

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

**KAYAÇ DELİNEBİLİRLİĞİNİN VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SPESİFİK**  
**DELME ENERJİSİNE OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**UTKU SAKIZ**

**OCAK 2019**

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

**KAYAÇ DELİNEBİLİRLİĞİNİN VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SPESİFİK**  
**DELME ENERJİSİNE OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**Utku SAKIZ**

**DANIŞMAN: Doç. Dr. Hamit AYDIN**

**ZONGULDAK**  
**Ocak 2019**

**KABUL:**

Utku SAKIZ tarafından hazırlanan “Kayaç Delinebilirliğinin ve Mekanik Özelliklerinin Spesifik Delme Enerjisine Olan Etkisinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 22/01/2019

**Danışman:** Doç. Dr. Hamit AYDIN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. Hanifi ÇOPUR

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. Olgay YARALI

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Doç. Dr. Deniz TUMAÇ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Doç. Dr. Okan SU

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, ZMYO, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum.

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

Prof. 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.”*



Utku SAKIZ



## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **KAYAÇ DELİNEBİLİRLİĞİNİN VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SPESİFİK DELME ENERJİSİNE OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Utku SAKIZ**

**Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hamit AYDIN**

**Ocak 2019, 181 sayfa**

Kazı makinaları uzun yıllardır; yeraltı ve yerüstü yapılarında, tünel açma işlerinde, gerek madencilik gerekse inşaat alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Optimum kazı performansı için kazı yapılacak formasyona ve kazı amacına uygun makina seçimi oldukça önemlidir. Bu bağlamda, delme patlatma vb. madencilik çalışmalarında, su, petrol ya da doğal gaz gibi doğal kaynakların belirlenmesi ve çıkarılması üzerine yürütülen çalışmalarda, zemin etüdü, enjeksiyon, zemin sağlamlaştırma, drenaj, baraj, tünel vb. pek çok alanda yaygın olarak delici makinalar kullanılmaktadır. Tüm kazı makinalarında olduğu gibi delici makinaların performans değerlendirmelerinde yaygın kullanılan parametreler, ilerleme hızı ve ilerleme için gerekli olan enerji miktarıdır. Delik delme sistemlerinden beklenen performansa ulaşılabilmesi için, bu makinaların çalışmanın yapılacağı kayaç özelliklerine uygun olarak seçilmeleri gerekmektedir. Bu nedenle de delinebilirlik performans değerlendirmelerinde formasyonun özelliklerinin iyi bir şekilde analiz edilmesi oldukça önemlidir.

## ÖZET (devam ediyor)

Yaygın olarak delme performans değerlendirmeleri, spesifik enerji ve ilerleme hızı dikkate alınarak yapılmaktadır. Spesifik enerji (SE) tespiti, mekanize delme performans değerlendirmelerinde delinebilirliğin bir ölçütü olup, kayaç türü, delme yöntemi ve uç türüne göre değiştiğinden fiziksel bir özellik olarak değerlendirilememektedir. Ancak, delme veriminin (üretim miktarı) tahmininde, karşılaştırmasında ve optimum çalışma koşullarının belirlenmesinde kullanılan en önemli parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Spesifik enerji, kayaçtan belirli bir hacim koparmak için gereken enerji miktarı ( $\text{kWh/m}^3$  ya da  $\text{MJ/m}^3$ ) ya da delme sırasında kayaç içerisinde yeni bir yüzey alanı oluşturmak için harcanan enerji miktarı olarak ifade edilmektedir. SE'nin belirlenmesi amacıyla; büyük ve küçük ölçekli kazı setleri, görgül (ampirik) yaklaşımlar ve arazide kazı makinesi ile yapılan çalışmalar olmak üzere pek çok yöntemden yararlanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında; döner deliciler kullanıldığından spesifik enerji, spesifik delme enerjisi olarak tanımlanmıştır.

Bu tez çalışmasında; sedimanter ve magmatik kökenli 16 kayaç türü üzerinde, ZBEU Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Laboratuvarında yeniden tasarımılandırılmış döner delik delme deney setinin kullanılmasıyla delme çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla, laboratuvarda kullanılan taşınabilir karot alma makinası, döner delik delme sistemleriyle uyumlu olacak şekilde uygun aparatlar ile desteklenerek (tork sensörü, dönme hızı/devir ölçer sensörü, akım ve voltaj sensörü, dijital kumpas vb.) yeniden tasarımılandırılmış ve deney seti oluşturulmuştur. Böylece, karot alma esnasında delme performans ölçümleri yapılabilmektedir. Deney setinin yeniden tasarımılandırılmasında, döner delicilerin delme performanslarının belirlenmesi için günümüzde yaygın kullanılan operasyonel makine parametreleri (baskı, dönme hızı/devir, tork, makinanın gücü vb.) dikkate alınmıştır. Deneyler sırasında baskı yükü ve dönme hızı/devir değişkenleri, makinanın operasyonel parametreleri olarak çalışma koşullarını belirlemiştir. Bu kapsamda, yapılan delme çalışmaları 4 farklı farklı baskı (50, 70, 90 ve 110 kg) ve 3 farklı dönme hızı/devir (210, 330 ve 470 dev/dk) koşulunda gerçekleştirilmiş olup, delme esnasında dönme torku, fiili dönme hızı, yapılan ilerleme miktarı, akım, voltaj ve güç gibi parametreler ölçülmüştür. Böylece spesifik delme enerjisi, döner deliciler için en çok kullanılan yaklaşımlar dikkate alınarak, mekanik ve elektriksel olarak hesaplanmıştır. Çalışmalar sırasında elmas emprenyeli karotiyerler kullanılmış, alınan karot örnekleri üzerinde kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir.

## ÖZET (devam ediyor)

Kayaç özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan deneyler, uluslararası standartlara (ISRM, ASTM) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kayaçların fiziksel (yoğunluk), mekanik (basınç ve çekme dayanımları ile deformasyon özellikleri), indeks (DRI, CAI ve ESD) ve mineralojik özellikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. Böylece, ilk olarak, operasyonel makine parametrelerinin spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı üzerindeki etkileri araştırılmış ve daha sonra kayaçların fiziksel, mekanik, indeks ve mineralojik özelliklerinin delme performansına etkileri istatistiksel değerlendirme yöntemleri (korelasyon ve regresyon) ile analiz edilmiştir. Bu çalışmada mevcut delme koşullarında her bir kayaç türü için optimum çalışma koşulları elde edilmiştir. Buna ek olarak, bir indeks deney yöntemi olarak DRI'nın, çalışmada kullanılan kayaçlar için delme performans parametrelerini istatistiksel olarak daha anlamlı olarak açıkladığı belirlenmiştir.

Bu tez çalışması ile madencilik ve sondaj faaliyetlerinde kullanılan döner delici makinaların en önemli delme performans parametresi olan spesifik delme enerjisinin, kayaç özellikleri ve döner delik delme deney setinden elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Delme performans tahminine yönelik geliştirilen modellerin güvenilirliği için çalışmada kullanılan örnek sayısı artırılmalı ve delici makinaların yerinde performans ölçümleri yapılarak laboratuvar çalışması ile arazide alınan ölçümler arasındaki ilişkiler irdelenmelidir.

**Anahtar Kelimeler:** Delinebilirlik, Spesifik Enerji (SE), Spesifik delme enerjisi (SDE), İlerleme hızı (PR), Delme oranı indeksi (DRI), Cerchar aşınma indeksi (CAI),

**Bilim Kodu:** 607.01.03



## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DRILLABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF ROCK ON SPECIFIC DRILLING ENERGY**

**Utku SAKIZ**

**Zonguldak Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mine Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hamit AYDIN**

**January 2019, 181 pages**

Over the years excavation machines are being widely used in underground and surface structures, tunneling works, mining and construction. The selection of suitable machinery for excavation and excavation purposes is very important. In this regard, drilling and blasting studies are carried out on the determination and extraction of natural resources such as water, oil or natural gas, in terms of mining; ground survey, injection, ground consolidation, drainage, dam, tunnel and so on. In many areas, drilling machines are widely used. Considering the drilling process, penetration rate and the amount of energy required to achieve progress are the two most commonly used parameters in the performance evaluation of drilling machines. In order to achieve the expected performance of drilling systems, these machines must be selected according to the rock properties. For this reason, it is very important to analyze the characteristics of the formation for the drillability performance evaluations.

## ABSTRACT (continued)

Specific energy and penetration rate parameters are commonly used in the order of drilling performance evaluations. Specific energy determination is a commonly used factor as a measure of penetrability in mechanized drilling performance assessments. Since method varies according to the type of drilling and bit type, the type of rock can not be considered as a physical feature. However, it is used as the most important parameter used in estimation, comparison and optimum working conditions of drilling efficiency (production quantity). Specific energy is defined as the amount of energy required to break a certain volume from the rock ( $\text{kWh/m}^3$  or  $\text{MJ/m}^3$ ) or the amount of energy spent to create a new surface area in the rock during drilling. In order to determine the specific energy many methods are employed such as large and small-scale excavation sets, empirical approaches and field applications. Within the scope of this thesis study; the specific energy is defined as the specific drilling energy, considering the excavation method. Another important parameter used in drilling performance evaluations is the penetration rate which is defined as the hole length per unit time.

In the context of this study; drilling were carried out on 16 rock types with sedimentary and magmatic origin by using the redesigned rotary hole drilling test set in ZBEU Mine Mechanization and Technology Laboratory. The core drilling machine used in the laboratory is compatible with rotary hole drilling systems and supported by suitable apparatus (torque, rotational speed, current and voltage, digital caliper, etc.). Thus, core drilling and drilling performance measurements can be made. The redesign of the set, the drilling performances of rotary drills, and today's highly complex machine settings (weight on bit, rotational speed, torque, power of the machine, etc.) are made. Experienced weight on bit and rotational speed / speed variables determine the operating conditions for the machine's operational function. Drilling operations were carried out in 4 different pressures (50, 70, 90 and 110 kg) and 3 different speed (210, 330 and 470 rpm), the drilling rotational torque, the actual rotational speed, the current, Voltage and power parameters are measured. Thus, the specific drilling energy is calculated mechanically and electrically, taking into account the most commonly used approaches for rotary drills.. During the studies, rock mechanics experiments were performed on the cores taken with diamond impregnated and core drilling bit. In the body of the study, physical (density) experiments, mechanical (compressive and tensile strength and deformation characteristics) characterizations, some index (DRI, CAI and ESD) calculations and determination of mineralogical properties of the rocks were performed separately by experiments.

## **ABSTRACT (continued)**

Thus, firstly, the effects of interchangeable machine parameters on specific drilling energy and penetration rate were investigated, and then the effects of physical, mechanical, index and mineralogical properties of the rocks on drilling performance were analyzed by statistical evaluation methods (correlation and regression). In this study, optimum working conditions have been obtained for each rock type for the employed drilling conditions. In addition, DRI, as an index testing method, was determined to explain the drilling performance parameters more significantly for the rocks used in the study.

This thesis study primarily intended to focus on development of new formulas for estimating the specific drilling energy from rock properties and rotary drilling machine test set for mining and drilling operations. For the reliability of the models developed for drilling performance estimation, the number of samples used in the study should be increased and performance measurements of the drilling machines should be carried out and the relations between the laboratory studies and the measurements taken in the field should be taken into consideration.

**Keywords:** Drillability, Specific Energy (SE), Specific drilling energy (SDE), Penetration rate (Pr), Drilling rate index (DRI), Cerchar abrasivity index (CAI), Rock hardness (ESD)

**Science Code:** 607.01.03





## TEŞEKKÜR

Yazar, Doktora tez çalışmaları ve akademik hayatı süresince maddi ve manevi katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen, daima yol gösterici olan ve doktora çalışmalarında yönlendiren, tez danışmanları Doç. Dr. Hamit AYDIN ve Prof. Dr. Olgay YARALI'ya sonsuz teşekkürlerini sunar.

Doktora tez izleme komite üyesi olarak yardımlarını ve önerilerini eksik etmeyen Doç. Dr. Okan SU'ya, tez çalışması konusunda değerli fikir ve görüşlerini paylaşarak yolumu açan tavsiyelerinden ötürü Prof. Dr. Nuri A. AKÇIN ve Prof.Dr. Hasan GERÇEK'e, kaya mekaniği ile ilgili katkılarından dolayı Prof. Dr. Melih GENİŞ'e, laboratuvar deneyleri sırasında yardımlarını gördüğüm Doç. Dr. Özgür YILMAZ'a, tez çalışmasında kullanılan kayaç örneklerinin minerolojik analizinin yapılmasında ve yorumlanmasında Dr. Öğr. Üy. Gürkan BACAĞ'a, çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Hanifi ÇOPUR, Prof. Dr. Cemal BALCI, Doç. Dr. Deniz TUMAÇ, Dr. Mühendis Emre AVUNDUK ve Yük. Mühendis Aydın SHATERPOUR MAMAGHANI'ye, dolomit/mermer (Bursa) örneklerinin temininde gösterdiği kolaylık ve destekten ötürü arkadaşı Maden Mühendisi Mehmet YURDAKUL'a, Üzülmüş kumtaşı örneklerinin laboratuvara getirilmesinde verdiği katkılarından dolayı Türkiye Taş Kömürü Kurumu'ndan Maden Mühendisi Servet Bulut'a, doktora tez çalışmaları süresince yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli arkadaşları Maden Yük. Mühendisi Halil Yalçın AYDINER, Arş. Gör. Haşim DURU, Arş. Gör. Candan Bilen ve Arş. Gör. Mehmet BİLEN'e teşekkürü bir borç bilir.

Ömrü boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, dualarıyla ve sevgileriyle her zaman yanında olan sevgili ailesine, tanıdığı ilk günden beri hayatına mutluluk ve yaşam enerjisi katan sevgili nişanlısı Pelin ÇIKLAİBLİKÇİ'ye sonsuz teşekkürlerini sunar.

Ayrıca, tez çalışmaları süresince, 2015-98150330-01 No.'lu BAP ve 2015-98150330-03 No.'lu Alt Yapı Projeleri ile çalışmaya maddi destek sağlayan ZBEÜ Bilimsel Araştırma Projesi Koordinatörlüğü'ne çok teşekkür eder.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxiii
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
1.1. KONUNUN ÖNEMİ.....	1
1.2. TEZİN AMACI.....	2
1.3. TEZİN KAPSAMI.....	2
1.4. TEZİN İÇERİĞİ.....	3
1.5. ÇALIŞMA İŞ AKIŞI.....	4
BÖLÜM 2 KAYAÇLARIN DELİNEBİLİRLİĞİ.....	7
2.1. GİRİŞ.....	7
2.2. DELİCİLER.....	13
2.3. DELME TEKNİKLERİ.....	14
2.3.1. Döner (Rötari) Delik Delme.....	14
2.3.2. Darbeli Delik Delme.....	15
2.3.3. Döner Darbeli Yöntem.....	16
2.4. DELİCİ UÇLAR.....	16
2.5. DELİK DELMEDE KAYAÇ YENİLME MEKANİZMASI.....	19
2.6. DELİNEBİLİRLİK İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	23
2.7. DELİNEBİLİRLİĞİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN DENEYLER.....	28

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.8. DELME ORANI İNDEKSİ (DRI) .....	29
2.8.1. Kırılma Deneyi (S20).....	30
2.8.2. Sievers Minyatür Delme Deneyi (SJ) .....	32
2.8.3 Delme Oranı İndeksinin (DRI) Değerlendirilmesi .....	34
BÖLÜM 3 SPESİFİK ENERJİ .....	37
3.1. SPESİFİK ENERJİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR .....	38
3.2. KÜÇÜK BOYUTLU KAZI DENEYİ .....	45
3.3. TAM BOYUTLU KAZI DENEYİ.....	47
3.4. TAŞINABİLİR DOĞRUSAL KESME SETİ (PLCM).....	50
BÖLÜM 4 LABORATUAR ÇALIŞMALARI VE DENEYSEL SONUÇLAR .....	53
4.1. LABORATUAR ÖLÇEKLİ DÖNER DELİK DELME SETİ .....	55
4.1.1. Döner Delme Seti Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi .....	59
4.1.2. Kayaçların Spesifik Delme Enerjisi ve İlerleme Hızı Değerlerinin Belirlenmesi ..	60
4.2. DENEY ÖRNEKLERİNİN HAZIRLANMASI .....	67
4.3. KAYAÇ ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	68
4.3.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi .....	68
4.3.2. Kayaçların Mekanik Özellikleri.....	69
4.3.2.1. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi .....	69
4.3.2.2. Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyi .....	70
4.3.2.3. Deformabilite Deneyi .....	71
4.3.3. İndeks Deneyleri .....	74
4.3.3.1. Delme Oranı İndeksi (DRI).....	74
4.3.3.2. Kayaçların Aşındırıcılığı.....	75
CAI: Cerchar aşınma indeksi .....	80
4.3.3.3. Kayaçların Sertliği.....	81
4.3.4. Minerolojik ve Petrografik Özellikler.....	84
4.4. PORTATİF DOĞRUSAL KESME SETİ İLE YAPILAN KESME DENEYLERİ .....	96

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 5 DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ.....	99
5.1. DELME PARAMETRELERİNİN DELME VERİMİNE ETKİSİ .....	99
5.1.1. Spesifik Delme Enerjisi (SDE) .....	99
5.1.1.1. Tork – Elektriksel Spesifik Delme Enerjisi Arasındaki İlişki.....	104
5.1.1.2. Baskı Yüğü – Elektriksel Spesifik Delme Enerjisi Arasındaki İlişki.....	110
5.1.1.2. Dönme Hızı/Devir – Elektriksel Spesifik Delme Enerjisi Arasındaki İlişki.	115
5.1.2. İlerleme Hızı (PR).....	119
5.1.2.1. Tork – İlerleme Hızı Arasındaki İlişki .....	119
5.1.2.2. Baskı Yüğü – İlerleme Hızı Arasındaki İlişki .....	125
5.1.2.3. Dönme Hızı/Devir – İlerleme Hızı Arasındaki İlişki .....	129
5.1.3. Elektriksel Spesifik Delme Enerjisi – İlerleme Hızı Arasındaki İlişki .....	134
5.2. KAYAÇ ÖZELLİKLERİNİN DELME VERİMİNE ETKİSİ .....	136
5.2.1. Fiziksel Özelliklerin Etkisi .....	141
5.2.2. Mekanik Özelliklerin Etkisi .....	142
5.2.3. İndeks Özelliklerin Etkisi .....	145
5.2.4. Minerolojik Özelliklerin Etkisi .....	151
5.3. KAYAÇ DELME PERFORMANS TAHMİNİ.....	153
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	159
6.1. SONUÇLAR.....	161
6.2. ÖNERİLER.....	165
KAYNAKLAR.....	167
BİBLİYOGRAFYA .....	179
ÖZGEÇMİŞ .....	181



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Çalışma iş akışı. ....	6
Şekil 2.1 Delinebilirliği etkileyen etkenler. ....	11
Şekil 2.2 Üstten darbeli delici .....	15
Şekil 2.3 Döner darbeli delici ve makine parametleri .....	16
Şekil 2.4 Döner ve darbeli delik delme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan delici uçlar ...	17
Şekil 2.5 Delik delmede yenilme mekanizması .....	19
Şekil 2.6 Delme işlemi üç aşamalı gösterimi .....	20
Şekil 2.7 Çatlak ilerleme modları.....	21
Şekil 2.8 Elmas taneciği ile kayaç arasındaki mekanik ilişkiye bağlı gerçekleşen kesme mekanizması .....	22
Şekil 2.9 Kırılgnlık deney düzeneği .....	31
Şekil 2.10 Kırılgnlık deney aleti.....	31
Şekil 2.11 Sievers minyatür delme deneyi düzeneği.....	32
Şekil 2.12 Sievers minyatür delme (SJ) deney aletinin görünüşü.....	33
Şekil 2.13 SJ deneyinde kullanılan özel uçların geometrisi.....	34
Şekil 2.14 SJ deneyinde kullanılan özel hazırlanmış uçlar. ....	34
Şekil 2.15 DRI'nin değerlendirilmesi için diyagram .....	35
Şekil 3.1 Gerilme birim deformasyon eğrisinden birim deformasyon enerjisi “destruction work” kestirimi .....	42
Şekil 3.2 Kollu galeri açma makinalarının SE ile değişimi .....	46
Şekil 3.3 CSM'de kullanılmış tam boyutlu kesme seti .....	48
Şekil 3.4 İTÜ'de kullanılan tam boyutlu kesme seti .....	48
Şekil 3.5 Optimum SE ile s/d' arasındaki eğri.....	49
Şekil 3.6 Taşınabilir doğrusal kesme seti (PLCM) .....	50
Şekil 3.7 Taşınabilir doğrusal kesme seti için hazırlanan örnekler ve deney öncesi yüzey düzeltmesi .....	51
Şekil 4.1 Çalışmada kullanılan kayaçların alındıkları yerler. ....	54
Şekil 4.2 Döner delik delme deney setinin şematik gösterimi .....	55
Şekil 4.3 Deney setinin ana kısımları ve şasesi.....	57
Şekil 4.4 Deney seti ait baskı yükü için kefe .....	57

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.5 Deney setine ait tork ve dönme hızı/devir sensörleri. ....	58
Şekil 4.6 Deney setinin genel görünümü .....	58
Şekil 4.7 Deney setinde uygulanan girdi ve çıktı parametreleri. ....	59
Şekil 4.8 Devir sabit tutulduğunda, baskı yükündeki değişime bağlı olarak kesme torku değerlerinin değişimi. ....	61
Şekil 4.9 Devir sabit tutulduğunda, baskı yükündeki değişime bağlı olarak makine gücü değerlerinin değişimi. ....	61
Şekil 4.10 Kayaç örneklerini kesme ve yüzeylerini düzeltme makinaları. a.Taş kesme makinesi b.Yüzey düzeltme makinesi. ....	67
Şekil 4.11 Boyutlandırılmış ve yüzeyleri standartlara uygun karot örnekleri.....	68
Şekil 4.12 Tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımı deneyinde kullanılan pres.....	69
Şekil 4.13 Dolaylı çekme deney aleti.....	70
Şekil 4.14 Deformabilite deneyinde kullanılan deney aleti. ....	71
Şekil 4.15 Çapsal ve eksenel gerilim-birim deformasyon grafikleri.....	72
Şekil 4.16 Orijinal CAI deney aleti (a) ve West deney aleti (b) çalışma prensibi .....	77
Şekil 4.17 Konik uçtaki aşınma yüzey çapının ölçümü .....	78
Şekil 4.18 Aşınmış uçların bilgisayar destekli 35 büyütme bioküler mikroskop altında ölçümünden bir örnek. ....	78
Şekil 4.19 West tam otomatik Cerchar aşınma indeksi deney aleti. ....	79
Şekil 4.20 Bilgisayar destekli mikroskop ile yapılan görüntüleme sistemi. ....	80
Şekil 4.21 Equatip sertlik ölçer. ....	82
Şekil 4.22 Equatip sertliği hız – zaman grafiği .....	83
Şekil 4.23 Kayaçların polarizon mikroskobu altındaki görüntüleri. ....	93
Şekil 5.1 Farklı spesifik delme enerjisi değerleri arasındaki ilişki. ....	100
Şekil 5.2 Elektriksel spesifik delme enerjisi ile mekanik spesifik delme enerjisi (Teale 1965) arasındaki ilişki. ....	101
Şekil 5.3 Elektriksel spesifik delme enerjisi ile mekanik spesifik delme enerjisi (Rabia 1982, 1985) arasındaki ilişki. ....	101
Şekil 5.4 Elektriksel spesifik delme enerjisi ile birim deformasyon enerjisi arasındaki ilişki .....	102
Şekil 5.5 Elektriksel spesifik delme enerjisi ( $SE_{PLCM}$ ) ile taşınabilir doğrusal kesme setinden elde edilen spesifik enerji ( $SE_{PLCM}$ ) arasındaki ilişki .....	103
Şekil 5.6 Magmatik kayaçlarda tork-elektriksel spesifik delme enerjisi ilişkisi.....	105
Şekil 5.7 Sedimanter kırıntılı kayaçlarda tork- elektriksel spesifik delme enerjisi ilişkisi. ....	107



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.8 Sedimanter karbonatlı kayalarda tork- elektriksel spesifik delme enerjisi ilişkisi.	109
Şekil 5.9 Magmatik kayalar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki. ....	112
Şekil 5.10 Sedimanter kırıntılı kayalar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki. ....	113
Şekil 5.11 Sedimanter karbonatlı kayalar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki. ....	114
Şekil 5.12 Magmatik kayalar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki. ....	115
Şekil 5.13 Sedimanter kırıntılı kayalar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki. ....	116
Şekil 5.14 Sedimanter karbonatlı kayalar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki. ....	118
Şekil 5.15 Magmatik kayalarda tork – ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	120
Şekil 5.16 Sedimanter kırıntılı kayalarda tork – ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	121
Şekil 5.17 Sedimanter karbonatlı kayalarda tork – ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	123
Şekil 5.18 Magmatik kayalar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	126
Şekil 5.19 Sedimanter kırıntılı kayalar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	127
Şekil 5.20 Sedimanter karbonatlı kayalar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	128
Şekil 5.21 Magmatik kayalar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	129
Şekil 5.22 Sedimanter kırıntılı kayalar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	131
Şekil 5.23 Sedimanter karbonatlı kayalar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	132
Şekil 5.24 Kayaların farklı yaklaşımlara göre spesifik delme enerjisi değerleri ile ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	134
Şekil 5.25 Tüm kayalar için elektriksel spesifik delme enerjisi değerleri ile ilerleme hızı arasındaki ilişki. ....	135
Şekil 5.26 Delme performans parametreleri ile kayaç yoğunlukları arasındaki ilişki. ....	141
Şekil 5.27 Delme performans parametre değerleri ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki. ....	143
Şekil 5.28 Delme performans parametre değerleri ile dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki. ....	144

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.29 Delme performans parametre değerleri ile elastisite modülü arasındaki ilişki.....	145
Şekil 5.30 Delme performans parametre değerleri ile sievers minyatür delme arasındaki ilişki .....	146
Şekil 5.31 Delme performans parametre değerleri ile kırılma değeri arasındaki ilişki ....	147
Şekil 5.32 Delme performans parametre değerleri ile delme oranı indeksi arasındaki ilişki.	148
Şekil 5.33 Delme performans parametre değerleri ile kayaç sertliği arasındaki ilişki.....	149
Şekil 5.34 Delme performans parametre değerleri ile Cerchar aşınma indeksi arasındaki ilişki. ....	150
Şekil 5.35 Delme performans parametre değerleri ile ortalama tane boyu arasındaki ilişki ...	151
Şekil 5.36 Delme performans parametre değerleri ile eş değer kuvars içeriği arasındaki ilişki .....	152

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Kazı makinelerinin performansını etkileyen bazı parametreler .....	9
Çizelge 2.2 Modellerde kullanılan deneyler .....	10
Çizelge 2.3 Doku ve tane boyu ile ilerleme hızı arasındaki ilişki.....	11
Çizelge 2.4 Kaya formasyonu ile ilerleme hızı ilişkisi .....	13
Çizelge 2.5 Kayaç kırılma şekline göre ilerleme hızı .....	13
Çizelge 2.6 Kırılmalık deneyi (S20) sınıflaması .....	31
Çizelge 2.7 Sievers minyatür delme ( $s_j$ ) deneyinin sınıflaması .....	33
Çizelge 2.8 Delme oranı indeksi (DRI) deneyi sınıflaması .....	35
Çizelge 3.1 Orta ağırlıktaki kollu galeri açma makinasının seçim kriterleri .....	47
Çizelge 3.2 Ağır tip kollu galeri açma makinasının seçim kriterleri .....	47
Çizelge 4.1 Çalışma kapsamında araziden alınan kayaç türü ve adları. ....	53
Çizelge 4.2 Çalışmada kullanılan kayaç türlerinin mekanik spesifik delme enerjisi değerleri (Teale 1965 yaklaşımı).....	62
Çizelge 4.3 Çalışmada kullanılan kayaç türlerinin mekanik spesifik delme enerjisi değerleri (Rabia 1982 1985 yaklaşımı). ....	63
Çizelge 4.4 Çalışmada kullanılan kayaç türlerinin elektriksel spesifik delme enerjisi değerleri.....	64
Çizelge 4.5 Çalışmada kullanılan kayaç türlerinin ilerleme hızı değerleri. ....	65
Çizelge 4.6 Delme deneyleri sırasında ölçülen dönme hızı/devir değerlerindeki düşüş.....	66
Çizelge 4.7 İncelenen kayaçların yoğunlukları. ....	68
Çizelge 4.8 ISRM (1979) tarafından önerilen $\sigma_c$ 'ye göre kaya malzemesinin tanımlanması..	70
Çizelge 4.9 Kayaçların mekanik özellikleri ve $SDE_{DW}$ değerleri. ....	73
Çizelge 4.10 Kayaçların delme oranı indeks deney (DRI) sonuçları değerleri ile sınıflaması.	75
Çizelge 4.11 Cerchar (1986) tarafından önerilen sınıflaması. ....	78
Çizelge 4.12 ASTM (2010) tarafından önerilen aşındırıcılık sınıflaması.....	79
Çizelge 4.13 Alber vd. (2014) tarafından önerilen aşındırıcılık sınıflaması.....	79
Çizelge 4.14 Çalışmada kullanılan kayaçların CAI değerleri ve sınıfı. ....	80
Çizelge 4.15 Çalışmada kullanılan kayaçların Equotip sertlik değerleri. ....	84
Çizelge 4.16 Kayaçların mineral içeriği, dokusu, hamur özellikleri, ayrışma durumları ve petrografik sınıflandırılmaları. ....	89

