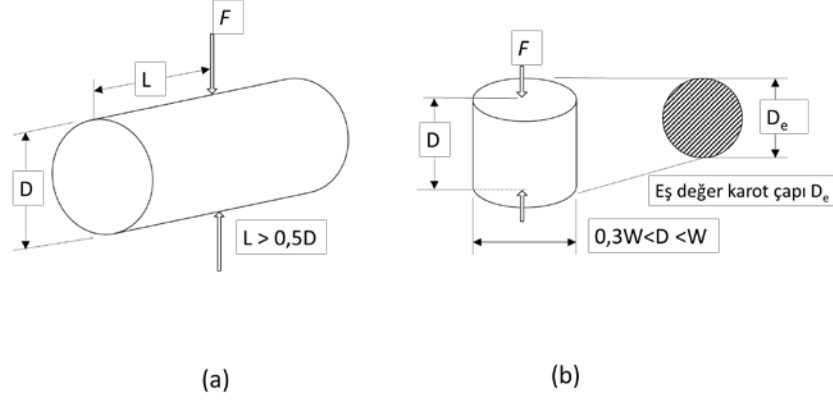
- Bu deney için  $W$  (genişlik)/ $D$  (çap) oranı 0.3-1.0 arasında olan karot örnekleri kullanılmalıdır.
- Kayaç örneği heterojen ve anizotrop ise, deney en az 10 örnek üzerinde yapılmalıdır.

- Örnek, çapı ve boyu kumpasla ölçüldükten sonra, konik uçlar arasında yükleme yönüne paralel olacak şekilde yerleştirilir.
- Örnek 10-60 saniye arasında yenilecek şekilde yükleme yapılır.
- Örnek yenildikten sonra, örneğin kırıldığı değer yük göstergesinden okunur ve not edilir.



**Şekil 4.4** Laboratuvar ortamında yapılan aksenal nokta yükü deneyi.

Nokta yükü dayanım indeksi deneyinde kullanılacak örneklerin sahip olması gereken özellikler Şekil 4.5'te şematik olarak anlatılmıştır.



Şekil 4.5 Çapsal (a) ve eksenel (b) örnek şekilleri.

#### 4.1.4 Hesaplamalar

Nokta yükü dayanım indeksi deneyi hesaplamalarının yapılması için gerekli işlemler açıklamalarıyla beraber aşağıda anlatılmıştır.

Nokta yükü dayanım indeksi deneyi için numuneden alınan karotlar NX tipi karotiyerle alındığından karot çapları  $54 \pm 0,4$  mm'dir. Kaya malzemesinden kaya kütlesine geçildiğinde dayanımın azaldığı bilinen bir gerçektir. Aynı mantık numune boyutlarında da geçerlidir. Bu sebeple farklı karot çaplarına (dolayısıyla farklı yüzey alanlarına) ait numunelerin dayanımları birbirinden farklı olacaktır. Bu sebeple elde edilen dayanım değerinin boyutsal olarak normalleştirilmesi gerekmektedir. Is değerinin standart bir karot çapına ( $D=50$ mm) göre düzeltilmesi ISRM (1985) tarafından önerilmektedir.

Nokta yükü dayanım indeksi değerini bulmak için düzeltilmemiş nokta yükü değeri  $I_s$  olarak adlandırılır.  $I_s$  değeri Eşitlik 4.1 ile hesaplanabilir.

$$I_s = \frac{F}{(D_e)^2} \quad (4.1)$$

Burada F kaya malzemesinin yenilme yükü (kN)  $D_e$  ise eş değer karot çapı (mm) olarak tanımlanmaktadır.



Çapsal deneylerde eş değer karot çapı  $D_e^2 = D^2$  olurken, aksel blok ve düzensiz örneklerde yapılan deneylerde ise  $D_e^2 = 4 \times A / \pi$ ,  $A = W \times D$  olarak hesaplanır. Burada D (mm) silindirik numunelerin çapını, W genişliği (mm) ve A ( $\text{mm}^2$ ) ise konik başlıklardan geçen en küçük kesit alanını temsil etmektedir.

Is değerini bulduktan sonra Eşitlik 4.2’de ifade edilen üssel bağıntı kullanılarak bir düzeltme katsayısı elde edilir. Bu düzeltme katsayısının hesaplanmasındaki amaç, uluslararası anlamda ortak bir bilim dilinin (ortak bir eş değer karot çapının tayini) geliştirilmesi olarak düşünülebilir. Bu sebeple uluslararası makalelerde her zaman Is değeri yerine  $Is_{50}$  değeri verilmektedir (Goodman 2003).

$$f = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \quad (4.2)$$

Burada f nokta yükü dayanımı düzeltme katsayısı,  $D_e$  ise eş değer karot çapıdır (mm). Düzeltilmiş nokta yükü dayanımı ise ( $Is_{50}$ ) Eşitlik 4.3 ile hesaplanabilir.

$$Is_{50} = f \times I_s \quad (4.3)$$

Ortalama  $Is_{50}$  değerini bulabilmek için, bir kayaç üzerinde, en az 10 adet geçerli deney yapılmalıdır. Daha sonra en yüksek ve en düşük ikişer değer göz ardı edilerek geriye kalan sonuçların ortalaması alınır. Örnek sayısı 10’dan az ise; en yüksek ve en düşük değer göz ardı edilerek geriye kalan değerlerin ortalaması alınır.

#### 4.1.5 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerle bulunan  $Is_{50}$  değerleri tek başlarına, Bieniawski’nin (1975) yılında yaptığı “Kayaçların Nokta Yükü Dayanımına Göre Sınıflandırılması” tablosuna göre sınıflandırılarak değerlendirilebilir (Çizelge 4.1). Bununla birlikte, belirlenen bu  $Is_{50}$  değeri, kayacın tek doğrultuda karşı koyabileceği maksimum yükü temsil eden tek aksel basınç dayanımını tahmin etmekte de kullanılmaktadır.

**Çizelge 4.1** Kayaçların nokta yükü dayanımına göre sınıflandırılması (Bieniawski 1975).

Kaya Sınıfı	Is <sub>50</sub> (MPa)
Çok Düşük Dirençli	< 1
Düşük Dirençli	1 - 2
Orta Dirençli	2 - 4
Yüksek Dirençli	4 - 8
Çok Yüksek Dirençli	> 8

#### 4.1.6 Nokta Yükü Dayanım İndeksi Deneyi Laboratuvar Çalışmaları

Nokta yükü dayanım indeksi deneyi, tez çalışmasının amacına uygun olarak deformasyon ve yük kontrollü deneyler yapabilmek adına geleneksel yolların aksine, BEÜ Maden Mühendisliğinde bulunan Kaya Mekaniği Laboratuvarındaki Hidrolik Katı Yükleme Makinesi kullanılarak yapılmıştır.

Kayaç anizotropisi gibi özel durumlar göz önünde bulundurulmadığında, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen nokta yükü dayanım indeksi deneyleri çapsal ve eksenel şekilde yapılmaktadır (Ulusay vd. 2001). Bununla birlikte, nokta yükü dayanım indeksi değerinden tek eksenli basınç dayanımı değerinin kestirilmesine yönelik literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında (D'andrea et al. 1965; Bieniawski 1975; Chau and Wong 1996; Singh et al. 2012), bu tip çalışmalar için yaygın olarak eksenel nokta yükü dayanım indeksi deneyinin kullanıldığı görülmüştür. Bu nedenden dolayı, tez çalışması kapsamında deneyleri için sadece eksenel yükleme şekli göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak, nokta yükü dayanım indeksi deneyi için Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden laboratuvar ortamına getirilen 14 kayacın her birinden ortalama 10'ar olmak üzere toplamda 140 tane karot örneği eksenel nokta yükü standartlarına göre hazırlanmıştır (Şekil 4.6).



**Şekil 4.6** Tez kapsamında kullanılan aksel nokta yükü dayanım indeksi deney örnekleri.

Deneyler için TTK Merkez Atölyesinde ASTM (1984) standartlara uygun nokta yükü uçları yaptırılmıştır (Şekil 4.7). Deney aleti ve örnekler deneye hazır hale getirildikten sonra deneyler yapılmıştır.

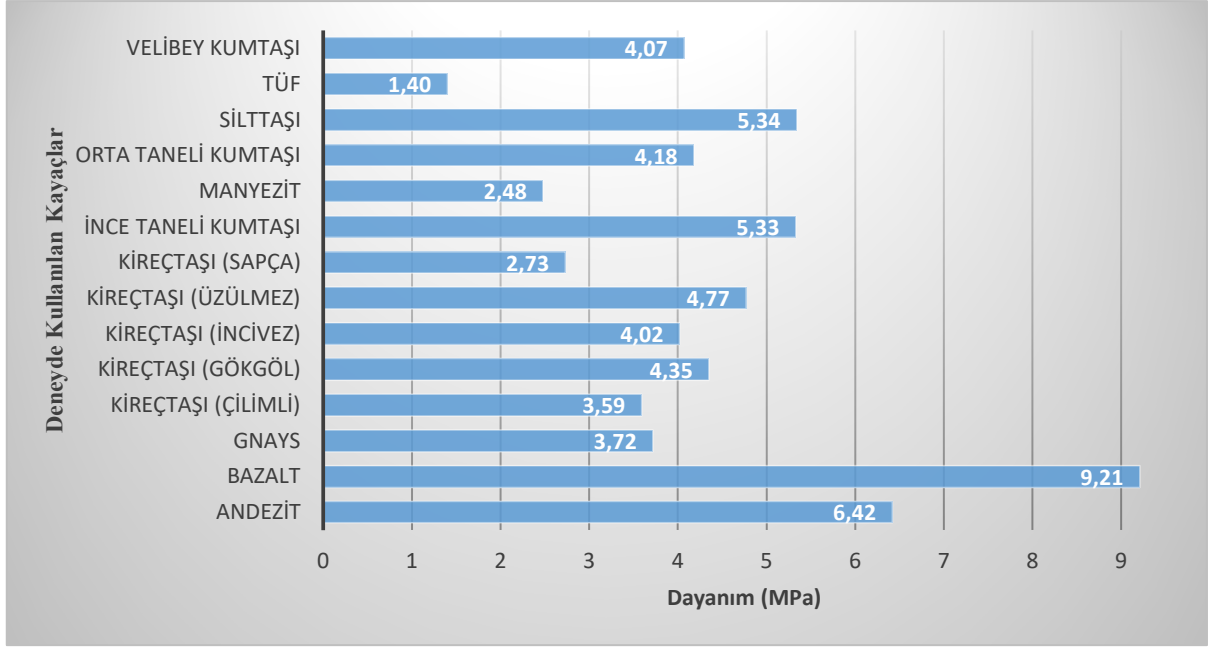


**Şekil 4.7** TTK Merkez Atölyesinde nokta yükü dayanım indeksi için hazırlanan yükleme başlıkları.

Sonuç olarak, farklı bölgelerden alınan 14 tane kayacın her birinden ortalama 10'ar adet olmak üzere toplamda 140 adet deney yapılmış ve elde edilen sonuçların ortalaması Bieniawski'nin 1975 yılında yaptığı nokta yükü deney sınıflama sistemine göre sınıflandırılarak Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Göz önünde bulundurulan her bir kayaç için elde edilen ortalama sonuçlar, dayanım farklılıklarının daha ayrıntılı bir şekilde gözlenebilmesi için Şekil 4.8'de ayrıca verilmektedir. Ek olarak, her bir kayaç için elde edilen tüm sonuçlar EK A'da ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

**Çizelge 4.2** Her bir kayaç için elde edilen nokta yükü dayanım indeksi sonuçlarının ortalamaları ve dayanımlarına göre sınıflandırılması.

Kayaç Adı	Deneylerin Ortalaması (MPa)	Dayanım Sınıflaması
Andezit	6,42±0,74	Yüksek
Bazalt	9,21±0,52	Çok Yüksek
Gnays	3,72±0,50	Orta
Kireçtaşı (Çilimli)	3,59±0,45	Orta
Kireçtaşı (Gököl)	4,35±0,66	Yüksek
Kireçtaşı (İncivez)	4,02±0,64	Yüksek
Kireçtaşı (Üzülmez)	4,77±0,56	Yüksek
Kireçtaşı (Sapça)	4,02±1,62	Yüksek
İnce Taneli Kumtaşı	5,33±0,59	Yüksek
Manyezit	2,48±1,27	Orta
Orta Taneli Kumtaşı	4,18±0,27	Yüksek
Silttaşı	5,34±1,34	Yüksek
Tüf	1,40±0,13	Düşük
Velibey Kumtaşı	4,07±0,70	Yüksek

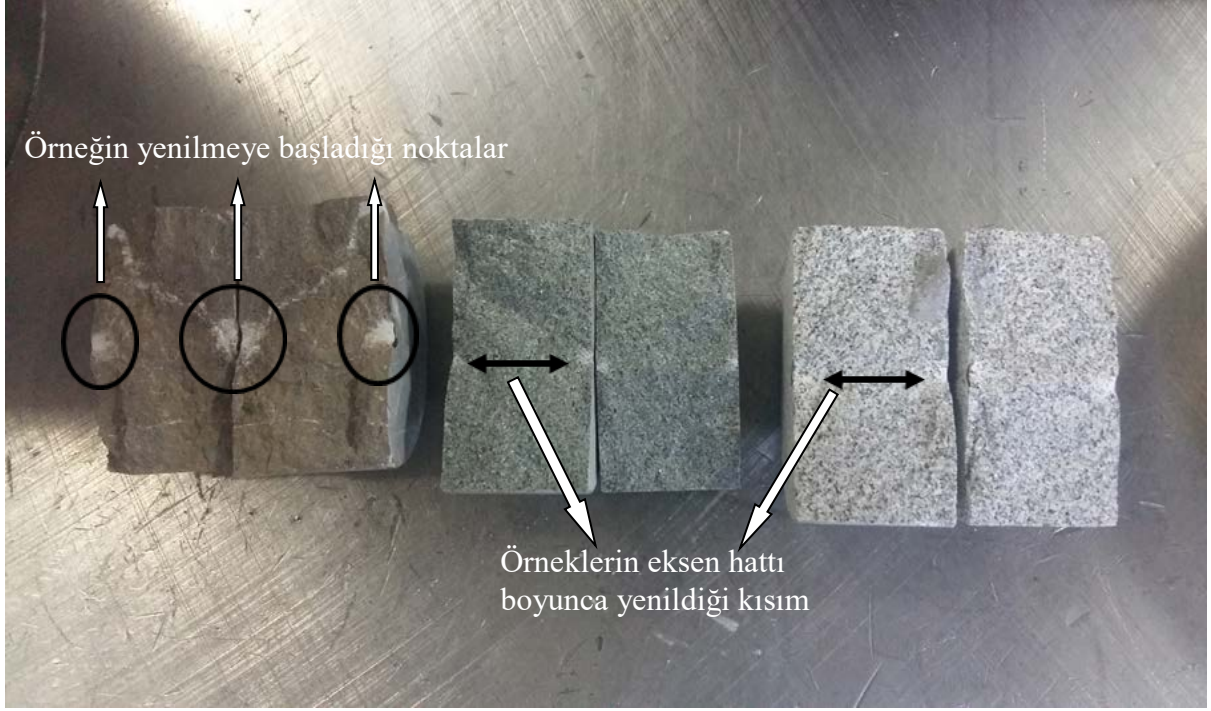


**Şekil 4.8** Nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçlarının grafik gösterimi.

Çizelge 4.2'den de anlaşılacağı gibi, deneyde kullanılan kayaçların büyük bir çoğunluğu yüksek dayanıma sahip kayaçlar olup sadece bir tanesi düşük dayanımlıdır.

Nokta yükü dayanım indeksi deneyinde, deney sonuçlarını etkileyen bir diğer önemli parametre de deneyde kullanılan örneklerin deney sonucunda kırılış biçimleridir. Deneyde kullanılan örneklerin düz bir eksen hattı boyunca kırılması ve yenilme eksenlerinin noktasal yükleme uçlarının değdiği kısımdan geçmesi beklenir.

Tez kapsamında yapılan nokta yükü deneyi sonucunda kırılan örneklerin bazıları Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde örneklerin kırılmalarının düz bir eksen hattı üzerinde olduğu gözlemlenmiştir ve ayrıca yenilmenin nokta yükü uçlarının değdiği merkez noktalardan geçtiği görülmüştür.



**Şekil 4.9** Eksenel yüklenen nokta yükü örneklerinin kırılması.

## 4.2 TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI DENEYİ

Sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı, bir kaya örneğinin tek bir doğrultuda karşı koyabileceği maksimum basınç gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Kaya mekaniği ve diğer mühendislik jeolojiyle ilgili alanlarda sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı deneyi, sağlam kaya malzemesinin dayanım özelliklerinin belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir.

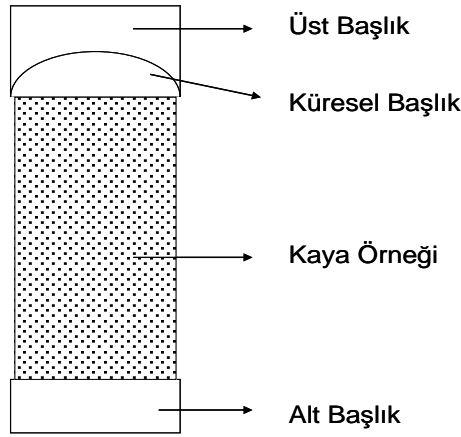
### 4.2.1 Deneyin Amacı ve Kullanım Alanları

Sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı, kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde ve temel bir girdi parametresi olarak kaya kütlesi dayanım ölçütlerinde kullanılmaktadır. Kaya malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan en eski deney türü olan tek eksenli basınç dayanımı deneyi, birim deformasyon ölçerlerle birlikte kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ), Elastisite modülü (E) ve Poisson oranının ( $\nu$ ) belirlenmesinde kullanılmaktadır. Veri yetersizliği durumunda ise kaya malzemesinin elastisite modülü, tek eksenli çekme dayanımı ( $\sigma_t$ ) ve kohezyonun (c) tahmin edilmesinde de kullanılabilir.

Tek eksenli basınç dayanımının uygulama alanları, kaya malzemesinin mekanik sınıflaması, kaya kütlesi sınıflandırma sitemleri, yenilme ölçütlerinin belirlenmesi ve duraylılık analizleridir.

#### 4.2.2 Deneyde Kullanılan Araç-Gereçler

Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kaya örneği üzerine eksenel yük uygulamak için uygun bir yükleme makinesi kullanılmalıdır. Bu makine deney için öngörülen yükleme hızını sağlayabilecek kapasite ve duyarlılıkta olmalıdır. Makine uygun zaman aralıklarında kontrol edilmeli ve uluslararası standartlara uymalıdır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Tek eksenli basınç deneyi yükleme düzeneğinin şematik gösterimi.

Deney sırasında örneğe sabit bir hızda ve sürekli olarak eksenel yükleme yapabilecek yeterli kapasitede hidrolik pres kullanılır. Yenilmenin 5 ile 10 dakika arasında gerçekleşebilmesi için yükleme presinin kapasitesinin kayacın dayanımına uygun olarak seçilmesi gerekir. Bu nedenle, dayanımı düşük olan zayıf kayaçlarda düşük yük aralıkları için bölümlendirilmemiş yük göstergelerine sahip yüksek kapasiteli preslerin yerine, tercihen daha küçük yükleme yapılmasına olanak sağlayan presler kullanılmalıdır (Ulusay and Hudson 2007).

Prese monteli küresel başlıklardan biri örneklerin hazırlanışı sırasında meydana gelebilecek geometrik kusurların deney sonucunu etkilememesi amacıyla küresel geometride olmalıdır. Bu başlıkların yüzeyleri birbirine paralel olmalı ve bu başlıklar hareket edebilmeli veya bir pozisyonda sabit kalabilmelidir (Ulusay and Hudson 2007).

Örnek yüzeyine yerleştirilen disk şeklindeki çelik plaklar veya silindirlerin sertliği Rockwell sertliği HRC58'den az olmamalıdır. Çelik plakların; çapı, örnek çapı (D) ile D+2 mm arasında olmalıdır. Plakaların kalınlıkları en az 15 mm veya D/3 kadar, yüzey düzgünlükleri ise 0,005 mm'den daha iyi olmamalıdır (Ulusay and Hudson 2007).

Örnek; plakalar ve küresel başlık yükleme makinesine doğru olarak merkezleştirilmelidir. Küresel başlık yüzeyinin eğrilik merkezi örneğin üst yüzeyinin merkeziyle çakışmalıdır (Ulusay and Hudson 2007).