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.17 Kayaçların mineral ve doku içeriği.....	91
Çizelge 4.18 Kayaçların çimentolanma katsayısı .....	95
Çizelge 4.19 Kayaçların Rosival aşındırıcılık katsayısı değerleri.....	95
Çizelge 4.20 Kayaçların petrografik özellikleri. ....	96
Çizelge 4.21 Taşınabilir doğrusal kesme setinden elde edilen spesifik enerji değerleri.....	97
Çizelge 5.1 Kayaçların spesifik delme enerjisi (SDE) ve ilerleme hızı (PR) değerleri .....	137
Çizelge 5.2 Magmatik kayaç için elde edilen ilişki matrisi. ....	138
Çizelge 5.3 Sedimanter kırıntılı kayaçlar için elde edilen ilişki matrisi. ....	139
Çizelge 5.4 Sedimanter karbonatlı kayaçlar için elde edilen ilişki matrisi. ....	139
Çizelge 5.5 Magmatik kayaçlarda spesifik delme enerjisi için önerilen tahmin modelleri ...	154
Çizelge 5.6 Sedimanter kırıntılı kayaçlarda spesifik delme enerjisi için önerilen tahmin modelleri.....	155
Çizelge 5.7 Sedimanter karbonatlı kayaçlarda spesifik delme enerjisi için önerilen tahmin modelleri.....	155
Çizelge 5.8 Magmatik kayaçlarda ilerleme hızı için geliştirilen tahmin modelleri. ....	156
Çizelge 5.9 Sedimanter kırıntılı kayaçlarda ilerleme hızı için geliştirilen tahmin modelleri. ....	156
Çizelge 5.10 Sedimanter karbonatlı kayaçlarda ilerleme hızı için geliştirilen tahmin modelleri.....	156
Çizelge 5.11 Spesifik delme enerjisi ile kayaç özellikleri arasında geliştirilen tahmin modelleri.....	157
Çizelge 5.12 İlerleme hızı ile kayaç özellikleri arasında geliştirilen tahmin modelleri. ....	157

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### SİMGELER

S20	: kırılma indeksi
SJ	: Sievers minyatür delme değeri
$\sigma_c$	: tek eksenli basınç dayanımı
PDC	: kompakt polikristalin elmas
Ft	: teğetsel kuvvet
Fn	: normal kuvvet
F	: baskı yükü
SE	: spesifik enerji
DRI	: delme oranı indeksi
KDK	: kayaç dayanım katsayısı
BWI	: uç aşınma indeksi
CLI	: uç ömür indeksi
NX	: çapı 54 mm olan karotiyer
SDE	: spesifik delme enerjisi
SDE <sub>T</sub>	: Teale 1965 eşitliğinden elde edilen spesifik delme enerjisi
PR	: ilerleme hızı
D	: delik çapı
N	: dönme hızı/devir
A	: delik yüzey alanı
D <sub>c</sub>	: delici ucun çapı
T	: tork
$\mu$	: kayaç sürtünme katsayısı
SDE <sub>DW</sub>	: birim deformasyon enerjisi “destruction work”
E	: elastisite modülü
SDE <sub>R</sub>	: Rabia 1982 eşitliğinden elde edilen spesifik delme enerjisi
$\epsilon_{max}$	: maksimum birim deformasyon
Wz	: şekil değiştirme enerjisi

## SİMGELER VE KISALTMALAR (devam ediyor)

B1	: kırılma hızı ölçütü
B2	: kırılma hızı ölçütü
B3	: kırılma hızı ölçütü
$\sigma_t$	: dolaylı çekme dayanımı
P	: güç
I	: akım
V	: voltaj
SDE <sub>E</sub>	: elektriksel spesifik delme enerjisi
Em	: makine verimi
F <sub>b</sub>	: gerçek baskı
$\gamma_b$	: delik taban eğimi
FC	: ortalama kesme kuvveti
ICR	: anlık ilerleme miktarı
Q	: pasa hacmi
F <sub>C</sub>	: maksimum kesme kuvveti
d <sup>l</sup>	: kesme derinliği
s	: keskinlikler arası mesafe
SE <sub>PLCM</sub>	: taşınabilir doğrusal kesme setinden elde edilen spesifik enerjisi
d	: yoğunluk
F <sup>l</sup>	: yenilme yükü
H	: numune boyu
t	: örnek kalınlığı
$\epsilon_l$	: aksel birim deformasyon
$\epsilon_d$	: çapsal birim deformasyon
l <sub>o</sub>	: örneğin orijinal aksel boyu
D <sub>o</sub>	: örneğin orijinal çapı
$\Delta l$	: örnek akseni boyunca uzunluktaki değişim
$\Delta D$	: örnek çapındaki çapsal değişim
$\nu$	: Poisson oranı
CAI	: Cerchar aşınma indeksi
d <sub>ca1</sub>	: Cerchar aşınma yüzeyi
ESD	: Equotip sertlik deneyi

## SİMGELER VE KISALTMALAR (devam ediyor)

H <sub>L</sub>	: Equotip sertlik değeri
V <sub>r</sub>	: ucun geri sıçrama yüksekliği
V <sub>i</sub>	: ucun darbe hızı
Yköş	: yarı köşeli, mineral tane yuvarlaklığı
Yuv	: yuvarlak, mineral tane yuvarlaklığı
Yyuv	: yarı yuvarlak, mineral tane yuvarlaklığı
Af	: alkali feldspat
Bi	: biyotit
Fe	: feldspat
K	: kalsit
Kav	: kavkı
Köş	: köşeli, mineral tane yuvarlaklığı
Kuv	: kuvars
Dol	: dolomit
Lp	: litik parça
M	: mika
Mk	: mikrokilin
MPL	: mikrolitik plajiyoklaz
MR	: mikritik kalsit
Ol	: olivin
Ool	: oolit
Op	: opak
Pl	: plajiyoklaz
Pir	: piroksen
Sk	: spar kalsit
Q <sub>eqv</sub>	: eş değer kuvars içeriği
d <sub>ort</sub>	: mineral ortalama tane boyu
DSK	: doku sağlamlık katsayısı
r	: korelasyon katsayısı
R <sup>2</sup>	: regresyon katsayısı

## SİMGELER VE KISALTMALAR (devam ediyor)

### KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
CSM	: Colorado School of Mines
DIN	: Deutsches Institut für Normung
ISRM	: International Society of Rock Mechanics
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
KGAM	: Kollu Galeri Açma Makinası
NTNM	: Norwegian University of Science and Technology
PLCM	: Portable Linear Cutting Machine
RPi	: Rock Penetrability Index
RQD	: Rock Quality Designation
RMR	: Rock Mass Ratio
TBM	: Tunnel Boring Machine
ZBEÜ	: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

#### 1.1. KONUNUN ÖNEMİ

İnsanoğlu, antik çağdan beri çeşitli alanlarda ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla yerüstü ve yeraltında açılan açıklıkları kullanmaktadır. Özellikle; dünya nüfusunun büyük artış gösterdiği son yıllarda sanayileşme ve göçler nedeniyle ortaya çıkan büyük şehirler ve buna bağlı olarak; enerji, ulaşım, sulama, doğalgaz vb. gibi ihtiyaçlara karşı olan gereksinimin karşılanması için yerüstünde uygun alanların yeterli olmayışı ve istenilen ortamın yaratılamaması, yeraltı açıklıklarına olan gereksinimi arttırmaktadır. Madencilik, inşaat vb. faaliyetlerinin yürütüldüğü yerüstü ve yeraltı yapılarında, kazı işleminin verimli, hızlı ve ekonomik bir şekilde gerçekleşmesi için mekanize kazı sistemlerinin kullanılması önemli bir yer tutmaktadır.

Mekanize kazının kabul gördüğü ilk andan günümüze kadar yapılan çalışmalar; keski aşınması ve uç sarfiyatının göz önünde bulundurulduğu aşınma ve kazı sırasında harcanan enerji olarak da tanımlanan spesifik enerji kavramları üzerinde durulmaktadır (Kel 2003). Kazı makinalarının performansının önceden tahmin etmek amacıyla birçok deneysel yöntemler geliştirilmiştir. Her bir deney yöntemi için özel ekipmanlar gerekmektedir. Bu deneyler sonucunda elde edilen verilere bağlı olarak, formasyona uygun mekanik kazı makinası ve seçilen makinanın performansına ait ilerleme, keski ve enerji tüketim miktarları öngörülebilmektedir.

Ülkemizde ve dünyada, madencilik faaliyetlerinin yürütüldüğü yerüstü ve yeraltı yapılarında delme – patlatma ve mekanize kazı sistemleri ayrı ayrı ya da kombine olarak uygulanmaktadır. Son yıllarda mekanize kazı sistemlerindeki gelişmeler paralelinde klasik kazı yöntemi olarak eskiden beri kullanılan, önemli bir kullanım alanına sahip delme – patlatma uygulamalarında, su, petrol ya da doğal gaz gibi doğal kaynakların belirlenmesi ve çıkarılması üzerine yürütülen

çalışmalarda, zemin etüdü, enjeksiyon, zemin sağlamlaştırma, drenaj, baraj, tünel vb. pek çok alanda yaygın olarak delici makinalar kullanılmaktadır.

## 1.2. TEZİN AMACI

Bu tez çalışması ile döner delicilerin performans tahmininde (spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı) pratik bir deney yönteminin geliştirilmesi, delici makinaların çalışma performansını etkileyen; operasyonel makine parametreleri (dönme hızı/devir, tork, , baskı yükü, güç vb.) ve kayaç özelliklerinin (fiziksel, mekanik, indeks ve minerolojik özellikleri) delme performansına olan etkisinin araştırılması ve performans tahmin modellerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

## 1.3. TEZİN KAPSAMI

Bu tez kapsamında;

- Yalnızca döner delici karotiyerler göz önünde bulundurulacaktır.
- Mekanize kazı sistemlerinde makine performansının önemi ve spesifik enerjinin hesaplanmasına yönelik çalışmalar literatür incelemesi ile göz önünde bulundurulacak, araştırmada delik delme sistemleri üzerine yapılan çalışmalara ağırlık verilerek, döner delik delme çalışmaları için geliştirilen ve literatürde kabul görmüş yaklaşımlar göz önünde bulundurulacaktır.
- Delinebilirlik çalışmaları elmas uçlu ve karot alınabilen NX tipi karotiyerler ile gerçekleştirilecek ve elde edilen karotlar kullanılarak her bir kayaç türüne ait özellikler (delinebilirlik, aşındırıcılık ve mekanik özellikleri) ayrı ayrı belirlenecektir.
- Laboratuvar koşullarında karot alma makinası üzerine yerleştirilen tork sensörü, dönme hızı/devir ölçer, akım, voltaj sensörü vb. aparatlar ile delme esnasında makinanın delme performans parametreleri kayıt altına alınarak delinebilirlik ile ilgili hesaplamalar için veri oluşturulacaktır.
- Batı Karadeniz Bölgesi'nde mevcut kayaçlar başta olmak üzere ülkemizin çeşitli yerlerinden alınan kökenleri farklı kayaç örnekleri üzerinde yeni deney seti kullanılarak delinebilirlik çalışmaları yapılacaktır.
- Laboratuvar çalışması, 4 farklı baskı yükü (50, 70, 90 ve 110) ve 3 farklı dönme hızı/devirde (210, 330 ve 470 dev/dk) delme deneyleri gerçekleştirilecektir. Böylece değiştirilebilir makine parametrelerinin delme performansı (spesifik delme enerjisi ve

ilerleme hızı), üzerindeki etkisi her kayaç için incelenecektir.

- Kayaçların delme performans (spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı) değerleri ile mekanik özellikleri, aşındırıcılıkları ve delinebilirlikleri arasında ilişkiler incelenecek.

#### 1.4. TEZİN İÇERİĞİ

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır.

Tezin birinci bölümünde; tez konusunun önemi vurgulandıktan sonra tezin amacı, kapsamı, içeriği ve çalışma yöntemi özetlenmiştir.

Literatür incelemesini kapsayan ikinci bölümde; makine performansı ile ilgili genel bilgiler verildikten sonra, delinebilirlik kavramı üzerinde durulmuş ve kayaçların delinebilirlik performansını etkileyen etkenlere değinilmiştir. Daha sonra, günümüzde yaygın olarak kullanılan delme teknikleri ve delici uçlar üzerinde durulmuştur. Ardından, delme sırasında kayaç yenilme mekanizmasıyla ilgili bilgi verilmiş ve delinebilirlik üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Son olarak, kayaçların delinebilirliğinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler ile ilgili bilgi verilmiş ve delme oranı indeks deneyi tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde, makine performans analizlerinde kullanılan spesifik enerji kavramı hakkında özet bilgiler sunulmuştur. Bu kapsamda, önce delme performansının değerlendirilmesine yönelik spesifik delme enerjisi (SDE) ve ilerleme hızı (Pr) tanımlanmıştır. Sonra, spesifik delme enerjisinin hesaplanmasında literatürde yaygın olarak kullanılan bağıntılar üzerinde durulmuştur. Bu bölümde son olarak da, spesifik enerjinin deneysel olarak hesaplanmasında kullanılan küçük ve büyük boyutlu deney setleri tanıtılmıştır.

Dördüncü bölümde; ilk olarak, arazi çalışmalarına kapsamında Batı Karadeniz başta olmak üzere ülkemizin çeşitli bölgelerinden alınan, magmatik ve sedimanter kökenli 16 kayaç türüne değinilmiştir. Sonra, spesifik delme enerjisinin hesaplanmasına yönelik yeniden tasarımı yapılan laboratuvar ölçekli döner delik delme deney seti anlatılmış ve çalışma koşulları (baskı yükü, dönme hızı/devir, makinanın gücü vb.) tanımlanmıştır. Son olarak, her kayaç türü için fiziksel, mekanik, indeks ve minerolojik özellikler, laboratuvarda yapılan deneyler ile ayrı ayrı belirlenmiştir.

Beşinci bölümde; döner delik delme deney seti ile yapılan deneylerden elde edilen veriler değerlendirilerek hesaplanan spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı değerleri üzerinde, makine parametrelerinin (baskı, dönme hızı/devir, tork) ve kayaç özelliklerinin (fiziksel, mekanik, indeks ve minerolojik özellikler) etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, çalışmada kullanılan her kayaç için optimum çalışma koşulları tanımlanmış ve daha sonra performans tahmini için geliştirilen modeller sunulmuştur.

Altıncı ve son bölümde, tez çalışması kapsamında elde edilen başlıca sonuçlar özetlenmiş ve aynı konuda ileride yapılabilecek çalışmalara yol gösterebilecek öneriler sunulmuştur.

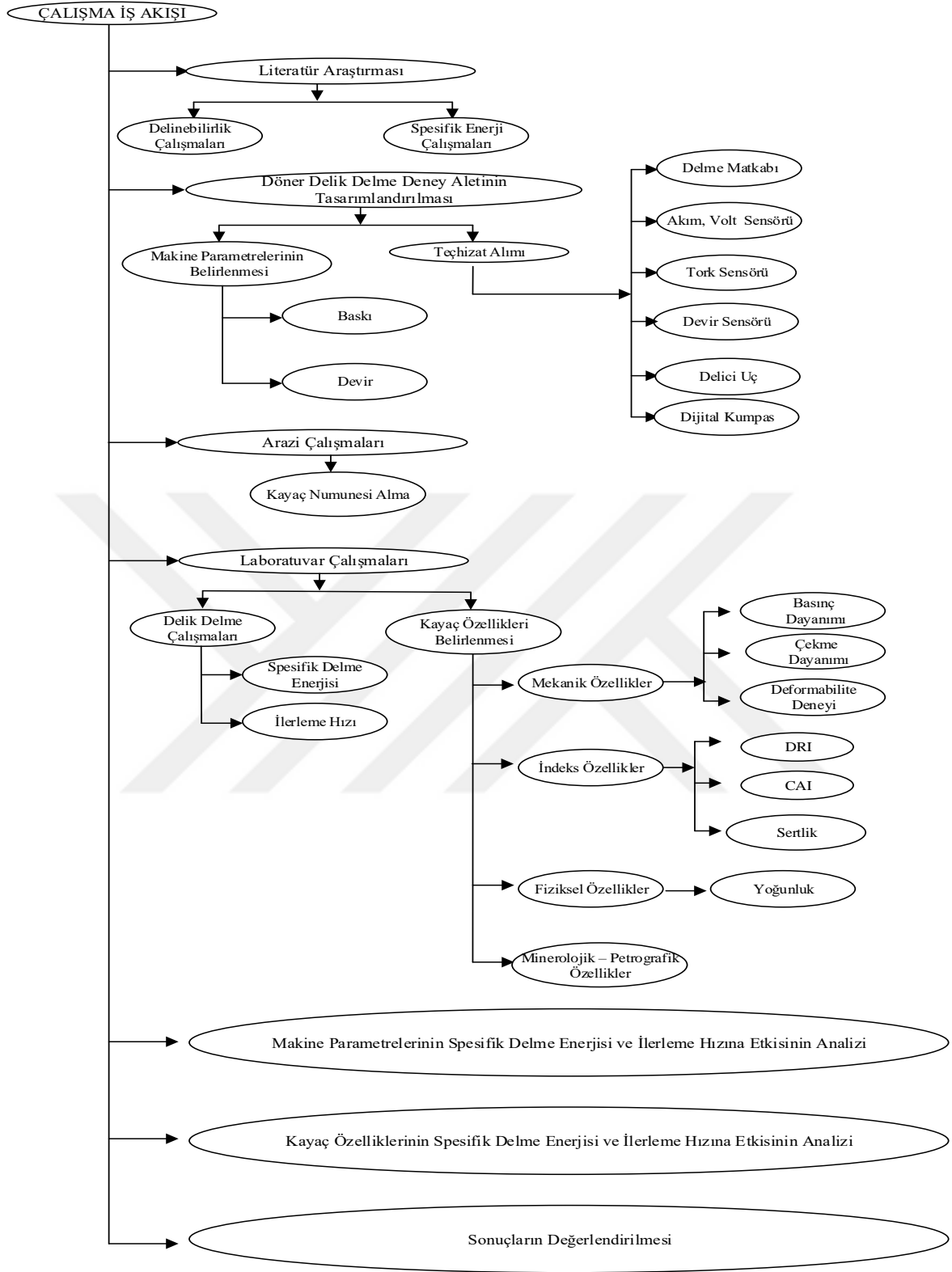
## 1.5. ÇALIŞMA İŞ AKIŞI

Bu tez çalışması kapsamında takip edilen çalışma iş akışı Şekil 1.1’de sunulmuştur.

Şekil 1.1’de görüldüğü üzere tez çalışmasının iş akışı; literatür çalışmaları, deney setinin tasarımı ve inşası, arazi ve laboratuvar çalışmaları ve çalışmalardan elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ana başlıkları altında toplanmıştır. Buna göre:

- İlk olarak konu hakkında yapılan literatür çalışmaları ile delinebilirlik ve spesifik enerji hakkında bilgi verilmiştir.
- Sonra, döner delik delme deney aletinin tasarımı ve inşası kapsamında, literatürde yapılan çalışmalar ve saha uygulamaları göz önünde bulundurularak makine parametreleri belirlenmiş (baskı yükü ve devir koşulları) ve gerekli teçhizatın (delme matkabı, delici uç, tork sensörü, akım, voltaj sensörü, devir sensörü vb.) alımı yapılarak deney seti kurulmuştur. Bu amaçla, ilk olarak ZBEU Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’nden 2015-98150330-01 No.’lu BAP ve 2015-98150330-03 No.’lu Alt Yapı Projeleri alınmıştır.
- Arazi ve laboratuvar çalışmaları kapsamında, ilk olarak çalışmada kullanılan kayaç örnekleri araziden alınarak laboratuvara getirilmiş ve daha sonra laboratuvar çalışmalarına başlanmıştır. Laboratuvar çalışmaları, delme deneyleri ve kayaç özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler olmak üzere ikiye ayrılmıştır.

- Delme deneyleri kapsamında, 4 farklı baskı yükü (50, 70, 90 ve 110 kg) ve 3 farklı devir (210, 330 ve 470 dev/dk) koşulunda delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Böylece operasyonel makine parametrelerine bağlı olarak delme performans parametreleri, spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı belirlenmiştir. Deneylerde NX karotiyer ucu kullanılmış ve delme deneylerinden alınan örnekler üzerinde kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir.
- Kayaç özelliklerinin belirlenmesi kapsamında; fiziksel (yoğunluk), mekanik (basınç, çekme ve deformabilite), indeks (delme oranı indeksi, Cerchar aşınma indeksi ve sertlik) deneyler yapılmış ve son olarak kayaçların minerolojik ve petrografik özellikleri belirlenmiştir.
- Çalışma kapsamında son olarak, operasyonel makine parametrelerinin ve kayaç özelliklerinin delme performans parametrelerine olan etkileri araştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 1.1 Çalışma iş akışı.

## BÖLÜM 2

### KAYAÇLARIN DELİNEBİLİRLİĞİ

Son 50 yılda kazı makinaları; yeraltında, tünel açma işlerinde, gerek madencilik gerekse inşaat alanında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Optimum kazı performansı için kazı yapılacak formasyona ve kazı amacına uygun makina seçimi oldukça önemlidir. Yanlış makina seçilmesi durumunda yapılan kazı/delme çalışması için istenen performansa (süre ve maliyet) ulaşamayacaktır.

#### 2.1. GİRİŞ

Yeraltında kazı işlemi genel olarak klasik (delme - patlatma) ve mekanize kazı olarak ikiye ayrılmaktadır. Laboratuvarında ve arazide uzun süreden beri denenmelerine rağmen; termal parçalanma, füzyon, buharlaştırma ve kimyasal parçalanma gibi yöntemler günümüzde ticari olarak endüstriyel bazda kullanılmaktadır. Bu durumun ana nedeni bu yöntemlerin büyük enerji gereksinimlerine ihtiyaç duyması ve yarattığı çevresel sorunlardır.

Kayaç kazısında klasik kazı yöntemi kullanıldığında delme – patlatma işleminin istenildiği seviyede olması için; gevşetilen kayanın kaldırılması, taşınması, depolanması ve işlenmesi kolay olan iyi parçalanmış bir yığın vermesi, aynı zamanda tahkimat için geçen süre ve maliyetleri en aza indirmek amacıyla çevre kayacın mümkün olduğu kadar az örselenmesi gerekmektedir. Ancak bu uygulamada mümkün olmayıp ek önlemler alınması gerektiği zaman kazı maliyetleri artmaktadır. Mekanize kazıda, formasyona uygun kesici kafa tasarımı yapılmış makineler kullanarak kayacı kesip parçalama esasına dayanan bir yöntemdir. Özellikle son yıllarda, daha hızlı, etkin ve güvenli oluşları nedeniyle tünel açma makineleri, madencilik ve tünelcilik işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kel 2003). Ayrıca, açılan tünel uzunluğu arttıkça tüm işletme maliyetleri (işçilik, tamir – bakım, kontrat süresi aşımında ödenecek cezalar, tahkimat, havalandırma vb.) göz önüne alındığında tam cepheli ve kısmi cepheli tünel açma makineleri, klasik kazıya esasa daha hızlı ve verimli kazı yapmaktadır

(Tunçdemir 2002). Tünel veya galeri açma makineleri çeşitli ölçütlere göre sınıflandırılabilir. Kazı cephesine göre yapılan bir sınıflamaya göre ikiye ayrılmaktadır:

- Tam kesit kazı yapan makineler (TBM)
- Kısmi kesit kazı yapan makineler (KGAM)

Tam cepheli tünel açma makineleri, prensip olarak bütün yüzeye uygulanan bir baskı kuvveti ile keskinin kayacı kesmesi esasına dayanmaktadır. Bu tip makineler ile sadece dairesel kesitte kazı yapılabilmektedir. Ancak, tünel kesitine oranla çok daha küçük olan kesme kafası sayesinde ayna üzerinde bölüm bölüm kazı yaparak istenilen kesitte tünellerin açılmasını sağlamaktadır (Tunçdemir 2002).

Yeraltı ve yerüstü yapılarında kullanılacak kazı yönteminde, en iyi verimi alabilmek için makine performansının önceden tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla geliştirilen performans tahmin modelleri, her bir keskinin üzerinde oluşan kesme kuvvetlerine göre geliştirilen modeller ve doğrudan yerindeki makina performansına bağlı olarak geliştirilen modeller olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Her iki model için de kendi içlerinde olumlu yanlar olduğu gibi olumsuz kısımlarda bulunmaktadır (Rostami vd. 1996). Genel olarak bakıldığında, performans tahmin modellerinin geliştirilmesinde kullanılan başlıca etkenler aşağıda sunulmuştur (Nilsen ve Özdemir 1993).

- Arazinin haritalanması (jeolojik açıdan) ve /veya arazide yerinde yapılan deneyler
- Küçük ölçekli laboratuvar deneyleri (indeks deneyleri)
- Büyük ölçekli laboratuvar deneyleri
- Sayısal modeller
- Teorik modeller

Makina seçimini ve performansını; makina ile ilgili etkenler, formasyonun jeolojik ve jeoteknik özellikleri ile ilgili etkenler ve işletme etkenleri olmak üzere 3 ana başlık altında incelemek mümkündür (Balcı vd. 2007). Makinaya ve kazılacak formasyon özelliklerinin yer aldığı ilk iki etkenin ayrıntılı incelemesi Çizelge 2.1'de sunulmuştur. İşletme etkenleri ise genel olarak, ekipman temin hızı, teknik personelin yetkinliği ve işyeri organizasyonu vb. çalışma kalitesini tanımlamaktadır.



Kazılabilirlik üzerine yürütülen çalışmalarda; uygun makine ve keski seçimi ile seçilen ekipmanın çalışma anında gösterecekleri performansın daha kazıya başlamadan önce belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla da laboratuvarında yapılan indeks deneylere ihtiyaç duyulmaktadır.

**Çizelge 2.1** Kazı makinelerinin performansını etkileyen bazı parametreler (Balcı vd. 2007).

<b>Makine Özelliklerine Bağlı Parametreler</b>	<b>Jeolojik Parametreler</b>
<b><u>Makine Özellikleri</u></b>	<b><u>Kaya Kütleli Özellikleri</u></b>
Makine tipi	Kayaç kalite değeri (RQD)
Makinenin ağırlığı ve boyutları	Kaya kütleli sınıflama sistemi (RMR)
Pasa toplama ve taşıma kapasitesi	Jeolojik süreksizlikler
Makinenin kurulu toplam gücü	Hidrojeolojik durum
<b><u>Kesici kafa özellikleri</u></b>	<b><u>Kayaçların Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri</u></b>
Kesici kafanın tipi ve boyutu	Kesme parametreleri (Spesifik enerji, kesme kuvvetleri)
Kesici kafanın gücü	Dayanım özellikleri (Basınç ve çekme dayanımı, kohezyon elastisite değeri)
Keskilerin dizilimi ve sayısı	Yüzey sertliği (Shore sertliği, Schmidt çekici değeri)
Keski tipi ve özellikleri	Kaya dokusu (Porozite, kuvars içeriği, mikroçatlaklar ve tane boyutu)
	Aşındırıcılığı (Cerchar değeri)
	Sismik özellikleri
	Diğer özellikler (Yoğunluk, nem oranı)

Kazılabilirlik çalışmaları ile önce kullanılacak keski/uç tipi belirlenmekte, daha sonra ise uygun kazı makinası seçimi yapılmaktadır. Seçilen kazı makinasında kullanılan keski ya da ucun aşınması problemi birçok soruna neden olabileceği gibi kazı maliyetlerini de olumsuz etkilemektedir. Kazı makinalarının performansının önceden tahmin etmek amacıyla çok fazla deneysel yöntem geliştirilmiştir. Her bir deney yöntemi için özel ekipmanlar gerekmektedir. Bu deneyler sonucunda elde edilen değerlere bağlı olarak, kayaca uygun mekanik kazı makinası tipi ve makina performansı (ilerleme hızı, keski ve enerji tüketim miktarı) belirlenebilmektedir. Bu durum, araştırmacıları makine performans tahmini ve uygun makine seçimi konularında kapsamlı çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. Günümüzde, maliyeti düşük ve verimi yüksek kazı sistemleri için etkin olan ana etkenlerin yanında diğer etkenlerin de neler olduğu konusunda çalışmalar sürdürülmektedir.

Kazı makinalarının performans tahminlerine yönelik olarak literatürde araştırmacılar tarafından pek çok yöntem ve model geliştirilmiş olmasına rağmen en çok kabul gören iki yöntem Çizelge

2.2’de sunulmuştur. Çizelge 2.2’de Colorado Madencilik Okulu (Colorado School of Mines, CSM) ve Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (Norwegian University of Science and Technology, NTNU) tarafından geliştirilen modeller ve bu iki modele ait deneyler listesi gösterilmektedir.