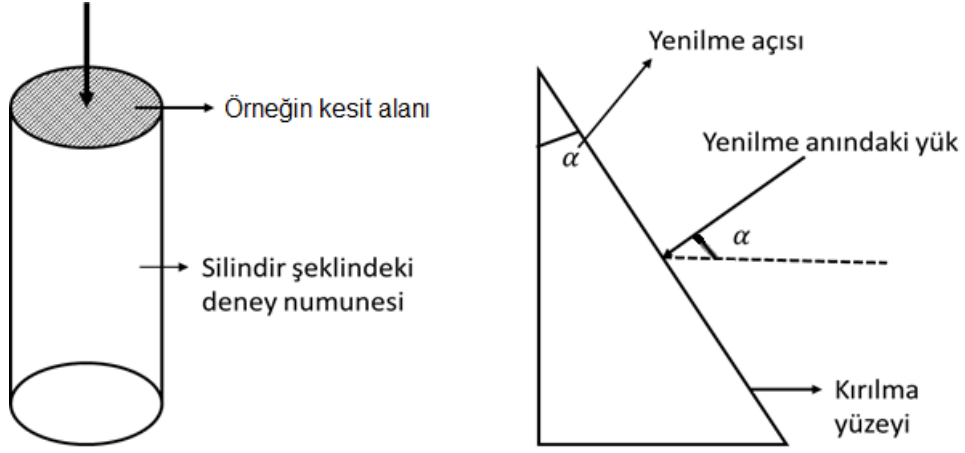
Bu deneyde ek olarak, örneklerin boyutlarının ölçülmesi için 0.1 mm duyarlılıkta bir kumpas ve gerektiğinde yükleme hızının denetimi için bir kronometre de kullanılmaktadır.

#### 4.2.3 Deneyin Yapılışı

- i. Deney için 2,5-3,0 değerinde yükseklik/çap oranına sahip ve tercihen çapı NX standartlarından, yani 54 mm'den küçük olmayan, düzgün silindir biçimli örnekler kullanılmalıdır. Örneğin çapı kayacın tane yapısına bağlı olmalı ve bu değere kayadaki en iri tane boyutunun 10 katı değerinden küçük olmamalıdır.
- ii. Örneğin alt ve üst yüzeyleri, 0,02 mm duyarlılıkta düzeltilmiş ve birbirine paralel olmalıdır ve örnek eksenini, düşeyden en fazla 0,001 radyan (50 mm'de 0,05mm) sapma göstermelidir.
- iii. Örneğin yan yüzeyi pürüzsüz olmalı ve düzgünlüğü yanal yüzeyi boyunca 0,3 mm'den daha küçük bir hassasiyette olmalıdır.
- iv. Örnekler, alındıkları tarihten itibaren 30 günden daha fazla bekletilmemiş olmalıdır (Ulusay and Hudson 2007). Aksi takdirde, örnekler doğal su içeriklerini kaybederler. Bu açıdan, gerekiyorsa, örneklerin su içerikleri de deney öncesinde tayin edilmelidir.
- v. Örneğin çapı ve boyu kumpasla birbirine dik yönlerde ölçülerek bu değerlerin ortalaması alınır ve yüklemenin yapılacağı kesit alanı hesaplanır.



- vi. Örnek, presin ortasındaki yükseltme plakasının üzerine merkezlenerek yerleştirilir. Eğer presin tavanına monte edilmiş büyük küresel bir başlık yoksa, küçük boyutlu ve küresel yüzeyli iki çelik silindir küresel yüzeyleri birbiriyle çakışacak şekilde örneğin üzerine konur.
- vii. Sistemdeki hidrolik vanası kapalı konuma getirildikten sonra sistemi çalıştırma düğmesine basılır ve yükleme kontrol vanası kolu ileri itilerek örneğin üzerine konduğu alt tabla yükseltilmeye başlanır. Bu sırada ani yükleme yapılmamasına dikkat edilir. Alttaki blok, örneğin üzerindeki silindirler ile presin üst bloğu arasında boşluk kalmayana değin yükseltilir. Örnekte boşluk kalmadığı elle de kontrol edilerek yükseltme işlemi tamamlanır. Yenilme sırasında kayaç parçalarının etrafa sıçrayarak tehlike yaratmasını önlemek amacıyla presin çevresine levha yerleştirilir.
- viii. Örnek 5 ile 10 dakika arasında yenilecek şekilde veya alternatif olarak saniyede 0,5-1 MPa'lık bir gerilim hızıyla presin yükleme hızı grafiğinden bir hız seçilir ve bu hız değeri, eğer kullanılan prese monteli ise, hız ayarlama düğmesi yardımıyla deney süresince sabit tutulmak üzere ayarlanır.
- ix. Yükleme kontrol vanası yavaşça döndürülerek yükleme işlemine başlanır. Yük göstergesindeki ibrenin, seçilen hıza uygun şekilde ilerlemesi sağlanır eğer hız uygun değilse hız kontrol sistemi ile hız ayarlanır.
- x. Örnek yenildiği anda yenilme yükü %1 duyarlılıkta göstergeden okunur ve hidrolik sistem durdurulur. Hidrolik vanası açılarak yağ boşaltılır ve örneğin üzerine konduğu alt tabla alçaltılır, daha sonra örnek ve silindirler prestan çıkarılır. Örneğin yenilme şeklide kaydedilir (Şekil 4.11).
- xi. Deneyde kullanılacak örnek sayısı, pratik gereksinimlere bağlı olmakla birlikte, ISRM (1981) tarafından her kayaç türünden en az beş örneğin deneye tabi tutulması önerilmektedir.



**Şekil 4.11** Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde örneğin yenilmesinin şematik gösterimi

Şekil 4.12’de tek eksenli basınç dayanımı deneyinin laboratuvar ortamında yapılışı sunulmaktadır.



**Şekil 4.12** Deneyin Yapılışı.

Kayaçların sahip olduğu jeolojik özellikler dayanımında oldukça etkilidir. Kayaçların basınç dayanımına etkileyen jeolojik özellikler aşağıda verildiği gibidir;

- Litoloji,
- Süreksizlik,
- Su içeriği,
- Çimentolanma ve kristalleşme derecesi,
- Homojenlik,
- İzotropluk,
- Ayrışma derecesi,
- Boy/Çap oranı,
- Yükleme hızı ve
- Örneğin alt ve üst yüzeylerinin nitelikleri.

#### 4.2.4 Hesaplamalar

Örneğin tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ) aşağıdaki Eşitlik 4.5' den hesaplanır.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{N}{mm^2} = [MPa] \quad (4.5)$$

Burada,

F: Yenilme anında kaydedilen yük,

A: Silindirik örneğin kesit alanı

Eğer örnek standartlarda olan çaptan farklı ise Eşitlik 4.6' de gösterilen çap düzeltme formülü kullanılır (Hoek and Brown 1981).

$$\sigma_c = \sigma_{c50} \times \left[ \frac{50}{D} \right]^{0,18} \quad (4.6)$$

$\sigma_{c50}$ : Çapı 50 mm olan bir örneğin basınç dayanımı

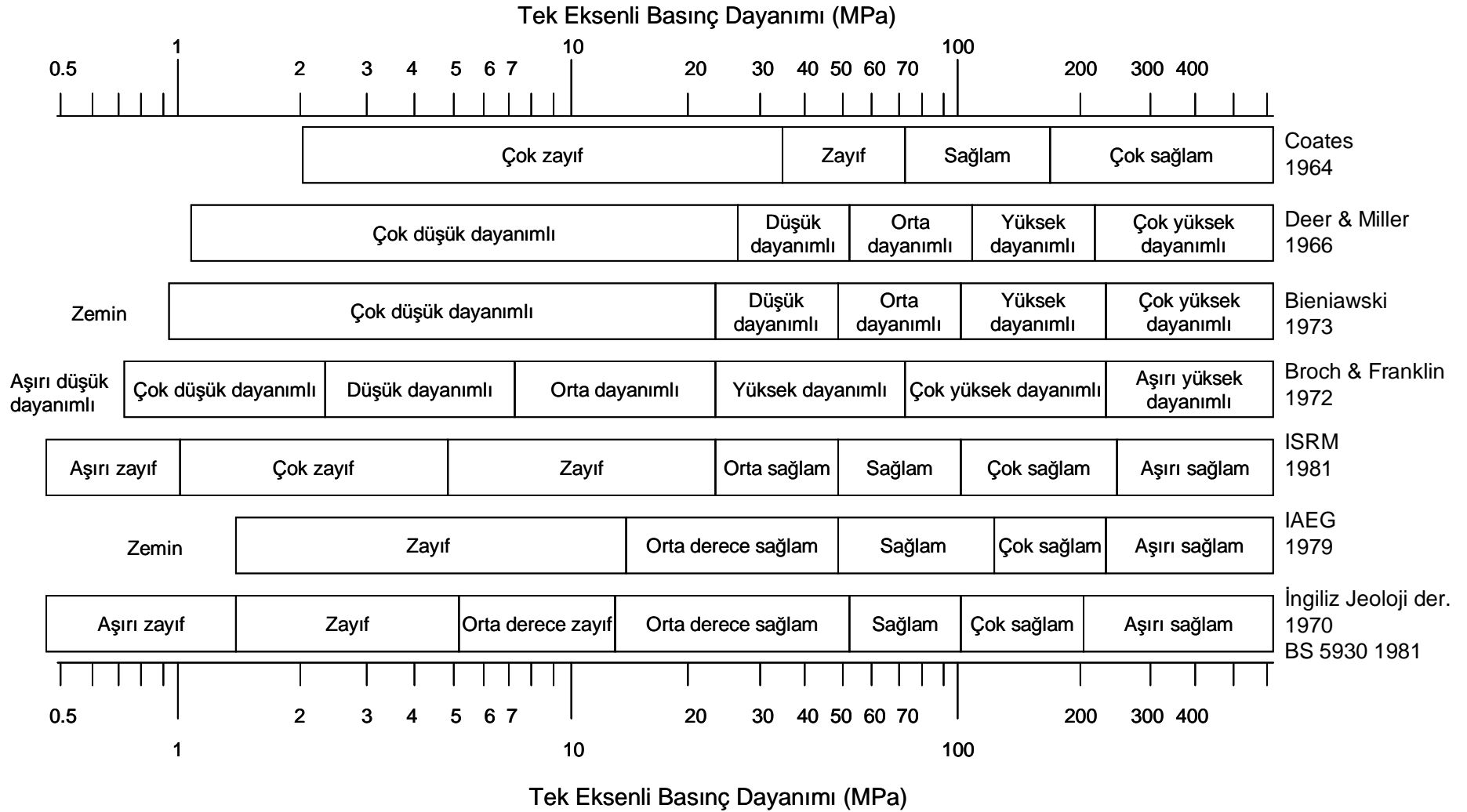
D: Örnek çapı

#### 4.2.5 Sonuç ve Yorumlar

Tek eksenli basınç dayanımı değeri kaya malzemesinin en önemli mekanik özelliğidir. 1960'lardan beri, mühendisler farklı tek eksenli basınç dayanımına sahip kayalar için bir sınıflama sistemi tanımlamaya çalışmışlardır. Farklı otoriteler arasında tutarlılık eksikliği olduğunu gösteren birkaç dayanım sınıflandırması Şekil 4.13 te sunulmaktadır. Şekil 4.13'te görüldüğü gibi araştırmalarını Kuzey Amerika'da sürdüren Coates (1964), Deere ve Miller (1966) ve Bieniawski'nin (1973) çalışmalarından sonra, 25 MPa civarında çok düşük ve düşük dayanımlı ayırımı yapılarak tek eksenli basınç dayanımı 50 MPa'dan küçük olan kayalar için düşük dayanımlı tanımlanması yapılması gerektiği düşünülmüştür. İngiliz çalışmacılar ise, malzemelerin dayanımını yapısal beton dayanımına (basınç dayanımı yaklaşık 25 MPa civarı) göre oranlayarak, yapısal betonu dayanımından düşük olan dayanımlara zayıf, yüksek olanlara ise sağlam tanımlaması yapmışlardır (Hawkins 1998).

Şekil 4.13'te görülebileceği gibi Amerikan ve İngiliz dayanım sınıflamaları arasında 50-100 MPa dayanım aralığında önemli derecede farklılıklar bulunmaktadır. Bu kategorideki kayalar, İngiliz Jeoloji Derneği (British Geological Society) raporlarında (1970) ve İngiliz Standartları'nda (British Standard) (BS 5930:1981) sağlam olarak tanımlanırken, Deere ve Miller (1966) ve Bieniawski (1973) tarafından sadece orta dayanımlı olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte, Deere ve Miller (1966) ve Bieniawski'nin (1973) verdiği orta dayanımlı terimi Broch ve Franklin (1972) tarafından 7,5 ve 25 MPa değeri arasında kullanılmıştır.

ISRM (1981), bu tanımlama kargaşasına bir çözüm getirmek için, Deere ve Miller veya Bieniawski'nin sınırlarıyla yaklaşık aynı sınırları kullanarak bir dayanım sınıflaması önermiştir. ISRM (1981) farklı olarak bu otoritelerin düşük dayanımlı sınıfını çok zayıf ve zayıf olarak ikiye ayırmıştır. ISRM sınıflamasında zayıf kaya sınıfı 5 ve 25 MPa arasında bulunmaktadır. Bu değer Broch ve Franklin'in (1972) orta dayanımlı ve İngiliz Jeoloji Derneği ve İngiliz Standartlarının orta derecede zayıf ve orta derecede sağlam sınıfına denk gelmektedir. Her ne kadar ISRM (1981), 50-100 MPa arasında kayaları sağlam olarak tanımlayarak ve 100 MPa üzerinde benzer terimler kullanarak İngiliz Jeoloji Derneği'ni desteklese de, 50 MPa aşağısında ISRM ve İngiliz Jeoloji Derneği arasında farklılıklar bulunmaktadır. IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment: Uluslararası Mühendislik Jeolojisi ve Çevre Birliği) ise 1979 yılında bu tartışmaya 1,5 ve 15 MPa değeri arasında zayıf olarak tanımlanan bir bölge eklemiştir (Hawkins 1998).



Şekil 4.13 Bazı kaya dayanımı sınıflandırmalarının karşılaştırılması (Bieniawski 1989' den değiştirilmiştir).

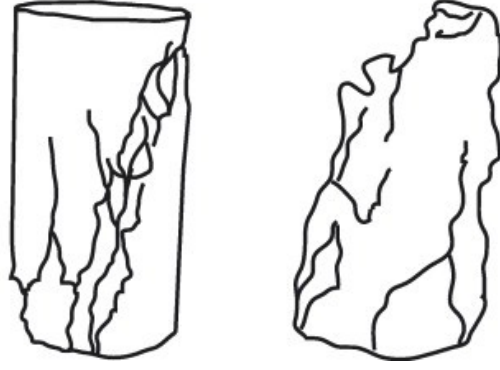
100 MPa değeri üzerinde, sınırların hassasiyeti mühendislik çalışmaları açısından pek pratik olmamakla birlikte daha az önem taşımaktadır ve bu nedenle Şekil 4.14'te logaritmik bir ölçek kullanılmıştır. Bu nedenle çok sağlam sınırı olarak, İngiltere'de 200 MPa değerinin kullanılmasının ve bu durumdan farklı olarak ISRM ve IAEG yetkilileri ve Bieniawski (1989) gibi yazarların ise 230 veya 250 MPa değerini seçmelerinin mühendislik açısında kritik bir önemi yoktur (Ulusay and Hudson 2007).

Birçok kazı çalışması, tünel inşası ve madencilik işleri gibi mühendislik çalışmalarının çoğunlukla tek eksenli basınç dayanımı 50 MPa'ın altındaki kayalar içerisinde yapıldığından, pratik mühendislik çalışmalarında bu dayanım değeri civarının doğru olarak tanımlaması özellikle önemlidir. Eğer bir malzemenin dayanımı 5 MPa değerinden az ise, büyük olasılıkla süreksiz aralığı ne olursa olsun mekanik kazıcılara kolayca kazılabilecektir. İnce tabakalaşmış (tabaka kalınlığı 20 cm den az) kayalarda ise bir ekskavatör 12-15 MPa'a kadar olan dayanımdaki malzemeyi rahatlıkla kazabilmektedir. Eğer tabakalaşmalar daha geniş aralıklı veya dayanım daha fazlaysa, ripperleme ya da patlatma olmadan malzemeyi kazmak zor olacaktır. 20 ve 25 MPa dayanımlı malzemelerde ise mekanik kazıcılar nadiren etkili olarak kullanılmaktadır.

Bu nedenlerle pratik mühendislik çalışmalarında dayanım sınırlarını İngiliz Jeoloji Derneği ve IAEG'ın önerdiği gibi 12-15 MPa dayanım değerleri arasında belirlemek pek avantajlı gözükmemektedir. Sınırları 20 veya 25 MPa dayanım değerleri değerlerine (Bieniawski 1973, 1989) yerleştirmek, kazılabilirliklerine göre malzemeleri ayırt etme tanımlamalarında esnekliğe izin vermemektedir.

Bu nedenle Hawkins (1998) tarafında, İngiliz jeoloji Derneği'nin Mühendislik Grubu 'nun önerdiği ve İngiliz Standartlarının (1981) içerdığı terminolojinin benimsenmesi gerektiği tasfiye edilmektedir (Hawkins 1998).

Ulusay and Hudson (2007) tarafından her kayaç türünden en az beş örneğin deneye tabi tutulması önerilir. Yenilme, uygulanan basınç etkisiyle tipik kırılma şekillerindeki (Şekil 4.14) gibi gerçekleşmişse yapılan deneyler geçerlidir. Aksi kırılma durumlarında deney tekrarlanır.

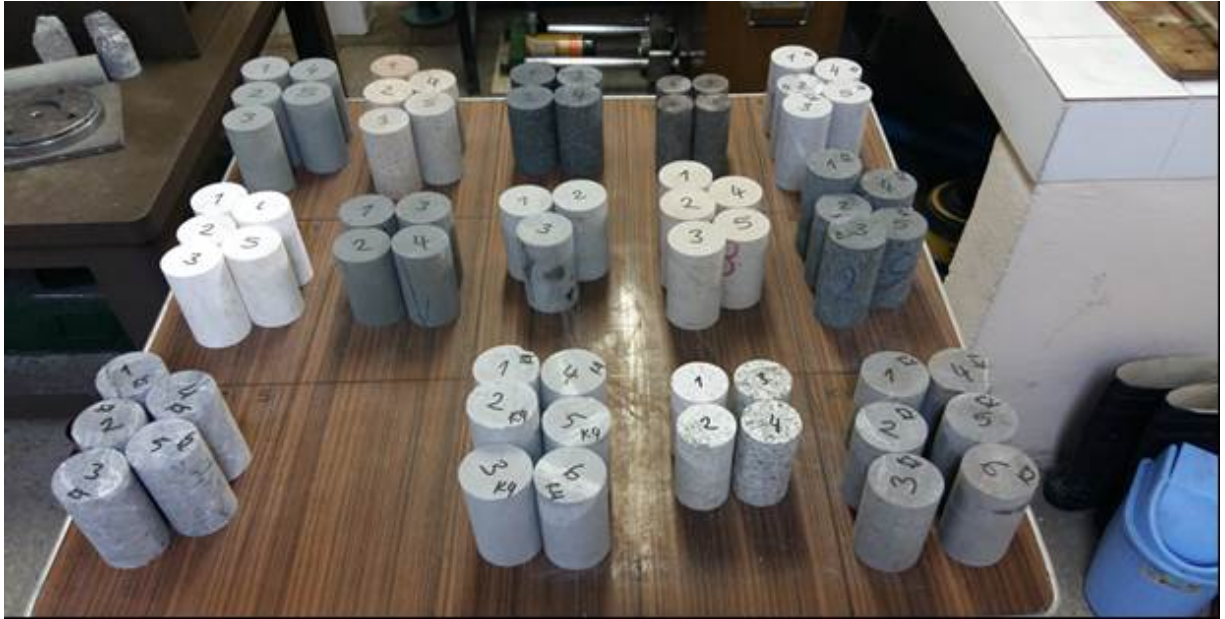


Şekil 4.14 Deneyde karşılaşılan tipik kırılma şekillerinden örnek.

#### 4.2.6 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi Laboratuvar Çalışmaları

Tek eksenli basınç dayanımı deneyi; BEÜ Maden Mühendisliğinde bulunan Kaya Mekaniği Laboratuvarındaki Hidrolik Katı Yükleme makinesi kullanılarak yapılmıştır.

Tek eksenli basınç dayanımı deneyi için 14 tane kayaçtan ortalama 5'er adet olmak üzere Şekil 4.15'de gösterilen örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu örnekler Hidrolik preste yenilme yüküne kadar yüklenerek elde edilen yenilme yükleri kaydedilmiş ve gerekli hesaplamalar yapılarak tek eksenli basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.15 Tek eksenli basınç dayanımı deney örnekleri.

Örnek, presin ortasındaki yükseltme plakanın üzerine merkezlenerek yerleştirilir. Eğer presin tavanına monte edilmiş büyük küresel bir başlık yoksa küçük boyutlu ve küresel yüzeyli iki çelik silindir küresel yüzeyleri birbiriyle çakışacak şekilde örneğin üzerine konur. Alttaki blok, örneğin üzerindeki silindirler ile presin üst bloğu arasında boşluk kalmayana değin yükseltilir. Örnekte boşluk kalmadığı elle de kontrol edilerek yükseltme işlemi tamamlanır. Yenilme sırasında kayaç parçalarının etrafa sıçrayarak tehlike yaratmasını önlemek amacıyla presin çevresine levha yerleştirilir.

Tek eksenli basınç dayanımı bir yapının planlanması ve tasarımında yararlanılan en önemli parametrelerden biridir. Deney yapıldıktan sonra kayaçlar elde ettikleri değerlere göre sınıflara ayrılır ve planlaması yapılan yapı ile ilgili gerekli işlemler bu sonuçlara göre yapılır.

Tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesi için birçok araştırmacı sınıflama sistemi geliştirmiştir. Coates (1964), Deer ve Miller (1966), Bieniawski (1973), Broch ve Franklin (1972) ve ISRM (1981) gibi sınıflamalar yapmışlardır.

Sonuç olarak, farklı bölgelerden alınan 14 kayacın her birinden ortalama 5'er adet olmak üzere toplamda 70 adet deney yapılmış ve elde edilen sonuçların ortalaması ISRM'in 1981 yılında önerdiği sınıflama sistemine göre sınıflandırılarak Çizelge 4.4'te sunulmuştur. Göz önünde bulundurulan her bir kayaç için elde edilen ortalama sonuçlar, dayanım farklılıklarının daha ayrıntılı bir şekilde gözlenebilmesi için Şekil 4.16'da ayrıca verilmektedir. Ek olarak, her bir kayaç için elde edilen tüm sonuçlar EK B'de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

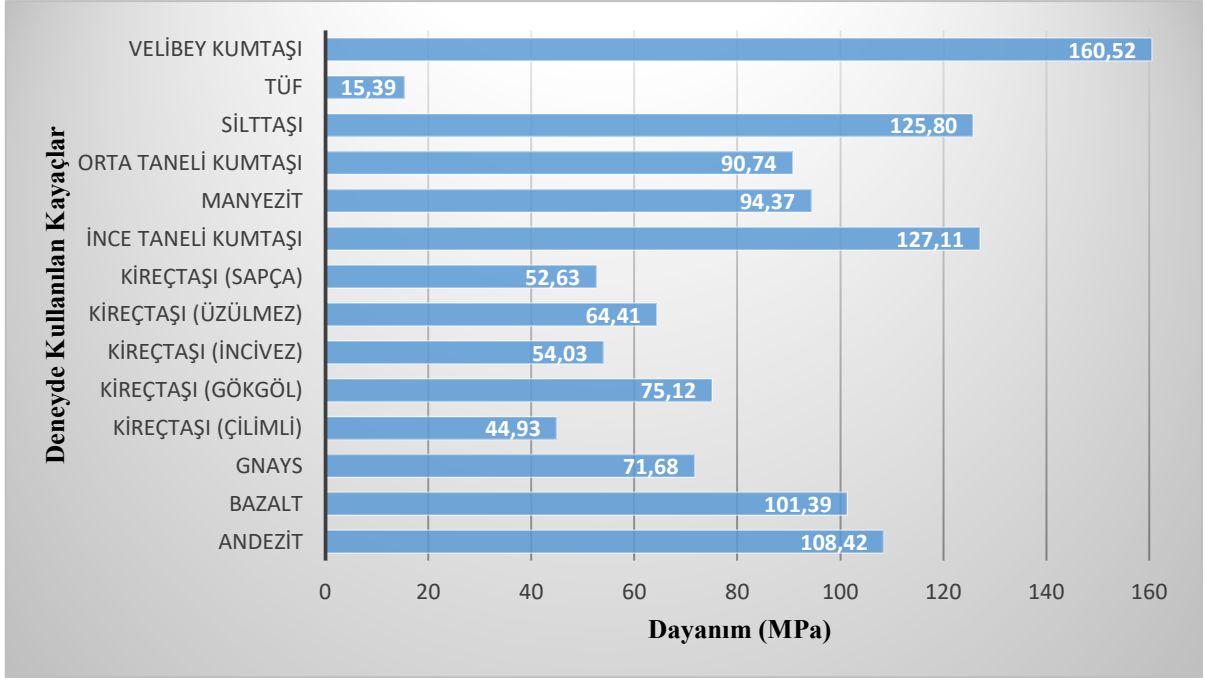


**Çizelge 4.3** Tek eksenli basınçlı dayanımı deneyi sonuçları ortalaması ve ISRM'e (1981) göre sınıflandırılması.

Kayaç Adı	Deneylerin Ortalaması (MPa)	ISRM (1981)
Andezit	108,4±34,1	Çok Sağlam
Bazalt	101,4±68,2	Çok Sağlam
Gnays	71,7±26,6	Sağlam
Kireçtaşı (Çilimli)	44,9±10,5	Orta Sağlam
Kireçtaşı (Gökgöl)	75,1±38,1	Sağlam
Kireçtaşı (İncivez)	54,0±18,2	Sağlam
Kireçtaşı (Üzülmez)	64,4±23,9	Sağlam
Kireçtaşı (Sapça)	52,6±24,2	Sağlam
İnce Taneli Kumtaşı	127,1±6,64	Çok Sağlam
Manyezit	94,4±28,9	Sağlam
Orta Taneli Kumtaşı	90,7±6,81	Sağlam
Silttaşı	125,8±20,6	Çok Sağlam
Tüf	15,4±4,19	Zayıf
Velibey Kumtaşı	160,5±2,31	Çok Sağlam

Çizelge 4.4'te görüleceği gibi tez kapsamında yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kullanılan kayaçların çoğu sağlam kayaç olarak sınıflanmıştır ve sadece bir tanesi zayıf kayaç sınıfına girmiştir.

Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde deney sonunda örneğin kırılış şekli deneyin geçerli olup olmadığında da etkilidir. Örnek dağınık, hızlı ve ani yükleme, örneği düzeneğe tam yerleştirememeye gibi durumlarda, düzensiz bir şekilde, ani patlama gibi biranda yenilirse deney geçersiz olur. Deneyin geçerli olabilmesi için örneğin yüklemesi kurallara uygun yapılmalı ve düzgün bir biçimde düzeneğe yerleştirilmelidir ve örnek düz bir eksen hattı boyunca kırılmalıdır.



**Şekil 4.16** Tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçlarının grafik gösterimi.

Tez kapsamında yapılan tek eksenli deneyi sonucunda kırılan örneklerin bazıları Şekil 4.17’de gösterilmektedir. Şekil 4.17 incelendiğinde, örneklerin gevreklik ve kırılabilirlik gibi yapısal özelliklerine bağlı olarak, değişik yenilme modlarında kırıldıkları gözlenmektedir. Örneklerin literatürde bahsedilen kesme ve çekme gibi yenilme modlarına uygun olarak kırılmaları, tek eksenli basınç dayanımı için yapılan deneyin geçerli olduğunu göstermiştir.



**Şekil 4.17** Tek eksenli basınç dayanımı deney sonucunda farklı kayalarda gözlenen yenilme tipleri.

### **4.3 DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI (BRAZILIAN) DENEYİ**

Dolaylı çekme dayanımı deneyi; 1930'lardan 1960'lara kadar Rio de Janeiro'daki Brezilya Ulusal Teknoloji Enstitüsü'nde (INT), betonun mühendislik bilimi ve teknoloji üzerine araştırmalara öncülük eden, Brezilyalı mühendis ve bilim adamı Prof. Fernando L. L. B. Carneiro' nun buluşu (1913-2001) olarak kabul edilmektedir.

1940'lı yılların başında II. Dünya Savaşına giren Brezilya'da hava alanlarındaki beton uçuş pisti kaplama uygulamaları, betonun çekme dayanımının belirlenmesini gerektiriyordu. Carneiro'nun ekibince doğrudan çekme deneyleri işlemsel zorluklar nedeniyle benimsenmemişti, yerine bütün dünyada yaygın olarak kullanılan üç veya dört- nokta yüklemeli eğilme deneyleri yapılmaktaydı.

Ancak Carneiro, bu yapısal deneylerin çekme dayanımı gibi duyarlı bir mekanik özelliği değerlendirmedeki sınırlamalarını biliyordu. Modern kırılma mekaniği kuramı ve ölçekleme yasalarının yokluğunda, betonun basınç dayanımı ile eğilmede çekme dayanımı arasında bir ilişki geliştirmekte başarısız oldu.

Rio de Janeiro'da yeni yapılacak bir yolun geçkisi üzerinde bulunan Barok tarzında bir kilisenin, yıkılması yerine, taşınmasına karar verilmesiyle ortaya çıkan iddialı bir mühendislik problemi, Carneiro'nun bugün dolaylı çekme dayanımı deneyi olarak bildiğimiz yeni bir yöntemi geliştirmesine esin kaynağı olmuştur. Kilise, üretilen çelik savaş girişimlerine yönlendirildiği için, beton baskı silindirler üzerinde yeni yerine taşınacaktı.

Carneiro, beton silindirlerin deneylerden sorumluydu. Deneylerde, yatırılarak yan yüzlerinden yüklenen silindirler, daima basınç plakalarına değen noktaları birleştiren düşey çap düzlemi boyunca yarılarak kırılmaktaydı. Bu gözlem basınç deneyleri için Brezilya standartlarında tanımlanan silindirlere (D=150 mm, L= 300 mm) uygulanabilecek bir çekme deneyinin geliştirilmesine yol açmıştır.

Carneiro, ayrıca uygunluk olsun diye, yükleme plakaları ile örnek arasına örnek çapının onda biri genişliğinde yük dağıtma şeritleri koyulmasını önermiştir. Carneiro (1943), elastisite kuramına dayanan basit bağlantılar kullanarak, bugün yaygın olarak kullandığımız, kırılma anındaki çekme dayanımını veren bağıntıyı bulmuştur. Yöntem, ilk kez 16 Eylül 1943'te Brezilya Teknik Kurallar Birliğinin 5. Toplantısında sunulmuştur. Savaş sonrasında, Carneiro'nun yöntemi Malzeme Deneyleri Laboratuvarları'nın Paris'teki uluslararası toplantısında sunulmuştur.

Bu konuyla ilgili diğer ilginç husus da Japonların çok benzer bir deney yöntemini bağımsız olarak bulmuş olmalarıdır. Tsunei Akazawa (1943), 1941 Kasımından itibaren benzer deneyler yaptığını ve deneyi Kasım 1943'te (Carneiro'dan 2 ay sonra) doktora tezi olarak bir

dergide yayımladığını 1953'te yayımlanan RILEM Bülten'inde belirtmektedir. Japon İnşaat Mühendisleri Enstitüsü tarafından Akazawa'ya bu çalışmadan dolayı 1944 yılında bir ödül verildiği ve Ağustos 1951'de yöntemin betonun çekme dayanımını belirlemek üzere Japon Endüstri standartı olarak kabul edildiği de rapor edilmektedir (Gerçek vd. 2011).

Akazawa'nın yükleme plakaları ile beton örneği arasına yük dağıtıcı şerit koymaması iki yöntem arasındaki en belirgin farktır (Machida 1975).

#### **4.3.1 Deneyin Amacı ve Kullanım Alanları**

Bu deney, disk şeklinde hazırlanmış kayaç örneklerinin çapsal yükleme altında çekme dayanımlarının dolaylı yoldan tayini amacı ile yapılır.

Bu yöntemle, silindirik kayaç örneklerinin uçlarından sabitlenerek çekilmesi şeklinde uygulanan doğrudan çekme deneyine göre, genellikle biraz daha yüksek çekilme dayanımları elde edilmektedir.

Örneklerin deneye hazırlanması ve deneyin yapılışı açısından daha pratik olması nedeni ile dolaylı çekme dayanımı deneyi daha yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Dolaylı çekme dayanımı deneyi, bazı yenilme ölçütlerinde ve duraylılık analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Çekme dayanımı kayacın tek eksenli basınç dayanımından sonra en önemli özelliklerinde biridir. Doğrudan çekme dayanımının elde edilmesindeki güçlüklerden dolayı dolaylı çekme dayanımı kayacın çekme dayanımının belirlenmesi amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır.

#### **4.3.2 Deneyde Kullanılan Araç-Gereçler**

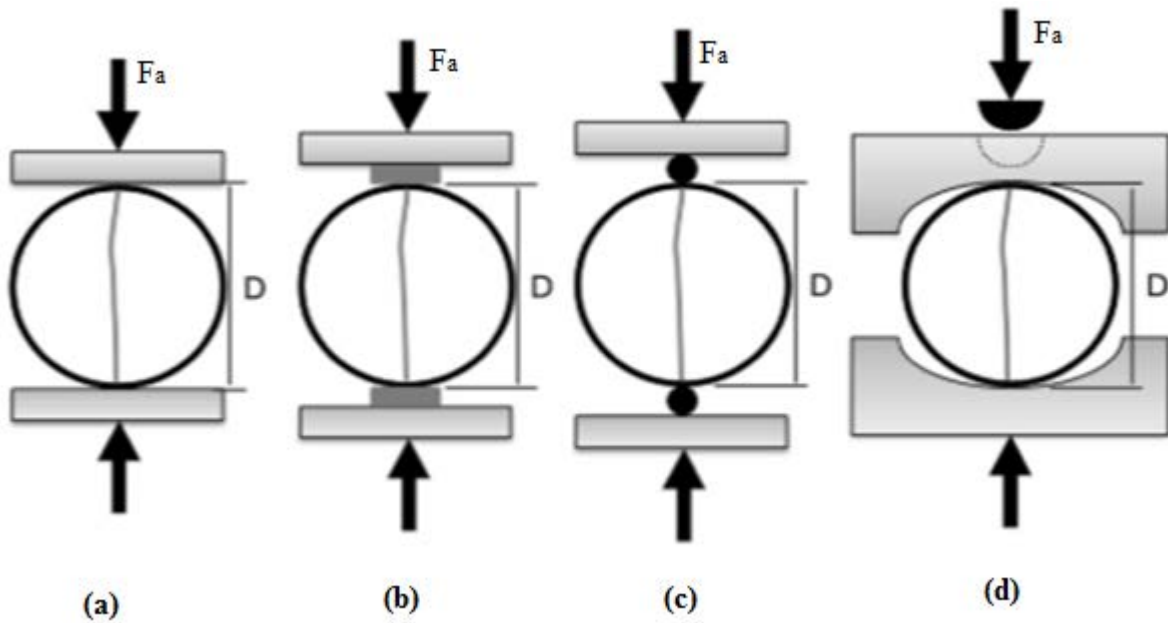
Disk şeklinde hazırlanmış örneğin çapsal olarak birbirine zıt konumlu yüzeylerine temas eden, metalden imal edilmiş yükleme çeneleri ve kılavuz saplamalarından oluşan düzenek. Bu düzeneğin en kritik boyutları; çenelerin eğrisellik çapı, alt ve üst çenelerin birbirine bağlanmasını sağlayan kılavuz saplamaların sağlayacağı açıklık ve uzunlukları ile çenelerin genişliğidir.

Düzenegi oluşturan parçaların boyutları:

- Çenelerin yarıçapı, örneğin yarıçapının 1,5 katı olmalıdır.
- Çenelerin birinin düzenek düzlemi üzerinde diğetine göre göreceli olarak çapın 0,004'ü dönmesine olanak sağlayacak şekilde, kılavuz piminin iç oluğuna girmesi için 25 mm'lik bir ilerlemeye izin verebilir.
- Çenelerin genişliği, örnek boyunun 1,1 katı olmalıdır.
- Üstteki çene, 25 mm çapında, yarı küresel bir elamandan oluşan bir küresel başlığı içermelidir.
- Yükleme hızı ayarlanabilen ve tercihen küresel bir yükleme başlığı olan yükleme ünitesi (Pres)
- Kompas (0,1 mm duyarlılıkta)

### 4.3.3 Deneyin Yapılışı

Dolaylı çekme dayanımı deneyi uçların durumuna göre değişik şekillerde yapılabilir. ISRM (1978) tarafından örnek yarıçapının 1,5 katı olan bir çene seti önerilmektedir. Bununla birlikte dolaylı çekme dayanımı deneyi için birkaç tane daha farklı yükleme başlığı düzeni kullanılmaktadır. Bu yükleme başlıklarından en çok kullanılanları Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18 Dolaylı çekme dayanımı deneyi yükleme başlıkları (Li and Wong 2012).

Yukarıda ki şekilde;

- a) Düz Yükleme Başlıklı,
- b) Yastıklı Düz Yükleme Başlıklı,
- c) Küçük Çaplı Silindir Kullanılan Düz Yükleme Başlıklı,
- d) Eğimli Yükleme Çenelerini ifade etmektedir.

Yapılan deneylerde Ulusay and Hudson (2007) tarafından önerilen yükleme çeneleri kullanılmıştır (Şekil 4.18.d).

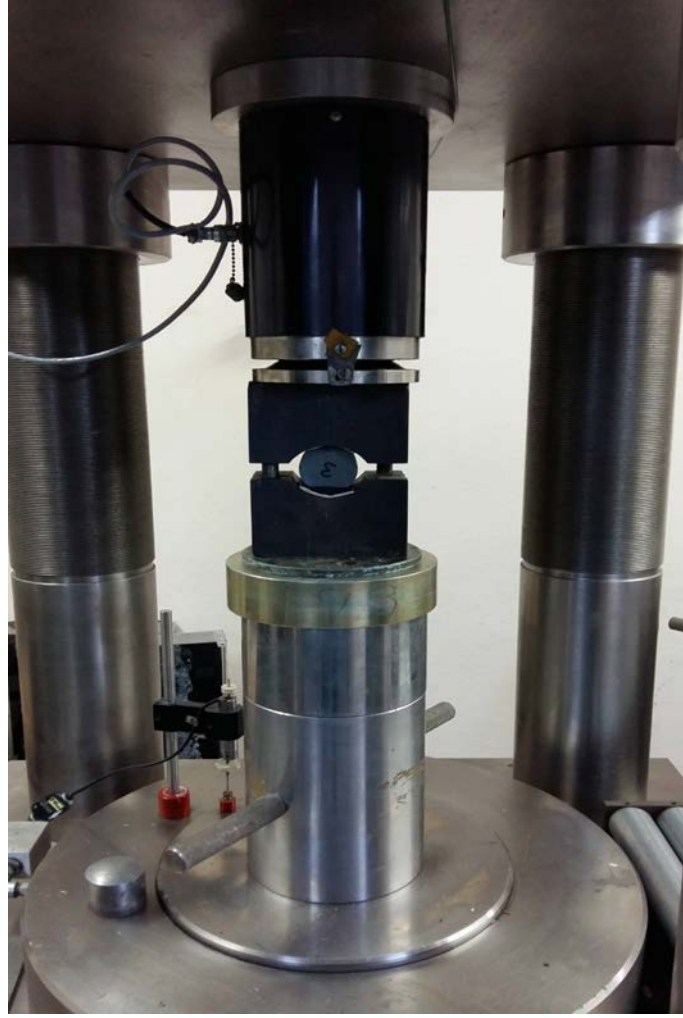
Çapı en az 54 mm ve boyu yarıçapı ile hemen hemen aynı olan (yani örneğin boyu çapının yarısı kadar), sağlam ve çatlaksız silindirik örnek hazırlanır. Örneğin alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel olmalıdır. Deneyde kullanılacak olan toplam örnek sayısı pratik değerlendirmelere bağlı olmakla birlikte, her kayaç biriminden 10 adet örneğin deneye tabi tutulmasında fayda vardır (Şekil 4.19).

Örneğin çapı (D) ve boyu (L) birbirine dik iki aynı yönde kompasla ölçülerek bu değerlerin ortalaması alınır.



Şekil 4.19 Deneyde kullanılan örneklerin görünümü.

Örnek, yan yüzeyleri yükleme çenelerinin arasında kalacak biçimde, yükleme başlığının altına koyulan çenelerin, nokta yükleme aleti kullanılıyorsa silindirik plakaların arasına yerleştirilir (Şekil 4.20).