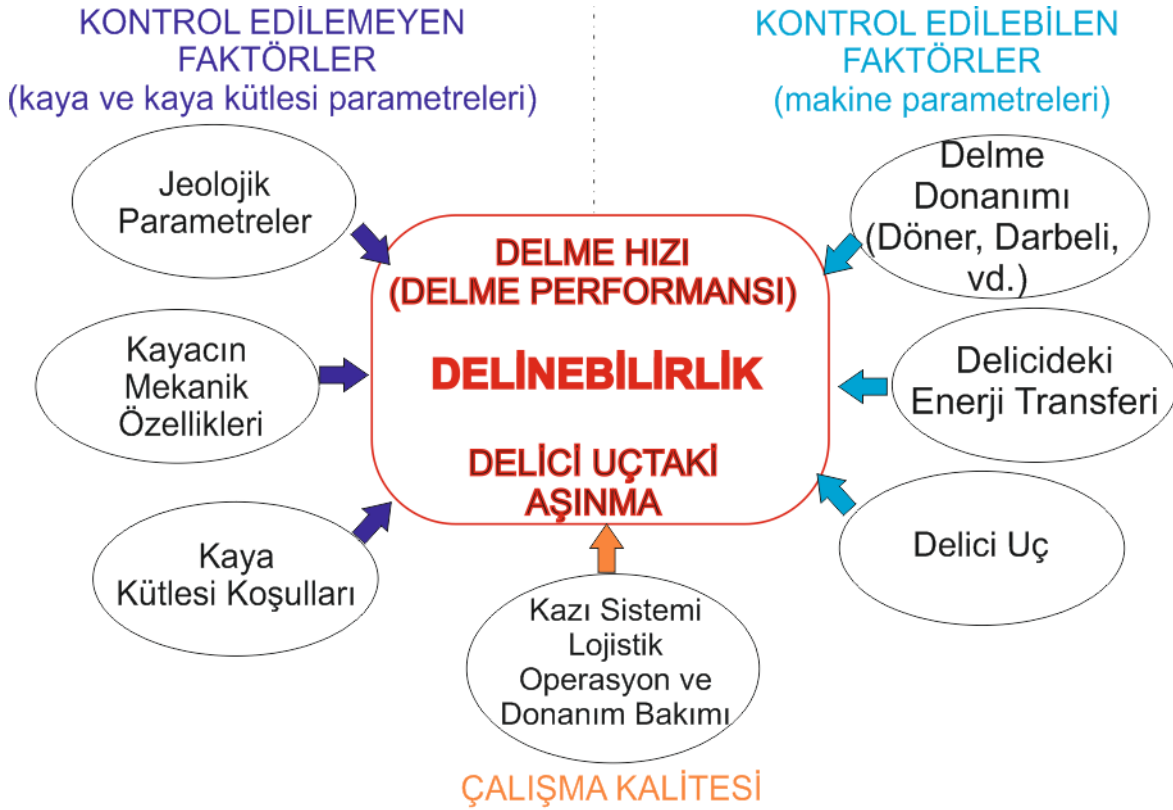
**Çizelge 2.2** Modellerde kullanılan deneyler (Özdemir ve Nilsen 1999).

<b>CSM Modeli</b>	<b>NTNU Modeli</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tek eksenli basınç dayanımı (deformasyon deneyi dahil)</li> <li>▪ Brazilian (dolaylı çekme) deneyi</li> <li>▪ Yoğunluk</li> <li>▪ Punch deneyi</li> <li>▪ Cerchar aşınma</li> <li>▪ Petrografik analizler               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sert minerallerin tipi ve içeriği</li> <li>✓ Tanelerin konumu ve yönlendirme özellikleri</li> <li>✓ Taneler arasındaki bağ</li> <li>✓ Mikroçatlaklar ve boşluklar</li> <li>✓ Diğer mikroskopik özellikler</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sievers minyatür delme deneyi (SJ)</li> <li>▪ Kırılabilirlik deneyi (S20)</li> <li>▪ Aşınma miktarı deneyi</li> <li>▪ Petrografik analizler               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sert minerallerin tipi ve içeriği</li> <li>✓ Tanelerin konumu ve yönlendirme özellikleri</li> <li>✓ Taneler arasındaki bağ</li> <li>✓ Mikroçatlaklar ve boşluklar</li> <li>✓ Diğer mikroskopik özellikler</li> </ul> </li> </ul>

Bu tez çalışması kapsamında yeraltı ve yerüstü yapılarında, doğal kaynakların araştırılması ve kazanımında, tünellerin faaliyetleri vb. pek çok alanda yaygın bir kullanım alanına sahip olan delik delme sistemleri göz önünde bulundurulacaktır. Bu kapsamda makine performansı ayrıca incelendiğinde, hızlı ve ekonomik delme işlemi için delinecek kayacın özelliklerinden delici ekipmanının seçimine kadar pek çok etkenin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu nedenle, kayaçların delinebilirliği üzerinde etkin olan etkenler kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen etkenler olmak üzere başlıca iki grupta incelemek mümkündür. Kontrol edilebilen etkenleri delici ucun tipi ve çapı, darbe, dönüş hızı gibi makinaya bağlı olan değişkenler oluştururken, kontrol edilemeyen etkenleri ise kayaç özelliklerine bağlı değişkenler oluşturmaktadır (Yaralı ve Kahraman 2011). Ek olarak, iş organizasyonunun yani çalışma kalitesinin de delinebilirlik çalışmalarına olumlu ya da olumsuz nasıl bir katkı sağlayacağını da göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Bu nedenle, kazı esnasında delinebilirlik üzerinde etkin olan etkenleri üç grupta incelemek daha doğru olacaktır (Şekil 2.1).

Delinebilirlik performans değerlendirmelerinde en çok kullanılan iki parametre, delme anında yapılan ilerleme hızı ve ilerlemenin sağlanabilmesi için gerekli olan enerji miktarıdır. Delik delme sistemlerinden beklenen yararları ulaşılabilmek için, bu makinelerin kazılacak olan kayaç

özelliklerine uygun olarak seçilmeleri gerekmektedir. Bu nedenle de delinebilirlik performans değerlendirmelerinde formasyonun özelliklerinin iyi bir şekilde analiz edilmesi oldukça önemlidir. Bu kapsamda, kayaç dokusu ve tane boyu, delinebilirliği etkileyen etkenlerden biridir. Tane boyları ince ve doku kompakt (yoğun) olduğu zaman delinebilirlik düşmektedir. İri tane boyuna ve daha gözenekli yapıya sahip kaya türlerinde ise delinebilirlik yüksektir. Çizelge 2.3'te doku ve tane boylarına göre delinme hızları verilmiştir.



Şekil 2.1 Delinebilirliği etkileyen etkenler (Thuro ve Spaun 1996'dan değiştirilerek).

Çizelge 2.3 Doku ve tane boyu ile ilerleme hızı arasındaki ilişki (Wilbur 1982).

İlerleme Hızı	Doku ve Tane Boyu
Hızlı	Poroz (Gözenekler çok belirgin)
Orta-Hızlı	Parçalı (Parçalar gevşek ya da yarı sağlam)
Orta	Granitoid (Tane boyları fark edilecek kadar büyük)
Orta-Yavaş	Porfiritik (İnce taneli granit içinde iri kristaller)
Yavaş	Yoğun (Tane yapısı çıplak gözle görülemeyecek kadar ince)

Sertlik, basit bir ifade ile kayaçın delinmeye karşı olan direnci olarak tanımlanabilir. Delici ucun kayaç içerisine batması sırasında karşılaştığı direnç kayaç sertliğinden kaynaklanmaktadır. Ancak, delici ucun kayaç içine batması sonrası delme işlemi nispeten daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, kayaç sertliği, delme performansı ve delici

uçtaki aşınma durumunun değerlendirilmesi açısından önemli bir etkidir. Kayaç sertliği; kayacı oluşturan minerallerin içeriği, dağılımı, homojenliği, ortalama tane boyu ve tane şekilleri ile ilişkilidir (Hoseinie vd. 2008).

Tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ) kayaçların en önemli mekanik özelliğidir. Tek eksenli basınç dayanımı birçok kayaç sınıflama sisteminde kullanılan en önemli özelliktir. Çünkü kayacı oluşturan malzemenin sağlamlığı, genel kaya kütlelerinin dayanımını artırmaktadır (Hoseinie vd. 2008).

Kaya kütlelerinin genel yapısı delme işleminin etkinliğinde önemli rol oynar. Kaya kütlelerinin yapısı ile kaya delinebilirliği arasında önemli bir ilişki vardır. Eklemlili kaya yapılarında delik delme, sağlam yapılara oranla çok daha zordur. Aşırı eklemlili, süreksizlik araları açık bölgelerde delik delme beraberinde birçok sorun getirir. Bu formasyonlarda delik delme işlemi sırasında delici ucun sıkışması delme hızının azalması ve delme performansının düşmesi açısından en önemli etkidir (Hoseinie vd. 2008).

Eklem sistemlerindeki en önemli karakteristik özellik, süreksizlikler arasındaki mesafedir. Kayacın delinebilirliği bu mesafeye bağlıdır. Bu mesafe azaldıkça, delme ortamının sürekliliği düşecek, bunun sonucunda delinebilirlik azalacaktır. Yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlarda 1 metre ve üzerindeki süreksizlikler arasındaki mesafelerde, delme işlemi daha etkili olmaktadır. 50 cm ve altındaki mesafelerde ise delinebilirlik çok düşüktür (Hoseinie vd. 2008).

Delinebilirliğe etki eden süreksizliklerle ilgili bir diğer özellik ise, süreksizliklerin açıklıkları ve bu açıklıkları dolduran dolgu malzemesinin varlığıdır. Arası kapalı çatlaklar veya eklemlerin olduğu durumların, delinebilirlik üzerine çok da olumsuz bir etkisi yoktur (Hoseinie vd. 2008).

Açık eklemlerin bulunması; delici uçların eksenden sapmasına, basınçlı hava veya suyun kaçmasına ve delici uçların kilitlemesine yol açmaktadır. Süreksizlikleri dolduran dolgu malzemesi ana kayacıdan daha yumuşaksa, delici uçlar bu süreksizliklerin açısında devam etmek isteyeceklerinden dolayı, delinebilirlik azalacaktır. Tam tersi durumda ise delinebilirlik çalışmaları bu durumdan etkilenmeyecektir. Yapılan araştırmalar, daha küçük yapıları dolgu malzemesinin olduğu süreksizliklerde delinebilirliğin olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür (Hoseinie vd. 2008). Bu gibi durumlarda, delik dibindeki ufalanmış kayacın dışarı çıkması zorlaşmaktadır ve delinebilirlik olumsuz olarak etkilenmektedir. Çizelge 2.4 ve 2.5'te kayaç formasyonuna bağlı olarak ilerleme hızındaki değişim gösterilmiştir

Eklemlerin eğimi de delinebilirliği etkileyen etkenlerdendir. Eklemler deliğin sapmasına ve bunun sonucunda delme performansının olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır. Dolgu malzemesi, eklem takımlarında eğime bağlı olarak delme işlemi sırasında ve sonrasında, delik içine dolabilir bu da delici ucun sıkışmasına neden olur. Yapılan araştırmalarda, delik yönü ile eklem yüzeyi arasındaki açı arttıkça delinebilirlik kolaylaşır (Hoseinie vd. 2008).

**Çizelge 2.4** Kaya formasyonu ile ilerleme hızı ilişkisi (Wilbur 1982).

<b>İlerleme Hızı</b>	<b>Formasyon</b>
Hızlı	Masif
Orta-Hızlı	Tabakalı
Orta	İnce tabakalı
Orta-Yavaş	Damarlı
Yavaş	Blok şekilli

**Çizelge 2.5** Kayaç kırılma şekline göre ilerleme hızı (Wilbur 1982).

<b>İlerleme Hızı</b>	<b>Kayaç Kırılma Şekli</b>
Hızlı	Kolayca ufalanan
Orta-Hızlı	Kırılgan
Orta	Tabakalı
Orta-Yavaş	Sağlam
Yavaş	Dövülebilir

## 2.2. DELİCİLER

Günümüz madencilik yaklaşımları; yeraltı ve yerüstünde yürütülen kazı çalışmaları, uygulanacak kazı yönteminin belirlenmesi ve kazı sonrası tahkimat sisteminin seçimi üzerinde yoğunlaşmıştır. Kazı aşamaları genel olarak delme – patlatma (klasik kazı) yöntemi ve mekanize kazı sistemlerinden yararlanılarak yapılmaktadır. Özellikle mekanize kazının mümkün olmadığı madencilik ve tünel açma çalışmalarında, delme – patlatma yöntemi ekonomik ve pratik olması bakımından öne çıkmaktadır. Yöntem uygulanış bakımından deliklerin delinmesi, patlayıcı ile doldurulması ve patlatılması aşamalarından oluşmaktadır. Kazı sonrasında uygulanacak tahkimat sistemleri içerisinde büyük önemi olan kaya saptamalarının yerleştirilmesi aşamasında da ilk olarak saptama deliklerinin oluşturulması gerekmektedir. Her iki uygulamada da yürütülen faaliyetler içerisinde delik delme işlemi önemli bir yer teşkil etmektedir. Günümüzde, yerüstü ve yeraltı madencilik çalışmalarında, kayaç yapılarının delinmesi amacıyla elektro – hidrolik delicilerden yararlanılmaktadır. Ayrıca, su, petrol ya da doğal gaz gibi doğal kaynakların belirlenmesi ve çıkarılması üzerine yürütülen

çalışmalarda, zemin etüdü, enjeksiyon, zemin sağlamlaştırma, drenaj, baraj, tünel vb.uygulama alanlarında da delik delme makinaları kaçınılmaz bir seçim olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda, literatürde kazı çalışmaları esnasında kayaçların delinebilirliği üzerine çok sayıda çalışma mevcut olup, delinebilirlik ile ilgili çalışmalar sürekli gelişerek devam etmektedir.

Teknolojideki gelişmelerin paralelinde delik delme sistemleri de oldukça gelişme göstermiş ve böylece farklı kayaç koşulları için değişik tipte delme teknikleri geliştirilmiştir. Bugün, kullanılmakta olan delme teknikleri:

- Rötari (Dönerek) delik delme,
- Darbeli delik delme,
  - Üstten darbeli delik delme
  - Delik dibi darbeli delik delme
- Rötari – darbeli delik delme'dir.

## **2.3. DELME TEKNİKLERİ**

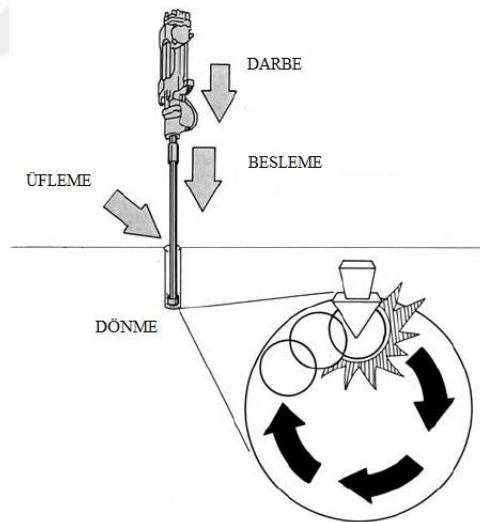
### **2.3.1. Döner (Rötari) Delik Delme**

Döner delik delme yöntemi; madencilik, inşaat, petrol ve doğal gaz çalışmalarında yaygın kullanılan delme yöntemidir (Bilgin ve Kahraman 2003, Franca 2011). Deliklerin delinmesi, kayaç yapılarının kesilerek yenilmesi esasına dayanmaktadır. Yöntem asıl olarak kesici uç üzerine belirli bir ağırlık yani baskının uygulanması ve dönme için yeteri dönüş değerinde tork uygulanması ile gerçekleşmektedir. Delme işleminin gerçekleşmesi için uygulanan baskı ve tork kuvvetlerinin kayaç dayanımını yenebilecek seviyede olması gerekmektedir. Döner delik delme yöntemi her türlü kayaç koşullarında uygulama alanına sahiptir. Ancak çok dayanıklı kaya yapılarında kayaçtan koparılan parça boyutu küçük olup, düşük ilerleme hızlarında çalışmaktadırlar (Tamrock 1999). Döner (rötari) delik delme yöntemi bir ya da birkaç kesme işleminin kombinasyonunu içeren üç boyutlu bir kesme operasyonudur. Bu kapsamda farklı araştırmacılar yöntemi; Miller ve Ball (1990), Rowlands (1973) göre delik oluşturma, Paone ve Bruce (1963) göre kesme ve parçalama, Chugh (1992) göre kazıma, girinti oluşturma ve kesme şeklinde tanımlanmaktadır (Bhatnagar vd. 2011).

### 2.3.2. Darbeli Delik Delme

Yöntem kaya yapılarının dayanımının dinamik darbe enerjisi ile yenilmesi esasına dayanmaktadır. Bu delme yönteminde kayaç yüzeyine gönderilen dinamik darbe enerjisi ile kayaçtan parçacıklar koparılmaktadır. Darbeli delik delme uygulamasının performansı büyük ölçüde darbe gücü, besleme kuvveti, delici uç dönme hızı ve üflemeyle bağlıdır. Kayaçtan koparılan parçaların boyutu kayacın mekanik özelliklerinin yanında delici ucun özellikleriyle de yakından ilgilidir. Darbeli delmede delme gücü hidrolik veya pnömatik olarak sağlanmaktadır. Darbeli delik delme yöntemi üstten ve delik dibi delme olmak üzere iki türlü yapılmaktadır (Yaralı 2017).

Üstten darbeli delik delme: Üstten darbeli delik delme yönteminde makinenin üzerinde bulunan tabanca tarafından üretilen darbe enerjisi tijler sayesinde delik dibindeki matkaba iletilmekte ve böylece kayaçtan parçaların koparılması sağlanmaktadır (Şekil 2.2). Darbe ve dönüş enerjisi dayanıklı delici takım aracılığı ile delik içindeki delici uca ve kaya yapısına iletilmektedir. Delici tabanca delik dışında bulunduğu için piston boyutlarında herhangi bir sınırlama söz konusu değildir. Bu sayede yüksek enerjili delici tabancalar yapılabilmektedir.



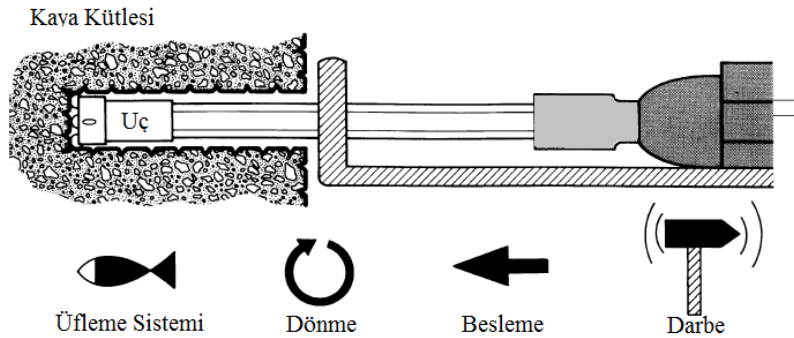
Şekil 2.2 Üstten darbeli delici (Tamrock 1999).

Delik dibi darbeli delik delme: Deliklerin delinmesi için darbe enerjisini veren tabanca delik dibinde yer almakta ve delme tiji ile delici uç arasında bulunmaktadır. Uygulamada gereken dönüş ve baskı ise delik dışında, delici makinadan sağlanmaktadır. Delici tabancanın delik dibinde olması sebebiyle piston boyutlarında sınırlama bulunmaktadır. Delme işlemi esnasında gereken darbe enerjisi doğrudan delik içerisinde yer alan delici tabancadan karşılanmaktadır.

Sistemin enerji kaynağı basınçlı hava tarafından karşılandığı için günümüzde sadece basınçlı hava ile çalışanları kullanılmaktadır. Delici matkabın etkin çalışabilmesi için oldukça büyük kapasiteli kompresöre ihtiyaç duyulmaktadır. Delici matkabın deliğin içinde yer alması sayesinde sabit ilerleme oranları elde edilmekte ve enerji kaybı minimumda tutulabilmektedir. Ancak büyük bir kompresöre ihtiyaç duymaları nedeniyle hareket kabiliyetleri zayıf olup, düşük ilerleme oranlarında çalışmaktadırlar. En yaygın 89 – 165 mm çaplarında kullanılmakta ve çok özel durumlarda da 1100 mm'ye kadar olabilmektedir. Delik uzunluğu ise 60 m'yi geçebilmektedir (Tamrock 1999).

### 2.3.3. Döner Darbeli Yöntem

Döner darbeli delik delme, özellikle sert kayaların delme – patlatma yöntemiyle kazılması aşamalarında göstermiş olduğu yüksek performans ile tünel ve yeraltı madenciliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Thuro 1997). Yöntem döner delme ve darbeli delmenin bir kombinasyonundan oluşmakta olup her iki yöntem ayrı ayrı baz alındığında daha üst bir uygulama olarak kabul görmüştür (Thuro 1997). Yöntemin çalışma prensibi, döner başlıkların üzerindeki, delici uçların veya keskilerin yeteri hızdaki dönüş aracılığı ile kaya yüzeyine darbe vermelerinin sağlanmasıdır (Şekil 2.3). Hızlı dönüş ve baskı bir anlamda keskilere dinamik darbe verilmesini sağlamaktadır. Böylece, kaya yapısının parçalanması darbeye bağlı olarak oluşmakta ve yenilme daha çok öğütme şeklinde olmaktadır (Yaralı 2017).



Şekil 2.3 Döner darbeli delici ve makine parametleri (Thuro 1997).

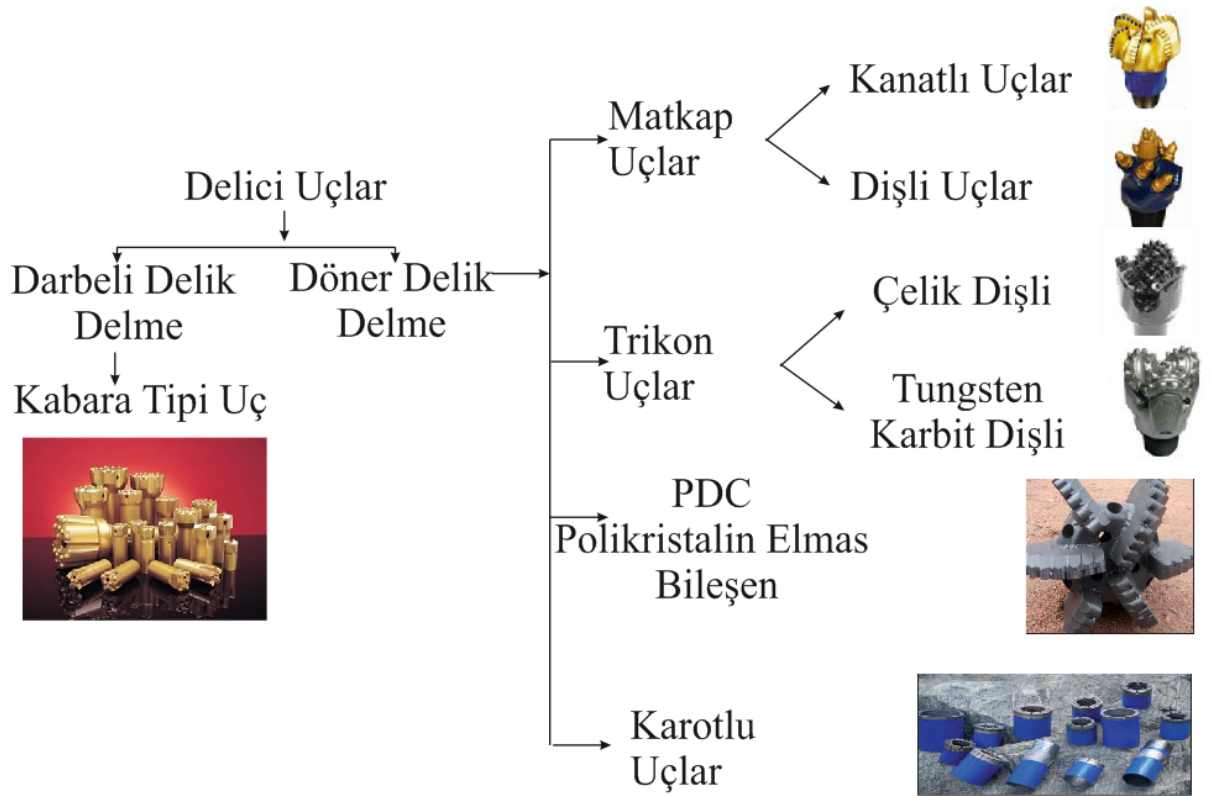
## 2.4. DELİCİ UÇLAR

Bir delme işleminde, zaman ve ekonomik giderlerin olumsuz etkilenmemesi için delme parametrelerinin mevcut saha koşulları ile uyumlu olarak belirlenmiş olmasının yanında delme



yöntemine uygun olarak delici ucun da doğru bir şekilde seçilmiş olması delme performansı üzerinde kilit rol oynamaktadır. Günümüzde kullanılan döner ve darbeli delik delme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan delici uç türleri Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Şekil 2.5 incelendiğinde; darbeli deliciler için kabara/düğmeli tip uçlar tercih edilirken, döner delicilerde matkap uçlar, trikon, PDC ve karot alınabilen matkap uç türleri patlatma deliklerinin açılmasında ya da derin sondaj çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



**Şekil 2.4** Döner ve darbeli delik delme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan delici uçlar (Boryczko 2012, Junhyeok 2016, HP 2017).

Matkap delici uçlar, kanatlı ve dişli olmak üzere iki gruba ayrılır. Kanatlı uçlar; dökme çelik üzerine tungsten karbitten perçinlenmiş iki, üç ve dört değiştirilebilir keski bıçağının birleşmesinden oluşmaktadır. Dişli uçlar ise seçilen delici ucun çapına bağlı olarak 5 veya daha fazla değiştirilebilir işlenmiş çelik kesme dişinden oluşmaktadır. Bu uçlar, tek eksenli basınç dayanımı 35 – 70 MPa arasında değişen formasyonlarda, kanatlı uçlara göre yüksek ilerleme hızlarına ve delme performansına sahip olmaları nedeniyle yüksek torka ihtiyaç duymaktadır (Gokhale 2010).

Trikon uçlar, döner delicilerde en sık kullanılan delici uç türü olarak yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Çeşitli kayaç formasyonlarında kullanılmak üzere oldukça geniş bir diş tasarımı ve farklı rulman türlerinde tasarımılandırılabilir. Delici ucun tasarımında kayaç özellikleri ve delik çapı oldukça önemli olmaktadır. Trikon uç kullanan döner makinalar delici uç ve konilerdeki hızlı dönüş ile konilerdeki dişlerin kaya yüzeyinde yaptığı ilerlemede yüksek darbe verilmesi sağlanarak kayacın parçalanması sağlanmaktadır (Boryczko 2012). Hızlı dönüş ve baskı bir anlamda keskilere dinamik darbe verilmesini sağlamaktadır. İşte kaya yapısının parçalanmasını sağlayan etken darbeye bağlı bir anlamda öğütmedir (Yaralı 2017). Trikon uçlar koniler, rulmanlar ve delici ucun gövdesi olmak üzere üç ana unsurdan meydana gelmektedir. Trikon uçlar iki, üç ve dört konili olarak kullanılabilmeyle birlikte yaygın olarak üç konili uygulamalar bulunmaktadır. Her koni üzerindeki dişler belirli bir düzende ve diğer konilerdeki dişler ile uyumlu bir halde çalışacak şekilde sıralanmıştır. Trikon uçların, çelik dişlerden ya da tungsten karbid dişlerden oluşan olan iki türü bulunmaktadır. Tungsten karbit uçlar daha pahalı olmak ile birlikte orta ve sert formasyonlarda yapılan delme çalışmalarında kullanılmaktadır (Boryczko 2012).

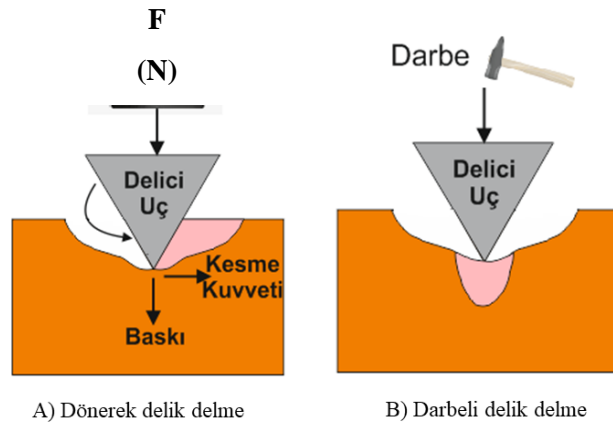
PDC uçlar delici uç tasarımında kilometre taşını temsil etmekte olup, endüstrinin ihtiyaçlarına göre geliştirilmiş çok ince tabakadan yapılmış kompakt polikristalin elmadan oluşmaktadır. Elmas, delici uç üzerinde hazırlanmış boşluklara presle takılan tungsten karbid uçlar ile uyumludur. PDC uçlarda, trikon uçların aksine rulmanlar ve koniler gibi hareketli parçalar kullanılmamaktadır. PDC uçlar ile yapılan delme işleminde, kayaç içerisinde ilerleme kesmeye bağlı olarak gerçekleşmekte ve böylece delme için gerekli baskı yükü ve enerji miktarı azalmaktadır. Bu sayede, delici ucun ömrü daha uzun olmaktadır (Boryczko 2012).

Karot alıcı uçlar, sığ saha sondajı ile yüzeysel ve orta derinliklerde yeraltından yukarıya doğru formasyondan örnek alınması amacıyla yapılan klasik karotlu sondaj uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu uçlar operasyonel basitlikleri ve ucuz araçlar olmaları nedeniyle oldukça verimlidir. Yumuşak ve çok sert formasyonlarda elmas emprenyeli uçlar, yumuşak ve orta sertlikteki formasyonlarda elmas uçlar, yumuşak kaya formasyonları ve örtü tabakasının delinmesi amacıyla tungsten karbit uçlar kullanılmaktadır (Epiroc 2017). Bu tez çalışması kapsamında emprenyeli elmas uçlardan oluşan karot uçlar (karotiyerler) kullanılarak delik delme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Sabit uçlar, emprenye elmaslı ve elmas uçlar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Emprenye uçlar, sentetik elmasların içine yerleştirildiği tungsten karbit matriksten oluşmaktadır. Elmas uçlar, doğada Mohs skalasında en sağlam ve en sert malzeme olarak gösterilen elmasların endüstriyel olarak işlenmesi ile üretilmektedir. Basınca karşı dayanımları yüksek olup, zorlu delik delme çalışmalarına karşı dayanıklıdırlar. Elmaslar, aşınmaya karşı yüksek hassasiyet ile karakterize edilirler ancak çekme dayanımlarının düşük olması nedeniyle darbelere karşı dayanıksızdırlar. Elmas uçlar; elmaslar, matriks ve uç olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır. Uçların tasarımı; matriksin şekline, deliğin çapına ve üzerindeki suyollarının düzenine ve sayısına göre çeşitli biçimlerde yapılabilmektedir. Yumuşak formasyonlarda düşük yüklerde büyük elmaslar ile yüksek ilerlemeler sağlanırken, sağlam formasyonlarda küçük elmaslar ile delik arınında yüksek temas sağlanarak düşük ilerleme hızları elde edilmektedir (Boryczko 2012).