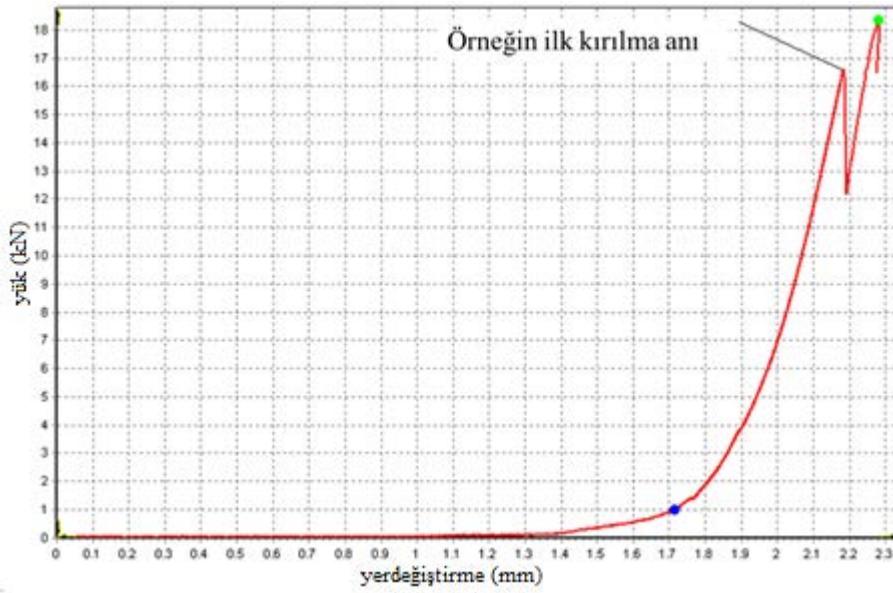
**Şekil 4.20** Örneğin ve yükleme çenelerinin hidrolik prese yerleştirilmesi.

Örnek, yenilme 15-30 sn arasında gerçekleşecek şekilde sabit bir hızla yüklenir. Bu amaçla 200N/sn'lik bir yükleme hızı önerilir.

Örneğin yenilme andaki yükü (F), yükleme ünitesinin göstergesinden (veya bilgisayardan) okunur ve gerekli yere not edilir. Burada bahsedilmesi gereken önemli bir husus, yükleme koşulu ve kaya örneğinin yapısal özellikleri dolaylı, bu deneyde örneğin çekme gerilmesi altından yenilmesinden sonra hala basınç yüklerine karşı dayanabilmesidir. Bu durumda örneğin ilk yenildiği anın belirlenmesi oldukça önem taşımaktadır. Aksi takdirde kaydedilen yenilme yükü çekme dayanımı için gerçeği yansıtmayacaktır. Geleneksel yüklenme makinalarında bahsi geçen bu ilk yenilme anının belirlenmesi bazı kayalarda oldukça zor olmaktadır. Bilgisayar kontrollü gelişmiş yükleme makinalarında ise ilk yenilme anının belirlenmesi oldukça kolaydır. Şekil 4.21'de dolaylı çekme dayanımı deneyindeki yükleme anında örneğin ilk kırılma anının tespit edilmesi gösterilmektedir. Şekil 4.21'den de



görülebileceği gibi, yük almaya devam eden örnekte bir anda yük düşüşü olmuş ve daha sonra yük taşımaya devam etmiştir.



Şekil 4.21 Dolaylı çekme dayanımı deneyindeki yükleme anında örneğin ilk kırılma anının tespit edilmesi.

#### 4.3.4 Hesaplamalar

Deney sonucunda elde edilen yük yardımıyla Eşitlik 4.7' deki formülden örneğin çekme dayanımı hesaplanır.

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi \times D \times L} \text{ [MPa]} \quad (4.7)$$

**F**= Örneğin yenilmesi anında uygulanan yük (N)

**D**=Örneğin çapı (mm)

**L**=Örneğin boyu (mm)

Deney sonuçları her bir deney için tek tek hesaplanır ve sonra ortalama dolaylı çekme dayanımı bulunur.

#### 4.3.5 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Dolaylı çekme dayanımında, yükleme altındaki yatay yönde oluşan çekme dayanımlarının dolaylı yönden tayini amacı ile yapılmakta olduğu için açık ocak ve yer altı işletmelerinde üzerinde çalışılan kayaç formasyonu ilgili kayaca gelecek çekilme kuvveti altında kayacın gösterdiği dayanım ile yola çıkılarak ön bir bilgi edinmemizi sağlar. Yeraltı çalışmalarında açılan galerilerde hangi tip tahkimat ünitesine ihtiyaç duyulacağı ve kazı sistemleri hakkında bize yardımcı olur. Çizelge 4.6'da dolaylı çekme dayanımının tek eksenli basınç dayanımı ile karşılaştırmalı olarak sınıflandırılması verilmektedir.

**Çizelge 4.4** Dolaylı çekme dayanımının tek eksenli basınç dayanımı ile karşılaştırmalı olarak sınıflandırılması (Backstrom et al. 2009).

Tanım	Basınç Dayanımı İçin Yaklaşık Değer Aralığı (MPa)	Çekme Dayanımı İçin Yaklaşık Değer Aralığı (MPa)
Zemin	< 0,5	< 0,05
Aşırı Zayıf	0,25 - 1	0,025 - 0,1
Çok Zayıf	1 - 5	0,1 - 0,5
Zayıf	5 - 25	0,5 - 2,5
Orta	25 - 50	2,5 - 5
Sağlam	50 - 100	5 - 10
Çok Sağlam	100 - 250	10 - 25
Aşırı Sağlam	> 250	> 25

Dolaylı çekme dayanımı deneyi yapıldıktan sonra; deney sonuçlarının geçerli olup olmadığı örneğin kırılış şekline bakarak karar verilir. Deneyde oluşturulan basınç etkisiyle yenilmeye uğrayan numuneler yükleme uçları boyunca bir eksenden geçtiği için yapılan deneyler geçerli sayılmaktadır. Yani örnek yükleme noktalarından itibaren merkezden geçecek şekilde kırıldıysa deney geçerli, merkezden geçemeyecek şekilde kırılırsa deney tekrarlanır.

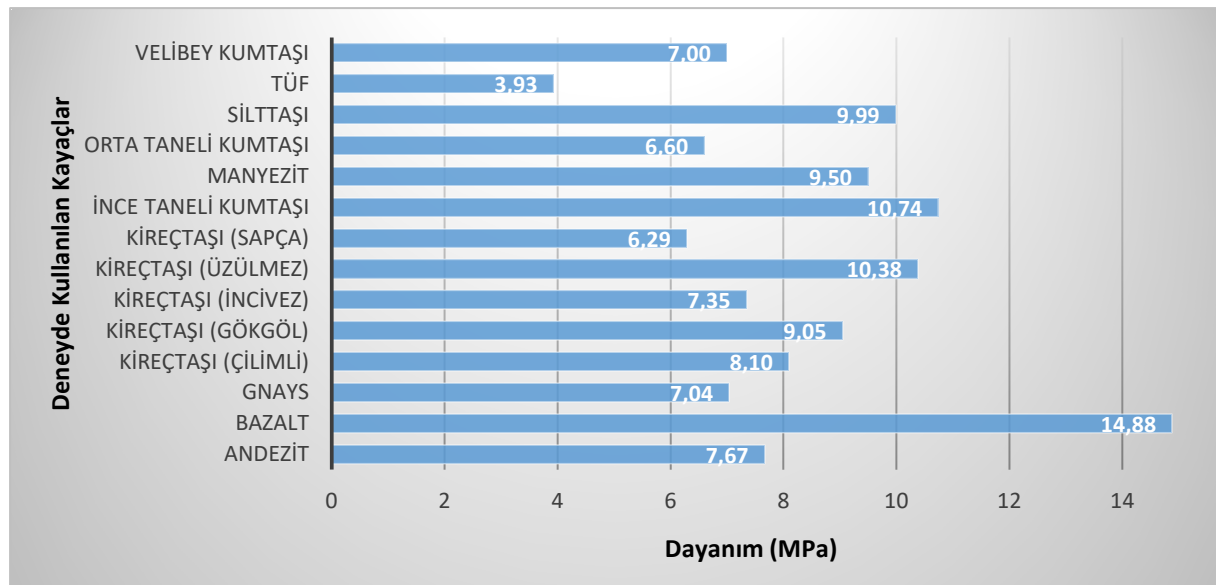
#### 4.3.6 Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyi Laboratuvar Çalışmaları

Dolaylı çekme dayanımı deneyi; BEÜ Maden Mühendisliğinde bulunan Kaya Mekanikği Laboratuvarında Hidrolik Katı Yükleme makinesi kullanılarak yapılmıştır.

Dolaylı çekme dayanımı deneyi için; 14 kayaç türünden ortalama 10'ar adet olmak üzere toplamda 140 adet örnek Bölüm 4' te anlatıldığı gibi hazırlanmıştır. Hazırlanan bu örnekler, yan yüzeyleri yükleme çenelerinin arasında kalacak biçimde, yükleme başlığının altına koyulan çenelerin, nokta yükleme aleti kullanılıyorsa silindirik plakaların arasına yerleştirilir.

Örnek, yenilme 15-30 sn arasında gerçekleşecek şekilde sabit bir hızla yüklenir. Bu amaçla 200N/sn'lik bir yükleme hızı önerilir.

Hidrolik preste kırılarak elde edilen örneklerin ilk yenilme yükleri kaydedilmiş ve gerekli hesaplamalar yapılarak dolaylı çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler ve bu değerlerin dayanım sınıflaması Çizelge 4.7'de sunulmuştur. Göz önünde bulundurulan her bir kayaç için elde edilen ortalama sonuçlar, dayanım farklılıklarının daha ayrıntılı bir şekilde gözlenebilmesi için Şekil 4.22'de ayrıca verilmektedir. Ek olarak, her bir kayaç için elde edilen tüm sonuçlar EK C'de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 4.22 Dolaylı çekme dayanımı deney sonuçlarının grafik gösterimi.

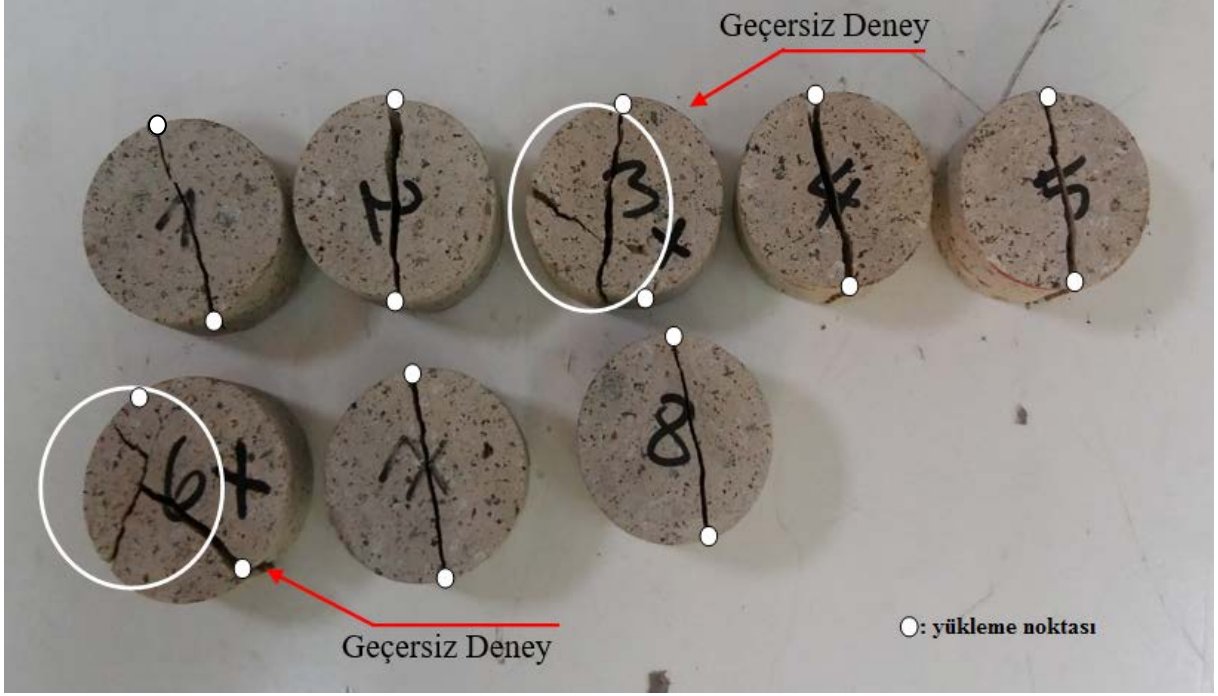
**Çizelge 4.5** Dolaylı çekme dayanımı deney sonuçlarının ortalaması ve dayanım sınıflaması.

Kayaç Adı	Deneilerin Ortalaması (MPa)	Sınıflandırma
Andezit	7,67±1,89	Sağlam
Bazalt	14,9±2,66	Çok Sağlam
Gnays	7,04±1,03	Sağlam
Kireçtaşı (Çilimli)	8,10±1,27	Sağlam
Kireçtaşı (Gökgöl)	9,05±1,63	Sağlam
Kireçtaşı (İncivez)	7,35±1,63	Sağlam
Kireçtaşı (Üzülmez)	10,4±2,24	Çok Sağlam
Kireçtaşı (Sapça)	6,29±3,17	Sağlam
İnce Taneli Kumtaşı	10,7±1,14	Çok Sağlam
Manyezit	9,50±2,64	Sağlam
Orta Taneli Kumtaşı	6,60±2,52	Sağlam
Silttaşı	9,99±2,96	Sağlam
Tüf	3,93±0,51	Orta
Velibey Kumtaşı	7,00±0,93	Sağlam

Çizelge 4.7’de verilen dolaylı çekme dayanımı deney sonuçlarına göre deneyde kullanılan kayaçların çoğu sağlam kaya sınıfına girdiği anlaşılmaktadır.

Dolaylı çekme dayanımı deneyinde, deneyin geçerli olması için örneğin kırılma şeklide önemlidir. Örnek; yenilme merkezden geçecek şekilde düz bir eksen hattı boyunca kırılmalıdır. Bu şekilde kırılma gözlenmesi için örnek düzeneğe düzgün yerleştirilmeli ve örneğin özelliklerine göre çeneler kullanılmalıdır. Kullanılan bantlar yükü eşit dağıtacak özellikte olmalıdır.

Deney sonuçlarının geçerli ve geçersiz deney örnekleri Şekil 4.23’de verilmiştir. Geçersiz örnekler işaretlenmiştir. Şekil 4.23’ten de görülebileceği gibi, 3 numaralı ve 6 numaralı deneyin kırılması yükleme noktaları arasından geçmediği için geçersiz sayılmıştır ve hesaplamalara katılmamıştır.



Şekil 4.23 Dolaylı çekme dayanımı deney sonucunda örneklerin kırılmış halleri.



## BÖLÜM 5

### GÖZ ÖNÜNDE BULUNDURULAN DENEYLERİN İSTATİSTİKSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Mühendislik açısından bakıldığı zaman, değişik amaçlar için birçok tipte yeraltı ve yerüstü yapısı oluşturulmaktadır. Oluşturulacak bu yapıların, düzeneğin ya da sistemin hizmet koşullarında duraylılığını kaybetmeden işlevini yerine getirmesinin sağlanması tasarımcının temel amacıdır. Gerek yeraltı gerekse yerüstü olsun bu türdeki çalışmaların tümünün duraylılığını etkileyen en önemli faktörler hiç kuşkusuz içinde bulunduğu kaya kütlelerinin mekanik özellikleridir. Duraylılık açısından bakıldığında, sağlam kaya malzemesinin ve/veya kaya kütlelerinin mekanik özelliklerinden tek eksenli basınç dayanımı ve tek eksenli çekme dayanımlarının belirlenmesi başta tasarım ve güvenlik olmak üzere birçok hususta oldukça önem taşımaktadır.

Sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı, kaya mekaniği pratiğinde en yaygın kullanılan jeomekanik özellik olup, bu özellik sağlam kaya malzemesinin ve kısmen de kaya kütlelerinin dayanımını belirlemektedir. Bununla birlikte, bu değer elde edilmesinde pratiklik açısından bir takım zorluklar mevcuttur. Bu nedenle, birçok araştırmacılar tarafında kaya mekaniği deneyleri arasındaki ilişkileri pratiklik açısından incelemiş olup özellikle arazi koşulların da elde edilmesi zor olan mekanik özellikleri tahmin etme yoluna gitmişlerdir. Tek eksenli basınç dayanımı değerinin tahmin edilmesinde en çok yararlanılan deney yöntemi nokta yükü dayanım indeksi deneyidir.

Kaya malzemesinin tek eksenli çekme dayanımının belirlenmesine yönelik farklı deney yöntemleri mevcut olup bu deneylerden bazıları, doğrudan çekme dayanımı deneyine göre hatırı sayılır derecede ucuz ve pratiktir ve de basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan yükleme makinalarında yapılabilirler. Diğer yandan, bu yöntemlerin çoğu pratik olmamaları ve güvenilir sonuç vermemeleri nedeniyle evrensel olarak kabul görmemiştir. Dolaylı deney yöntemleri arasında en çok bilineni ve en yaygın olarak kullanılanı Brezilya çekme deneyidir.

Yukarıda bahsedilen önemlerinden dolayı, tez çalışmasının bu bölümünde, çoğunluğu Zonguldak ili ve çevresi olmak üzere Türkiye'nin farklı bölgelerinden laboratuvar ortamına getirilen kayalar üzerinde, tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükü dayanım indeksi ve dolaylı çekme dayanımı deneyleri yapılmış (Bkz. Bölüm 4) ve arasındaki istatistiksel ilişkiler incelenmiştir. Burada bahsedilmesi gereken önemli bir husus, tez çalışmasının amacına uygun olarak, nokta yükü dayanım indeksi deneyinin geleneksel yolların aksine hidrolik katı yükleme makinesi kullanılarak deformasyon ve yük kontrollü olarak yapılmış olmasıdır. Deformasyon kontrollü olarak yapılan deneylerde yükleme 1,5 mm/dk, yük kontrollü olarak yapılan deneylerde ise yükleme 200 N/sn olarak yapılmıştır. Buradaki amaç, yükleme yönteminin kaya malzemesinin tez çalışması kapsamında göz önünde bulundurulmuş mekanik özellikleri arasındaki istatistiksel ilişkileri üzerindeki etkilerini incelemektir.

## **5.1 TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI İLE NOKTA YÜKÜ DAYANIM İNDEKSİ ARASINDAKİ İLİŞKİ**

Daha önceden de bahsedildiği gibi tek eksenli basınç dayanımı en önemli kaya mekaniği laboratuvar deneyi olarak kabul görmektedir. Bununla birlikte, birçok araştırmacı özellikle arazi koşullarında elde edilmesi zor olan bu mekanik özelliği nispeten daha kolay elde edilen özelliklerle tahmin etme yoluna gitmiştir. Nokta yükü dayanım indeksi deneyinin tek eksenli basınç dayanımı deneyine göre, deney için gerekli örneklerin çok daha kolay hazırlanması ve arazi koşullarında kolaylıkla yapılabilmesi gibi uygulama kolaylıkları mevcuttur. Bu nedenle, tek eksenli basınç dayanımı değerinin tahmin edilmesinde en çok yararlanan deney yöntemi nokta yükü dayanım indeksi deneyidir.

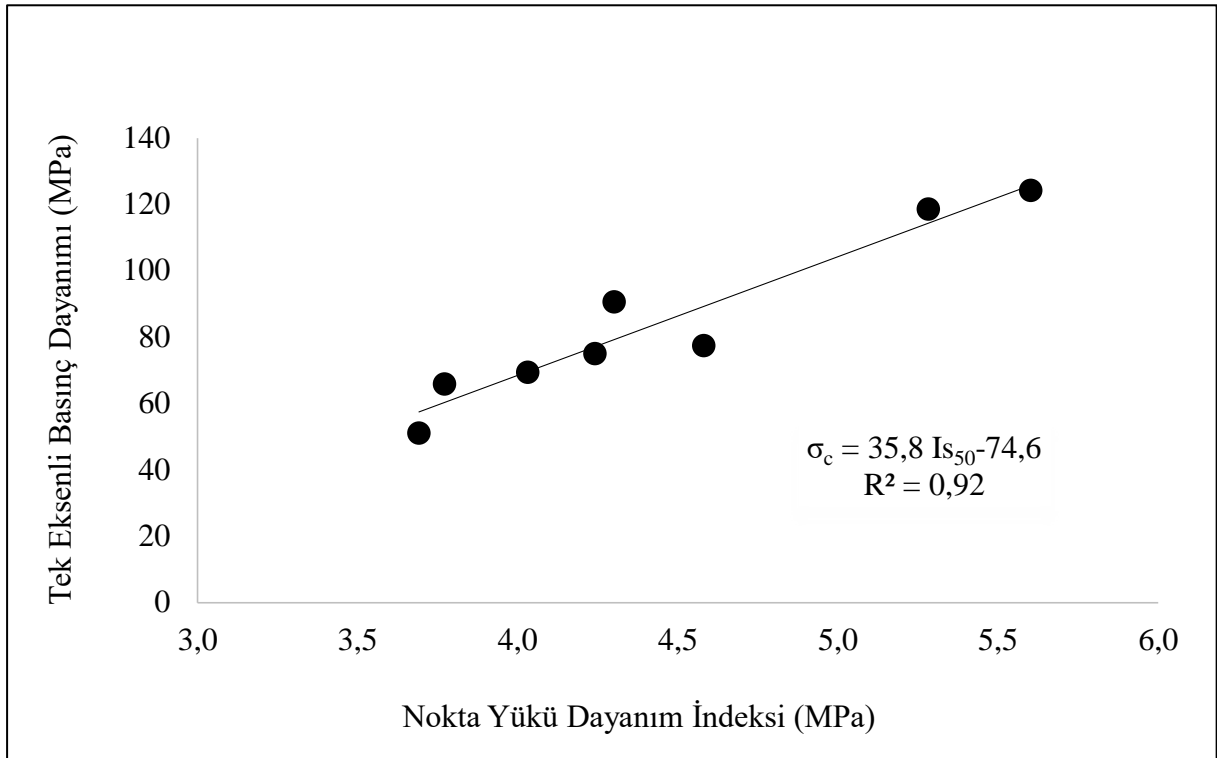
İlk olarak 1965'te D'andrea bu iş için girişimde bulunmuş ve nokta yükü dayanım indeksinden tek eksenli basınç dayanımı tahmin etmeye çalışmıştır. D'andrea'den (1965) sonra Broch ve Franklin (1972), Bieniawski (1975), ISRM (1985), Rusnak ve Mark (2000), Singh (2012) gibi birçok tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükü dayanım indeksi değeri arasındaki ilişkiyi incelemiş ve çeşitli sonuçlar elde etmişlerdir. Literatürde yapılan araştırmalar incelendiği zaman, araştırmacılar tarafından bu iki değer arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak çoğunlukla doğrusal şekilde elde edildiği göze çarpmaktadır. Ayrıcı tüm bu çalışmalarda bakıldığında, tek eksenli basınç dayanımı deneyinin yük kontrollü olarak yapıldığı nokta yükü dayanım indeksi dayanımının ise geleneksel yöntemlerle (hidrolik kriko), kesikli bir şekilde yüklendiği görülmektedir. Bu çalışmada, nokta yükü dayanım



indeksi deneyi geleneksel yolların aksine hidrolik katı yükleme makinesi kullanılarak hem deformasyon hem de yük kontrollü olarak yapılarak, yükleme koşulları da ayrıca göz önünde bulundurulmuştur. Bu bağlamda öncelikle tez çalışması kapsamında göz önünde bulundurulan kayaçlar oluşum türlerine göre ayrı ayrı ele alınmış sonra genel olarak değerlendirilmiştir.

Kayaç oluşum türlerine göre ayrı ayrı yapılan değerlendirmeler için, ilk olarak sedimanter kayaçlar ele alınmıştır. Daha sonra Zonguldak havzasında çok karşılaşılmaması sebebiyle kireçtaşları değerlendirilmiş olup, son olarak sedimanter olmayan kayaçlar ayrıca ele alınmıştır.

Tez kapsamında kullanılan sedimanter kayaçlar; Çilimli kireçtaşı, Gököl kireçtaşı, İncivez kireçtaşı, Üzülmez kireçtaşı, Sapça kireçtaşı, ince taneli kumtaşı, orta taneli kumtaşı, silttaşı ve Velibey kumtaşıdır. Bu kayaçlar ele alınarak yapılan istatistiksel değerlendirme sonucu elde edilen, tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



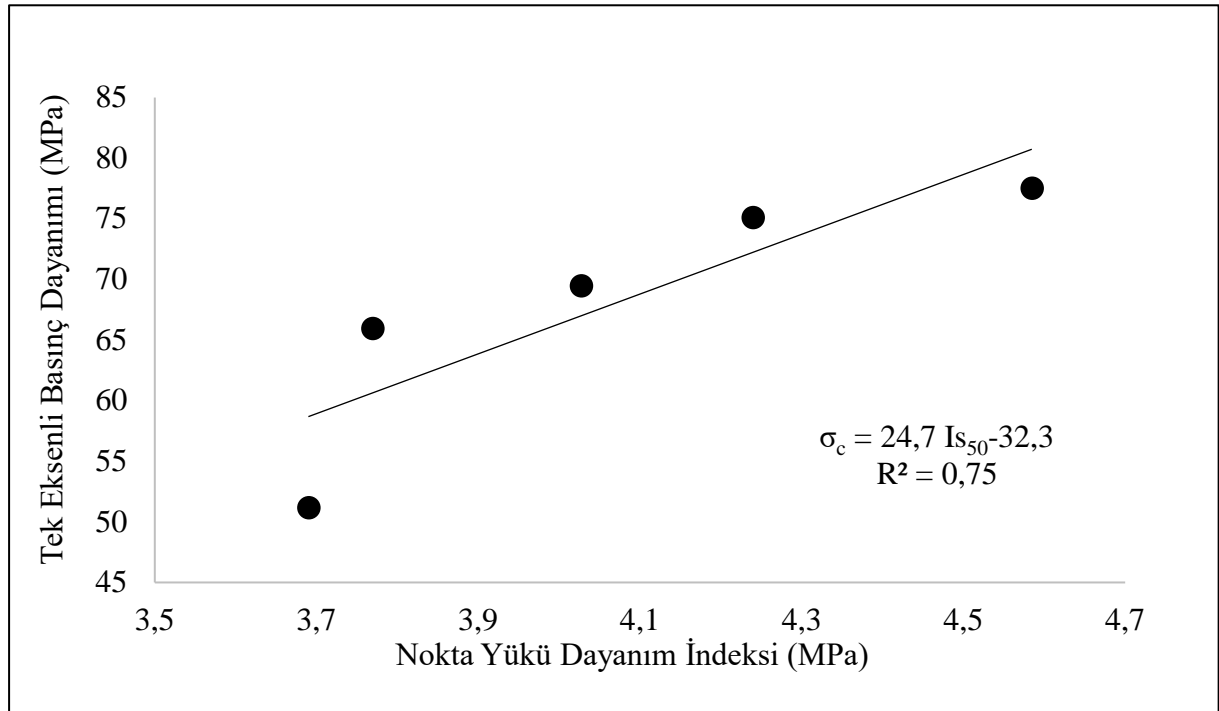
**Şekil 5.1** Sedimanter kayaçlar için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki.

Şekil 5.1'den de görülebileceği gibi, sedimanter kayaçlar için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki doğrusal ilişki aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir;

$$\sigma_c = 35,8 I_{s50} - 74,6 \quad (R^2=0,92) \quad (5.1)$$

Burada bahsedilmesi gereken önemli bir husus ise, tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasında kurulan istatistiksel ilişkinin belirleme katsayısının ( $R^2$ ) 0,92 çıkmasıdır. Bu değer sedimanter kayaçlar için tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin %92'sinin nokta yükü dayanım indeksi değeri ile ilişkili olduğu anlamına gelmektedir.

Kayaç oluşum türlerine göre yapılan bir diğer istatistiksel çalışma ise, genellikle Zonguldak bölgesine ait farklı yörelerden alınan kireçtaşları ele alınarak yapılmıştır. Tez kapsamında kullanılan kireçtaşları İncivez, Gökgöl, Çilimli, Üzülmez ve Sapça bölgelerinden alınan kireçtaşlarıdır. Sadece kireçtaşları ele alınarak yapılan istatistiksel değerlendirme Şekil 5.2'de sunulmaktadır.



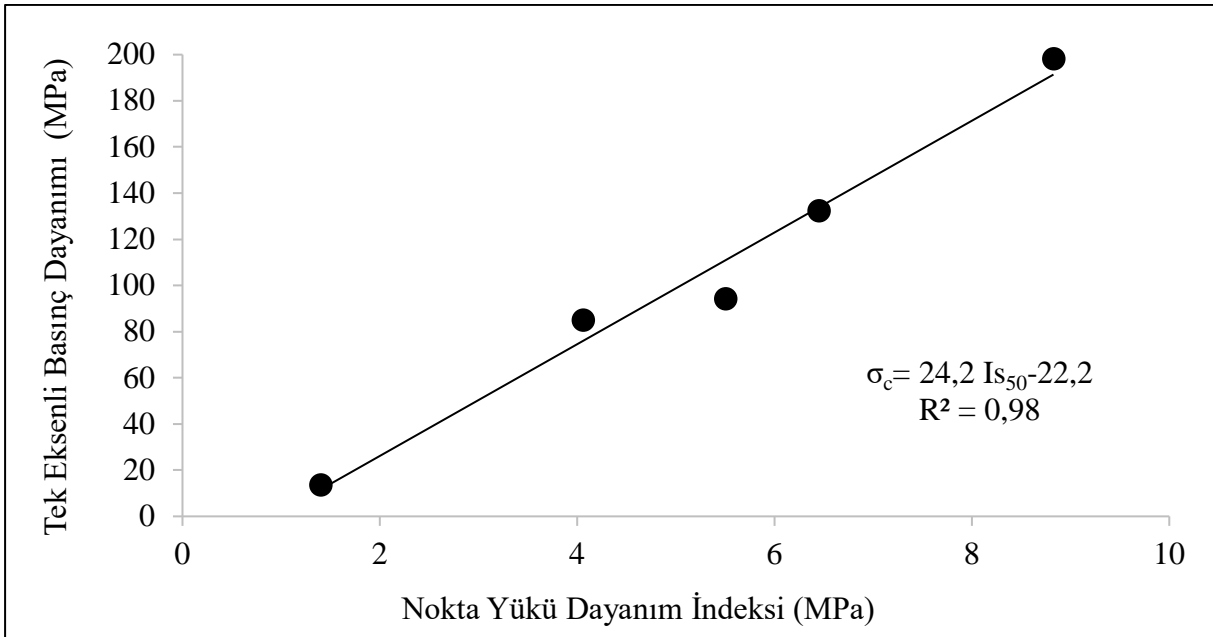
Şekil 5.2 Kireçtaşları için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki.

Şekil 5.2’de verilen grafikten görüldüğü üzere, kireçtaşları için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki doğrusal ilişki;

$$\sigma_c = 24,7 I_{s50} - 32,3 \quad (R^2=0,75) \quad (5.2)$$

şeklinde bulunmuştur. Deneylerde kullanılan kireçtaşları için, tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasında kurulan istatistiksel ilişkinin belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0,75 çıkmıştır. Kireçtaşlarının tek eksenli basınç dayanımının, nokta yükü dayanım indeksi kullanılarak tahmin edilmesi durumunda %75 oranında doğru değere yakın sonuç vereceği anlaşılmaktadır.

Tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki istatistiksel ilişki, sedimanter kayaçlar ve kireçtaşları için yapıldıktan sonra sedimanter olmayan kayaçlar (çoğunluğu magmatik) için ayrıca yapılmıştır. Tez kapsamında magmatik kayaç olarak andezit, bazalt, manyezit ve tuf, metamorfik kayaç olarak ise gnays kullanılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre elde edilen istatistiksel değerlendirme sonuçları Şekil 5.3’te vermiştir.



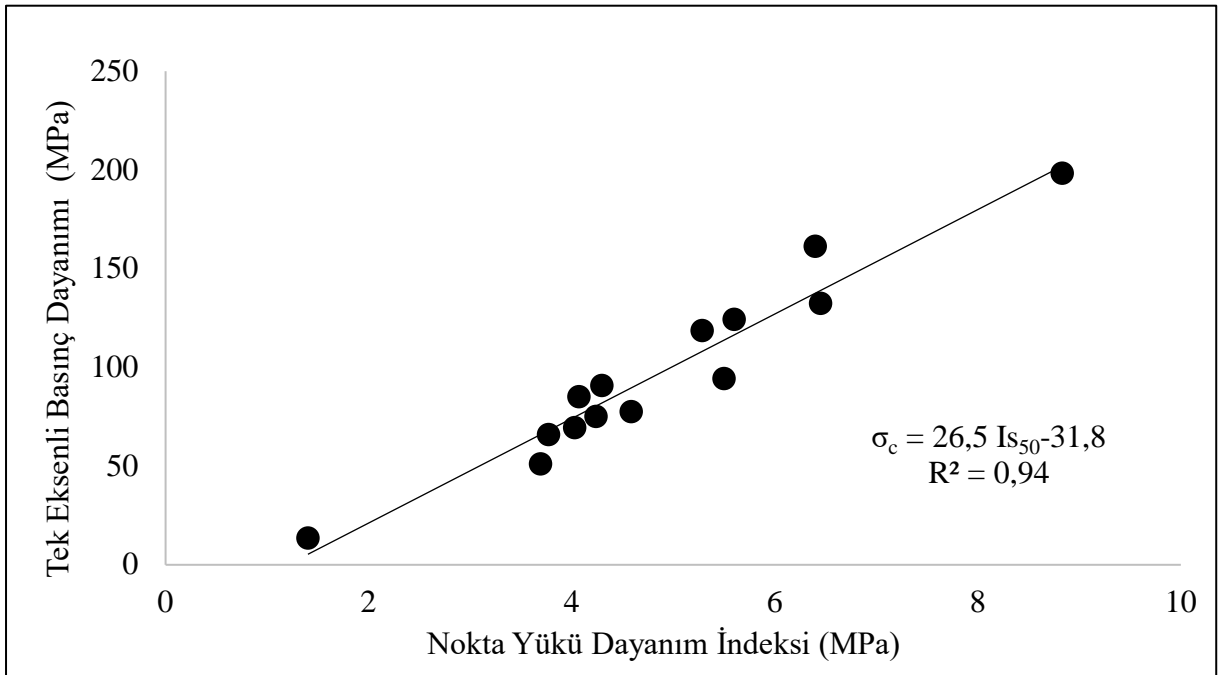
Şekil 5.3 Sedimanter olmayan kayaçlar için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki.

Şekil 5.3'ten de görülebileceği gibi, tez çalışması kapsamında göz önünde bulundurulan sedimanter olmayan kayaçlar için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki doğrusal ilişki aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir;

$$\sigma_c = 24,2 I_{s50} - 22,2 \quad (R^2=0,98) \quad (5.3)$$

Eşitlik 5.3'ten de görülebileceği üzere, sedimanter olmayan kayaçlar için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasında kurulan istatistiksel ilişkinin belirleme katsayısı oldukça yüksek ( $R^2= 0,98$ ) çıkmıştır. Bu değer magmatik ve metamorfik kayaçlar için tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin %98'inin nokta yükü dayanım indeksi değeri ile ilişkili olduğu anlamına gelmektedir.

Tez çalışması kapsamında göz önünde bulundurulan kayaçlar oluşum türlerine göre ayrı ayrı değerlendirildikten sonra, tüm kayaçların için ortak bir istatistiksel değerlendirme çalışması yapılmıştır. Göz önünde bulundurulan tüm kayaçlar için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki Şekil 5.4'te sunulmaktadır.



Şekil 5.4 Göz önünde bulundurulan tüm kayaçlar için tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki.

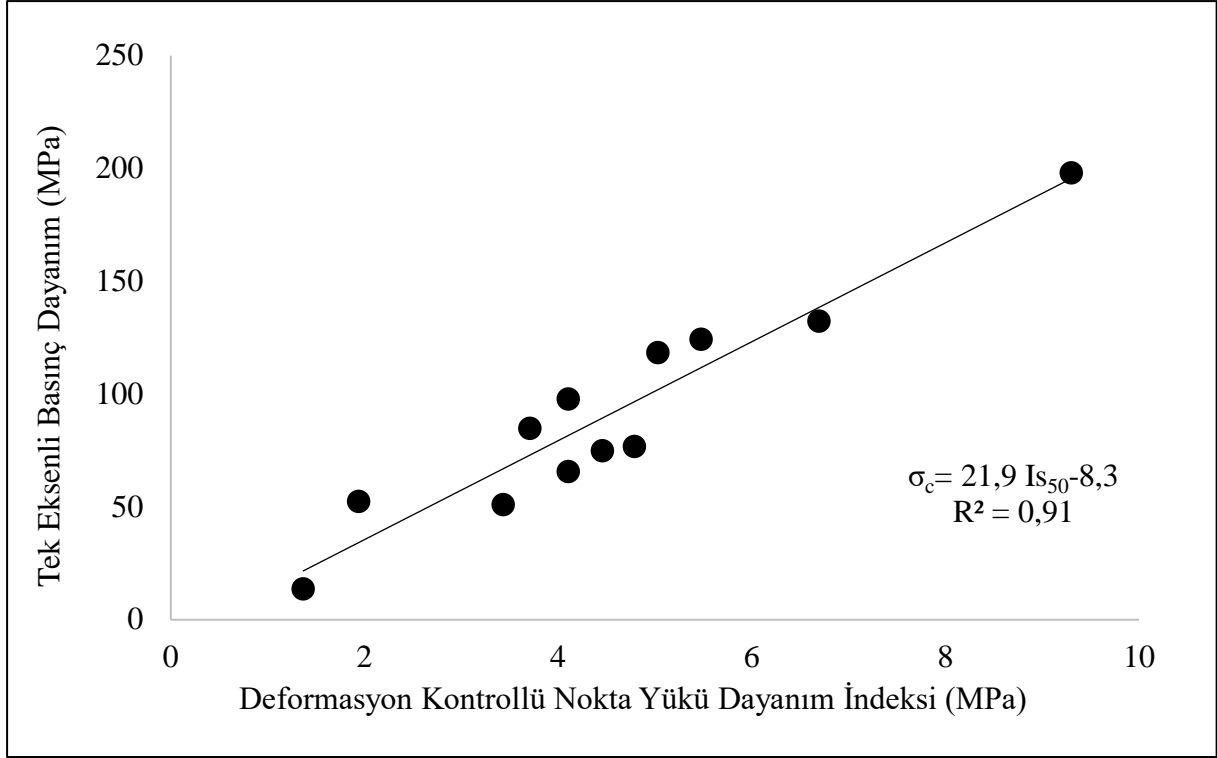
Şekil 5.4'te verilen grafikten görülebileceği üzere, tüm kayaçlar için nokta yükü dayanım indeksinden tek eksenli basınç dayanımının tahmin edilmesini sağlayan bağıntı;

$$\sigma_c = 26,5 I_{s50} - 31,8 \quad (R^2=0,94) \quad (5.4)$$

şeklinde bulunmuştur. Tüm kayaçlar için yapılan çalışmada da, tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasında kurulan istatistiksel ilişkinin belirleme katsayısı kabul edilebilir derecede yüksek ( $R^2= 0,94$ ) çıkmıştır. Buradan yola çıkarak, Eşitlik 5.4'te verilen bağıntı ile deneyde kullanılan kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin, nokta yükü dayanım indeksi deneyinden oldukça güvenilir bir şekilde tahmin edilebileceği söylenebilir.

Kayaçlar oluşum türlerine göre ayrı ayrı ve tüm kayaçlar hep birlikte ele alınarak yapılan tahmin değerlendirmelerinden sonra, literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak, tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişki yükleme koşulları göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Bu bağlamda, hem deformasyon kontrollü yükleme hem de yük kontrollü yükleme şeklinde yapılan nokta yükü dayanım indeksi deneyleri, sadece yük kontrollü yükleme ile yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyi ile karşılaştırılmıştır. Nokta yükü dayanım indeksi deneyinde yükleme hızları, sırasıyla, deformasyon kontrollü olarak yapılan deneylerde 1,5 mm/dk, yük kontrollü olarak yapılan deneylerde ise 200 N/sn olarak seçilmiştir. Yük kontrollü yükleme ile yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyindeki yükleme hızı ise 0,5 MPa/sn'dir.

Yükleme koşulları göz önünde bulundurularak yapılan bu çalışmalarda ilk olarak, deformasyon kontrollü yüklemeyle (1,5 mm/dk) yapılan nokta yükü dayanım indeksi deneyi ile yük kontrollü yüklemeyle (0,5 MPa/sn) yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin karşılaştırılması incelenmiş olup, elde edilen istatistiksel ilişki Şekil 5.5'de gösterilmektedir.