## 2.5. DELİK DELMEDE KAYAÇ YENİLME MEKANİZMASI

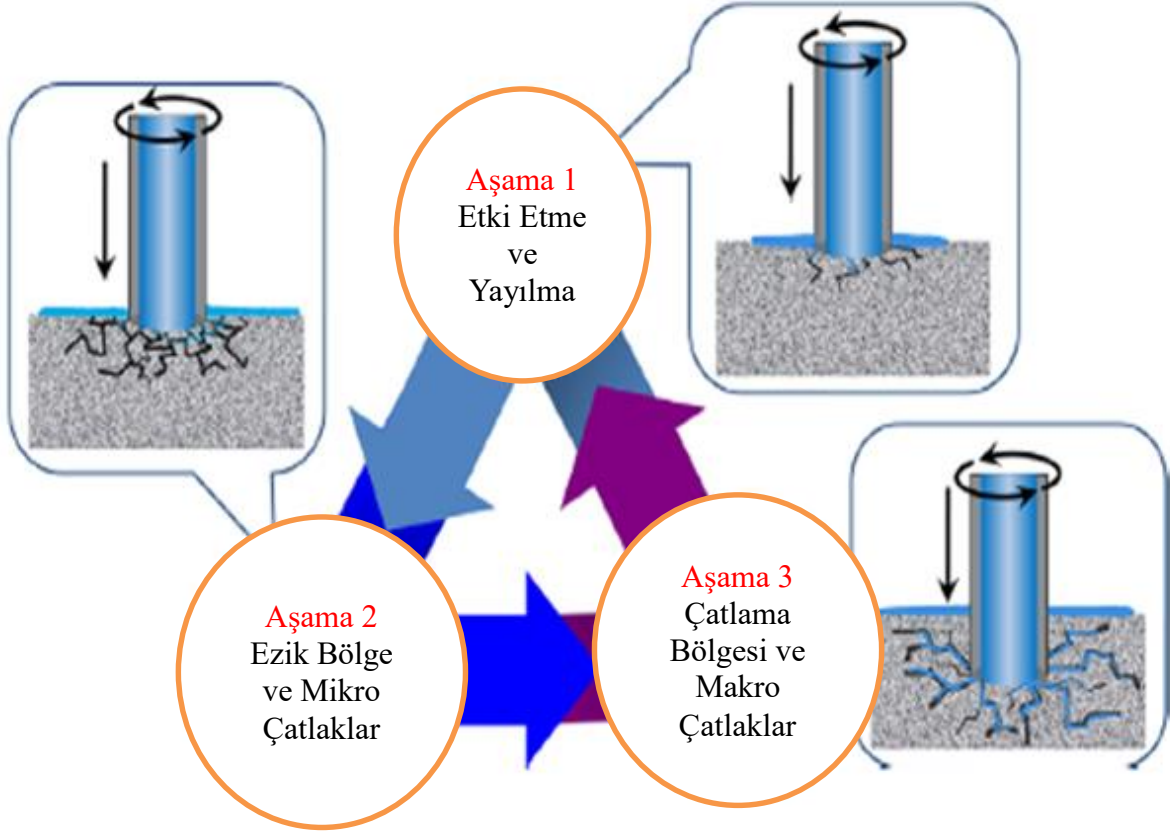
Döner delicilerde kayacın yenilmesi dönme torqu ve aksnel yük yani delici uç üzerindeki baskıya bağılı gerçekleşmektedir. Delici uç üzerindeki baskı, ucun kayac içinde ilerlemesini sağlarken dönme torqu da kesme bölgesi yaratarak delik arının üst yüzeylerinden kayac parçalarının ayrılmasını sağlamaktadır (Junhyeok 2016). Darbeli delicilerde kayacın yenilmesi ise delici uca darbe verilmesi esasına dayanmaktadır. Döner ve darbeli delicilerde gerçekleşen yenilme mekanizmaları Şekil 2.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.5 Delik delmede yenilme mekanizması (Han vd. 2005'ten değiştirilerek).

Delmeye bağılı gerçekleştirilen kayac kazısı sırasında, ilerleyen çatlaklar kayacın yenilmesine neden olmaktadır. Delici uç ile temas eden yüzey hattından başlamak üzere kayacın bünyesinde oluşan bu çatlaklar üç türde ilerlemektedir (Şekil 2.6);

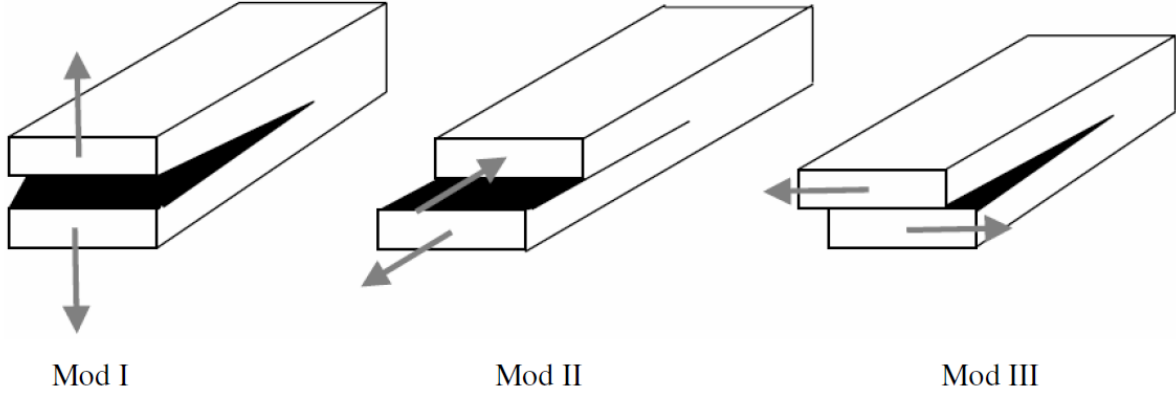
- Aşama 1: Elastik deformasyon ve delici ucun etki ederek yüzey çatlaklarının oluşumu
- Aşama 2: Delici ucun altında ezik/parçalanma bölgesinin genişlemesi ve kayaç bünyesinde mikro çatlakların oluşumu
- Aşama 3: Dönme torkunun etkisiyle yatay kuvvetlerin oluşumu, çatlama bölgesi ve kayaç bünyesinde makro çatlamlar (Li vd. 2015, Junhyeok 2016).



Şekil 2.6 Delme işlemi üç aşamalı gösterimi (Li vd. 2005).

Kazı esnasında, delici ucun hareketine bağlı olarak kayaç yüzeyinde oluşan çatlak mekanizması, ucun kayaç üzerindeki pozisyonuna göre değişiklik göstermekte ve 3 ayrı türde incelenmektedir (Şekil 2.7). Bunlar;

- Mod I; açılma (ya da çekme) modu olarak tanımlanır ve çatlak ucu normal gerilmelere maruz kalmakta ve yüzeyleri birbirine ters yönde hareket ederler.
- Mod II; kayma (makaslama) modu olup ve yüzeyler ters yönde yanlara doğru birbirini üzerinde kayarak hareket ederler.
- Mod III; yırtılma modu olarak tanımlanmıştır. Çatlak düzlem dışı bir kayma gerilmesine maruz kalır. Yüzeyler çatlak ucu çizgisine paralel olarak hareket ederler (Whittaker vd. 1992, Su 2010).

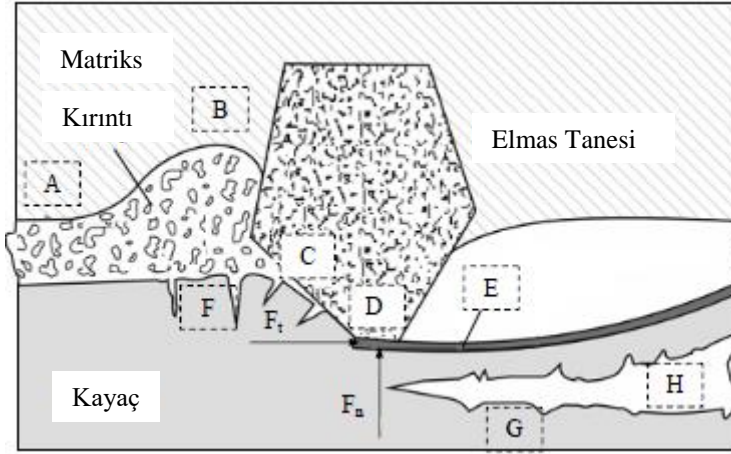


**Şekil 2.7** Çatlak ilerleme modları (Park 2006, Su 2010).

Delici ucun kayaç yüzündeki hareketi sırasında gerilme dağılımlarına etkisiyle oluşan çatlak ilerleme modları, tek tek veya iki tanesinin birleşimiyle karışık modu oluştururlar. Genellikle çatlak mekaniğinde en çok karşılaşılan ve uygulama açısından en kolay çatlak modu Mod I.'dir. Bu nedenle çatlak mekaniğinde pek çok çalışma Mod I üzerinde yoğunlaşmıştır (Whittaker vd. 1992, Park 2006, Su 2010).

Delme işlemi sırasında delici uç ile kayacın yenilme mekanizması; kesme, parçalanma ve öğütme şeklinde gerçekleşmektedir. Delici uçlar göz önüne alındığında, trikon uçlarda bu durum parçalanma şeklinde gerçekleşirken, sabit ve PDC uçlarda bu durum kesme mekanizması ile gerçekleşmektedir (Akisanmi 2016). Delme esnasında oluşan öğütme, delici uç üzerinde yer alan çok sayıda elmas tanesinin, kayacı küçük parçalara ayırması işlemi olarak tanımlanabilmektedir. Elmas tanelerinin, kayaç yüzeyinden koparmış olduğu parçacıklar, malzemenin öğütülmesine yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, delme işlemleri sırasında kayaçta oluşan yenilme mekanizmasının özünde öğütme işlemi yer almaktadır. Delme sırasında oluşan öğütme mekanizması elmas kesme uygulamaları sırasında oluşan öğütme mekanizması ile benzerlik göstermektedir. Bu nedenle, elmas kesme işlemi sırasında oluşan yenilme mekanizmalarına değinmek gerekmektedir. Ek olarak, elmas kesme uygulamaları, keskinlerin kullanımı ve dizilimi göz önünde bulundurulduğunda kesme teorileri ile de benzerlik göstermektedir. Ancak, elmas kesme uygulamalarında keskinlerin yerini elmas tanecikleri almakta ve kayaç kesme işlemi yapılmaktadır (Özçelik 1999).

Elmas taneciklerinin kullanıldığı delme ve kesme çalışmalarında, elmas ile kayaç arasında oluşan mekanik ilişkiye bağlı olarak gerçekleşen kesme mekanizması Şekil 2.8'de sunulmuştur.



**Şekil 2.8** Elmas taneciği ile kayaç arasındaki mekanik ilişkiye bağlı gerçekleşen kesme mekanizması (Töshöff vd. 2002, Aydın 2012).

Şekil 2.8 incelendiğinde;

Ft: Teğetsel kuvvet

Fn: Normal kuvvet

A: Matriks ve kırıntı arasındaki sürtünme

B: Oluşan kırıntı ile matriks erozyonu

C: İlk kırıntı bölgesi

D: Kayaç ile elmas tanesi arasındaki sürtünme bölgesi

E: Plastik deformasyon

F: Elastik deformasyon

G: İkinci kırıntı bölgesini belirtmektedir.

Chen ve Rowe (1996) kesme işlemi sırasında, elmas tanesi ile kayaç arasında oluşan kinematik ilişkiyi incelemişler ve kesme aşamalarını belirtmişlerdir. Yapılan çalışma incelendiğinde, kayaç ile elmas taneleri arasında oluşan kesme aşamaları; sürtünme, çentik oluşumu ve kesme şeklinde tanımlanmıştır. Sürtünme aşaması, elastik deformasyon ve elmas tanelerinin etki ederek kayaç yüzeyinde kesme işlemi yapmadan kayması olarak ifade edilmektedir. Çentik açma aşaması ise, elmas tanesi ile kayaç yüzeyi arasındaki kuvvetlerin artışına bağlı olarak gelişen plastik deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Son olarak kesme aşaması, uygulanan kuvvetlerin etkisiyle çalışılan kayaç yüzeyinden parça koparılması (kırıntı oluşumu) şeklinde ifade edilmektedir. Kesme ya da delme sırasında ortaya çıkan kırıntılar, soğutucu su tarafından dışarı atılmaktadır.

## 2.6. DELİNEBİLİRLİK İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Tamrock (1987) kayaçların delinebilirliğini, bir delici ucun kayaç içinde ilerleme hızı şeklinde tanımlamıştır. Delinebilirlik ile ilgili olarak bir başka tanım ise, uygulanan delme yöntemine bağlı olarak, ilerleme sırasında kayacın gösterdiği dirençtir ya da verdiği karşılıktır (Kramadibrata vd. 2001, Adebayo vd. 2010). Genel olarak bakıldığında delinebilirlik, delici ucun kayaç dayanımı yenmesi ile sağlanan ilerleme olarak da tanımlanabilmektedir. Delinebilirlik ile ilgili olan çalışmalar teknolojideki gelişmelerinde etkisiyle yeraltı ve yerüstünde yürütülen madencilik çalışmalarında büyük önem teşkil etmektedir. Teknik olarak bakıldığında daha öncede belirtildiği gibi döner ve darbeli olmak üzere iki tür delme mekanizması söz konusudur. Yeraltında kullanılan elektro – hidrolik deliciler ile yer üstünde kullanılan delicilerde iki tip delme mekanizmasından yararlanarak işlemler gerçekleştirilmektedir.

Yeraltı ve yerüstünde mevcut kayaçlarda yapılacak ilerleme çalışmalarında kullanılan delicilerin delme hızı ve makine performansının belirlenmesi, projenin planlanması ve maliyeti açısından oldukça önemlidir. Delicilerin performans değerlendirmelerinde en önemli iki parametre; ilerleme hızı ve spesifik enerjidir. İlerleme oranı; delinen deliğin uzunluğunun (m), net delme süresine oranı ile belirlenmektedir (Kim vd. 2009). Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) tarafından doğrudan önerilen bir kazılabilirlik tayin yöntemi olmamak ile birlikte birkaç yöntemin kullanılması önerilmektedir. Delinebilirlik üzerine yapılan çalışmalar için günümüzde pek çok yöntem geliştirilmiş olmakla birlikte, en iyi yöntem doğrudan delinebilirlik testlerinin yapılmasıdır (Andrews vd. 2007, Zhang vd. 2012). Delinebilirlik tayini için önerilen yöntemlerin; uygulaması kolay, ekonomik ve her kayaç türü için doğru sonuçları verecek özelliklere sahip olması gerekmektedir. Ayrıca, delinebilirlik tayini için önerilen yöntemlerin standart uygulanabilir olması gerekmektedir (Baş 1993).

Protodyakanov (1962) makine performansının belirlenmesinde en önemli etkenlerden biri olan spesifik enerjinin, döner deliciler için baskı yükü ve darbeli delicilerde ise darbe enerjisi ile değiştiğini belirtmiştir. Baskı yükü ve darbe enerjisindeki artışa bağlı olarak spesifik enerji değerlerinin düştüğünü ortaya koymuştur.

Fish (1968) döner delicilerde yapmış olduğu çalışmalarda ilerleme/delme oranının, kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ile doğru orantılı, darbe ile ise ters orantı olduğunu ortaya

koymuştur. Singh (1969) ise delme oranının tek eksenli basınç dayanımından doğrudan etkilenmediğini vurgulamıştır.

Salmer – Olsen ve Blindheim (1970) arazide darbeli deliciler ile deneyler yapmış ve delme oranı indeksi (DRI) ile ilerleme hızı arasında iyi bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca delme işleminde kayaçların sertlik, aşındırıcılık, dayanım ve kırılabilirlik özelliklerinin önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Selim ve Bruce (1970) laboratuvar şartlarında dokuz kayaç üzerinde darbeli delme deneyleri yürütmüşlerdir. Yapmış oldukları çalışma kapsamında, ilerleme oranları ile kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, statik ve dinamik Young modülü, Shore sertliği, kesme dayanımı, yoğunluk, kayaç dayanım katsayısı ve kuvars içeriği gibi özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir.

Schmidt (1972) ilerleme hızı ile kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, Shore sertliği, yoğunluk, statik ve dinamik elastisite modülü, kayma modül ve Poisson oranı arasında ilişki incelemiş ve sadece tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve Young modülleri arasında anlamlı bir ilişki bulmuştur.

Pathinkar ve Misra (1980) laboratuvarında beş kayaç üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda; kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, spesifik enerjisi, Shore sertliği, Mohs sertliği ile ilerleme hızı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Kayaçların özellikleri ile ilerleme hızı arasında anlamlı ancak karmaşık ilişkiler kurmuşlardır.

Adamson (1984) altı kayaç için döner deliciler kullanarak çalışmış ve ilerleme hızı ile kayaçların dokusal özellikleri arasında yakın ilişkiler olduğu belirtmiştir.

Howarth vd. (1986) ilerleme hızı ile kayaçların yoğunluk, tek eksenli basınç dayanımı, gözeneklilik, P dalgası hızı ve Schmidt çekici değerleri arasında güçlü ilişkiler bulmuşlardır. Ancak bu çalışmalarda, kayaçların kuru tek eksenli basınç dayanımı ve Schmidt çekici değerleri arasındaki ilişkinin çok güçlü olmadığını da vurgulamışlardır. Ayrıca, gözenekliliğin kayaçların delinebilirliğini olumlu bir şekilde etkilemekte olduğunu ortaya koymuşlardır.



Howarth ve Rowland (1987) darbeli deliciler için yaptıkları çalışmalarda, kayaçların dokusal özellikleri ile delme oranı arasında yakın ilişkiler belirlemişlerdir. Yüksek doku katsayısına sahip olan kayaçların delinebilirliği düşük ancak tek eksenli basınç dayanımları yüksektir.

Karpuz vd. (1990) Türkiye’de on altı kömür madeninde yaptıkları çalışmalarda delme oranının belirlenmesi için eğrisel bir regresyon modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, tek eksenli basınç dayanımı kayaçların en önemli mekanik özelliği olduğu vurgulanmıştır.

Thuro ve Spaun (1996), 15 ve 20 kW’lık iki delici kullanarak tünel arınındaki delme oranını ölçmüşlerdir. Spesifik enerji ile ilerleme hızı arasındaki ilişkiyi incelemişler ve kayaçların basınç ve çekme dayanımları ile delme oranı arasında güçlü logaritmik ilişkiler bulmuşlardır.

Kahraman (1999) açık maden ocaklarında kullanılan döner delicilerin ilerleme hızı belirlenmesi için çoklu regresyon kullanarak yeni bir model geliştirmişlerdir. Çalışma kapsamında ilerleme hızlarının üzerinde basınç dayanımının, delici uç çapının, dönme hızının ve delici uç üzerindeki baskının oldukça önemli olduğunu belirlemiştir.

Kahraman vd. (2000) yaptıkları çalışma kapsamında kayaçların delinebilirlik indeksinin tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, Schmidt çekici sertliği, nokta yükü indeksi, P dalga hızı, elastisite modulu ve kayaç yoğunluğu ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Kahraman (2002) kayaç kazılarında ve delme işlemlerin oldukça etkili bir özellik olan kayaçların kırılgenliği ile darbeli ve döner delicilerin ilerleme hızı arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak incelemiştir. Kayaçların kırılgenliğinin belirlenmesinde ise tek eksenli basınç ve çekme dayanımlarının kullanıldığı kırılgenlik ölçütlerinden yararlanmıştır.

Rao vd. (2002) laboratuvarında döner delik delme makinasından yararlanarak çeşitli kayaç türleri üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda makine parametrelerinin ve kayaç özelliklerinin delme performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca delme sırasında, sisteme gönderilen suya polietilen oksid ekleyerek kayaç yüzeyinde etkisini incelemişlerdir. Ek olarak polietilen oksid ilaveli suda dağılma deneyleri gerçekleştirerek, karışımly suyun ile kayacın etkileşimini incelemişlerdir. Yapılan delme çalışmalarında baskı ve dönme hızının değişimini incelemişler ve ilerlemenin esas olarak delici uç üzerindeki baskıya bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Aynı zamanda polietilen ilaveli su ile yapmış oldukları delme çalışmalarında ilerleme hızı artmış ve

dönme torkunun azaldığını gözlemlemişlerdir. Torkun düşük olması bir açıdan da spesifik delme enerjisinin azalması ve delici uçtaki aşınmanın daha düşük olması anlamı taşımaması açısından önemli olmaktadır.

Bilgin ve Kahraman (2003) sekiz açık maden işletmesinde 14 farklı kayaç türü üzerinde döner darbeli delicilerin performansını ve kayaç özellikleri ile ilerleme oranları arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Tek eksenli basınç dayanımı, Schmidt sertliği değeri, Cerchar aşınma değeri ve darbe dayanımı ile ilerleme hızı arasında güçlü ilişkiler belirlemişlerdir.

Kahraman vd. (2003) açık ocaklardan ve arazi çalışmaları sırasında 8 adet kaya örnekleri üzerinde uygulanan fiziksel ve mekanik deneyler sonucunda ilerleme hızı ile, tek eksenli basınç dayanımı, Brezilyan çekme dayanımı, nokta yükü dayanımı ve Schmidt sertliği değeri arasında güçlü korelasyon ilişkileri elde etmişlerdir. Darbe dayanımı indeksi ile ilerleme hızı arasında orta derecede bir ilişki elde ederken P dalgası hızı ile ilerleme hızı arasında anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir.

Altındağ (2000, 2002, 2003) kayaçların basınç ve çekme dayanımlarını kullanarak yeni bir kırılgenlik indeks modeli geliştirmiştir. Ayrıca yapmış olduğu çalışmalarda kırılgenlik ile delme oranı indeksi arasındaki ilişkinin önemini vurgulamıştır.

El Biblawi vd. (2007), 5 farklı kayaç türü üzerinde farklı baskı ve dönme hızlarında gerçekleştirmiş oldukları laboratuvar deneyleri ile spesifik delme enerjisini ve ilerleme hızlarını hesaplamışlardır. Tanımlamış oldukları  $\sigma_c/SE$  ölçsüz indeksi ile ilerleme hızı arasındaki ilişki çizmiş oldukları grafikler ile incelemişlerdir. Bu kapsamda, tüm baskı kuvvetleri ve dönme hızlarından elde edilen değerler birlikte incelendiğinde, kayaç türleri arasında herhangi bir gruplaşma oluşmamıştır. Ancak yüksek bası kuvveti - düşük dönme hızı ya da tam tersi koşullarda edinilen veriler incelendiğinde kayaç türlerinin ilerleme hızı değerlerine göre farklı gruplara ayrıldığı belirlenmiştir.

Hoseinie vd. (2009) kaya kütlelerinin delinebilirliğinin tanımlanması için yeni bir delinebilirlik/ indeksi (RPI) geliştirmişlerdir. Bu amaçla; kayaçların Mohs sertliği, tane boyu ve dokusu, tek eksenli basınç dayanımı, süreksizliklerin aralığı, dolgusu ve süreksizliğin eğiminden yararlanmışlardır.

Yaşar vd. (2010) laboratuvarında hazırlamış oldukları çimento harcı üzerinde farklı delme koşullarında delinebilirlik deneyleri yapmışlardır. Bu kapsamda yürütülen çalışmalarda, delme koşulları ile çimento harcının fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir.

Yaralı ve Kahraman (2011) laboratuvarında 32 kayaç türü üzerinde yaptıkları çalışmalarda, farklı kırılma güçleri ile delme oranı indeksi (DRI) arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Kayaçların basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerlerini kullanarak kırılma güçlerini belirlemişlerdir. Sonuç olarak kırılma güçlerinden basınç dayanımı ile çekme dayanımının çarpımının yarısı olan ölçütün kayaç delinebilirliğinin belirlenmesinde daha anlamlı olacağını belirtmişlerdir.

Kelessidis (2011), delinebilirlik performans değerlendirmelerinde kayaçların tek eksenli basınç dayanımının önemi vurgulamıştır. Yaptığı çalışmada, kayaçların tek eksenli basınç dayanımının ölçülemediği durumlarda sonik dalga hızı/p dalga hızına bağlı olarak tahmin edilebileceğini belirtmiştir.

Dahl (2003), Dahl vd. (2012) ve Zare ve Bruland (2013) SINTEF (Norwegian University of Science and Technology) delme oranı indeksi, kırılma testi, Siever's minyatür delme testi ve uç aşınma indeksi ile ilgili olarak yeni bir deney yöntemi geliştirmişlerdir. Farklı kayaç türlerinden 2000'den fazla örnek üzerinde yapılan çalışmalarda delinebilirliğin laboratuvar koşullarında belirlenmesi amacıyla yeni bir deney yöntemini ortaya koymuşlardır.

Su vd. (2013) elektro - hidrolik delicilerde kullanılan burğu ve buton tipi uçların performans analizlerini yapmışlardır. Laboratuvarında ve arazide koşullarında yapmış oldukları çalışmalarda buton tipi uçların kullanımını ile daha düşük spesifik enerji ve daha fazla ilerleme hızları elde etmişlerdir.

Moein vd. (2014) laboratuvarında oluşturdukları delme ekipmanı ile 6 farklı karbonat kayacı üzerinde delme deneyleri yapmışlardır. Kayaçların sertliği, delinebilirliği ve ilerleme hızı arasında anlamlı ilişkiyi incelemişlerdir. İlerleme hızı ve delme oranı indeksi için en anlamlı sonucu spesifik enerjinin verdiğini belirtmişlerdir.

Su (2016), kömür çevre kayaçları üzerinde yapmış olduğu çalışmalarda delicilerin performansını incelemiştir. Zonguldak bölgesinde kullanılmakta olan elektro - hidrolik v

deliciler üzerinde yürüttüğü çalışmalarda spesifik enerji, ilerleme hızı ve uçlardaki aşınma üzerinde çalışmalar yapmıştır.

Shaabani vd. (2016) laboratuvarında karbonat kökenli kayaçlar üzerinde delinebilirlik çalışmaları yürütmüşler ve makine parametreleri (baskı ve dönme hızı) ile kayaç özelliklerinin ilerleme hızı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kayaç özelliklerini göz önüne alındığında, deneyi yapılan kayaçlar için delme oranı indeksinin (DRI) kayaçların tek eksenli basınç dayanımından daha anlamlı olduğunu belirtmişlerdir.

## **2.7. DELİNEBİLİRLİĞİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN DENEYLER**

Delinebilirliğin güvenilir olarak saptanması ancak çeşitli deney yöntemlerinin birlikte uygulanması ile gerçekleşmektedir. Ancak bu yol genellikle pahalı olmaktadır. En güvenilir ve başarılı sonuçlar, laboratuvarında spesifik enerji ve aşındırıcılık deneyi gibi özel olarak tasarlanan ve delinebilirliğe etki eden çeşitli özellikleri birlikte irdeleyen deney yöntemleri vermektedir. Delici makinaların delme hızlarının, uç aşınmalarının ve uç seçiminin tespit edilmesinde iyi sonuçlar veren özel olarak tasarlanan, delinebilirliğe etki eden çeşitli özellikleri bir arada irdeleyen delinebilirlik indeksleri geliştirilmiştir. Kayaçların delinebilirliği; dayanım, kırılma, aşındırıcılık ve süreksizlik özelliklerinden etkilenir. Delinebilirlik tayininde bu özelliklerden bir kaçını bir arada değerlendirilirler. Delinebilirlik tayininde kullanılan bu özelliklere göre deneyler yapılmıştır (Yazıcı 1984, Baş 1993). Bu sınıflama aşağıdaki gibidir.

a - Dayanım özelliklerini irdeleyen deney yöntemleri

- Tek eksenli basınç dayanımı
- Tek eksenli çekme dayanımı
- Nokta yükü dayanımı

b - Kırılma özelliğini irdeleyen deney yöntemleri

- Shore Skleroskopu
- Plastik sertlik deneyi
- Aşındırıcılık özelliğini irdeleyen deney yöntemleri
- Kayacın mineral içeriği
- Kayaçların tane boyutu
- Kayaçların tane düzgünlüğü
- Çimentolanma derecesi

c - Dayanım ve kırılma özelliklerini irdeleyen deney yöntemleri

- Darbe dayanımı deneyi
- Konik delici deneyi
- Shore sertliği deneyi
- Sivri uç batırma deneyi

d - Dayanım, kırılma ve süreksizlik özelliklerini irdeleyen deney yöntemleri

- Schmidt çekici deneyi
- Kayaç kazılabilirlik deneyi
- Yerinde kayaç dayanım indeksi deneyi
- Darbeli delici deneyi

Delme hızlarının, keski aşınmalarının ve kazı makinalarında keski seçiminin belirlenmesinde iyi sonuçlar veren, delinebilirliğe etki eden çeşitli özellikleri bir arada irdeleyen özel olarak tasarlanmış delinebilirlik indeksleri geliştirilmiştir. Bunlar;

- Kayaç dayanım katsayısı indeksi (KDK) deneyi
- Delme oranı indeksi (DRI) deneyi
- Uç aşınma indeksi (BWI) deneyi
- Uç ömrü indeksi (CLI)

Kazı makinelerinin performans tahmini için geliştirilmiş modellerde delme oranı indeksi (DRI) kullanılmaktadır. Bu indeks Norveç Teknoloji Enstitüsü (Norwegian Institute of Technology) SINTEF’de 1960’lı yıllardan itibaren kayaçların delinebilirlik için yapılan laboratuvar ve arazi çalışmalarının derlenmesi sonucu geliştirilmiştir. Ancak 1988 yılında itibaren özellikle İskandinav ülkelerinde delinebilirlik konusunda standart bir deney haline gelmiştir. Bu indeks deneyi, kayaçların kırılma değeri (S<sub>20</sub>) ve Sievers minyatür delme (SJ) deneyin verilerine bağlıdır (Dahl 2003).

## **2.8. DELME ORANI İNDEKSİ (DRI)**

Delme oranı indeksi (DRI) 1943 yılında İsviçre’de N. Von Matern ve A. Hjelmer tarafından geliştirilmiştir. Bu deney yöntemi birkaç değişiklikten sonra standart hale gelmiş ve 1950’li yılların sonundan itibaren kayaçların delinebilirliklerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır. DRI iki temel laboratuvar deneyine bağlı olarak bulunmaktadır. Birincisi;

kırılmalık deneyi, S20 ve diğeri ise Sievers minyatür delme deneyi (Sievers miniature drill-test value), SJ'dir. Delme oranı indeksi kayac̄ yüzey sertliği için düzeltilmiş kırılmalık değerleri olarak da tanımlanabilir (Dahl 2003).

### **2.8.1. Kırılmalık Deneyi (S20)**

Kırılmalık deneyi, tekrarlanan darbe sonucu kayacın kırılmaya karşı gösterdiği direnci dolaylı olarak ölçen bir deney yöntemidir. Şekil 2.9'da kırılmalık değerleri deneyine ait temel Şekil verilmiştir. Çizelge 2.6'da kırılmalık deneyi (S20) sınıflaması verilmiştir.

Şekil 2.9'daki deney düzeneğinde de görüldüğü üzere, deney aletine beslenecek malzeme miktarını belirleyen ana unsur, boyutu değişen kaya malzemesinin yoğunluğudur. Deneyde kullanılacak kaya malzemelerinin yoğunluk hesabı için kütle/hacim prensibinden yararlanılarak; araziden alınan kaya bloklarından çıkartılan NX tipi karot numunelerinin tek tek hassas terazide tartılan kütleleri, bu numunelerin geometrik hacmine oranlanarak bulunur.

Kayac̄ örneği önce çeneli kırıcıdan geçirilerek malzeme kırılır. -16 mm/+11.2 mm elek aralığındaki malzemedan 2.65 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki malzeme için 500 gr 'a karşılık gelen örnek miktarı havan içine konulur. Ortalama 25 cm yükseklikten 14 kg ağırlığındaki çekiç havan içindeki malzemeye 20 defa düşürölür. 20 kez tekrarlanan darbeye kırılan havan içindeki malzeme 11.2 mm'lik elekten elenir. – 11.2 mm'lik malzeme miktarı deneyin başında havan içine konulan malzemeye ağırlıkça oranlanır. Yüzde olarak bulunan değer kayacın kırılmalık değerine eşittir. Bir kayacın kırılmalık deneyi, aynı koşularda 3-5 kez tekrar sonucu elde edilen değerlerin ortalaması olarak bulunur (Dahl 2003). ZBEÜ Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Uygulama Laboratuvarı'nda bulunan kırılmalık deney aleti Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Kırılmalık deney düzeneği (Dahl 2003).

Çizelge 2.6 Kırılmalık deneyi (S20) sınıflaması (Dahl 2003).

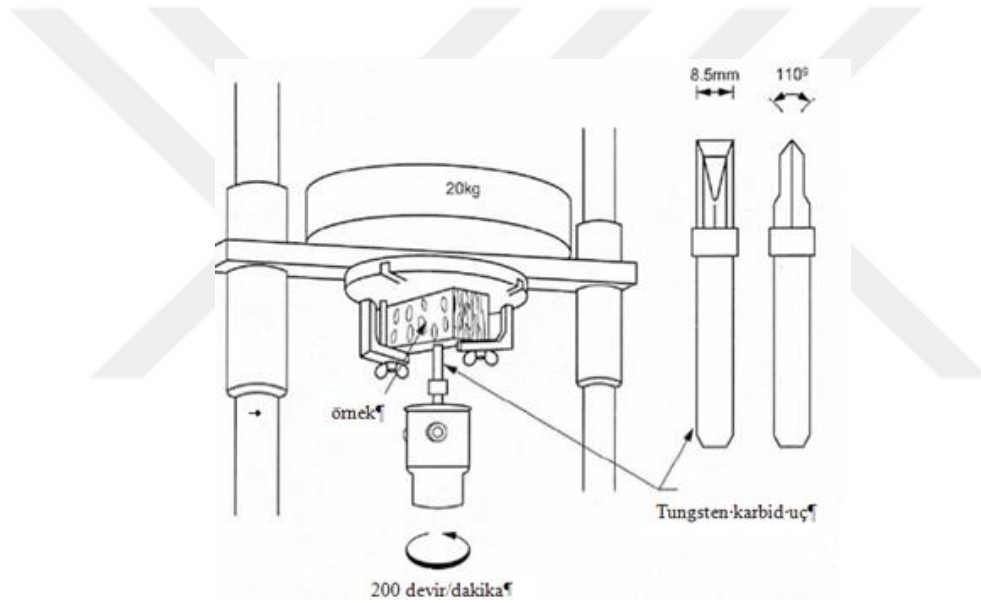
Sınıf	Kümülatif (%)	Değer
Oldukça düşük	0-5	<30
Çok düşük	5-15	31-34
Düşük	15-35	35-41
Orta	35-65	42-50
Yüksek	65-85	51-59
Çok yüksek	85-95	52-67
Oldukça yüksek	95-100	>67



Şekil 2.10 Kırılmalık deney aleti (ZBEÜ).

### 2.8.2. Sievers Minyatür Delme Deneyi (SJ)

Bu deney kayacın yüzey sertliğinin veya delmeye karşı direncin bir ölçüsünü verir. Bu deney yöntemi 1950'li yıllarda H. Sievers tarafından geliştirilmiştir. Şekil 2.11'de bu deney düzeneği gösterilmektedir. Sievers minyatür delme deneyi (SJ), minyatür delme ucunun 1 dakika boyunca 200 devirde döndükten sonra kayaç içinde açılan delik boyunun mm olarak ölçülmesidir. Önceden kesilerek hazırlanan kayaç örneğinin yüzeyi dikkatlice incelendikten sonra yumuşak ve sert tabaklaşma durumuna göre delinecek yerler işaretlenmelidir. %60'ı sert ve %40'ı yumuşak tabaklaşma gösteren bir kayaçta 3 delik sert kısma, 2 delik de yumuşak kısma delinmelidir. Yumuşak/sert kombinasyon gösteren kısımlardan kaçınılmalıdır (Dahl 2003).



Şekil 2.11 Sievers minyatür delme deneyi düzeneği (Dahl 2003).

Kayaç örneği 20 kg'lık ağırlık altına sıkılır ve matkabın ucu deyincede kadar dikkatli bir şekilde indirilir. Matkabın ucunun kayacın yüzeyine paralel olmasına dikkat edilmelidir. Matkabın dönme işine başlanır ve delme işi 200 devir tamamlanincaya kadar deney yapılır. Deney bittiği zaman ağırlık ve örnek yukarı kaldırılır. Örnek gevşetilerek sonraki işaretlenmiş delme yeri delinir. Bu işlem her örnek için 4 ile 8 kez tekrarlanmalıdır. Delik boyları bir elektronik mikrometre veya kumpas ile ölçülerek elde edilen değerlerin ortalaması hesaplanır. Bulunan bu değer örneğin Sievers minyatür delme değeridir (Dahl 2003). Çizelge 2.7'de Sievers minyatür delme (SJ) deneyinin sınıflaması verilmiştir. Şekil 2.12'de ise bu çalışmada ZBEÜ Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Uygulama Laboratuvarı'nda kullanılan deney aleti gösterilmiştir. Bu deneyde özel geometride bilenmiş tungsten karbit uç (Şekil 2.13 ve 2.14) kullanılmıştır.



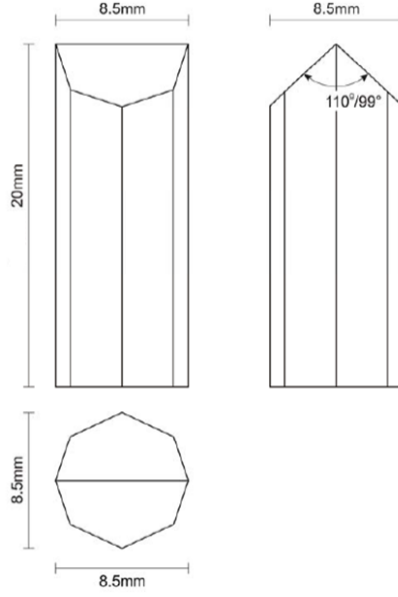
**Çizelge 2.7** Sievers minyatür delme ( $s_j$ ) deneyinin sınıflaması (Dahl 2003).

<b>Sınıf</b>	<b>Kümülatif (%)</b>	<b>Değer</b>
Oldukça düşük	0-5	<2
Çok düşük	5-15	2-3
Düşük	15-35	4-6
Orta	35-65	7-18
Yüksek	65-85	19-55
Çok yüksek	85-95	56-86
Oldukça yüksek	95-100	>86

Bu çalışmada NX çapında karot örnekler kullanılmıştır. Örnekler 25 – 30 mm kalınlığında ve alt ve üst yüzeyleri 0.02 mm' ye kadar düzgün olacak şekilde hazırlanmıştır. Her bir kayaç örneği 5 ile 7 kez delinmiştir. Delik uzunlukları bir elektronik kumpas ile ölçülmüştür.



**Şekil 2.12** Sievers minyatür delme (SJ) deney aletinin görünüşü (ZBEÜ).



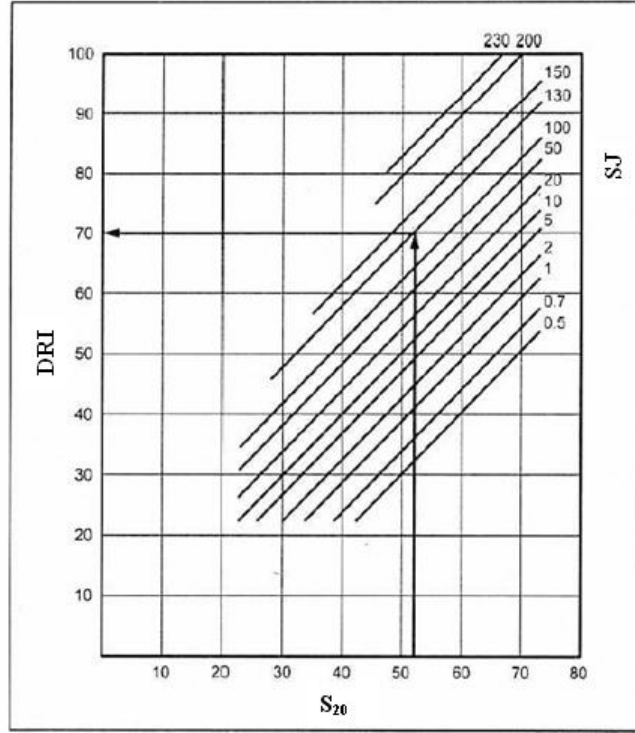
Şekil 2.13 SJ deneyinde kullanılan özel uçların geometrisi.



Şekil 2.14 SJ deneyinde kullanılan özel hazırlanmış uçlar.

### 2.8.3 Delme Oranı İndeksinin (DRI) Değerlendirilmesi

Delme oranı indeksi Şekil 2.15'te verilen diyagram kullanılarak bulunur. Diyagram üzerinde kırılma değeri (S20) deneyinden elde edilen değer ve Sievers minyatür delme (SJ) deneyinden elde edilen değerle karşılaştırılarak DRI değeri tespit edilir. Elde edilen DRI değerleri, Çizelge 2.8'de gösterilen sınıflama sistemine göre değerlendirilerek her bir kayaç türüne ait delme sınıfı türü belirlenmektedir. dayanımının kayaç kazılabilirliği/delinebilirliği için kullanılabilmesi açıkça görülmektedir (Tamrock 1999). Çizelge 2.9'da ise bazı kayaçların DRI değerleri verilmiştir.



Şekil 2.15 DRI'nin değerlendirilmesi için diyagram (Dahl 2003).

Çizelge 2.8 Delme oranı indeksi (DRI) deneyi sınıflaması (Dahl 2003).

Sınıf	DRI
Oldukça düşük	$\leq 25$
Çok düşük	26-32
Düşük	33-42
Orta	43-57
Yüksek	58-69
Çok yüksek	70-82
Oldukça yüksek	$\geq 83$



## BÖLÜM 3

### SPEŞİFİK ENERJİ

Mekanize kazıda spesifik enerji (SE), seçilen kazı yöntemine göre, kazı makinasının kayaç iç bağlarını yenerek parçalayabilmesi için ihtiyacı duyduğu enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır (Atıcı ve Ersoy 2009). Teale (1965) SE'yi, kayaçtan belirli bir hacim koparmak için gereken enerji miktarı olarak tanımlamıştır. Pathinkar ve Misra (1980) ise SE'yi, kazı arınında yeni bir yüzey alanı oluşturmak için harcanan enerji miktarı olarak açıklamışlardır. Atıcı ve Ersoy (2009) SE'nin metre başı ilerleme maliyetleri ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

SE, her kayaç türü için kazı çeşidi ve keski türüne göre değiştiğinden fiziksel bir özellik olarak değerlendirilememektedir. Ancak farklı kökenlerdeki kayaçlar benzer şartlarda kazıldığında elde edilen SE değerleri kayaçların kazılabilirliğinin bir ölçütü olarak tanımlanabilir. Kazı şekli sabit tutulduğunda SE'nin sadece kayaç özelliklerinin bir fonksiyonu olacağı açıktır (Kel 2003). SE; kesme, delme, kazma, kırma ve öğütme gibi kaya çalışma işlemlerinin verimliliklerinin değerlendirmesinde kullanılmaktadır. SE mekanize kazı makinalarının kazı veriminin (üretim miktarı) tahmininde ve karşılaştırmasında ve optimum çalışma koşullarının belirlenmesinde kullanılan en önemli etkidir.

SE, kazılan parçanın ölçüm kriterlerine göre hacim esaslı ya da ağırlık esaslı olarak ifade edilebilmektedir. Buna göre;

Hacim esas alındığında  $SE = \text{kg m} / \text{m}^3, \text{MJ} / \text{m}^3$

Ağırlık esas alındığında  $SE = \text{kg m} / \text{m}, \text{MJ} / \text{kg}$

birimleri kullanılmaktadır (Kel 2003).

SE, kayaç kazılabilirliğinin tanımlanmasında kullanılan bir ifade olmak ile birlikte, makine performans değerlendirmelerinde de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Rostami vd. 1994, Tiryaki 2008).

### 3.1. SPESİFİK ENERJİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

SE'nin belirlenmesi amacıyla; büyük ve küçük ölçekli kazı setleri, görgül (ampirik) yaklaşımlar ve arazide gerçek bir makine kullanılarak yapılan çalışmalar olmak üzere pek çok yöntemden yararlanılmaktadır. Yapılan literatür çalışmasında yalnızca delik delme çalışmaları sırasında önerilen bağıntılar göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca tez çalışması kapsamında; incelenen kazı yöntemi göz önünde bulundurularak SE, spesifik delme enerjisi (SDE) olarak tanımlanmıştır. Bu bölümde SE'nin hesaplanmasına yönelik olarak literatürde pek çok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Teale (1965) deliciler üzerinde yürütmüş olduğu çalışmalar ile SDE'nin hesaplanmasına yönelik ilk ciddi çalışmaları yürütmüş ve Eşitlik 3.1'de ki bağıntıyı önermiştir.

$$SDE_T = \frac{F}{\frac{\pi * (D^2 - D_c^2)}{2}} + \frac{2\pi NT}{\frac{\pi * (D^2 - D_c^2)}{2} PR} \quad (3.1)$$

Burada;

F: baskı yükü (N),

D: delik çapı (m),

D<sub>c</sub>: ucun çapı (m),

N: devir/dönme hızı (dev/dk),

T: tork (Nm) ve

PR: ilerleme hızıdır (m/dk). Eşitlik 3.1'de önemli parametrelerden biri olan tork değeri verilen Eşitlik (3.2 ve 3.3) yardımı ile kolayca hesaplanabilmektedir.

$$T = \frac{\mu FD}{3} \quad (3.2)$$

Burada;

μ: sürtünme katsayısı,

F: delici uç üzerindeki baskı yükü (N) ve

D: ise delici ucun çapıdır (m). Ayrıca,

$$T = 0.0408 F + 1.01 \quad (3.3)$$

Burada;

T: torku (kNm) ve

F: delici üzerindeki baskıyı belirtmektedir (kN) (Bilgin vd. 2014).

Delicinin ilerleme hızının hesaplanması için önerilen bağıntı ise Eşitlik 3.4'te belirtilmiştir.

$$PR = \frac{\text{Delik Uzunluğu (m)}}{\text{Delme Süresi (h)}} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'te de görüldüğü üzere PR birim zamanda delinen delik uzunluğudur.

Mellor (1972) ve Hughes (1972), kayacın kesilmesi ya da koparılmasına yönelik çalışmalarda SDE değerleri ile kayacın tek eksenli basınç dayanımı arasında ilişki kurmuşlardır. Ancak bu çalışmalarda yalnızca kayacın yüklenmeye başladığı an ile yenilmesi arasındaki koşulları göz önünde bulundurmışlardır. SDE'nin birim deformasyon enerjisine göre önerilen bağıntı Eşitlik 3.5'te sunulmuştur.

$$SDE_{DW} = \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (3.5)$$

Burada;

$\sigma_c$ : tek eksenli basınç dayanımı (MPa) ve

E: elastisite modülüdür (GPa).

Miranda ve Mello - Mendes (1983), delme ekipmanı seçiminde temel laboratuvar deneyi olarak Vickers mikrosertliği ve SE elverişli bir öngörü metodu olarak belirtmiştir.

Mc – Feat Smith ve Fowell (1977, 1979) kömür çevre kayaçlarına ait shore sertliği ve konik delici sertliğini kullanarak, SE belirlenmesi için bir tahmin geliştirmişlerdir.

Fowell ve Pycroft (1980) kömür çevre kayaçlarının; tek eksenli basınç dayanımı, konik delici sertliği ve SE arasında anlamlı ilişkiler bulmuşlardır.

Rabia (1982, 1985) kayaçtan bir parça koparmak ya da yeni bir yüzey alanı oluşturmak için tanımlanan SDE'nin, kayacın başlıca bir özelliği olmayıp doğrudan delme işlemlerinden etkilediğini ortaya koymuştur. Rabia (1982, 1985) Eşitlik 3.6'da, döner deliciler için SDE'nin elde edildiği yeni bir bağıntı önermiştir.

$$SDE_R = 2.35 \frac{F * N}{(D - D_c) * PR} \quad (3.6)$$

Burada;

F: delici uç üzerindeki baskı (kg),

N: dönme hızı/devir (dev/dk),

D: delik çapı (mm),

D<sub>c</sub>: ucun çapı (mm) ve

PR: ilerleme hızı (m/h) olarak tanımlanmıştır.

Roxborough (1985) ve Fowell (1993) kayaç kesme işlemi sırasında SE'yi; kayacın özellikleri, kesici geometrisi, kesicilerin ilerlemesi ve kesiciler arasındaki boşluk ile doğrudan ilgili olduğunu ortaya koymuştur.

Fowell vd. (1991) farklı kayaç örneklerine ait kırılma tokluğu verileri ile SE değerleri arasında ilişki olduğunu belirlemişlerdir.

Pessier ve Fear (1992), Teale (1965) tarafından döner deliciler için SDE'nin hesaplanmasına yönelik geliştirilen model üzerinde çalışmalar yapmışlar ve yeni bir bağıntı önermişlerdir (Eşitlik 3.7 ve 3.8).

$$SDE = F \left( \frac{1}{A} + \frac{13.33 * \mu * N}{D * PR} \right) \quad (3.7)$$

$$\mu = 36 * \frac{T}{D * F} \quad (3.8)$$

Burada, boyutsuz bir parametre olarak delme düzeneğinin sürtünme katsayısı olarak tanımlanmıştır (Eşitlik 3.8)



Wang (1995), Huang ve Wang (1997) kayaç örnekleri üzerinde elmaslı karot matkapları ile delinebilirlik çalışmaları yürütmüşlerdir. Yürüttükleri çalışma kapsamında, laboratuvar koşullarında matkap tezgahını yeniden tasarımılandırarak uygun hale getirmişlerdir. Delik delme esnasında; ilerleme hızı, uygulanan tork, uç üzerindeki ağırlık ve dönme hızının etkisini incelemişlerdir. Delik delme işlemi sırasında harcanan enerjinin belirlenmesi için Eşitlik 3.9'dan yararlanmışlardır.

$$SDE = \frac{8 * T * N}{(D^2 - D_c^2) * PR} \quad (3.9)$$

Burada;

T: tork (Nm),

N: dönme hızı/devir (dev/dk),

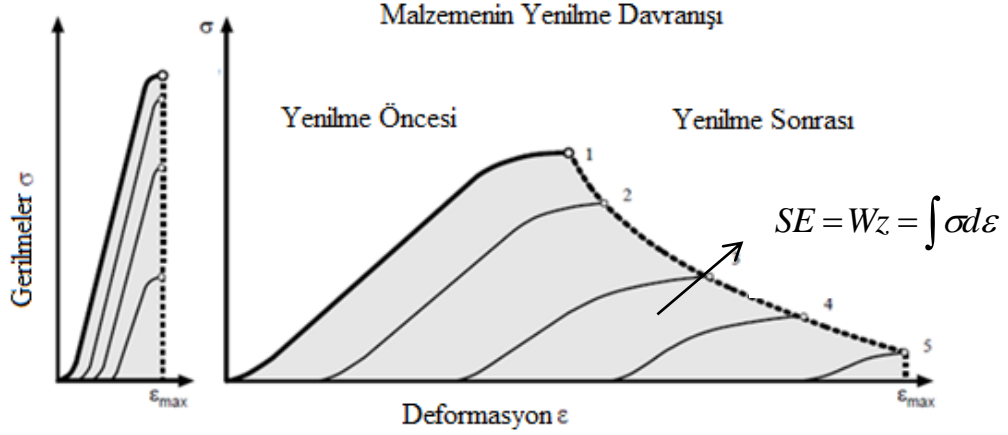
D ve D<sub>c</sub>: sırasıyla delik çapı (mm) ve ucun çapı (mm),

PR: ilerleme hızıdır (m/dk).

Yürütülen çalışmalar sonucunda, delici uç üzerinde ağırlığın arttırılmasıyla uygulanan tork ve PR exponansiyel olarak artış göstermiştir. Ancak delici uç üzerindeki ağırlığın artışına bağlı olarak SE değerleri düşmüştür.

Reddish ve Yaşar (1996) SE'den yararlanarak bir dayanım indeksi üzerinde durmuşlar ve delme için gerekli enerji miktarını kayacın bir parametresi olarak, kullanılan alete de bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Thuro ve Spaun (1996 a, 1996 b) Kayaçta yeni çatlak yüzeyleri oluşturmak için gereken enerji ile kayacın kırılgenliği arasında yeni bir kayaç özelliği tanımlanmıştır. Bu kapsamda; yürüttükleri çalışma, Hughes ve Mellor'un 1972 yılında yaptıkları çalışmalar ile benzerlik göstermekle birlikte, kayacın yenilme sonrası davranışının da işin içine dahil edilmesiyle daha geniş bir kavram olarak spesifik enerjiyi (birim deformasyon enerjisi "destruction work", SDE<sub>DW</sub>) tanımlamışlardır (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1** Gerilme birim deformasyon eğrisinden birim deformasyon enerjisi “destruction work” kestirimi (Thuro ve Spaun 1996).

Thuro ve Spaun (1996), 15 ve 20 kW’lık iki matkap kullanarak tünel arınındaki ilerleme hızını (birim zamandaki delme mesafesi, m/dk) ölçmüşlerdir. Çalışmada, basınç ve çekme dayanımları ile ilerleme hızı arasında güçlü logaritmik ilişkiler bulmuşlardır.

Rostami vd. (1993) ve Speight (1997) yaptıkları çalışmalarda kömür çevre kayaçlarının tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile SE arasında güçlü ilişkiler bulmuşlardır. Benzer bir çalışma, jips ve anhidrit gibi evaporitik kayaçlar üzerinde uygulanmış, ancak tek eksenli basınç dayanımı ile SE arasında anlamlı sonuçlar elde edilememiştir (Speight 1997).

Copur vd. (2001) bazı çalışma değişirgeleri sabit tutulduğunda optimum kesme koşulları altında, SE’nin kayacın özelliklerinden doğrudan etkilendiğini ortaya koymuşlardır.

Altındağ (2003) yaptığı çalışmalarda literatürde en çok tercih edilen kırılgenlik ölçütleri (Eşitlik 3.10-3.12) ile SE arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu kapsamda literatürde yaygın kullanılan kırılgenlik ölçütleri;

- Basınç dayanımının çekme dayanımına oranından kırılgenliğin belirlenmesi

$$B_1 = \sigma_c / \sigma_t \quad (3.10)$$

- Basınç ve çekme dayanımından kırılgenliğin belirlenmesi (Kahraman 2002):

$$B_2 = (\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t) \quad (3.11)$$

- Basınç ve çekme dayanımının çarpımından kırılgenliğin belirlenmesi (Altındağ 2000):

$$B_3 = (\sigma_c * \sigma_t)/2 \quad (3.12)$$

Burada;

$\sigma_c$ : tek eksenli basınç dayanımını (MPa) ve

$\sigma_t$ : ise çekme dayanımını (MPa) göstermektedir.

Yapılan çalışmalar neticesinde, B1 ve B2 kırılmalık ölçütleri ile SE arasında anlamlı ilişkiler kurulamazken, B3 kırılmalık ölçütü ile SE değerleri arasında anlamlı ilişkilerin olduğu belirlenmiştir (Altındağ 2003).

Dupriest ve Koederitz (2005), Teale (1965) tarafından önerilen SDE modelini baz almış ancak delme sırasında makine veriminin ( $E_m$ ) de hesaba katılması gerektiğini belirtmişler ve verim değerinin delici ucun türüne ve uygulanan baskıya bağlı olarak %30-40 olduğunu ifade etmişlerdir (Eşitlik 3.13). Özellikle derin sondaj çalışmalarında delici ucun üzerinde oluşan baskı ile yeryüzünde okunan baskı değeri arasındaki hata payı, kazı verimini oldukça etkileyen bir etkidir.

$$SDE = 0.35 \left( \frac{F}{A} + \frac{120\pi * T * N}{A * PR} \right) \quad (3.13)$$

Tiryaki ve Dikmen (2006) altı farklı kumtaşı örneği üzerinde yaptıkları çalışmalarda, SE ile kayaç dokusu katsayısı arasında olumlu bir ilişkinin olduğu gözlemlemişlerdir.

Balcı ve Bilgin (2007) farklı kayaç örnekleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda, kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile küçük ölçekte ve büyük ölçekte kesme setlerinden elde edilen SE değerleri arasında bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu kapsamda Eşitlikleri 3.14 ve 3.15'i önermişlerdir;

$$SE = 2.04 \sigma_t^{0.72} \quad (3.14)$$

$$SE = 12.81 * \sigma_t^{0.66} \quad (3.15)$$

Burada;

$\sigma_c$ : tek eksenli basınç dayanımını (MPa) ve

$\sigma_t$ : ise çekme dayanımını (MPa) göstermektedir.

Rostami vd. (1994), Balcı (2004) SE'yi; birim zamanda (h) kazılan malzeme miktarı (m<sup>3</sup>) ve bu hacimdeki malzemenin kazılmasında harcanan güçten (kW) yola çıkarak belirlemiştir (Eşitlik 3.16 – 3.18).

$$P = V * I \quad (3.16)$$

$$ICR = \frac{\text{Kazılacak malzemenin hacim cinsinden miktarı (m}^3\text{)}}{\text{Kazı Süresi (h)}} \quad (3.17)$$

$$SDE_E = \frac{P}{ICR} \quad (3.18)$$

Burada;

SDE<sub>E</sub>: elektriksel spesifik delme enerjisi (Mj/m<sup>3</sup>)

ICR: kesici makinanın anlık ilerleme miktarı (m<sup>3</sup>/h),

P: ise makinanın harcadığı güçtür (w),

I: makinanın çalışırken çektiği akım (amp) ve

V: makinanın çalışırken çektiği voltaj (V)

Tiryaki (2008) farklı kayalar için konik delici sertliği, tek eksenli basınç dayanımı ve SE arasında ilişkiyi vurgulamıştır.

Cherif ve Bits (2012) yapmış oldukları çalışmada delme işlemi sırasında makine veriminin 0.26 – 0.64 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Eşitlik 3.19'da verilen bağıntı kullanılarak hesaplanan SDE değerlerinde makine verimi de göz önünde bulundurulmuştur.

$$SDE = E_m \left( \frac{4 * F}{\pi * D^2} + \frac{480 * T * N}{\pi * D^2 * PR} \right) \quad (3.19)$$

Amadi vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada ise delme işlemi sırasında makine veriminin 0.125 olduğunu ortaya koymuşlardır.

Chen vd. (2014) özellikle derin sondaj çalışmalarında kullanılmak üzere yeni bir SDE'nin hesaplanması için yeni bir model önermiştir (Eşitlik 3.20 ve 3.21). Bu modelde diğer çalışmaların aksine derinliğe bağlı olarak delici uç üstünde değişen baskı koşulu göz önünde bulundurulmuştur. Arazi çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında oldukça anlamlı sonuçlar elde etmişlerdir.

$$SDE = E_m * F_b \left( \frac{1}{A} + \frac{13.33 * \mu * N}{D * PR} \right) \quad (3.20)$$

$$F_b = F * e^{\mu * \gamma b} \quad (3.21)$$

Burada;

$F_b$ : delici uç üzerindeki gerçek baskı (N),

$\gamma b$ : ise delik tabanın eğimi olarak tanımlanmıştır.

Rashidi vd. (2010) yapmış oldukları çalışma ile sürtünme katsayısının 0.30 – 0.85 arasında olduğunu ortaya koymuşlardır.