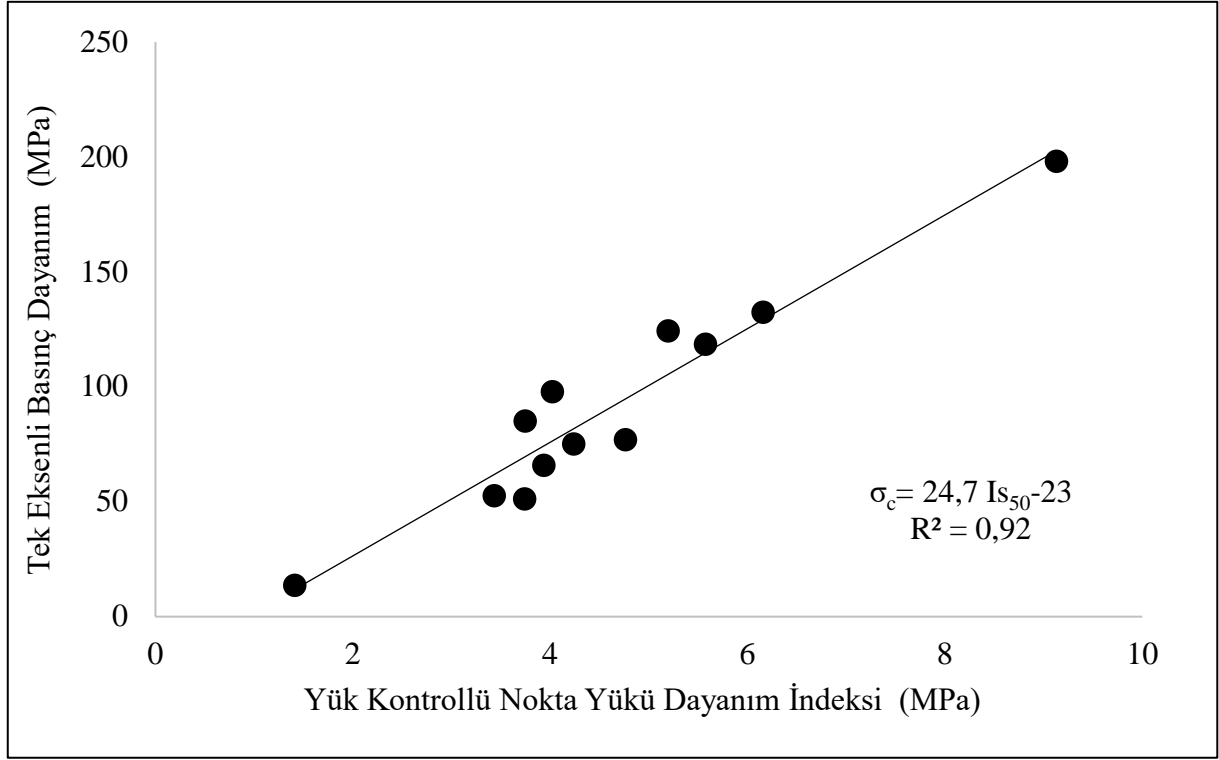
**Şekil 5.5** Deformasyon kontrollü (1,5 mm/dk) nokta yükü dayanım indeksi ile yük kontrollü (0,5 MPa/sn) tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Şekil 5.5'ten de görülebileceği gibi, deformasyon kontrollü nokta yükü dayanım indeksi ile yük kontrollü tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir;

$$\sigma_c = 21,9 I_{s50} - 8,3 \quad (R^2=0,91) \quad (5.5)$$

Tüm kayaçlar göz önünde bulundurularak yapılan değerlendirmelere benzer olarak, bu karşılaştırmada da belirleme katsayısı yüksek çıkmıştır ( $R^2=0,91$ ).

Yükleme koşulları göz önünde bulundurularak yapılan bir diğer çalışmada ise, yük kontrollü yüklemeyle (200 N/sn) yapılan nokta yükü dayanım indeksi deneyi ile yine yük kontrollü yüklemeyle (0,5 MPa/sn) yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin karşılaştırılması incelenmiş olup, elde edilen istatistiksel ilişki Şekil 5.6'da sunulmaktadır.



**Şekil 5.6** Yük kontrollü (200 N/sn) nokta yüğü dayanım indeksi ile yük kontrollü (0,5 MPa/sn) tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Şekil 5.6’da sunulan grafikten elde edilen sonuçlara göre, yük kontrollü olarak yapılan nokta yüğü dayanım indeksi deneyi ile yine yük kontrollü olarak yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyi arasındaki ilişki;

$$\sigma_c = 24,7 I_{S50} - 23 \quad (R^2=0,92) \quad (5.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Şekil 5.6’daki grafikten elde edilen istatistiksel değerlendirme sonucuna göre, yük kontrollü yapılan nokta yüğü deneylerinin %92’sinin yük kontrollü yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyi ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır.

Yükleme koşulları göz önünde bulundurularak yapılan istatistiksel çalışmalar değerlendirildiğinde, göz önünde bulunduran her iki koşulunda belirleme katsayılarının hemen hemen aynı çıktığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak, tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yüğü dayanım indeksi arasındaki ilişkinin yükleme koşullarından pek etkilenmediği söylenebilir.

## 5.2 NOKTA YÜKÜ DAYANIM İNDEKSİ İLE DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI ARASINDAKİ İLİŞKİ

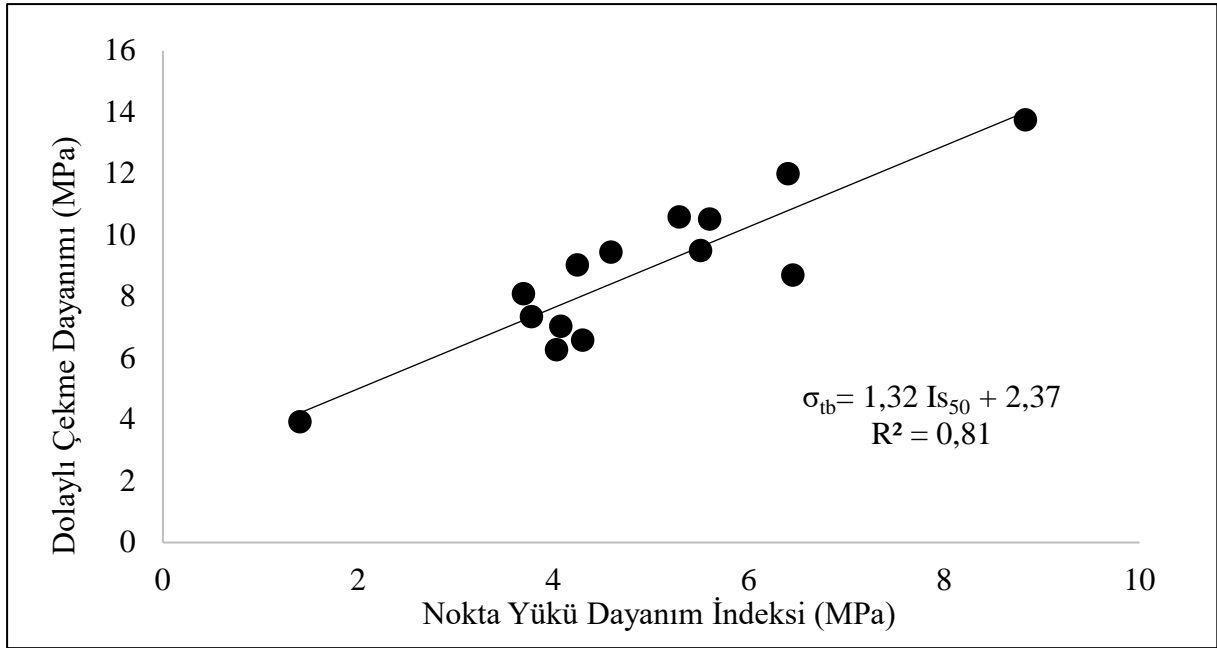
Sağlam kaya malzemesinin mekanik özellikleri arasından, tek eksenli basınç dayanımından sonra belki de en önemli olanı tek eksenli çekme dayanımıdır. Ancak daha önceden de belirtildiği üzere, tek eksenli çekme dayanımı deney zorlukları nedeniyle çoğunlukla dolaylı deney yöntemleriyle belirlenmektedir. Dolaylı deney yöntemleri arasında en çok bilenen ve en yaygın olarak kullanılanı Brezilya çekme deneyidir. Hatta oldukça yaygın olarak kullanılmasından dolayı, bu deney sıklıkla dolaylı çekme dayanımı olarak adlandırılır.

Dolaylı çekme dayanımı deneyinde, yükleme basınç olmasına rağmen örneğin kırılması, merkezinde meydana gelen ve uygulanan basınç gerilmesinin üçte biri kadar oluşan çekme gerilmesi nedeniyle olmaktadır. Kaya ve beton gibi kaya benzeri malzemelerin basınç dayanımlarının çekme dayanımlarına göre 5-10 daha fazla olmasından dolayı, uygulanan bu 3 birim basınç gerilmesi, malzemenin basınç dayanımını aşmadan çok daha önce merkezde oluşan 1 birim çekme gerilmesi malzemenin çekme dayanımını aşmaktadır. Böylece uygulanan yük basınç olmasında rağmen, örneğin yenilmesi çekme gerilmesi nedeniyle olmaktadır. Nokta yükü dayanım indeksi deneyinde de uygulanan yükleme şekli basınç olduğu için, bu tez çalışması kapsamında, nokta yükü dayanım indeksi ve dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Göz önünde bulundurulan bu iki deneyde de elde edilen sonuçlar gerekli anlamlılık seviyelerinde (MPa mertebesinde) tek eksenli basınç dayanımına göre oldukça dar bir aralıkta değişmektedir. Bundan dolayı, karşılaştırma çalışmalarında kayaç türlerine göre ayrı ayrı incelemek yapmanın yanıltıcı olabileceği söylenebilir. Bu nedenle, göz önünde bulundurulan tüm kayaçlar için genel bir değerlendirme yapılması yoluna gidilmiştir.

Laboratuvar çalışmaları sonrasında farklı kayaçlar için elde edilen, nokta yükü dayanım indeksi ve dolaylı çekme dayanımı arasındaki istatistiksel ilişki Şekil 5.7'de sunulmaktadır.





**Şekil 5.7** Göz önünde bulundurulan tüm kayaçlar için dolaylı çekme dayanımı ile nokta yüğü dayanım indeksi arasındaki ilişki.

Şekil 5.7'den de görülebileceği gibi, göz önünde bulundurulan tüm kayaçlar için dolaylı çekme dayanımı ile nokta yüğü dayanım indeksi arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir;

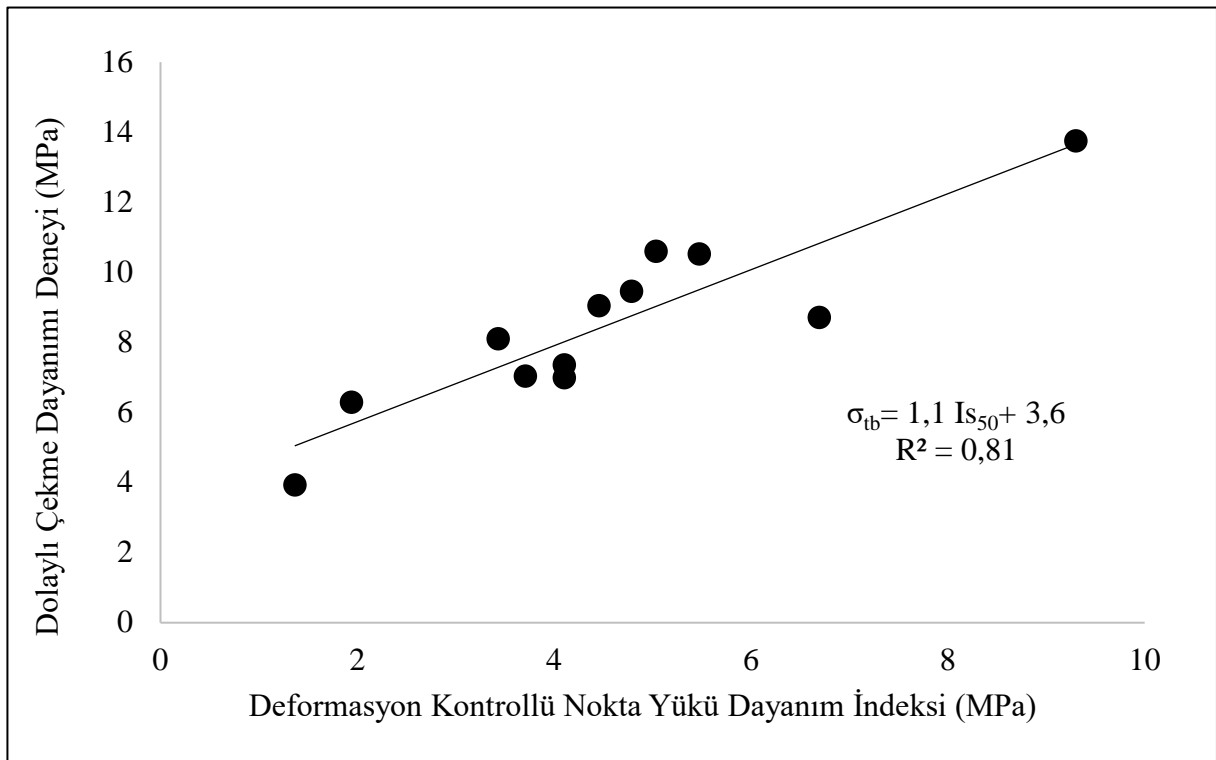
$$\sigma_{tb} = 1,32 I_{S50} + 2,37 \quad (R^2 = 0,81) \quad (5.7)$$

Göz önünde bulundurulan kayaçlar için, dolaylı çekme dayanımı ile nokta yüğü dayanım indeksi arasındaki ilişkinin belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0,81 çıkmıştır. Yine tüm kayaçlar için yapılan bir diğer çalışmada, tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yüğü dayanım indeksi arasında kurulan istatistiksel ilişkinin belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0,94 olarak elde edilmişti (Bkz. Şekil 5.4). Buradan yola çıkarak, nokta yüğü dayanım indeksinin, dolaylı çekme dayanımından ziyade tek eksenli basınç dayanımı ile daha yakından ilişkili olduğu söylenebilir.

Bu çalışmaya ek olarak, literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak, dolaylı çekme dayanımı ile nokta yüğü dayanım indeksi arasındaki ilişki yükleme koşulları göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Bu bağlamda, hem deformasyon kontrollü yükleme hem de yük kontrollü yükleme şeklinde yapılan nokta yüğü dayanım indeksi deneleri, sadece yük kontrollü yükleme ile yapılan dolaylı çekme dayanımı deneyi ile karşılaştırılmıştır. Daha

önceden de bahsedildiği gibi, nokta yükü dayanım indeksi deneyinde yükleme hızları, sırasıyla, deformasyon kontrollü olarak yapılan deneylerde 1,5 mm/dk, yük kontrollü olarak yapılan deneylerde ise 200 N/sn olarak seçilmiştir. Yük kontrollü yükleme ile yapılan dolaylı çekme dayanımı deneyindeki yükleme hızı ise 200 N/sn'dir.

Yükleme koşulları göz önünde bulundurularak yapılan bu çalışmalarda ilk olarak, deformasyon kontrollü yüklemeyle yapılan nokta yükü dayanım indeksi deneyi ile yük kontrollü yüklemeyle yapılan dolaylı çekme dayanımı deneylerinin karşılaştırılması incelenmiş olup, elde edilen istatistiksel ilişki Şekil 5.8'de sunulmaktadır.



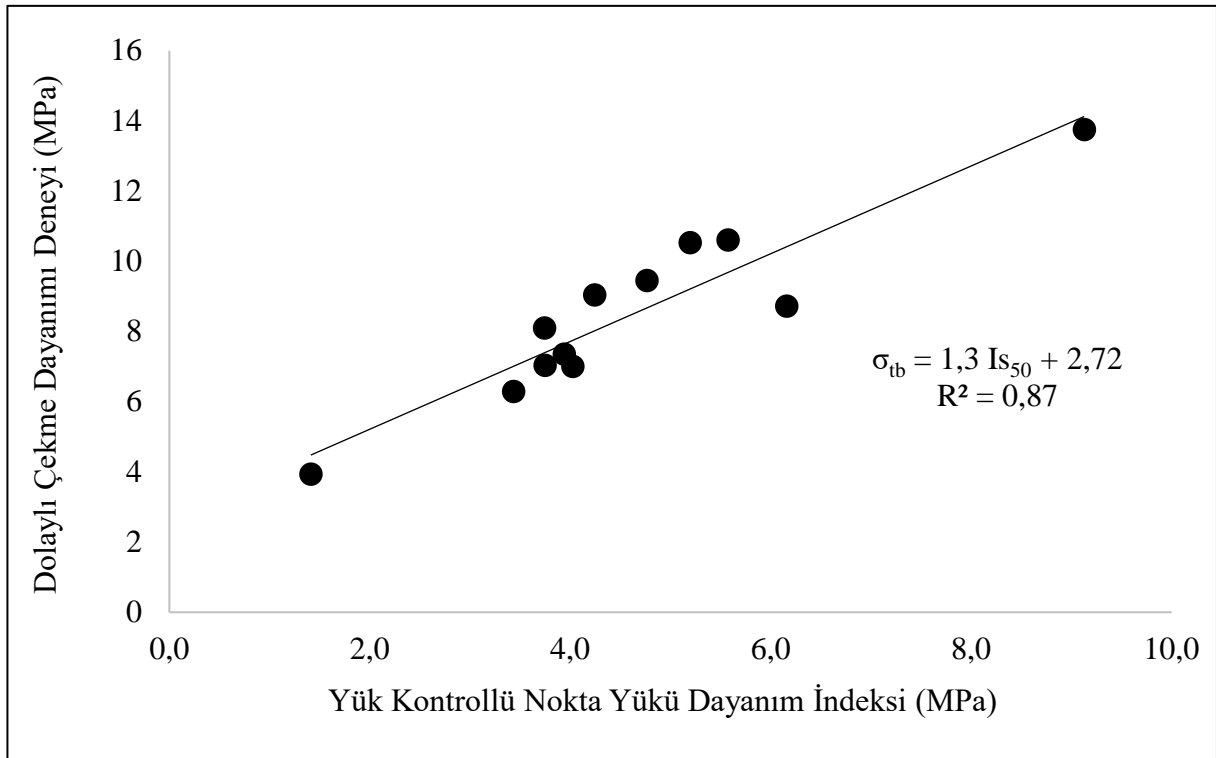
**Şekil 5.8** Deformasyon kontrollü (1,5 mm/dk) nokta yükü dayanım indeksi ile yük kontrollü (200 N/sn) dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki.

Şekil 5.8'de verilen grafikten elde edilen sonuçlara göre, deformasyon kontrollü yapılan nokta yükü dayanım indeksi deneyi ile yük kontrollü yapılan dolaylı çekme dayanımı deneyi arasındaki ilişki;

$$\sigma_{tb} = 1,1 I_{s50} + 3,6 \quad (R^2=0,81) \quad (5.8)$$

şeklinde elde edilmiştir. Tüm kayaçlar göz önünde bulundurularak yapılan değerlendirmelere benzer olarak bu karşılaştırmanın da belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0,81 çıkmıştır.

Yükleme koşulları göz önünde bulundurularak yapılan bir diğer çalışmada ise, nokta yükü dayanım indeksi ve dolaylı çekme dayanımı deneylerinin ikisi de yük kontrollü yüklemeyle (200 N/sn) yapılmış ve aralarındaki istatistiksel ilişki incelenmiştir. Elde edilen bu istatistiksel ilişki Şekil 5.9'da sunulmaktadır.



**Şekil 5.9** Yük kontrollü (200 N/sn) nokta yükü dayanım indeksi ile yük kontrollü (200 N/sn) dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki.

Şekil 5.9'da verilen grafikten görüldüğü üzere, yük kontrollü yapılan nokta yükü deneyi ile yük kontrollü dolaylı çekme dayanımı deneyi arasındaki ilişki;

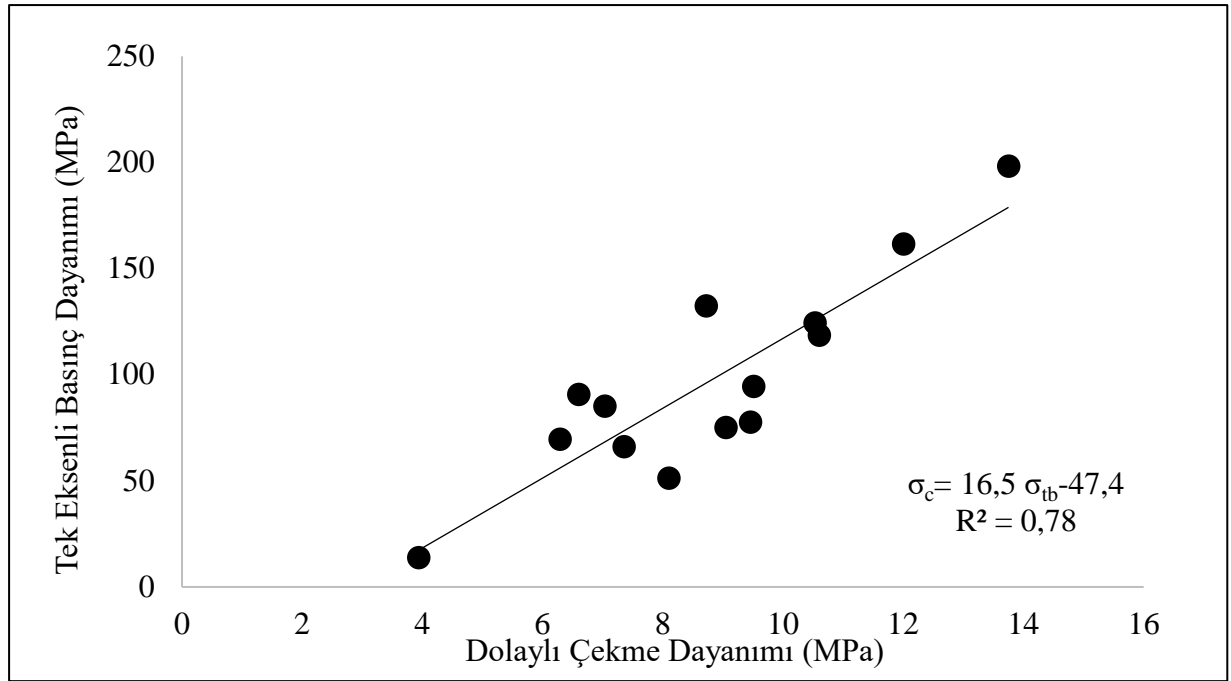
$$\sigma_{tb} = 1,3 I_{s50} + 2,72 \quad (R^2=0,87) \quad (5.9)$$

şeklinde oluşmuştur. Eşitlik 5.9'dan da görülebileceği gibi, bu ilişkinin belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0,87 olarak elde edilmiştir. Yüklemeye koşulları göz önünde bulundurularak yapılan istatistiksel çalışmalar değerlendirildiğinde, nokta yükü dayanım indeksi ve dolaylı çekme

dayanımı deneylerinin ikisinin de yük kontrollü yüklemeyle yapılması durumunda aralarındaki istatistiksel ilişkinin daha da arttığı görülmektedir.