Antoljak vd. (2018) laboratuvar koşullarında geliştirmiş oldukları kesme ve delme setleri ile gerçekleştirdikleri deneylerde spesifik delme ve kesme enerjileri arasındaki ilişkiyi incelemişler ve spesifik delme enerjisinin, kesme enerjisinden daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Çalışmada, delme işleminde kayaç ile temas eden karotiyerin ucundaki elmas tanelerinin sayısı ve boyutunun önemi vurgulanmıştır.

### 3.2. KÜÇÜK BOYUTLU KAZI DENEYİ

McFeat – Smith ve R.J. Fowell (1977, 1979) tarafından geliştirilen bu yöntem uzun yıllar laboratuvar ve yerindeki deney sonuçlarına dayanılarak geliştirilmiştir. Yerinde yapılan çalışmalarda kollu galeri açma makinalarının net kazı miktarını, tükettiği gücü, keski tüketimini ve duraklamaları ölçerek kademeli kollu tünel açma makinalarının performanslarını yerinde tespit etmişlerdir. Buralardan aldıkları karot veya blok numuneleri, laboratuvarda sabit şartlarda küçük boyutlu kesme deneyine tabi tutarak, bir keskiye gelen yatay ve dikey kuvvetleri ölçmüşler ve birim hacimdeki kayacı kesmek için gerekli olan SE'yi ve birim mesafedeki keski tüketimini belirlemişlerdir (Balcı 2004).

Küçük ölçekli kesme setinde 18kw'lık elektrik motoruyla tahrik edilen bir planya makinası ve bu makine üzerinde 30\*40\*50 cm boyutlarında numune yerleştirme sehpası bulunmaktadır. Deney esnasında, kayaç numunesi planyanın sehpasına sabitlenir ve aşağı – yukarı, sola – sağa hareket ettirilerek kesme derinliği, keski arası mesafe gibi özelliklerin kazılabilirlik

üzerindeki etkileri incelenebilir. Deneyin en büyük avantajı numune hazırlamadaki kolaylıktır (Balcı ve Bilgin 2005).

Deney yöntemine göre, 7.6 cm çapındaki karot örneği veya 20\*10\*10 cm boyutunda küçük kaya numuneleri bir planya makinesinde sehpaye oturtulur. Kesme açısı -5°, keski genişliği 12.7 mm, temizleme açısı 5°, kesme derinliği 5 mm olduğu koşullarda sabit kesme koşulları kullanılarak deney yapılmaktadır (Balcı 2004).

McFeat – Smith ve R.J. Fowell (1977, 1979) yaptıkları çalışmalarda belirli bir değere kadar SE düştükçe, kademeli kolları tünellerin ilerleme hızının arttığını göstermiştir (Şekil 3.2).

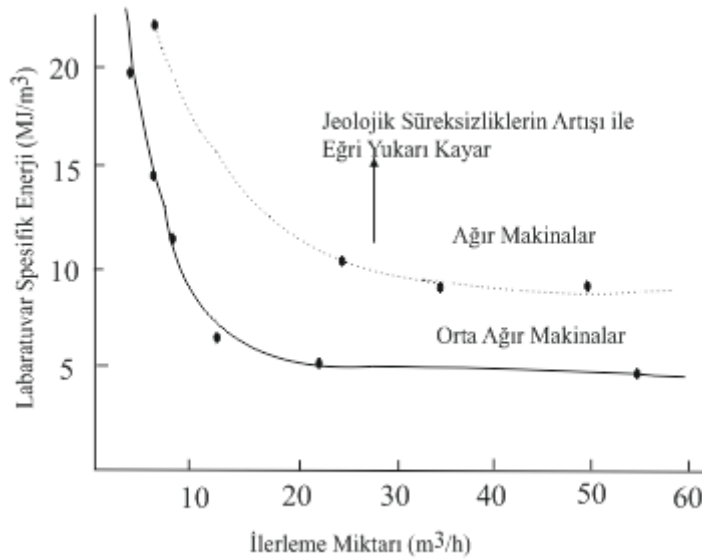
Üç yönde kesme, dikey ve yanıl kuvvetler bir dinamometre kullanılarak kaydedilir. Sonrasında birim hacimdeki (1m<sup>3</sup>) kayacı kesmek için gereken enerji olarak tanımlanan SE, Eşitlik 3.22'den MJ/m<sup>3</sup> ya da kWh/m<sup>3</sup> olarak bulunmaktadır (Çopur et al. 2001).

$$SE = \frac{FC}{Q} \quad (3.22)$$

eşitliğinden yararlanılmaktadır. Burada;

FC: ortalama kesme kuvvetini (FC = F'C/2) ve

Q: pasa hacmini göstermektedir.



Şekil 3.2 Kolları galeri açma makinalarının SE ile değişimi (McFeat ve Fowell 1979, Balcı 2004).

Yapılan hesaplamalar sonucunda orta ve ağır tip galeri açma makinaları için performans değerlendirme sınıflaması yapılmıştır (Çizelge 3.1 ve 3.2).

**Çizelge 3.1** Orta ağırlıktaki kollu galeri açma makinasının seçim kriterleri (Bilgin vd 1997, Su 2010).

Spesifik Enerji		Tanımlama
(kWh/m <sup>3</sup> )	(MJ/m <sup>3</sup> )	
> 6	> 20	Uygun değil
6 – 4	20 – 15	Düşük kazı performansı ve aşırı uç aşınması
4 – 2	15 – 8	Orta seviyede kazı performansı ve 9 – 13 m <sup>3</sup> /h ilerleme miktarı beklenir
< 2	< 8	Mükemmel kazı performansı ve 12 – 20 m <sup>3</sup> /h ilerleme miktarı elde edilebilir.

**Çizelge 3.2** Ağır tip kollu galeri açma makinasının seçim kriterleri (Bilgin vd. 1997, Su 2010).

Spesifik Enerji		Tanımlama
(kWh/m <sup>3</sup> )	(MJ/m <sup>3</sup> )	
> 9	> 32	Keski sarfiyatının yüksek olması beklendiği için, kazılması oldukça zordur. Formasyon ince tabakalar halinde kesilebilir.
9 – 7	32 – 25	Masif kayacıkta düşük kazı performansı ve 9 – 11 m <sup>3</sup> /h ilerleme miktarı elde edilebilir
7 – 5	25 – 17	Orta seviyede kazı performansı ve 12 – 13 m <sup>3</sup> /h ilerleme miktarı beklenir
< 5	< 17	Mükemmel kazı performansı ve 12 – 30 m <sup>3</sup> /h ilerleme miktarı elde edilebilir

### 3.3. TAM BOYUTLU KAZI DENEYİ

Colarado School of Mines’da geliştirilen bu yöntemin esas amacı gerçek boyutlu bir keski ile kaya bloğunun kesilmesi ve gerekli SE’nin hesaplanması esasına dayanmaktadır (Balcı 2004). Tam boyutlu deney seti ile farklı kesme koşulları altında kayacık kazılabilirliğini belirlemek, en uygun kesici kafa tasarımı yapmak, kazı makinalarının performansını önceden tahmin etmek amacıyla geliştirilmiş bir kazı setidir (Su 2010). Teorik olarak; anlık ilerleme miktarı (ICR), makine gücü ve SE arasında ilişkiler mevcuttur (Eşitlik 3.17).

Eşitlik 3.17’de kaya kütlesi özelliklerine ve makine tipine bağlı olarak 0.7 – 0.9 arasında değişen bir katsayı olarak alınmaktadır. Optimum SE ise laboratuvar tam boyut kesme deneylerinden elde edilmektedir.

Şekil 3.3 ve 3.4'te, İTÜ ve Colarado School of Mines laboratuvarlarında kullanılan tam boyutlu kesme deney aletleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3 CSM'de kullanılmış tam boyutlu kesme seti (Su 2010).

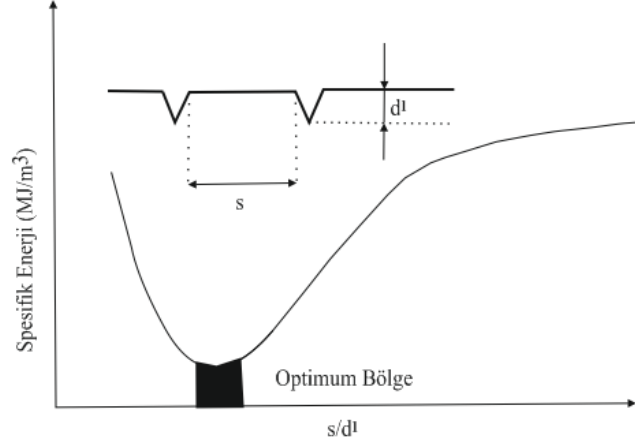
Kazı mekaniği prensiplerine bağlı olarak yapılan kesme deneylerinde öyle bir kesmeler arası mesafe / kesme derinliği ( $s/d'$ ) oranı vardır ki bu değerde birim hacimdeki kayacı kesme için gerekli olan SE minimum olmaktadır. Optimum kesmeler arası mesafe, kesme derinliğine bağlı olduğundan, boyutsuz olan  $s/d'$  oranı optimum çalışma şartlarını vermektedir.



Şekil 3.4 İTÜ'de kullanılan tam boyutlu kesme seti (İTÜ 2018).

Şekil 3.5'te görüldüğü üzere optimum orana ulaşana kadar  $s/d'$  oranını artmasıyla SE değeri azalmaktadır. Bu oranın ötesinde se değeri artmaya başlamaktadır.





Şekil 3.5 Optimum SE ile  $s/d'$  arasındaki eğri (Balcı 2004).

İTÜ'de bulunan tam boyutlu deney setinde maksimum  $1*1*0.6$  m boyutlarında büyük kayaç örnekleri üzerinde kesme deneyleri yürütülmektedir. Deney sırasında farklı kesme parametrelerine bağlı olarak kesme kuvveti, normal kuvvet ve yanal kuvvet değerleri kaydedilir. SE değeri de kesme işlemi sonrasında çıkan pasa hacmine göre belirlenmektedir.

Kesme setinin bağımsız değişkenleri; kayaç türü, kesme derinliği ve keskinler arası mesafe gibi parametrelerden oluşmaktadır. Buna karşın, bağımlı değişkenler ortalama ve maksimum kesme kuvveti, verim ve SE gibi parametrelerdir. Bu setlerde yapılan kesme deneyleri uzun bir süreç gerektirdiği gibi oldukça pahalıya mal olmaktadır. Ayrıca, deneyin yapılabilmesi için gerekli boyutlarda kaya bloklarının hazırlanması oldukça zahmetlidir. Bu yönleri kesme deney setinin en büyük dezavantajlarını oluşturmaktadır (Balcı ve Bilgin 2007).

Tam boyutlu ve doğrusal kesme setinde bağımsız (yardımsız, etkileşimsiz) ve bağımlı (yardımcı, etkileşimli) kesme olmak üzere iki tür kesme modu uygulanmaktadır. Bağımsız kesme türünde, farklı kesme derinliklerinde deneysel çalışmalar yapılarak optimum kesme derinliğinde düşey ve yatay kesme kuvvetleri kayıt edilmektedir.

Bağımlı kesme türünde ise, keskinler arası mesafeye bağlı olarak deneysel çalışmalar aynı örnek üzerinde tekrar yürütülür. Bu durumda, keskinler eğer birbirine çok yakın olursa kayaçtaki aşırı kırılma nedeniyle verimli bir kesme oluşmamaktadır. Bununla birlikte, eğer keskinler birbirine çok uzak olursa kesme hatlarındaki çekme çatlakları birbirlerine ulaşmazlar ve çok yüksek SE değeri elde edilmektedir. Bu nedenle, yapılan deneysel çalışmalarda keskinler arası optimum mesafe

belirlenerek, bu mesafede etkin olan kesme kuvvetlerine bağılı olarak minimum SE değeri belirlenmektedir (Balcı ve Bilgin 2007).

### 3.4. TAŞINABİLİR DOĞRUSAL KESME SETİ (PLCM)

İTÜ Maden Mühendisliği Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde geliştirilen taşınabilir doğrusal kesme seti (PLCM); küçük ölçekli kama, konik ve disk uçların kullanılmasıyla, ufak bloklar ya da karot örnekleri üzerinde kesme deneyleri yapılabilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Özellikle temini daha kolay olan karot örnekler üzerinde yapılan çalışmalar, performans tahminin kesme deney seti ile güvenilir bir şekilde yapılabileceğini göstermiştir (Balcı 2004). Kayaç örnekleri, hareketi hidrolik silindir ile sağlanan, 20\*20\*10 cm<sup>3</sup>'lük metal örnek kutusu kalıbına yerleştirilmekte ve betonlarak sabitlenmektedir. Keski, 0-100 kN kapasiteli ve 1 kN hassasiyetinde, gerinim ölçer tabanlı dinamometreye (üç eksenli kuvvet dönüştürücü, yük hücresi) bir araç tutucu ile yerleştirilmektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Taşınabilir doğrusal kesme seti (PLCM) (Tumaç vd. 2018).

Temizleme açısı 5°, keski genişliği 12.7 mm ve kesme açısı -5° olan standart bir keski ile, farklı kesme derinliklerinde ve farklı keski arası mesafe koşullarında kesme deneyleri yapılabilmektedir. Deneye başlamadan önce, metal kutu içerisine yerleştirilen kayaç örneğinin yüzeyi, standart keski ile dikkatli bir şekilde kesilerek düzlenmekte ve böylece düz bir yüzey elde edilebilmektedir (Şekil 3.7). Tüm deneyler en az 3 kez tekrarlanmaktadır. Deney aletinin veri örnekleme oranı 1000 Hz ve kesme hızı 3 cm/s'dir. Her bir kesme işleminde, ortalama ve maksimum kesme kuvvetleri ile birim uzunluktaki örneğin kesiminden elde edilen pasa hacmi

kayıt edilmekte ve spesifik enerji, Eşitlik 3.22’de verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır (Tumaç vd. 2018).



**Şekil 3.7** Taşınabilir doğrusal kesme seti için hazırlanan örnekler ve deney öncesi yüzey düzeltilmesi (Tumaç vd. 2018).



## BÖLÜM 4

### LABORATUAR ÇALIŞMALARI VE DENEYSEL SONUÇLAR

Laboratuvar çalışmaları için öncelikle, başta Zonguldak olmak üzere ülkemizin çeşitli yerlerinden alınan 12 adet sedimanter ve 4 adet magmatik kökenli 16 farklı kayaç türü üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada; 1 adet granit, 1 adet bazalt, 2 adet bazaltik andezit, 2 adet dolomit, 3 adet kireçtaşı, 1 tanesi kuvarslı olmak üzere 6 adet kumtaşı kayaçları bulunmaktadır. Kayaçların isimleri, türlerine göre sınıfları ve çalışma süresince tanımlanan kodlandırmaları Çizelge 4.1’de, alındıkları noktalar ise Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1** Çalışma kapsamında araziden alınan kayaç türü ve adları.

<b>Kayaç Kodu</b>	<b>Kayaç Adı</b>	<b>Alındığı Yer</b>	<b>Kayaç Türü</b>
M1	Porfirik Bazaltik Andezit	Ankara	Magmatik
M2	Porfirik Bazaltik Andezit	Ereğli, Zonguldak	Magmatik
M3	Bazalt	Kızılcahamam, Ankara	Magmatik
M4	Granit	Bergama, İzmir	Magmatik
S1	Kuvarslı Kumtaşı	Velibey, Zonguldak	Sedimanter
S3	İri Taneli Kumtaşı	Üzülmez, Zonguldak	Sedimanter
S4	İri Taneli Kumtaşı	Bağlık, Zonguldak	Sedimanter
S5	Orta Taneli Kumtaşı	Üzülmez, Zonguldak	Sedimanter
S6	İnce Taneli Kumtaşı	Üzülmez, Zonguldak	Sedimanter
S15	Kumtaşı	Üzülmez, Zonguldak	Sedimanter
S16	Kumtaşı	Karadon, Zonguldak	Sedimanter
S8	Kireçtaşı/Mermer	Eflani, Karabük	Sedimanter
S9	Dolomit/Mermer	Bursa	Sedimanter
SK1	Kireçtaşı	Zonguldak	Sedimanter
SK2	Dolomitik Kireçtaşı	Zonguldak	Sedimanter
SK3	Dolomit	Zonguldak	Sedimanter



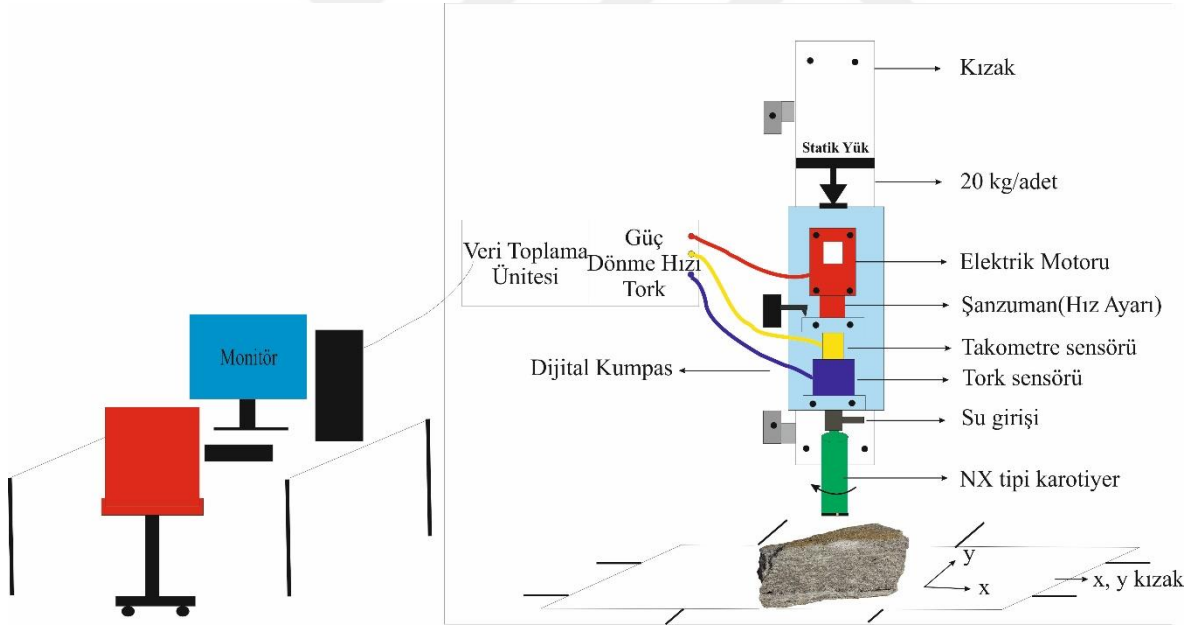
Şekil 4.1 Çalışmada kullanılan kayaçların alındıkları yerler.

Bu tez çalışması kapsamında, 16 farklı kayaç türü üzerinde yeniden tasarımılandırılan laboratuvar ölçekli döner delik delme deney seti kullanılarak spesifik delme deneyleri yapılmış ve deneylerden elde edilen karot örnekleri üzerinde her bir kayaç türüne ait fiziksel, mekanik ve indeks özellikler ayrı ayrı belirlenmiştir. Bu bölümde laboratuvarda yapılan deneylerin yapılış şekli, standardı ve deney sonuçlarından bahsedilmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen deneyler şu şekildedir;

1. Spesifik Delme Enerjisinin (SDE) Belirlenmesi
2. Kayaç Özelliklerinin Belirlenmesi
  - ✓ Fiziksel özellikler
    - i. Yoğunluk
  - ✓ Mekanik deneyler
    - i. Tek Eksenli Basınç Dayanımı
    - ii. Dolaylı Çekme (Brazilian) Dayanımı
    - iii. Deformabilite Deneyi
  - ✓ İndeks Deneyler
    - i. Delme Oranı İndeksi (DRI)
    - ii. Cerchar Aşınma İndeksi (CAI)
    - iii. Equatip Sertlik Deneyi (ESD)
  - ✓ Minerolojik ve Petrografik Özelliklerin Belirlenmesi

#### 4.1. LABORATUVAR ÖLÇEKLİ DÖNER DELİK DELME SETİ

Delik delme uygulamalarında; ilerleme hızı, dönme hızı/devir, uygulanan baskı yükü ve tork en önemli parametreler olarak bilinmektedir. Özellikle döner delik delme uygulamaları, kesici uç üzerine belirli bir baskı yükü ve dönüş için yeterli miktarda tork kuvvetinin uygulanması ile gerçekleşmektedir. Delme işleminin gerçekleşmesi için uygulanan baskı yükü ve tork kuvvetlerinin kayaç dayanımını yenebilecek seviyede olması önem taşımaktadır. Bu nedenle kayaçların delinebilirliğinin belirlenmesinde, her bir makine parametresi ayrı ayrı değiştirilerek optimum delme koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla yapılan literatür araştırmaları ve gözlemler baz alınarak; makine parametrelerinin ölçülebileceği, döner delik delme uygulaması ile uyumlu, pratik ve kullanışlı bir laboratuvar ölçekli döner delik delme deney seti tasarımı yapılmıştır (Şekil 4.2). Çalışma, ZBEU Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nden alınan 2015-98150330-01 No.'lu BAP ve 2015-98150330-03 No.'lu Alt Yapı projeleri ile desteklenmiştir.



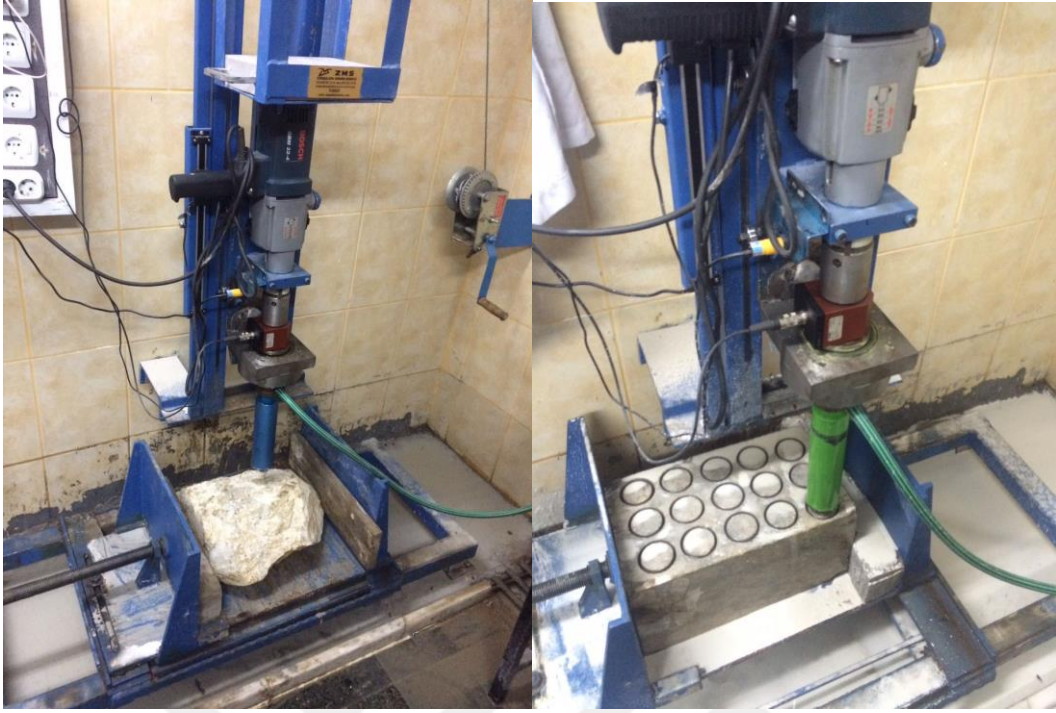
Şekil 4.2 Döner delik delme deney setinin şematik gösterimi (BAP 2017).

Delinebilirlik üzerine çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar incelendiğinde, ilerleme hızı ve spesifik delme enerji parametrelerinin en önemli iki parametre olarak ele alındığı görülmektedir. Özellikle spesifik enerjinin belirlenmesi amacıyla; büyük ve küçük ölçekli kazı setleri, görgül (ampirik) yaklaşımlar, arazide gerçek bir makine kullanılarak yapılan çalışmalar olmak üzere pek çok yöntemden yararlanılmaktadır. Kazılabilirlik ölçütü olarak

spesifik enerji, kayaktan belirli bir hacim koparabilmek için gerekli olan enerji olarak tanımlanmaktadır. Çalışma kapsamında spesifik enerji, uygulanan kazı yöntemi ve uç şekli göz önüne alındığında spesifik delme enerjisi (SDE) şeklinde ifade edilmiştir.

Yeni deney setinde, laboratuvarında karot alma amaçlı kullanılan 1.5 kW'lık taşınabilir karot alma makinası/matkabından yararlanılmıştır. Düşey konumlu hazırlanan bir şase üzerine, taşınabilir karot alma matkabı/karotiyer sabit kalacak şekilde yerleştirilmiş ve alt kısmına ise araziden alınan kayaç örneklerinin konabildiği, kızaklar aracılığı ile sağ – sola ve ileri - geri (x, y eksen) hareketi mekanik olarak sağlanabilen yatay konumlu mengene konumlandırılarak deney setinin ana kısımları oluşturulmuştur (Şekil 4.3). Delme matkabının boştaki hareketi için cereskal tercih edilmiş ancak birkaç kullanımdan sonra cereskalın dişlerindeki bozulma ve sıkışmalar nedeniyle elektrikli vinç ile çalışmalar sürdürülmüştür. Delici ucun kayaca batması ile birlikte sistemin hareketi deney setinin kendi ve üzerindeki statik ağırlıkların etkisi ile olmaktadır. Bu nedenle, delik delme işlemi sırasında gereken baskı yükü için delme matkabının üst kısmına, içine her biri 20 kg olan ağırlıkların yerleştirilebileceği bir kefe yapılmıştır (Şekil 4.4). Delme işlemi sırasında, kayaç içerisinde yapılan ilerleme miktarı ise matkabın yan tarafına sabitlenen 300 mm kapasiteli elektronik kumpas kullanılarak ölçülebilmektedir. Delik delme işlemi sırasında, tork ve dönme hızının ölçülmesi için delme matkabı ile delici uç arasına tork ve devir ölçer sensörleri yerleştirilmiştir (Şekil 4.5). Bu amaçla 50 ve 500 Nm kapasiteli iki adet tork sensörü alınmıştır (BAP 2016). Deneyle sırasında 50 Nm kapasiteye sahip tork sensörünün çalışmada kullanılan kayaçlar için yeterli olmadığı görülmüş ve tüm delme çalışmalarında 500 Nm kapasiteli tork sensörü kullanılmıştır. Dönme hızı/devir sensörü ise tork sensörünün hemen üzerine taşınabilir karot alma makinasının hemen altına yerleştirilmiştir. Delik delme işlemi sırasında, tork ve devir ölçer sensörlerinin bir arayüz aracılığıyla veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Benzer bir yaklaşım anlık elektriksel verilerin (akım, gerilim, güç) alınması amacıyla da uygulanmış ve yerleştirilen akım - gerilim sensörlerinin bilgisayar ile olan bağlantısı yapılarak istenen delme parametrelerini saniyede 5 veri kayıt alabilecek şekilde ayarlanmıştır. Deney seti içine koyulan kayaç blokları üzerinde delme işlemi 6 su kanallı, elmas emprenyeli karot matkabı (NX tipi karotiyer) kullanılarak yapılmaktadır. Böylece delinen deliklerden alınan karot örnekleri üzerinde kaya mekaniği deneyleri yapılabilmektedir. Şekil 4.6'da, yeniden tasarımılandırılmış laboratuvar ölçekli döner delme deney seti genel görünümü sunulmuştur. Böylece, döner delik delme deney seti kullanılarak yürütülen delme deneylerinde elektriksel ve mekanik yöntemler göz önünde bulundurularak SDE değerleri tüm kayaç türleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.





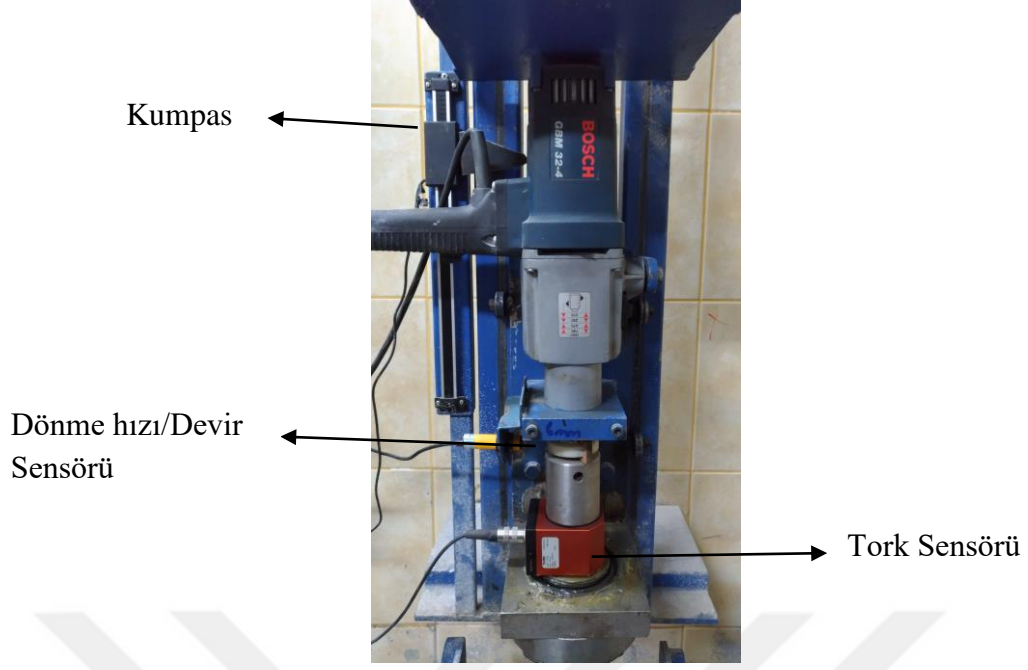
Şekil 4.3 Deney setinin ana kısımları ve şasesi.