### 5.3 DOLAYLI ÇEKME DAYANIMI İLE TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI ARASINDAKİ İLİŞKİ

Daha önceden de bahsedildiği üzere, dolaylı çekme dayanımı deneyinde yükleme basınç olmasına rağmen örneğin yenilmesi çekme gerilmesi nedeniyle olmaktadır. Bu nedenle, dolaylı çekme dayanımı ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki de ayrıca incelenmiş olup elde edilen sonuçlar 5.10'da sunulmuştur.



**Şekil 5.10** Göz önünde bulundurulan kayaçlar için dolaylı çekme dayanımı ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Şekil 5.10'dan de görülebileceği gibi, Göz önünde bulundurulan kayaçlar için dolaylı çekme dayanımı ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki doğrusal ilişki aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir;

$$\sigma_c = 16,5 \sigma_{tb} - 47,4 \quad (R^2=0,78) \quad (5.10)$$

Grafikten elde edilen belirleme katsayı 0,78 çıkmıştır. Bu değer tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin %78'sinin dolaylı çekme dayanımı değeri ile ilişkili olduğu anlamına gelmektedir. Görüldüğü gibi yapılan bütün çalışmalar değerlendirildiğinde, en zayıf istatistiksel ilişki (en düşük belirleme katsayısı) tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı arasında çıkmıştır.

#### **5.4 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Tez kapsamında farklı bölgelerden alınan 14 tane kayaç üzerinde yapılan deneylerin sonunda elde edilen sonuçlara göre kayaç oluşum türlerine göre, deneyde kullanılan tüm kayaçlar için ve yükleme koşulları göz önünde bulundurularak istatistiksel değerlendirme çalışmaları yapılmıştır.

Yapılan değerlendirme çalışmaları sonucu deneylerde kullanılan tüm kayaçlar göz önünde bulundurularak elde edilen tahmin eşitliği daha önce yapılan aynı çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için örnek olarak gökgöl kireçtaşı baz alınmıştır ve Çizelge 5.1'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.1'de verilen ve gökgöl kireçtaşları baz alınarak yapılan karşılaştırma tablosuna göre tez kapsamında bulunan tahmin eşitliği, daha önce yapılan çalışmalarla benzerlik göstermiştir ve tez çalışması kapsamında bulunan tahmin eşitliğinden yapılan gökgöl kireçtaşı örneği için %11,1 hata payıyla gerçek değere yakın bir sonuç verdiği görülmüştür.

Tez kapsamında yapılan deneylerde kullanılan sedimanter kayaçların tek eksenli basınç dayanımını, nokta yükü dayanım indeksi deneyinden tahmin etmek için verilen tahmin eşitliği ile daha önce sedimanter kayaçlar üzerinde aynı çalışmayı yapan araştırmacıların tahmin değerleri karşılaştırmıştır. Karşılaştırma için gökgöl kireçtaşı baz alınmıştır. Bu karşılaştırılma Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.1** Yapılan istatistiksel değerlendirme çalışmalarının daha önce yapılan bazı çalışmalarla karşılaştırılması.

Araştırmacı	Tahmin Eşitliği	Deneysel		Tahmin Tek Eksenli Basınç Dayanımı	Deneysel Değerden Farkı (%)
		Nokta Yüğü Dayanım İndeksi	Tek Eksenli Basınç Dayanımı		
D'andrea vd. (1965)	$\sigma_c=15,3I_{s50}+16,3$	4,35	75,1	82,9	10,3
Deer ve Miller (1966)	$\sigma_c=20,7I_{s50}+29,6$	4,35	75,1	119,7	59,3
Broch ve Franklin (1972)	$\sigma_c=23,7I_{s50}$	4,35	75,1	103,1	37,2
Singh (1981)	$\sigma_c=18,7I_{s50}-13,2$	4,35	75,1	68,8	9,29
Forster (1983)	$\sigma_c=14I_{s50}$	4,35	75,1	60,9	18,9
ISRM (1985)	$\sigma_c=22I_{s50}$	4,35	75,1	95,7	27,4
Caargill ve Shakoor (1990)	$\sigma_c=23I_{s50}+13$	4,35	75,1	113,1	50,5
Tsidzi (1991)	$\sigma_c=48I_{s50}$	4,35	75,1	208,8	178
Chau ve Wong (1996)	$\sigma_c=12,5I_{s50}$	4,35	75,1	54,4	27,6
Fener vd. (2005)	$\sigma_c=9,08I_{s50}+39,32$	4,35	75,1	78,8	4,92
Kahraman vd. (2005)	$\sigma_c=10,91I_{s50}+27,41$	4,35	75,1	74,9	0,33
Karaman ve Kesimal (2012)	$\sigma_c=20,42I_{s50}-5,146$	4,35	75,1	83,7	11,4
Bu çalışma	$\sigma_c=26,5I_{s50}-31,8$	4,35	75,1	83,5	11,1

**Çizelge 5.2** Sedimanter kayaçların tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

Araştırmacı	Tahmin Eşitliği	Deneysel		Tahmin Tek Eksenli Basınç Dayanımı	Deneysel Değerden Farkı (%)
		Nokta Yüğü Dayanım İndeksi	Tek Eksenli Basınç Dayanımı		
Hassani vd. (1980)	$\sigma_c=29I_{s50}$	4,35	75,1	126,2	67,9
Read vd. (1980)	$\sigma_c=20I_{s50}$	4,35	75,1	87	15,8
O'Rourke (1988)	$\sigma_c=30I_{s50}$	4,35	75,1	130,5	73,7
Hawkins (1998)	$\sigma_c=17,5I_{s50}$	4,35	75,1	76,1	1,34
Bu çalışma	$\sigma_c=35,8I_{s50}-74,6$	4,35	75,1	81,1	8,0

Yukarıda verilen tabloda görülen sonuçlara göre deneyde kullanılan sedimanter kayaçlar baz alınarak yapılan istatistiksel değerlendirme sonucu ortaya çıkan tahmin eşitliğinin deneysel değerden %8 farkla gerçek değere yakın bir sonuç verdiği görülmüştür.





## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, kaya mekaniği deneyleri olan nokta yükü dayanım indeksi, tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden alınan 14 farklı kayaç türü ile yapılan deneyler değerlendirilmiş ve çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. Bunlar;

1. Yapılan nokta yükü dayanım indeksi ve tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçlarını karşılaştırılması neticesinde 2 temel sonuç elde edilmiştir.

- i. Tek eksenli basınç dayanımı değerini nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçlarından elde etmek için eşitlikler bulunmuştur.

$$\sigma_c = 35,8 \text{ Is}_{50} - 74,6 \quad (R^2=0,92) \quad \text{Sedimanter kayaçlar için} \quad (6.1)$$

$$\sigma_c = 24,7 \text{ Is}_{50} - 32,3 \quad (R^2=0,75) \quad \text{Kireçtaşları için} \quad (6.2)$$

$$\sigma_c = 24,2 \text{ Is}_{50} - 22,2 \quad (R^2=0,98) \quad \text{Sedimanter olmayan kayaçlar için} \quad (6.3)$$

$$\sigma_c = 26,5 \text{ Is}_{50} - 31,8 \quad (R^2=0,94) \quad \text{Tüm kayaçlar için} \quad (6.4)$$

Çoğunluğu Zonguldak ili ve çevresi olmak üzere Türkiye'nin 14 farklı bölgesinden alınan kayaçlar üzerine yapılan deney çalışmaları sonucu elde edilen sonuçlarla tek eksenli basınç dayanımını nokta yükü dayanım indeksi değerinden tahmin etmek için yukarıdaki tahmin eşitlikleri bulunmuştur. Tahmin eşitliklerinin belirleme katsayıları incelendiğinde iki deney arasındaki ilişkinin belirlenen gruplarda yüksek çıktığı görülmüştür.

Tüm kayaçlar için yapılan tahmin eşitliği daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırılmış ve bu çalışma sonucu ortaya çıkan değer gerçek değere %11 hata oranıyla yakın çıkmıştır. Çalışmaların birçoğundan daha iyi bir ilişki ve daha az bir

hata oranına sahip olduğu görülmüştür. Aynı şekilde sedimanter kayalar içinde karşılaştırma yapılmış ve %8 gibi bir hata oranı ile gerçek değere yakın sonuçlar bulunmuştur.

- ii. Yükleme koşullarına göre farklı yükleme koşullarında ve aynı yükleme koşullarında iki deney arasındaki ilişkiye bakılmıştır ve tahmin eşitlikleri verilmiştir. İki deney önce farklı yükleme koşullarında yani nokta yükü dayanım indeksi deformasyon kontrollü yükleme şeklinde, tek eksenli basınç dayanımı deneyi yük kontrollü yükleme şeklinde yapılmıştır. Daha sonra iki deneyde yük kontrollü yükleme şeklinde yapılmıştır.

$$\sigma_c = 21,9 I_{S50} - 8,3 \quad (R^2=0,91) \quad \text{Farklı yükleme koşullarında} \quad (6.5)$$

$$\sigma_c = 24,7 I_{S50} - 23 \quad (R^2=0,92) \quad \text{Aynı yükleme koşullarında} \quad (6.6)$$

Yükleme koşulları göz önünde bulundurularak yapılan istatistiksel çalışmalar değerlendirildiğinde, göz önünde bulunduran her iki koşulunda belirleme katsayılarının hemen hemen aynı çıktığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak, tek eksenli basınç dayanımı ile nokta yükü dayanım indeksi arasındaki ilişkinin yükleme koşullarından pek etkilenmediği söylenebilir.

2. Dolaylı çekme dayanımı deneyinde, yükleme basınç olmasına rağmen örneğin kırılması, merkezinde meydana gelen ve uygulanan basınç gerilmesinin üçte biri kadar oluşan çekme gerilmesi nedeniyle olmaktadır.

Yükleme şekli basınç olan dolaylı çekme dayanımı deneyi ve yine yükleme şekli basınç olan nokta yükü dayanım indeksi deneyi arasındaki ilişki hem istatistiksel olarak hem de yükleme koşulları göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir.

- i. İstatistiksel olarak değerlendirme sonucu Eşitlik 6.7’de verilen sonuç bulunmuştur.

$$\sigma_{tb} = 1,32 I_{S50} + 2,37 \quad (R^2=0,81) \quad \text{Tüm kayalar için} \quad (6.7)$$

Yukarıda verilen tahmin eşitliğinin belirleme katsayısından anlaşılacağı üzere iki deney arasında iyi bir ilişki olduğu ortaya çıkmıştır. İki deney arasındaki ilişki sayesinde nokta yükü dayanım indeksi deneyinden dolayı çekme dayanımı tahmin edilebilir ve dolaylı olarak ta doğrudan çekme dayanımı hakkında bilgi sahibi olunabileceği anlaşılmıştır.

- ii. Dolaylı çekme dayanımı deneyi ile nokta yükü dayanım indeksi deneyi arasındaki ilişki yükleme koşullarının durumuna göre de değerlendirilmiştir. İki deney önce farklı yükleme koşullarında yani nokta yükü dayanım indeksi deformasyon kontrollü yükleme şeklinde, dolaylı çekme dayanımı yük kontrollü yükleme şeklinde yapılmıştır. Daha sonra iki deneyde yük kontrollü yükleme şeklinde yapılmıştır.

$$\sigma_{tb} = 1,1 I_{s50} + 3,6 \quad (R^2=0,81) \quad \text{Farklı yükleme koşullarında} \quad (6.8)$$

$$\sigma_{tb} = 1,3 I_{s50} + 2,72 \quad (R^2=0,87) \quad \text{Aynı yükleme koşullarında} \quad (6.9)$$

Yükleme koşulları göz önünde bulundurularak yapılan istatistiksel çalışmalar değerlendirildiğinde, nokta yükü dayanım indeksi ve dolaylı çekme dayanımı deneylerinin ikisinin de yük kontrollü yüklemeyle yapılması durumunda aralarındaki istatistiksel ilişkinin daha da arttığı görülmektedir.

3. Yine aynı şekilde yükleme şekli basınç olan tek eksenli basınç dayanımı deneyi ve dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki incelemiştir. İki deney arasındaki ilişki Eşitlik 6.9'daki şekilde bulunmuştur.

$$\sigma_c = 16,5 \sigma_{tb} - 47,4 \quad (R^2=0,78) \quad \text{Tüm kayaçlar için} \quad (6.10)$$

Yukarıda verilen belirleme katsayısından da anlaşılacağı gibi iki deney arasında iyi bir ilişki (%78) çıkmıştır.

4. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi, nokta yükü dayanım indeksi deneyi ve dolaylı çekme dayanımı deneyi bir arada karşılaştırıldığında, literatürde bahsedildiği gibi tek

eksenli basınç dayanımıyla en çok ve en yüksek ilişkisi olan deneyin nokta yükü dayanım indeksi deneyi olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Akram M and Bakar M Z A** (2007) Correlation between uniaxial compressive strength and point load index for salt-rangerocks, *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1: 8.
- Al-Jassar S H and Hawkins A B** (1979) Geotechnical properties of the Carboniferous limestones of Bristol area, the influence of petrography and chemistry, *ISRM Proc. 4. Conf., Montreaux*, 3-13.
- ASTM** (1984) Standart test method for unconfined compressive strength of intact rock corespecimens. Soil and rock, building Stones *Annualbook of ASTM standards 4.08*. ASTM, Philadelphia, Pennsylvania. 1-22.
- Backstrom A L, Metcalf J G and McKelvie S** (2009) What happens in Las Vegas: The Apex Tunnel geologic investigation. *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, G. Almeraris and B. Mariucci, SME, Littleton, CO, 534-547.
- Başarır H, Kumral M ve Özsan A** (2004) Kayaçların tek eksenli basınç dayanımının basit deney yöntemleriyle tahmini. *Kaya mekaniği sempozyumu*, 21-24 Ekim 2004, Sivas Türkiye, 111-119.
- Bieniawski Z T** (1973) Engineering classification of jointed rock masses. *Transactions of South African Institution of Civil Engineers*,15: 335-344.
- Bieniawski Z T** (1975) The point load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, 9: 1
- Broch E and Franklin J A** (1972) The point load strenght test. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstract*, 9(6): 669-676.
- Chau K T and Wong R H C** (1996) Uniaxial compressive strength and point load strength of rocks *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.*, 33: 183–188.
- Deer D U and Miller R P** (1966) Engineering classification and index properties for intact rock. Air Force Weapons Lab. Technical Report, Kirtland Base, New Mexico, 65-116.
- Erarслан N, Liang Z Z and Williams D J** (2011) Experimental and numerical studies on determination of indirect tensile strength of rocks. *Rock Mechanics Rock Engineering*. 323-332.
- Fener M, Kahraman S, Bilgil A ve Günaydın O** (2005) A comparative evaluation of indirect methods to estimate the compressive strenght of rocks. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 329-343.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Gerçek H** (2002) *Kaya Mekaniği Ders Notları (yayımlanmamış)*, BEÜ Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği, Zonguldak.
- Gerçek H ve Özarıslan A** (2011) Kaya malzemesinin çekme dayanımı sınıflaması. *Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyum*, 04.10.2004 Ankara, Türkiye.
- Goodman R E** (2003) *Kaya Mekaniğine Giriş*, Çev. K.Kabayalı, Gazi Kitabevi, ISBN 975-8640-33-X, Ankara, 589.
- Gündoğdu E** (2015) *Genel Jeoloji Ders Notları*, <http://erdemgundogdu.weebly.com/genel-jeoloji.html>, ÇOMÜ Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği, Çanakkale.
- Hawkins A B** (1998) Aspects of rock strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57: 17-30.
- Hoek E and Brown E T** (1980) *Underground Excavations in Rock*, IMM, London, 527.
- Hoek E and Brown E T** (1997) Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34(8): 1165-1186.
- Hudson J A** (1989) *Rock mechanics principles in engineering practice. CIRIA Ground Engineering Report: Underground Construction*. Butterworths, Oxford.
- IAEG** (1979) Report of the commission on engineering geological mapping. *Bull IAEG* 19: 364-371.
- ISRM** (1981) Basic technical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstract*, 18: 85-110.
- ISRM** (1985) Point load test, suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstract*, 22: 55-60.
- Karaman K, Erçıkıdı B K, Cihangir F ve Kesimal A** (2011) Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı tahmininde Schmidt Çekici sertlik tayini değerlendirme yöntemlerinin incelenmesi 22. *Dünya Madencilik Kongresi, (11-13 Mayıs 2011), Ankara, Bildiriler Kitabı*, 87-94.
- Karaman K ve Kesimal A** (2012) Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı tahmininde nokta yükü deney yöntemleri ve porozitenin değerlendirilmesi *Madencilik*, 51(4): 3-14.
- Karaman S** (2001) Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstract*, 42: 584-589.
- Rusnak J and Mark C** (1999) Using the point load test to determine the uniaxial compressive strength of coal measure rock. *Proceedings of 19th International Conference on Ground Control in Mining*, 362-371.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

**Topal T** (2000) Nokta yükleme deneyi ile ilgili uygulamada karşılaşılan problemler. *Geological Engineering Journal*, 24(1): 73-86.

**Ulusay R and Hudson J A** (2007) *The Complete ISRM Suggested Methods For Rock Characterizasyon, Testing and Monitoring: 1974-2006*, Competition Amanged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.

**Wong L N Y and Li D** (2012) The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46: 269-287.





## BİBLİYOGRAFYA

- Bieniawski Z T** (1989) Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, New York, 251.
- Broch E** (1983) Estimation of strength anistrophy using the point load test. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstract*, 20: 181-187.
- Cargill I S and Shkoor A** (1990) Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstract*, 27: 495-503.
- Fookes P G, Gourley C S and Ohikere C** (1988) Rock weathering in engineering time. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 21: 33-57.
- Gökçeoğlu C ve Zorlu K** (2004) A fuzzy model to predict the uniaxial copmressive strenght and the modulusof elasticity of a problematic rock, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17: 61-72.
- Machida A** (1975) Studies on tests for splitting tensile strenght of concrete. *Proceedings of Japan Society of Civil Enginners*, 242: 115-124.
- McFcal S and Tarkoy P J** (1979) Assessment of tunnel boring machine performance. *Tunels and Tunelling*, 11(10): 33-37.
- Norbury D R** (1986) The point load test. In A.B. Hawkins (ed.), Site Investigation Practice Accessing BS 5930 *Geological Society*, London, 325-329.
- Pettifer G S and Fookes P G** (1994) A revision of the graphical method for assesing the excavatability of rock. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 27: 145-164.