Baskı Yüğü  
(Statik Yüğü)

Taşınabilir  
Karotiyer

Şekil 4.4 Deney seti ait baskı yüğü için kefe



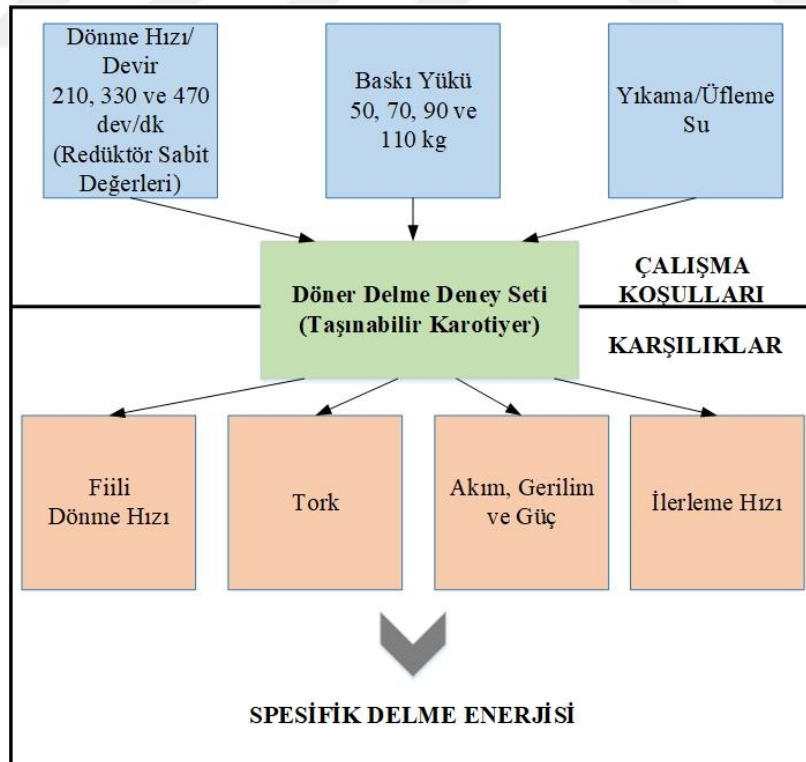
Şekil 4.5 Deney setine ait tork ve dönme hızı/devir sensörleri.



Şekil 4.6 Deney setinin genel görünümü

#### 4.1.1. Döner Delme Seti Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında delinebilirlik ile ilgili olan yöntemler göz önünde bulundurularak tasarımılandırılan döner delik delme setinde, SDE'nin elde edilmesi için gereken parametreler dikkate alınmıştır. Yapılan delme çalışmaları, 4 farklı baskı yükü (50, 70, 90 ve 110 kg) ve 3 farklı dönme hızı/devir (I. Devir=210 dev/dk, II. Devir=330 dev/dk ve III. devir=470 dev/dk) koşullarında uygulanmıştır. Böylece, makine değiştirgelerinin delme performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Delme parametreleri belirlenirken, taşınabilir karotiyerin ve deney düzeneğinin özellikleri göz önünde bulundurularak çalışma koşulları belirlenmiştir. Taşınabilir karotiyerin dönme hızı/devir özellikleri çalışmada kullanılan dönme hızı/devir koşullarını belirlemiştir. Baskı yükü koşulları için ise, 50 kg'dan düşük değerler ile yapılan ön deneylerde delme için uzun süreler gerekmiş ve delme veriminin oldukça düştüğü belirlenmiştir. Baskı yükünün 110 kg'dan daha yüksek değerler alması durumu ise deney şasesinin taşıma kapasitesi ve delme donanımı düşünülerek değerlendirmeye alınmamıştır. Delme deney setininin mevcut çalışma koşulları belirlenerek yürütülen delme deneyleri sırasında dönme hızı, tork, akım, gerilim ve güç parametreleri ölçülerek makinedan elde edilen karşılıklar olarak alınmıştır (Şekil 4.7).



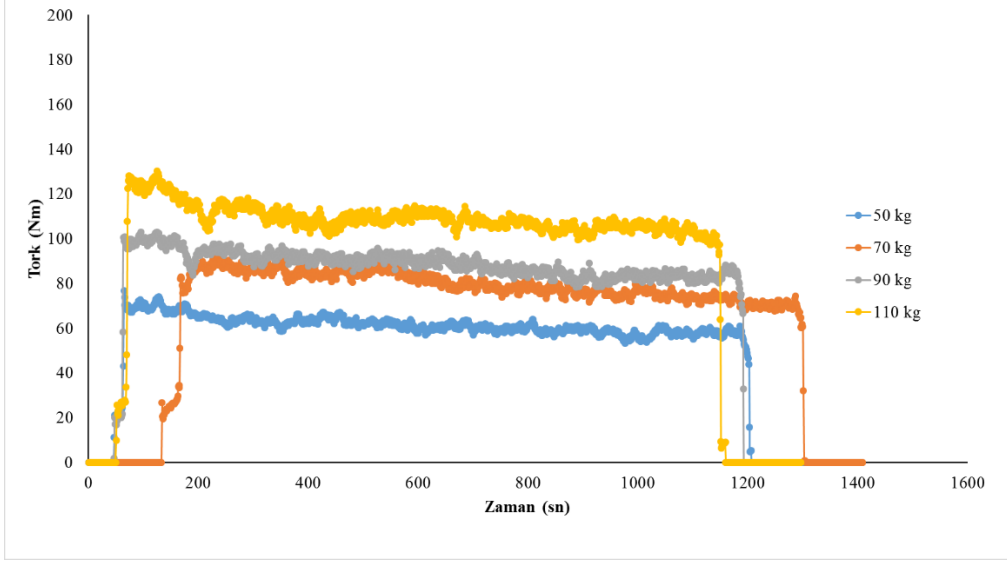
Şekil 4.7 Deney setinde uygulanan girdi ve çıktı parametreleri.

#### 4.1.2. Kayaçların Spesifik Delme Enerjisi ve İlerleme Hızı Değerlerinin Belirlenmesi

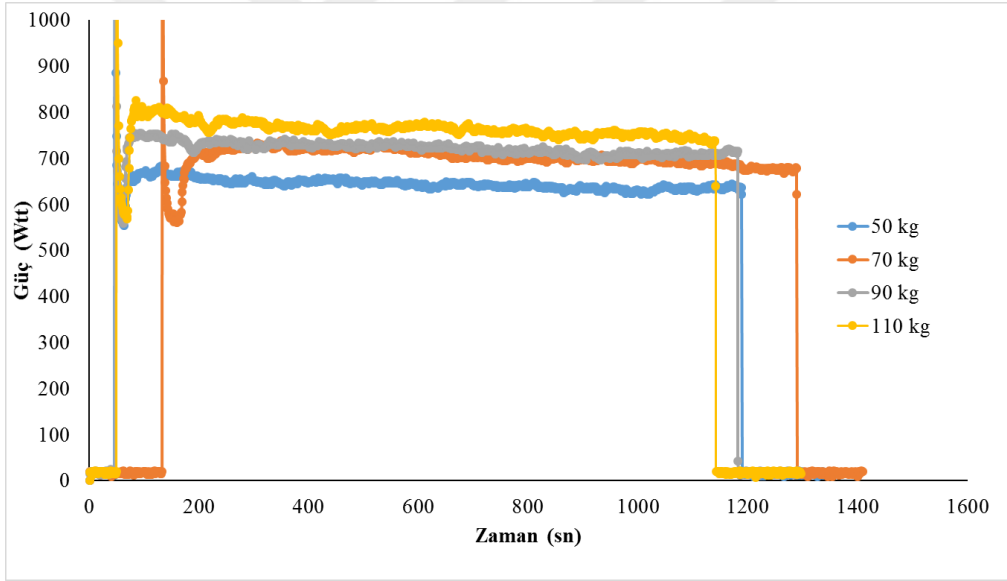
Çalışma kapsamında, 16 farklı kayaç türü üzerinde makine parametreleri değiştirilerek 450'nin üzerinde delme deneyi yapılmıştır. Böylece her bir kayaç için değişen makine parametrelerine (baskı yükü ve dönme hızı/devir) bağlı olarak mekanik ve elektriksel spesifik delme enerjisi (SDE) ile ilerleme hızı (PR) değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Deney sırasında anlık olarak alınan dönme hızı, tork, akım, gerilim ve güç değerleri kayıt edilmiştir. Böylece, delme deneylerinden elde edilen verilerin önerilen görgül yaklaşımlarda (Bkz. Bölüm 3) kullanılmasıyla spesifik delme enerjisi (SDE) değerleri mekanik ve elektriksel olarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu amaçla, SDE'nin belirlenmesinde, döner deliciler için en yaygın kullanılan yaklaşımlar göz önünde bulundurulmuştur. Bu kapsamda SDE mekanik enerji cinsinden, Teale (1965) ve Rabia (1982, 1985) tarafından önerilen yaklaşımlar (Bkz. Eş. 3.1 ve 3.6) kullanılarak belirlenmiş ve sırasıyla  $SDE_T$  ve  $SDE_R$  olarak tanımlanmıştır (Çizelge 4.2 ve 4.3). Bölüm 3'te verilen diğer mekanik spesifik delme enerjisi eşitlikleri ise, farklı araştırmacıların, Teale (1965) tarafından önerilen yaklaşımı zaman içerisinde geliştirmesiyle türetilmiştir. Bu nedenle, mekanik spesifik delme enerjisinin belirlenmesinde yalnızca Teale (1965) ve Rabia (1982 ve 1985) tarafından önerilen yaklaşımlar ön planda tutulmuştur. SDE elektriksel enerji olarak ise, makinanın çalışma sırasında çektiği güç göz önünde bulundurularak Eşitlik 3.18'den hesaplanmış ve  $SDE_E$  olarak tanımlanmıştır (Çizelge 4.4).  $SDE_E$ , delme esnasında makinanın tam yükte çalışırken alınan değerlerden makinanın boşta çalışması sırasında elde edilen değerlerin çıkarılması ile net delme işlemi için gereken güç miktarının belirlenmesi yoluyla hesaplanmıştır. Bir diğer önemli parametre olarak ilerleme hızı (PR) ise; çalışma sırasında delinen delik uzunluğunun, net delme süresine oranlanmasıyla ayrı olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.5).

$SDE_T$  ve  $SDE_R$  yaklaşımları göz önüne alındığında mekanik spesifik delme enerjisi kesme torku ve baskı yükü değerleri ön plana çıkmaktadır.  $SDE_E$  ise makinanın delme esnasında çektiği güce bağlı olarak belirlenmektedir. Farklı baskı yükü koşullarında yapılan delme esnasında, kesme torkunun ve makine gücünün değişimi Şekil 4.8 ve 4.9'da sunulmuştur. Şekil 4.8 ve 4.9'da, M2 (andezit) örneği göz önünde bulundurulmuş ve dönme hızı/devir sabit tutularak baskı yükünün değişimine bağlı olarak kesme torkunun ve makine gücü değerlerinin değişimi incelenmiştir. Yapılan deneyler bir karot boyu boyunca sürdürülmüş ve değerler kaydedilmiştir.



**Şekil 4.8** Devir sabit tutulduğunda, baskı yükündeki değişime bağlı olarak kesme torku değerlerinin değişimi.



**Şekil 4.9** Devir sabit tutulduğunda, baskı yükündeki değişime bağlı olarak makine gücü değerlerinin değişimi.

Delme deneyleri sırasında kayacın parçalanma mekanizması öğütme şeklinde olmaktadır. Bu nedenle, laboratuvarında yürütülen delme deneylerinden elde edilen spesifik delme enerjisi değerleri oldukça yüksek çıkmıştır. Ayrıca bu durum, yumuşak kayaç türlerine nazaran daha sağlam kayaç türleri üzerinde çalışılmasından da kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 4.2** Çalışmada kullanılan kayaç türlerinin mekanik spesifik delme enerjisi değerleri (Teale 1965 yaklaşımı).

Kayaç Kökeni	Kayaç Kodu	SDE <sub>T</sub> (MJ/m <sup>3</sup> )											
		210 dev/dk				330 dev/dk				470 dev/dk			
		50 kg	70 kg	90 kg	110 kg	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg
Magmatik Kayaç Türleri	M1	10,786	10,453	7,776	8,879	13,338	11,395	11,841	10,110	14,288	10,999	11,415	11,742
	M2	4,927	4,634	5,155	5,301	6,576	6,928	5,860	5,343	6,339	5,853	6,170	5,980
	M3	46,303	42,846	31,782	29,403	54,187	44,474	32,431	19,746	65,535	51,416	41,234	34,506
	M4	37,525	31,436	31,745	32,814	89,877	65,425	41,342	28,620	56,958	28,423	27,726	29,375
Sedimanter Kırıntılı Kayaç Türleri	S1	4,972	4,078	3,547	2,770	3,924	3,669	3,633	3,288	11,483	6,027	7,264	7,781
	S3	14,761	9,126	8,809	9,376	12,101	12,151	10,594	11,603	16,474	11,523	11,344	12,268
	S4	11,346	11,172	12,199	14,653	10,958	5,355	8,808	14,393	7,103	5,227	8,030	10,325
	S5	14,905	8,299	7,291	6,828	11,554	8,199	12,825	7,973	10,315	7,671	8,514	6,224
	S6	6,717	7,403	8,417	10,158	9,310	7,089	9,176	11,428	9,900	10,498	10,099	8,249
	S15	15,600	15,118	14,478	12,919	15,023	15,629	14,059	13,262	24,979	15,865	14,333	13,091
	S16	8,326	8,358	12,248	7,995	13,540	13,698	12,303	12,160	12,435	10,966	11,823	11,255
Sedimanter Karbonatlı Kayaç Türleri	S8	17,056	13,711	18,163	16,602	22,174	18,351	16,048	18,752	24,535	23,475	26,658	25,077
	S9	32,932	32,210	29,753	38,673	26,181	22,415	23,607	30,186	35,109	22,924	27,458	33,513
	SK1	43,688	36,940	40,397	56,657	36,477	36,310	35,119	45,652	45,867	34,495	41,378	47,533
	SK2	-	60,143	29,933	35,122	-	26,984	28,186	29,881	-	70,427	87,861	43,849
	SK3	13,935	12,462	14,010	12,668	20,377	17,021	15,269	13,228	21,342	15,770	13,688	12,456

SDE<sub>T</sub>: Teale 1965 yaklaşımına göre spesifik delme enerjisi

**Çizelge 4.3** Çalışmada kullanılan kayaç türlerinin mekanik spesifik delme enerjisi değerleri (Rabia 1982. 1985 yaklaşımı).

		SDE <sub>R</sub> (MJ/m <sup>3</sup> )											
		210 dev/dk				330 dev/dk				470 dev/dk			
Kayaç Kökeni	Kayaç Kodu	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg
Magmatik Kayaç Türleri	M1	5,662	4,536	4,662	4,804	4,205	4,785	5,031	4,766	5,371	4,850	4,938	5,318
	M2	2,522	3,378	3,593	3,557	3,547	3,804	4,138	3,060	3,039	3,173	3,646	3,713
	M3	10,760	11,691	8,954	8,315	12,592	10,935	9,689	6,401	15,229	14,497	12,252	11,466
	M4	9,069	8,577	8,420	9,481	18,101	17,851	10,966	9,057	17,206	7,755	9,137	10,552
Sedimanter Kırıntılı Kayaç Türleri	S1	2,755	3,160	2,986	2,941	2,981	3,635	3,750	4,483	1,692	1,307	1,507	1,723
	S3	6,667	4,295	4,361	3,782	7,319	6,510	5,872	4,979	6,647	6,086	5,876	6,430
	S4	2,343	2,285	2,630	3,329	1,989	1,796	3,063	3,270	2,239	1,905	2,985	3,843
	S5	10,982	6,881	6,498	6,215	8,512	6,192	9,685	6,020	7,789	7,723	7,588	5,588
	S6	4,521	4,832	4,686	3,867	4,213	3,538	4,013	4,990	7,871	8,071	6,462	5,897
	S15	2,480	2,610	2,762	2,769	2,521	2,592	2,548	2,555	4,079	3,441	3,316	2,900
Sedimanter Karbonatlı Kayaç Türleri	S16	1,602	1,794	2,466	1,731	2,211	2,633	2,230	2,412	2,210	2,620	2,771	2,801
	S8	4,893	5,507	5,791	6,286	7,024	5,741	6,208	7,092	7,388	7,604	8,122	9,490
	S9	5,479	5,402	5,531	8,219	3,920	3,916	4,545	5,849	6,185	4,577	5,921	7,614
	SK1	14,794	12,245	13,450	17,080	10,791	11,613	10,728	14,116	10,855	12,176	13,316	15,468
	SK2	-	20,654	9,259	10,263	-	20,518	8,208	9,659	-	34,471	42,569	20,518
SK3	10,267	8,783	9,522	8,861	10,613	10,138	10,249	9,352	12,165	9,528	9,303	8,195	

SDE<sub>R</sub>: Rabia (1982, 1985) yaklaşımına göre spesifik delme enerjisi



**Çizelge 4.4** Çalışmada kullanılan kayaç türlerinin elektriksel spesifik delme enerjisi değerleri.

		SDE <sub>E</sub> (MJ/m <sup>3</sup> )											
		210 dev/dk				330 dev/dk				470 dev/dk			
Kayaç Kökeni	Kayaç Kodu	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg
Magmatik Kayaç Türleri	M1	5,219	3,102	2,625	2,318	2,823	2,426	2,064	1,741	2,891	1,986	1,684	1,639
	M2	2,423	2,365	2,042	1,784	2,279	1,940	1,687	1,258	1,666	1,389	1,336	1,159
	M3	13,798	10,887	7,102	5,802	12,162	8,162	6,103	3,494	11,938	8,815	6,611	5,334
	M4	11,556	8,112	6,512	6,516	17,683	13,338	6,719	4,549	12,741	5,072	4,500	4,468
Sedimanter Kırıntılı Kayaç Türleri	S1	2,349	2,002	1,481	1,244	1,861	1,654	1,349	1,391	1,922	1,132	1,130	1,102
	S3	6,275	3,024	2,461	1,818	4,836	3,348	2,437	1,826	3,498	1,986	1,945	1,917
	S4	2,501	1,970	2,028	1,844	1,774	1,197	1,744	1,918	1,404	1,026	1,386	1,629
	S5	9,705	4,542	3,455	2,830	5,464	3,085	3,839	2,052	3,947	2,873	2,379	1,529
	S6	3,849	3,132	2,629	1,798	2,829	1,975	1,889	2,008	4,071	3,171	2,097	1,738
	S15	3,473	2,868	2,616	2,236	2,793	2,427	2,092	2,007	3,567	2,582	2,171	1,896
Sedimanter Karbonatlı Kayaç Türleri	S16	2,196	1,912	2,278	1,453	2,449	2,349	1,917	1,816	2,091	1,868	1,744	1,675
	S8	8,531	8,018	7,754	7,671	6,385	4,105	3,582	3,490	6,128	4,892	4,791	4,634
	S9	7,371	6,296	5,351	6,470	4,667	3,631	3,638	4,154	5,917	3,513	4,180	4,705
	SK1	17,803	11,340	10,224	11,371	9,787	8,399	6,699	7,714	7,847	7,211	6,764	7,094
	SK2	-	16,211	6,318	6,311	-	12,701	3,934	5,017	-	15,151	16,230	7,069
SK3	9,280	5,906	5,202	4,309	7,038	5,138	4,191	3,252	6,365	3,898	3,209	2,506	

SDE<sub>E</sub>: Elektriksel spesifik delme enerjisi



**Çizelge 4.5** Çalışmada kullanılan kayaç türlerinin ilerleme hızı değerleri.

		PR (m/h)											
		210 dev/dk				330 dev/dk				470 dev/dk			
Kayaç Kökeni	Kayaç Kodu	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg	50 kg	70 kg	90 kg	110 kg
Magmatik Kayaç Türleri	M1	0.44	0.73	0.92	1.06	0.86	1.01	1.25	1.51	0.87	1.41	1.70	1.94
	M2	1.13	1.17	1.41	1.70	1.22	1.54	1.79	2.75	1.90	2.45	2.68	3.22
	M3	0.23	0.30	0.49	0.63	0.29	0.46	0.65	1.20	0.33	0.48	0.68	0.90
	M4	0.28	0.41	0.52	0.55	0.21	0.29	0.58	0.83	0.30	0.86	0.95	0.98
Sedimanter Kırıntılı Kayaç Türleri	S1	1.02	1.27	1.74	2.10	1.40	1.57	1.97	2.02	2.72	4.89	5.22	5.43
	S3	0.37	0.78	0.98	1.37	0.52	0.80	1.15	1.54	0.75	1.17	1.47	1.54
	S4	1.27	1.74	1.83	1.72	2.12	3.41	2.55	2.50	2.82	4.25	3.35	3.14
	S5	0.26	0.58	0.77	0.98	0.51	0.96	0.79	1.52	0.75	1.05	1.33	2.18
	S6	0.88	1.14	1.14	1.51	0.91	1.44	1.66	1.61	0.75	1.03	1.64	2.08
	S15	0.98	1.26	1.48	1.76	1.40	1.79	2.27	2.65	1.26	1.87	2.37	3.08
Sedimanter Karbonatlı Kayaç Türleri	S16	1.59	1.91	1.72	2.92	1.65	1.87	2.69	2.92	2.19	2.55	2.99	3.44
	S8	0.50	0.60	0.72	0.81	0.50	0.83	1.06	1.12	0.63	0.85	0.83	1.03
	S9	0.52	0.67	0.84	0.70	0.97	1.35	1.49	1.41	0.87	1.58	1.46	1.42
	SK1	0.20	0.31	0.35	0.36	0.38	0.44	0.60	0.61	0.50	0.61	0.70	0.73
	SK2	-	0.18	0.51	0.56	-	0.24	0.82	0.82	-	0.21	0.22	0.55
	SK3	0.28	0.46	0.53	0.69	0.41	0.58	0.73	0.96	0.49	0.85	1.09	1.47

PR: ilerleme hızı

Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4 değerlendirildiğinde mekanik SDE'nin elektriksel SDE değerlerinden daha yüksek çıktığı görülmektedir. Yapılan delme deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan SDE değerleri incelendiğinde; sedimanter kırıntılı kayaç türlerinde S5 (orta taneli kumtaşı) örneği için diğerlerine göre daha yüksek spesifik delme enerjisi belirlenmiştir. Magmatik kayaç grubu içerisinde ise M1 ve M2 (andezitler) örneklerine nazaran M3 ve M4 (bazalt ve granit) örneklerinde yüksek spesifik delme enerjisi değerleri elde edilmiştir. Aynı şekilde karbonatlı kayaç grubu içerisinde yer alan SK1 ve SK2 (kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı) örneğinde yüksek spesifik delme enerjisi değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca, spesifik delme enerjisi yüksek çıkan kayaç örneklerinde yapılan ilerleme hızı değerleride diğer kayaç örneklerinde elde edilen sonuçlara göre karşılaştırıldığında oldukça düşük çıkmıştır.

Çalışmada kullanılan kayaçlar üzerinde 3 farklı dönme hızı/devir ve 4 farklı baskı koşulu altında gerçekleştirilen deneylerde makinanın boştaiken ve delme sırasında ölçülen devirleri arasındaki verim kaybı incelendiğinde oluşan farklar Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Çizelge 4.6'da görüldüğü üzere, delici uç ile kayaç etkileşimi sırasında %43'e varan dönme hızı/devir kayıpları oluşmaktadır.

**Çizelge 4.6** Delme deneyleri sırasında ölçülen dönme hızı/devir değerlerindeki düşüş.

Kayaç Kökeni	Kayaç Kodu	Dönme hızı/devir Kaybı (%)		
		Ortalama (%)	Mak. (%)	Min. (%)
Magmatik Kayaçlar	M1	23	31	15
	M2	20	26	13
	M3	30	37	23
	M4	30	36	23
Sedimanter Kırıntılı Kayaçlar	S1	18	42	2
	S3	23	32	17
	S4	29	37	20
	S5	18	25	11
	S6	14	23	1
	S15	35	45	26
Sedimanter Karbonatlı Kayaçlar	S16	32	40	22
	S8	27	37	19
	S9	35	43	24
	SK1	28	36	20
	SK2	20	27	11
	SK3	18	26	12

## 4.2. DENEY ÖRNEKLERİNİN HAZIRLANMASI

Araziden alınan kayaç örnekleri, Maden Mühendisliği Uygulamalı Kaya Mekaniği Laboratuvar'ına getirilmiştir. Gerek örneklerin alınmasında, gerekse laboratuvarda deneylerin yapılmasında Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (International Society of Rock Mechanics, ISRM) standartlarına uyulmuştur. Araziden alınan şekli düzgün olmayan kaya blokları üzerinde, tez kapsamında geliştirilen laboratuvar ölçekli döner delik delme seti kullanılarak delme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deney seti, kayaçların delinebilirliği üzerine çalışmalar yapmak üzere karot alma makinasının yeniden tasarımı ile geliştirilmiştir. Delici uç olarak elmas uçlu ve karotlu NX tipi karotiyer kullanılmıştır. Böylece, delik delme çalışmaları esnasında hem delinebilirlik parametreleri ölçülebilmekte hem de delinen deliklerden alınan örnekler üzerinde kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilebilmektedir. Örnek hazırlama aşamasında, tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı deneylerinde kullanılan örneklerin alt ve üst yüzeyleri ISRM (1980) standardına göre hazırlanmıştır. Karot örneklerinin, dayanım deneylerinde kullanılabilmesi için uygun boyutlarda taş kesme makinalarında kesilerek (Şekil 4.10a) kaba düzeltmeleri yapılmıştır. Kayaç örneklerinin ince yüzey düzeltmeleri yüzey düzeltme makinalarıyla yapılmıştır (Şekil 4.10b). Çalışma kapsamında 16 farklı kayaç türü üzerinde yürütülen delme deneylerinden elde edilen karot örnekleri boyutlandırılmış ve yüzeyleri standartlara uygun olarak düzenlenerek Şekil 4.11'de sunulmuştur.

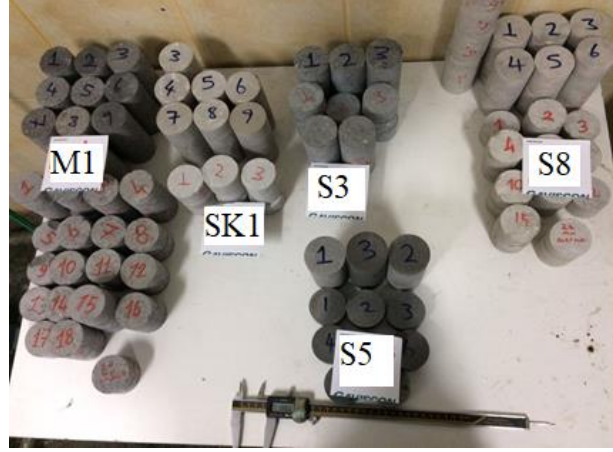


a)Taş kesme makinesi



b)Yüzey düzeltme makinesi.

**Şekil 4.10** Kayaç örneklerini kesme ve yüzeylerini düzeltme makinaları. a.Taş kesme makinesi b.Yüzey düzeltme makinesi.



Şekil 4.11 Boyutlandırılmış ve yüzeyleri standartlara uygun karot örnekleri.

### 4.3. KAYAÇ ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

#### 4.3.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Fiziksel özellikler kapsamında tüm kayaç türlerinin yoğunlukları belirlenmiştir. Bu amaçla, ilk olarak karot şeklinde hazırlanan örneklerin boyutları ölçülmüş ve sonrasında ortalamaları alınarak hacimleri belirlenmiştir. Daha sonra ise numuneler kütlelerinin belirlenmesi için tartılmıştır. Elde edilen bu iki büyüklüğün oranından kayaçların yoğunlukları tespit edilmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7 İncelenen kayaçların yoğunlukları.

Kayaç kodu	Kayaç Adı	Yoğunluk d (kN/m <sup>3</sup> )	Kayaç kodu	Kayaç Adı	Yoğunluk d (kN/m <sup>3</sup> )
M1	Porfirik Bazaltik Andezit	23.5	S15	Kumtaşı	25.4
M2	Porfirik Bazaltik Andezit	22.3	S16	Kumtaşı	26.2
M3	Bazalt	28.3	S8	Kireçtaşı/Mermer	26.5
M4	Granit	26.0	S9	Dolomit/Mermer	26.9
S1	Kuvarslı Kumtaşı	22.2	SK1	Kireçtaşı	26.9
S3	İri Taneli Kumtaşı	26.1	SK2	Dolomitik Kireçtaşı	27.1
S4	İri Taneli Kumtaşı	24.8	SK3	Dolomit	27.2
S5	Orta Taneli Kumtaşı	25.7			
S6	İnce Taneli Kumtaşı	26.4			

d: yoğunluk

### 4.3.2. Kayaçların Mekanik Özellikleri

Kayaçların dayanımları tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımı deneyleri yapılarak bulunmuştur.

#### 4.3.2.1. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Bu deney, silindirik şekilli kayaç örneklerinin tek eksenli basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Deneysel çalışmalarda ISRM (1979) tarafından önerilen yöntem izlenmiştir. ISRM (1979) tarafından önerilen yükseklik/çap oranının, (H/D) 2.5 – 3.0 arasında olması istenirken, ASTM (1972) standartına göre bu oranın 2.0 – 2.5 olması önerilmektedir. Bu çalışmada H/D oranı 2.0 – 2.5 olacak şekilde örnekler hazırlanmıştır. Her kaya tipi için deney 5 kez tekrarlanmıştır. Deney, Uygulamalı Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan hidrolik preste ve ortalama 1 MPa/sn yükleme hızında yapılmıştır (Şekil 4.12). Deney sonuçlarından kayaç örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı Eşitlik 4.1'den bulunmuştur. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi amacıyla Çizelge 4.8'de ISRM (1980) tarafından önerilen  $\sigma_c$ 'ye göre kaya malzemesine ait sınıflandırma sistemi sunulmuştur.

$$\sigma_c = 4000 * F^1 / \pi * D^2 \quad (4.1)$$

Burada;

$\sigma_c$ : Tek eksenli basınç dayanımı, (MPa)

F<sup>1</sup>: Yenilme anında kaydedilen yük, (kN)

A: Silindirik örneğin kesit alanı

D: Örnek çapı (mm)'dir.