## EK AÇIKLAMALAR A

### EK A: Nokta Yüğü Dayanım İndeksi Deney Sonuçlarının Sunulması

Çizelge A.1 Andezit için nokta yüğü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D)(mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	33,5	0,62	16,5	0,00230	7,18	1,04	7,43
2	54	32,4	0,60	13,6	0,00223	6,10	1,04	6,32
3	54	32,5	0,60	14,9	0,00223	6,67	1,04	6,90
4	54	32,5	0,60	14,0	0,00223	6,28	1,04	6,50
5	54	33,4	0,62	14,0	0,00230	6,09	1,04	6,31
6	54	33,2	0,61	16,7	0,00228	7,32	1,04	7,57
7	54	32,0	0,59	10,8	0,00220	4,91	1,04	5,08
8	54	33,1	0,61	13,6	0,00228	5,99	1,04	6,20
9	54	33,0	0,61	12,9	0,00227	5,68	1,04	5,88
10	54	31,3	0,58	12,6	0,00215	5,83	1,04	6,04

Çizelge A.2 Bazalt için nokta yüğü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D)(mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	27,7	0,51	16,7	0,00190	8,78	1,04	9,09
2	54	28,5	0,53	18,8	0,00196	9,59	1,04	9,93
3	54	32,1	0,59	18,9	0,00221	8,57	1,04	8,87
4	54	26,0	0,48	16,9	0,00179	9,45	1,04	9,78
5	54	35,1	0,65	20,3	0,00241	8,40	1,04	8,70
6	54	29,0	0,54	17,2	0,00199	8,60	1,04	8,90

**Çizelge A.3** Kireçtaşı (Çilimli) için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D)(mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	26,3	0,49	6,83	0,00181	3,78	1,04	3,91
2	54	29,7	0,55	5,63	0,00204	2,76	1,04	2,85
3	54	32,1	0,59	8,00	0,00221	3,62	1,04	3,75
4	54	32,2	0,60	7,85	0,00221	3,55	1,04	3,67
5	54	28,6	0,53	5,61	0,00197	2,85	1,04	2,95
6	54	35,5	0,66	7,58	0,00244	3,11	1,04	3,21
7	54	33,3	0,62	8,57	0,00229	3,74	1,04	3,88
8	54	30,0	0,56	7,77	0,00206	3,77	1,04	3,90
9	54	29,0	0,54	8,16	0,00199	4,09	1,04	4,24
10	54	29,5	0,55	6,83	0,00203	3,37	1,04	3,49

**Çizelge A.4** Kireçtaşı (Gökgöl) için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D)(mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	26,0	0,48	5,80	0,00179	3,24	1,04	3,36
2	54	29,1	0,54	10,3	0,00200	5,13	1,04	5,31
3	54	28,9	0,54	9,80	0,00199	4,93	1,04	5,11
4	54	29,0	0,54	8,95	0,00199	4,49	1,04	4,65
5	54	28,3	0,52	7,24	0,00195	3,72	1,04	3,85
6	54	27,9	0,52	6,30	0,00192	3,28	1,04	3,40
7	54	28,8	0,53	7,87	0,00198	3,97	1,04	4,11
8	54	27,1	0,50	8,38	0,00186	4,50	1,04	4,66
9	54	31,8	0,59	9,33	0,00219	4,27	1,04	4,42
10	54	28,6	0,53	8,75	0,00197	4,45	1,04	4,61

**Çizelge A.5** Gnays için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D)(mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	48	26,5	0,55	6,79	0,00162	4,19	0,98	4,12
2	48	28,0	0,58	7,10	0,00171	4,15	0,98	4,07
3	48	36,1	0,75	6,59	0,00221	2,99	0,98	2,93
4	48	27,2	0,57	6,74	0,00166	4,05	0,98	3,98
5	48	29,0	0,60	6,34	0,00177	3,58	0,98	3,51

**Çizelge A.6** Kireçtaşı (İncivez) için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D)(mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	29,6	0,55	8,15	0,00204	4,00	1,04	4,15
2	54	29,8	0,55	8,61	0,00205	4,20	1,04	4,35
3	54	28,1	0,52	9,05	0,00193	4,68	1,04	4,85
4	54	31,8	0,59	8,71	0,00219	3,98	1,04	4,12
5	54	37,9	0,70	7,65	0,00261	2,94	1,04	3,04
6	54	28,9	0,54	8,12	0,00199	4,09	1,04	4,23
7	54	28,2	0,52	8,29	0,00194	4,28	1,04	4,43
8	54	27,1	0,50	5,65	0,00186	3,03	1,04	3,14
9	54	26,0	0,48	7,96	0,00179	4,45	1,04	4,61
10	54	28,0	0,52	6,11	0,00193	3,17	1,04	3,29

**Çizelge A.7** İnce taneli kumtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D)(mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	33,5	0,62	11,4	0,00230	4,97	1,04	5,14
2	54	29,1	0,54	11,5	0,00200	5,74	1,04	5,95
3	54	32,0	0,59	12,7	0,00220	5,76	1,04	5,97
4	54	30,1	0,56	9,67	0,00207	4,67	1,04	4,84
5	54	31,0	0,57	11,0	0,00213	5,14	1,04	5,32
6	54	32,4	0,60	12,4	0,00223	5,58	1,04	5,78
7	54	36,3	0,67	10,3	0,00250	4,12	1,04	4,27
8	54	32,6	0,60	11,7	0,00224	5,23	1,04	5,42

**Çizelge A.8** Manyezit için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D)(mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	28,0	0,52	5,62	0,00193	2,92	1,04	3,02
2	54	31,0	0,57	5,80	0,00213	2,72	1,04	2,82
3	54	32,0	0,59	4,91	0,00220	2,23	1,04	2,31
4	54	32,0	0,59	4,61	0,00220	2,10	1,04	2,17
5	54	31,9	0,59	2,92	0,00219	1,33	1,04	1,38
6	54	25,0	0,46	4,40	0,00172	2,56	1,04	2,65
7	54	32,1	0,59	3,03	0,00221	1,37	1,04	1,42
8	54	26,0	0,48	3,27	0,00179	1,83	1,04	1,89
9	54	32,0	0,59	3,03	0,00220	1,38	1,04	1,43
10	54	32,3	0,60	12,2	0,00222	5,49	1,04	5,68

**Çizelge A.9** Orta taneli kumtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D)(mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	31,5	0,58	7,82	0,00217	3,61	1,04	3,74
2	54	37,3	0,69	10,4	0,00256	4,04	1,04	4,19
3	54	38,0	0,70	10,8	0,00261	4,11	1,04	4,26
4	54	32,5	0,60	9,66	0,00223	4,32	1,04	4,48
5	54	32,2	0,60	9,12	0,00221	4,12	1,04	4,26

**Çizelge A.10** Kireçtaşı (Sapça) için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D) (mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	28,1	0,52	4,87	0,00193	2,52	1,04	2,61
2	54	26,4	0,49	3,83	0,00182	2,11	1,04	2,18
3	54	30,8	0,57	6,15	0,00212	2,90	1,04	3,01
4	54	40,5	0,75	2,98	0,00278	1,07	1,04	1,11
5	54	28,6	0,53	2,22	0,00197	1,13	1,04	1,17
6	54	29,0	0,54	8,36	0,00199	4,19	1,04	4,34
7	54	33,0	0,61	0,68	0,00227	0,30	1,04	0,31
8	54	29,9	0,55	8,27	0,00206	4,02	1,04	4,16
9	54	30,9	0,57	11,2	0,00212	5,28	1,04	5,47
10	54	27,8	0,51	5,44	0,00191	2,85	1,04	2,95

**Çizelge A.11** Silttaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D) (mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	30,0	0,56	8,30	0,00206	4,02	1,04	4,17
2	54	32,1	0,59	8,46	0,00221	3,83	1,04	3,97
3	54	34,0	0,63	15,7	0,00234	6,72	1,04	6,96
4	54	33,6	0,62	14,8	0,00231	6,42	1,04	6,64
5	54	33,0	0,61	10,2	0,00227	4,50	1,04	4,66
6	54	32,6	0,60	14,4	0,00224	6,44	1,04	6,66
7	54	32,5	0,60	9,34	0,00223	4,18	1,04	4,33

**Çizelge A.12** Tüf için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D) (mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	42	21,0	0,50	1,61	0,00112	1,43	0,92	1,33
2	42	23,0	0,55	1,59	0,00123	1,29	0,92	1,20
3	42	22,9	0,55	1,93	0,00122	1,58	0,92	1,46
4	42	23,3	0,55	1,91	0,00125	1,53	0,92	1,42
5	42	21,1	0,50	1,74	0,00113	1,54	0,92	1,43
6	42	23,2	0,55	1,82	0,00124	1,47	0,92	1,36
7	42	21,2	0,50	1,83	0,00113	1,61	0,92	1,49
8	42	22,8	0,54	2,08	0,00122	1,71	0,92	1,58
9	42	30,0	0,71	2,72	0,0016	1,70	0,92	1,57
10	42	26,5	0,63	1,85	0,00142	1,31	0,92	1,21

**Çizelge A.13** Kireçtaşı (Üzülmez) için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

Örnek No	Çap (D) (mm)	Boy (L) (mm)	L/D	Yenilme Yüğü (kN)	De <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (MPa)	f	I <sub>s50</sub> (MPa)
1	54	32,0	0,59	10,5	0,00220	4,78	1,04	4,95
2	54	31,5	0,58	9,85	0,00217	4,55	1,04	4,71
3	54	31,0	0,57	10,4	0,00213	4,87	1,04	5,04
4	54	31,6	0,59	9,31	0,00217	4,29	1,04	4,44
5	54	32,1	0,59	10,2	0,00221	4,63	1,04	4,79
6	54	30,0	0,56	8,81	0,00206	4,27	1,04	4,42
7	54	33,2	0,61	12,2	0,00228	5,36	1,04	5,55
8	54	30,0	0,56	7,22	0,00206	3,50	1,04	3,62
9	54	31,7	0,59	10,5	0,00218	4,83	1,04	5,00
10	54	29,9	0,55	11,1	0,00206	5,42	1,04	5,61
11	54	31,2	0,58	9,06	0,00215	4,22	1,04	4,37



**Çizelge A.14** Velibey Kumtaşı için nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları.

<b>Örnek No</b>	<b>Çap (D) (mm)</b>	<b>Boy (L) (mm)</b>	<b>L/D</b>	<b>Yenilme Yüğü (kN)</b>	<b>De<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>I<sub>s</sub> (MPa)</b>	<b>f</b>	<b>I<sub>S50</sub> (MPa)</b>
1	54	32,0	0,59	7,55	0,00220	3,43	1,04	3,55
2	54	30,0	0,56	10,5	0,00206	5,08	1,04	5,26
3	54	39,1	0,72	12,3	0,00269	4,56	1,04	4,72
4	54	32,5	0,60	6,09	0,00223	2,73	1,04	2,82
5	54	29,5	0,55	8,14	0,00203	4,01	1,04	4,15
6	54	31,0	0,57	7,56	0,00213	3,55	1,04	3,67
7	54	28,6	0,53	7,47	0,00197	3,80	1,04	3,93
8	54	38,0	0,70	10,3	0,00261	3,94	1,04	4,08
9	54	30,0	0,56	8,80	0,00206	4,27	1,04	4,42



## EK AÇIKLAMALAR B

### EK B: Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deney Sonuçlarının Sunulması

**Çizelge B.1** Andezit için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	107,0	299,8	2290,2	130,9
2	54	110,0	173,7	2290,2	75,8
3	54	104,0	332,6	2290,2	145,2
4	54	102,0	158,0	2290,2	69,0
5	54	107,1	277,4	2290,2	121,1

**Çizelge B.2** Bazalt için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	100,8	453,8	2290,2	198,2
2	54	104,2	87,9	2290,2	38,4
3	54	100,0	202,8	2290,2	88,6
4	54	107,5	184,3	2290,2	80,5

**Çizelge B.3** Gnays için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)	$\sigma_c=F/A$ (MPa) (Düzeltilmiş)
1	48	99,1	181,4	1809,6	100,2	98,1
2	48	98,0	83,0	1809,6	45,9	44,9
3	48	98,7	133,1	1809,6	73,5	72,0

**Çizelge B.4** Kireçtaşı (Çilimli) için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	110,0	79,2	2290,2	34,6
2	54	128,3	126,5	2290,2	55,3
3	54	109,5	69,1	2290,2	30,2
4	54	105,0	105,6	2290,2	46,1
5	54	103,4	127,1	2290,2	55,5
6	54	104,6	109,9	2290,2	48,0

**Çizelge B.5** Kireçtaşı (Gökgöl) için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	105,2	120,0	2290,2	52,4
2	54	105,0	127,6	2290,2	55,7
3	54	107,0	325,7	2290,2	142,2
4	54	105,5	161,5	2290,2	70,5
5	54	105,0	125,4	2290,2	54,8

**Çizelge B.6** İnce taneli kumtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	106,2	283,1	2290,22	123,6
2	54	106,0	281,1	2290,22	122,8
3	54	106,5	280,7	2290,22	122,5
4	54	105,5	294,2	2290,22	128,5
5	54	105,4	316,5	2290,22	138,2

**Çizelge B.7** Kireçtaşı (İncivez) için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	112,0	123,4	2290,2	53,9
2	54	105,0	89,1	2290,2	38,9
3	54	111,6	77,2	2290,2	33,7
4	54	108,5	152,4	2290,2	66,5
5	54	111,1	176,6	2290,2	77,1

**Çizelge B.8** Manyezit için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	97,0	143,1	2290,2	62,5
2	54	97,1	302,2	2290,2	131,9
3	54	105,0	210,9	2290,2	92,1
4	54	105,0	163,3	2290,2	71,3
5	54	102,5	261,1	2290,2	114,0

**Çizelge B.9** Orta taneli kumtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	101,7	215,7	2290,2	94,2
2	54	108,3	189,9	2290,2	82,9
3	54	103,5	217,9	2290,2	95,2

**Çizelge B.10** Kireçtaşı (Sapça) için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	124,1	141,9	2290,2	62,0
2	54	106,0	189,6	2290,2	82,8
3	54	120,0	142,2	2290,2	62,1
4	54	116,0	77,0	2290,2	33,6
5	54	106,0	51,9	2290,2	22,7

**Çizelge B.11** Silttaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	102,0	337,6	2290,2	147,4
2	54	100,0	268,6	2290,2	117,3
3	54	104,5	314,1	2290,2	137,2
4	54	104,0	232,1	2290,2	101,4

**Çizelge B.12** Tüf için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)	$\sigma_c=F/A$ (MPa) (Düzeltilmiş)
1	42	103,8	17,7	1385,4	12,8	12,2
2	42	103,9	24,9	1385,4	18,0	17,2
3	42	104,1	29,7	1385,4	21,4	20,5
4	42	104,6	17,0	1385,4	12,2	11,7

**Çizelge B.13** Kireçtaşı (Üzülmez) için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	104,0	97,2	2290,2	42,5
2	54	100,1	111,9	2290,2	48,9
3	54	100,3	238,1	2290,2	104,0
4	54	102,3	146,1	2290,2	63,8
5	54	104,0	144,3	2290,2	63,0

**Çizelge B.14** Velibey kumtaşı için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c=F/A$ (MPa)
1	54	109,0	360,0	2290,2	157,2
2	54	114,1	371,9	2290,2	162,4
3	54	114,2	370,4	2290,2	161,7
4	54	105,0	368,2	2290,2	160,8

## EK AÇIKLAMALAR C

### EK C: Dolaylı Çekme Dayanımı Deney Sonuçlarının Sunulması

Çizelge C.1 Andezit için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	32,1	24,1	2290,2	8,86
2	54	33,0	26,0	2290,2	9,28
3	54	31,1	18,5	2290,2	7,01
4	54	33,1	18,1	2290,2	6,44
5	54	35,0	21,8	2290,2	7,34
6	54	32,9	12,1	2290,2	4,32
7	54	32,5	21,0	2290,2	7,63
8	54	34,1	30,3	2290,2	10,5

Çizelge C.2 Bazalt için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	31,8	31,9	2290,2	11,8
2	54	30,4	36,9	2290,2	14,3
3	54	31,6	49,0	2290,2	18,3
4	54	31,1	39,8	2290,2	15,1

Çizelge C.3 Gnays için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	47,1	27,9	12,3	1742,3	5,95
2	47,1	28,0	14,8	1742,3	7,15
3	47,1	28,0	16,6	1742,3	8,00

**Çizelge C.4** Kireçtaşı (İncivez) için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	35,8	24,7	2290,2	8,13
2	54	30,1	15,6	2290,2	6,09
3	54	31,1	23,7	2290,2	8,99
4	54	32,0	16,0	2290,2	5,88
5	54	27,1	22,8	2290,2	9,91
6	54	30,5	14,1	2290,2	5,46
7	54	26,0	14,2	2290,2	6,44
8	54	27,0	17,8	2290,2	7,78
9	54	28,0	21,6	2290,2	9,11
10	54	29,1	14,1	2290,2	5,72

**Çizelge C.5** Kireçtaşı (Sapça) için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	35,0	7,90	2290,2	2,66
2	54	29,5	12,2	2290,2	4,87
3	54	30,0	16,6	2290,2	6,53
4	54	31,8	15,1	2290,2	5,58
5	54	33,2	38,1	2290,2	13,5
6	54	34,8	17,5	2290,2	5,91
7	54	25,0	10,3	2290,2	4,86
8	54	36,5	19,6	2290,2	6,34



**Çizelge C.6** Kireçtaşı (Üzülmez) için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	32,1	18,1	2290,2	6,65
2	54	31,2	26,0	2290,2	9,84
3	54	31,1	20,8	2290,2	7,87
4	54	32,1	33,8	2290,2	12,4
5	54	33,0	30,6	2290,2	10,9
6	54	33,5	22,2	2290,2	7,82
7	54	32,0	35,4	2290,2	13,0
8	54	32,5	33,6	2290,2	12,2
9	54	32,0	29,7	2290,2	11,0
10	54	32,5	33,4	2290,2	12,1

**Çizelge C.7** Kireçtaşı (Çilimli) için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	34,0	18,1	2290,2	6,28
2	54	32,0	21,3	2290,2	7,84
3	54	31,4	20,4	2290,2	7,67
4	54	33,0	25,2	2290,2	9,00
5	54	29,7	24,4	2290,2	9,68
6	54	32,0	28,2	2290,2	10,4
7	54	31,0	19,5	2290,2	7,43
8	54	30,5	18,4	2290,2	7,12
9	54	29,6	21,1	2290,2	8,40
10	54	30,2	18,3	2290,2	7,16

**Çizelge C.8** Kireçtaşı (Gökgöl) için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	29,1	25,3	2290,2	10,3
2	54	30,5	19,0	2290,2	7,33
3	54	31,0	26,4	2290,2	10,1
4	54	27,3	19,6	2290,2	8,46
5	54	28,0	28,8	2290,2	12,1
6	54	28,9	19,8	2290,2	7,82
7	54	30,0	22,0	2290,2	8,63
8	54	35,9	23,5	2290,2	7,72

**Çizelge C.9** İnce taneli kumtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	32,0	33,8	2290,2	12,5
2	54	32,1	26,4	2290,2	9,68
3	54	34,2	32,8	2290,2	11,3
4	54	36,0	31,0	2290,2	10,2
5	54	34,1	29,2	2290,2	10,1

**Çizelge C.10** Orta taneli kumtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	31,2	23,3	2290,2	8,81
2	54	29,2	16,8	2290,2	6,77
3	54	30,8	8,61	2290,2	3,30
4	54	35,0	30,0	2290,2	10,1
5	54	36,1	14,8	2290,2	4,85
6	54	34,1	16,7	2290,2	5,77

**Çizelge C.11** Manyezit için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	38,5	46,8	2290,2	14,3
2	54	38,4	26,1	2290,2	8,00
3	54	32,8	25,2	2290,2	9,07
4	54	32,4	20,4	2290,2	7,43
5	54	32,1	20,4	2290,2	7,50
6	54	32,0	32,5	2290,2	12,0
7	54	30,0	20,9	2290,2	8,21

**Çizelge C.12** Siltaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	54	32,2	19,8	2290,2	7,23
2	54	32,2	32,1	2290,2	11,8
3	54	27,1	17,7	2290,2	7,68
4	54	31,3	37,2	2290,2	14,0
5	54	33,1	26,0	2290,2	9,27
6	54	32,3	37,4	2290,2	13,7

**Çizelge C.13** Tüf için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

Örnek No	Çap (mm)	Boy(mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
1	41,50	24,1	7,32	1352,7	4,66
2	41,50	23,0	4,79	1352,7	3,19
3	41,50	24,1	5,54	1352,7	3,53
4	41,50	23,0	6,23	1352,7	4,16
5	41,50	24,0	6,33	1352,7	4,05
6	41,50	24,3	6,35	1352,7	4,01

**Çizelge C.14** Velibey kumtaşı için dolaylı çekme dayanımı deney sonuçları.

<b>Örnek No</b>	<b>Çap (mm)</b>	<b>Boy (mm)</b>	<b>Yenilme Yüğü (kN)</b>	<b>Kesit Alanı (mm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_t</math> (MPa)</b>
1	54	31,4	17,9	2290,2	6,74
2	54	29,1	13,6	2290,2	5,51
3	54	33,1	21,1	2290,2	7,53
4	54	31,9	19,9	2290,2	7,35
5	54	30,0	20,0	2290,2	7,87

## ÖZGEÇMİŞ

Emre GÜNAY 1988 yılında Zonguldak'ta doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2008 yılında girdiği Zonguldak Karaelmas Üniversitesi'nden 2013 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu; halen Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını sürdürmekte olup, 2014 yılından itibaren BEÜ ZMYO'da Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

### ADRES BİLGİLERİ

Adres: Tepebaşı Mah. Yapkent Sok. Kale Sitesi  
A1 Blok Daire 1  
ZONGULDAK

Tel: 0 544 743 67 22

E-posta: emre.gunay@beun.edu.tr