Şekil 4.12 Tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımı deneyinde kullanılan pres.

**Çizelge 4.8** ISRM (1979) tarafından önerilen  $\sigma_c$ 'ye göre kaya malzemesinin tanımlanması.

<b>Tek eksenli basınç dayanımı (<math>\sigma_c</math>)(MPa)</b>	<b>Dayanım sınıfı</b>
<6	Çok Düşük
6-20	Düşük
20-60	Orta
60-200	Yüksek
>200	Çok yüksek

#### 4.3.2.2. Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyi

Bu deney, disk şeklinde hazırlanmış kayaç örneklerinin çapsal yükleme altında çekme dayanımlarının dolaylı olarak tespiti için (Şekil 4.13), ISRM (1978) tarafından önerilen bir dayanım deney yöntemidir. Bu deney yönteminde prensip, yükleme basınç olmasına rağmen örneğin kırılması merkezinde oluşan yatay çekme gerilmesine dayanmaktadır (Gerçek 2008).



**Şekil 4.13** Dolaylı çekme deney aleti.

Yapılan deneylerde H/D oranı 0.5 olacak şekilde örnekler hazırlanmış, örneklerin alt ve üst yüzeyleri kabaca düzeltilmiştir. Her bir kaya örneği için 10'ar adet deney yapılmıştır. Örnek kalınlıkları çapın yarısı (yaklaşık 27 mm) olacak şekilde hazırlanmıştır. Örnek üzerine uygulanan yük, sabit bir hızda ve en zayıf kayaçta dahi yenilmeyi 15-30 s arasında ve yükleme hızı 200 N/s olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Dolaylı çekme dayanımı değeri Eşitlik 4.2'den hesaplanmıştır.

$$\sigma_t = 0.636 * \frac{F^I}{Dt} \quad (4.2)$$

Burada;

$\sigma_t$ : Tek eksenli çekme dayanımı, (MPa)

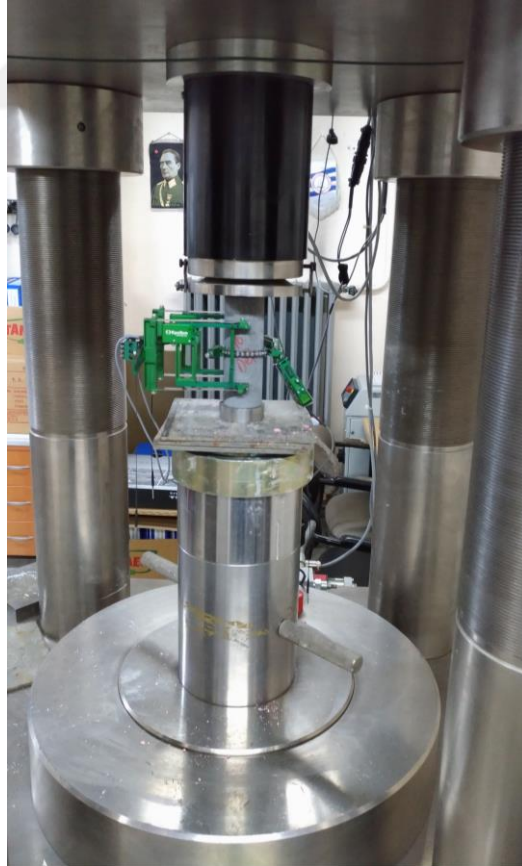
$F^I$ : Yenilme anında kaydedilen maksimum yük, (N)

D: Deneş örneğinin çapı, (mm)

t: Örneğın kalınlığı, (mm)

#### 4.3.2.3. Deformabilite Deneyi

Çalışma kapsamında ISRM (1979) tarafından önerilen yöntem temel alınarak, silindirik şekilli sağlam kayaç karot örneklerinin tek eksenli yükleme koşulunda “gerilim-birim deformasyon” eğrilerinin çizilmesi ve Elastisite modülü (E) ile Poisson oranının ( $\nu$ ) tayini amacıyla yapılan bir deneş yöntemidir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Deformabilite deneşinde kullanılan deneş aleti.



Eksenel birim deformasyon ( $\epsilon_l$ ) ve çapsal birim defosmasyon ( $\epsilon_d$ ), kullanılan cihazın türüne bağlı olarak, doğrudan birim defosmasyon göstergesinden veya deformasyon okumalarından hesaplanarak belirlenir. Eksenel birim deformasyon Eşitlik 4.3' ten hesaplanır.

$$\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.3)$$

Burada;

$\Delta l$ : Örneğin ekseni boyunca uzunluktaki değişim

$l_0$ : Deney öncesi örneğin orjinal eksenel boyu

Çapsal birim deformasyon ( $\epsilon_d$ ), örnek çapındaki değişim ölçülerek Eşitlik 4.4'ten hesaplanır.

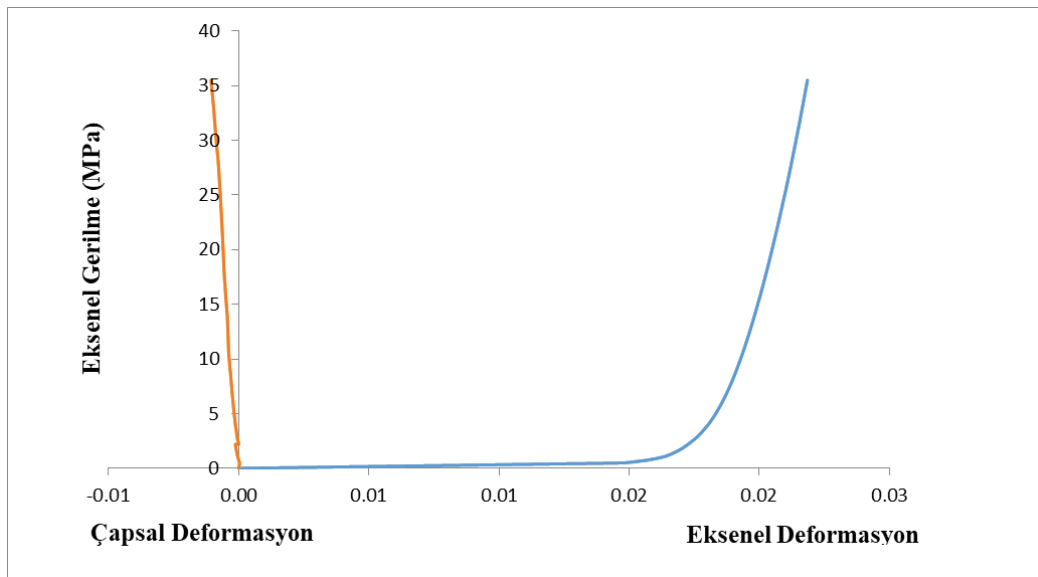
$$\epsilon_d = \frac{\Delta D}{D_0} \quad (4.4)$$

Burada,

$\Delta D$ : Çaptaki değişim

$D_0$ : Örneğin deney öncesindeki çapı

Yükleme işleminin farklı aşamalarında alınan okumalara göre Eşitlik 4.3 ve 4.4'e göre hesaplanmış değerler kullanılarak grafikleri çizilir (Şekil 4.15)



Şekil 4.15 Çapsal ve eksenel gerilim-birim deformasyon grafikleri.



Poisson oranı ( $\nu$ ) aksel yüklemeye koşulunda Eşitlik 4.5 ve 4.6 ifadelerinden hesaplanır.

$$\nu = \frac{\text{Çapsal birim deformasyon}}{-\text{Eksenel birim deformasyon}} \quad (4.5)$$

$$\nu = \frac{E}{-\text{Çapsal eğrinin eğimi}} \quad \text{veya} \quad \nu = \frac{\varepsilon_d}{-\varepsilon_l} \quad (4.6)$$

Yapılan tek aksel basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve deformabilite deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.9’da sunulmuştur. Ayrıca Çizelge 4.6’da, kayaç mekanik özelliklerine bağlı olarak hesaplanan birim deformasyon enerjisi (Eşitlik 3.6) değerleri de verilmiştir.

**Çizelge 4.9** Kayaçların mekanik özellikleri ve  $SDE_{DW}$  değerleri.

Kayaç Kodu	Kayaç Adı	$\sigma_c$ (MPa)	Sınıfı	$\sigma_t$ (MPa)	E (GPa)	$\nu$	$SDE_{DW}$ (kJ/m <sup>3</sup> )
M1	Porfirik Bazaltik Andezit	74±17	Yüksek	9.4±0.90	33	0.16	83
M2	Porfirik Bazaltik Andezit	90±13	Yüksek	7.7±1.39	20	0.29	203
M3	Bazalt	139±40	Yüksek	10.7±1.84	100	0.18	97
M4	Granit	98.5±10	Yüksek	8.4±1.3	-	-	-
S1	Kuvarslı Kumtaşı	82±6.54	Yüksek	2.9±0.94	23	0.26	146
S3	İri Taneli Kumtaşı	104±15	Yüksek	8.4±0.8.4	26	0.21	208
S4	İri Taneli Kumtaşı	56±16	Orta	3.2±0.83	13	0.18	121
S5	Orta Taneli Kumtaşı	84±15	Yüksek	9.4±0.8	33	0.1	107
S6	İnce Taneli Kumtaşı	77±10	Yüksek	10.9±1.83	-	-	-
S15	Kumtaşı	148±28	Yüksek	6.68±1.66	38	0.19	288
S16	Kumtaşı	75±11.49	Yüksek	6.8±1.72	44	0.13	64
S8	Kireçtaşı/Mermer	123±11	Yüksek	9.6±0.71	35	0.2	216
S9	Dolomit/Mermer	64±15	Yüksek	7.1±1.57	82.5	0.29	25
SK1	Kireçtaşı	89±16	Yüksek	8.4±2.60	27	0.12	147
SK2	Dolomitik Kireçtaşı	97±19	Yüksek	8±2	96	0.25	49
SK3	Dolomit	105±18	Yüksek	9.4±2.76	80	0.34	71

$\sigma_c$ : tek aksel basınç dayanımı,  $\sigma_t$  dolaylı çekme dayanımı, E: elastisite modülü,  $\nu$ : poisson oranı ve  $SDE_{DW}$ : birim deformasyon enerjisi.

Çizelge 4.9’da verilen kayaçların mekanik özellikler incelendiğinde, S4 örneği orta dayanım sınıfında yer alırken diğer kayaç türleri yüksek dayanımlı kayaç sınıfında yer almaktadır. En yüksek basınç dayanımı değeri S15 (148 MPa) örneğinde, en düşük dayanım ise S4 (56 MPa) örneği olarak belirlenmiştir. Kayaçların çekmeye karşı olan dayanımları incelendiğinde ise en yüksek değerler M3 (10.7 MPa) ve S6 (10.9 MPa) örnekleri için elde edilmiştir. En düşük çekme dayanım değerleri ise S1 (2.9 MPa) ve S4 (3.2 MPa) örneklerinde olduğu Çizelge 4.6’da gösterilmiştir. Tüm kayaçlar için çekme dayanımları 2.9 – 10.9 MPa arasında değişmektedir. Çalışmada kullanılan kayaçların deformabilite özellikleri incelendiğinde ise, en yüksek elastisite modülü değeri M2 örneğinde elde edilmiştir. Tüm kayaçlar birlikte değerlendirildiğinde, elastisite modülü değerleri 13 – 100 GPa arasında değişmektedir. Kayaçların poisson oranlarının ise 0.1 ile 0.34 arasında değiştiği belirlenmiştir.

### **4.3.3. İndeks Deneyleri**

Bu çalışmada indeks deneyi olarak Delme oranı indeksi (DRI), Cerchar aşınma indeksi (CAI) ve Equotip sertlik (ESD) deneyleri yapılmıştır.

#### **4.3.3.1. Delme Oranı İndeksi (DRI)**

Kayaçların delinebilirliğinin belirlenmesinde kullanılan delme oranı indeks deneyi, standart bir deney yöntemi olarak kayaçların kırılma değeri (S20) ve Sievers minyatür delme (SJ) deneylerinden elde edilen verilerin diyagramda kesiştirilmesiyle elde edilmektedir. Delme oranı indeksi, Bölüm 2.8’de ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Bu bölümde, çalışmada kullanılan 16 kayaç türü için elde edilen sonuçlar ve DRI sınıflamaları verilmiştir (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10 incelendiğinde, en yüksek S20 değeri S1 ve S4 kayaçlarında elde edilirken en düşük değer ise S6 kayacında elde edilmiştir. SJ değerleri incelendiğinde ise, M1 ve S4 kayacında en delme değerlerine ulaşılmıştır. SJ’nin en düşük olduğu değerler M3, S3 ve S15 kayaçlarında belirlenmiştir. Elde edilen SJ ve S20 sonuçları diyagramda kesiştirildiğinde DRI değerlerine ulaşılmış ve önerilen sınıflama sistemi göz önünde bulundurularak kayaçlar sınıflandırılmıştır. Bu kapsamda, S1 ve S4 kayaçlarının en yüksek DRI (sırasıyla 85 ve 86) değerlerine sahip olduğu görülürken, S6 ve M3 (sırasıyla 32 ve 35) kayaçlarının ise en düşük DRI değerine sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.10).

**Çizelge 4.10** Kayaçların delme oranı indeks deney (DRI) sonuçları değerleri ile sınıflaması.

Kayaç Kodu	Kayaç Adı	SJ	S20	DRI	Sınıfı
M1	Porfirik Bazaltik Andezit	100.6±4	44	56	Orta
M2	Porfirik Bazaltik Andezit	64±3.6	51	61	Yüksek
M3	Bazalt	3.6±1.1	41	35	Düşük
M4	Granit	6.90±1.4	55	52	Orta
S1	Kuvarslı Kumtaşı	60±40	76	85	Oldukça Yüksek
S3	İri Taneli Kumtaşı	27±30	64	69	Yüksek
S4	İri Taneli Kumtaşı	95.8±3.7	76	86	Oldukça Yüksek
S5	Orta Taneli Kumtaşı	84.9±1.9	44	54	Orta
S6	İnce Taneli Kumtaşı	85.4±2	22	32	Çok Düşük
S15	Kumtaşı	16±1.5	54	56	Orta
S16	Kumtaşı	79±0.44	42	53	Orta
S8	Kireçtaşı/Mermer	66.5±4.4	44	64	Yüksek
S9	Dolomit/Mermer	56±5	57	66	Yüksek
SK1	Kireçtaşı	68.9±4.9	48	57	Orta
SK2	Dolomitik Kireçtaşı	60±5.4	42	52	Orta
SK3	Dolomit	68±12	49	60	Yüksek

SJ: sievers minyatür delme, S20: kırılgenlik indeksi ve DRI: delme oranı indeksi

#### 4.3.3.2. Kayaçların Aşındırıcılığı

DIN 50320'e göre aşınma, mekanik hareket boyunca bir katı cismin yüzeyinde gerçekleşen malzeme kaybı olarak tanımlanmıştır (Zum Gahr 1987). Kazı mekaniği açısından bakıldığında ise aşınma, kazı esnasında kayaçların delici uç tarafından buldukları yerden koparılması sırasında meydana gelmektedir. Kazı esnasında uç ile kayacın teması neticesinde uç üzerinde aşınma meydana gelmektedir. Benzer şekilde, delici ucun etkisi ile kaya ve zemin ortamında da malzeme kaybı yaşanmakta ve mevcut ortamda da aşınma oluşumu gerçekleşmektedir. (Deketh 1995). Tamrock (1999) aşınmayı, çalışma yüzeyinden veya bir numunenin yüzeyinde ucun gezdirilmesi sonucunda meydana gelen malzeme hareketi ya da başka bir tabirle, ucun mevcut ortamda hareket ettirilmesi sonucunda ucun ömrünün kılmasına neden olan bozulma olarak tanımlamıştır. Atkinson (1993) göre aşınma, kazı esnasında kayacın delici uçlar tarafından buldukları yerden koparılması sırasında meydana gelmektedir. Aşınma işlemi

özellikle madencilik, delme ve tünelticilik uygulamalarında delici uçta, katı bir yüzeyden malzemenin taşınması veya yer değiştirmesi şeklinde meydana gelmektedir.

Delici uçtaki aşınmanın; makinanın ilerleme hızı, uygulanan baskı ve dolayısıyla da harcanan enerji sarfiyatında önemi bir yeri vardır. Çalışılacak kayaç biriminin ya da formasyonun delinebilirliğe uygun olup olmadığının değerlendirilmesinde, kayaçın aşındırıcılığı ile SDE değeri arasındaki ilişki oldukça önemlidir. Aşındırıcılığı yüksek kayaç, uç sarfiyatının artmasına, verimsiz kazıya ve aşırı titreşimlerin olmasına sebep olmaktadır (Tiryaki 2008).

Kayaçla devamlı temasta olan herhangi bir uç, bir süre sonra aşınmakta ve kullanılmaz hale gelmektedir. Uç masraflarının tüm kazı maliyetinin 1/3'üne vardığı durumlara da rastlanmaktadır (Bilgin 1982). Bu nedenle, bir delme sistemi tasarımı yapılmadan, deliklerin delineceği formasyonun mekanik ve petrografik özelliklerinin bilinmesi ve ne kadar uç harcanacağı tahmin edilerek makine tipinin iyi tespit edilmesi gerekmektedir (Yaralı 2005).

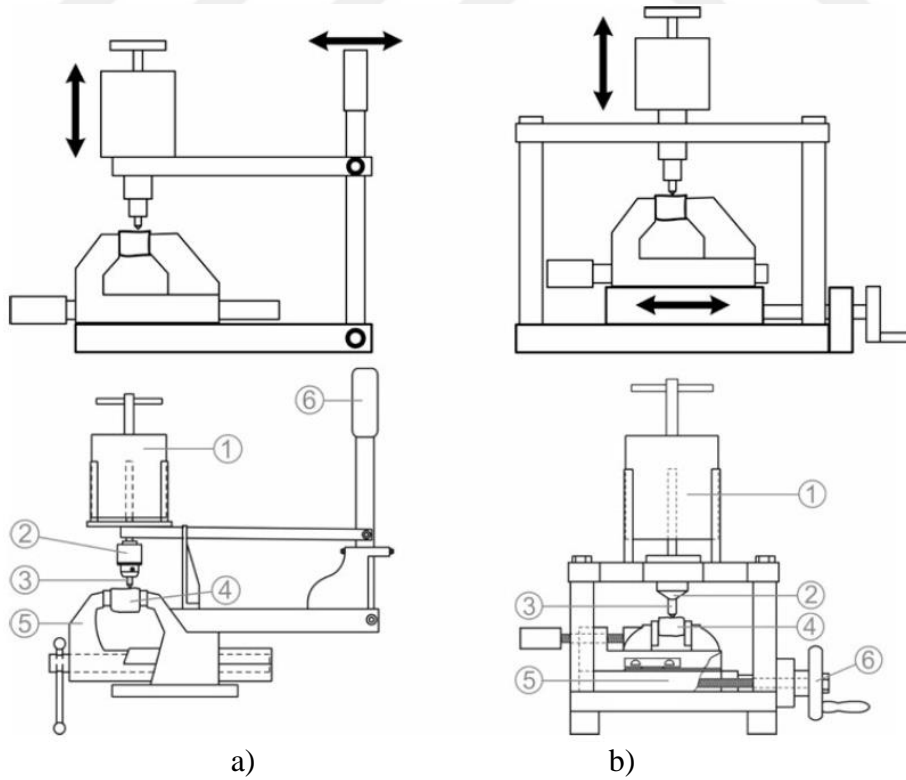
Yüksek aşındırıcı özelliğe sahip kayaç türleri, kısa zamanda uçların körlenmesine neden olmaktadır. Bu durum, bir yandan uç tüketimini artırmakta, diğer yandan delme verimini düşürmekte ve dolayısı ile delme maliyetinin artmasına yol açmaktadır (Yaralı 2005).

Aşınmanın belirlenebilmesi için çeşitli test yöntemleri ve standartlardan yararlanılmaktadır. Tüm bu yöntem ve standartlar ortaya konulduğunda çok geniş bir ölçekte karşımıza çıkmaktadır. Aşınmanın belirlenmesinde uygulanan tüm yöntemler birbirlerinden bağımsız olarak kendi için de farklı etkenleri hesaba katmaktadır (Plinninger 2010).

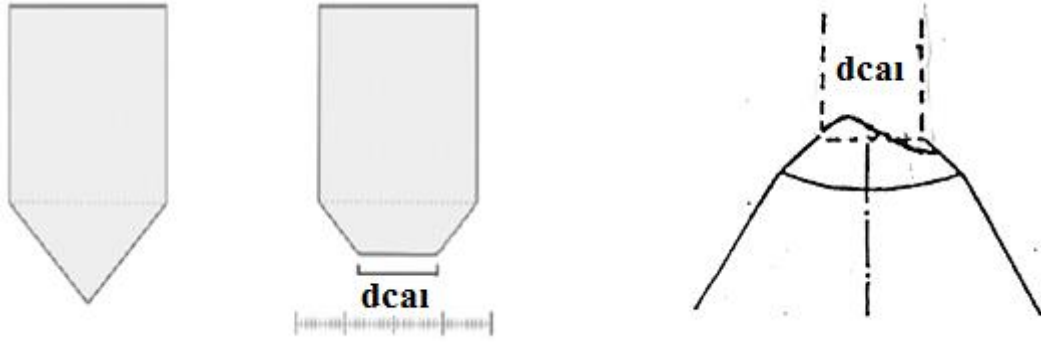
Basitçe kayaç ya da zemin numuneleri kullanılarak laboratuvarlarda yapılan deneylerden elde edilen aşınma değerleri, oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Kayaçların aşındırıcılıklarının belirlenmesine yönelik birçok deney yöntemi önerilmiş olmasına rağmen kabul görmüş deney yöntemi oldukça az sayıdadır. Son yıllarda Cerchar Aşınma İndeks (CAI) deneyi bir projede delici uç aşınmalarının ve uç değişim maliyetlerinin doğru tahmin edilmesinin ekonomik öneminden dolayı dikkate değer bir önem kazanmıştır. CAI deneyi özellikle Batı Avrupa'daki kaya mekaniği laboratuvarlarında sert kayaçların aşındırıcılıklarının belirlenmesinde oldukça yaygın kullanılan bir deney yöntemidir (Yaralı vd. 2008). Ayrıca ZBEÜ Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Laboratuvar altyapısı CAI deneyinin yapılabilmesi için uygun ekipman ve donanım imkanı sağlamaktadır.

Cerchar aşınma indeksi deneyi, kömür madenciliği uygulamaları için ilk olarak Fransa'da Cerchar Araştırma Enstitüsü (Research Institute Cerchar of the Charbonnages de France)'nde 1971 yılında bulunmuş ve sonuçlar Valantin (1973) tarafından yayınlanmıştır. Kayaçların aşındırıcılığının belirlenmesinde Cerchar aşınma deneyi ve indeks değeri önemli bir yer tutmaktadır (Atkinson 1993, Dipova 2012).

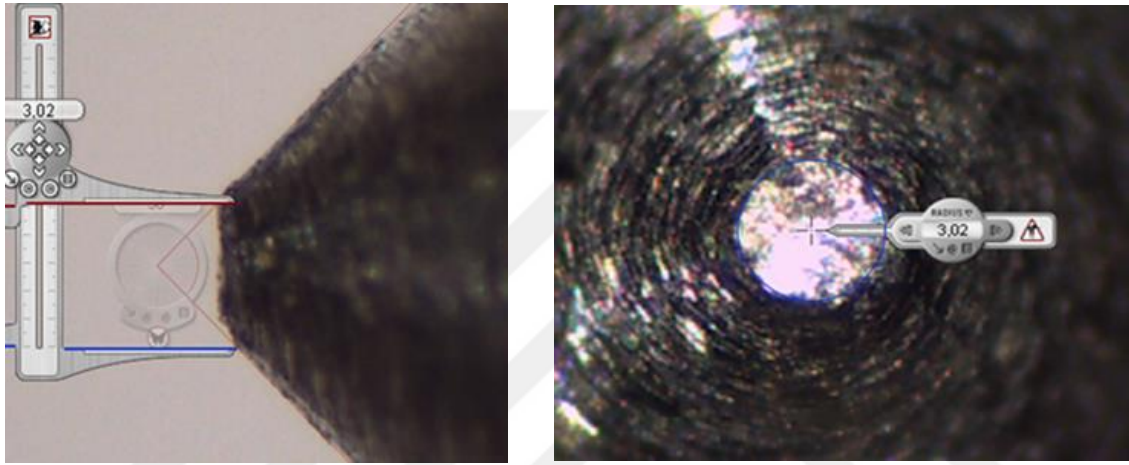
Alber vd. (2014), CAI deneyini; birinci nesil (klasik) deney aleti (Şekil 4.16 a) için  $1\pm 0.5$  saniye ve ikinci nesil (West) deney aleti (Şekil 4.16 b) için ise  $10\pm 2$  saniye süresince, 70 N'luk statik yük altında,  $2000 \text{ N/mm}^2$  çekme dayanımına sahip standart krom vanadyum alaşımli soğuk iş takım çeliğinden Rockwell sertliği  $55\pm 1$  olan ve  $90^\circ$  tepe açılı konik bir ucun, taze kırılmış bir kayaç yüzeyinde 10 mm çekilmesi şeklinde gerçekleştirilen deney yöntemi olarak tarif etmiştir. Bu deney her seferinde yeni uçlar kullanılarak farklı yönlerde veya bir yönde birkaç kez (genellikle beş çizik) tekrarlanır. Bu deney iki deney aletinden biri kullanılarak yapılır. CAI deneyinde kullanılan konik uç, mikroskop altında incelenerek uçtaki aşınma yüzeyinin çapı ( $d_{ca}$ ) 0.1 (1/10) mm hassasiyetinde ölçülür (Şekil 4.17 ve 4.18). Tespit edilen aşınma miktarı kayacın aşındırıcılığı olarak kabul edilir.



**Şekil 4.16** Orjinal CAI deney aleti (a) ve West deney aleti (b) çalışma prensibi (Alber vd. 2014).



**Şekil 4.17** Konik uçtaki aşınma yüzey çapının ölçümü (Thuro and Plinninger 1998).



**Şekil 4.18** Aşınmış uçların bilgisayar destekli 35 büyütme bioküler mikroskop altında ölçümünden bir örnek.

Günümüzde, Cerchar aşınma indeks deneyi için Cerchar (1986), ASTM (2010) ve Alber vd. (2014) tarafından önerilen aşındırıcılık sınıflamaları Çizelge 4.11, 4.12 ve 4.13'te sunulmuştur.

**Çizelge 4.11** Cerchar (1986) tarafından önerilen sınıflaması.

Cerchar Aşınma İndeks Değeri	Sınıfı
0.3 – 0.5	Çok az aşındırıcı
0.5 – 1.0	Biraz Aşındırıcı
1.0 – 2.0	Orta aşındırıcı
2.0 – 4.0	Çok aşındırıcı
4.0 – 6.0	Oldukça fazla aşındırıcı

**Çizelge 4.12** ASTM (2010) tarafından önerilen aşındırıcılık sınıflaması.

Sınıfı	Ortalma CAI
Çok düşük aşınma	0.30–0.50
Düşük aşınma	0.50–1.00
Orta aşınma	1.00–2.00
Yüksek aşınma	2.00–4.00
Oldukça fazla aşınma	4.00–6.00
Kuvars	6.00–7.00

**Çizelge 4.13** Alber vd. (2014) tarafından önerilen aşındırıcılık sınıflaması.

Cerchar Aşınma İndeksi	Sınıfı
0.1 – 0.4	Hiç ya da oldukça az aşındırıcı
0.5 – 0.9	Çok az aşındırıcı
1.0 – 1.9	Az aşındırıcı
2.0 – 2.9	Orta
3.0 – 3.9	Yüksek aşındırıcı
4.0 – 4.9	Çok yüksek aşındırıcı
≥ 5	Aşırı aşındırıcı

Bu çalışmada yer alan 16 kayaç türüne ait CAI değerleri ZBEÜ Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Laboratuvarı'nda bulunan West tam otomatik deney aleti (Şekil 4.19) ile bilgisayar destekli 35 kat büyütme bioküler mikroskop kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4.20).



**Şekil 4.19** West tam otomatik Cerchar aşınma indeksi deney aleti.



**Şekil 4.20** Bilgisayar destekli mikroskop ile yapılan görüntüleme sistemi.

Çizelge 4.14'te, Alber vd. (2014)'e göre yapılan Cerchar aşınma indeks deneylerinden elde edilen değerler ve sınıflaması gösterilmiştir. Buna göre, en yüksek aşınma değerleri S3 (3.75) ve M4 (3.78) örneklerinde ve en düşük aşınma değerleri ise S8 (0.80) ve SK2 (0.82) örneklerinde olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.14** Çalışmada kullanılan kayaçların CAI değerleri ve sınıfı.

<b>Kayaç Kodu</b>	<b>Kayaç Adı</b>	<b>CAI</b>	<b>Sınıfı</b>
M1	Porfirik Bazaltik Andezit	3.09±0.24	Yüksek
M2	Porfirik Bazaltik Andezit	1.61±0.47	Düşük
M3	Bazalt	2.50±0.10	Orta
M4	Granit	3.78±0.11	Yüksek
S1	Kuvarslı Kumtaşı	3.32±0.14	Yüksek
S3	İri Taneli Kumtaşı	3.75±0.30	Yüksek
S4	İri Taneli Kumtaşı	2.28±0.42	Orta Aşındırıcı
S5	Orta Taneli Kumtaşı	2.72±0.54	Orta Aşındırıcı
S6	İnce Taneli Kumtaşı	1.09±0.12	Düşük
S15	Kumtaşı	3.26±0.55	Yüksek
S16	Kumtaşı	1.48±0.22	Düşük
S8	Kireçtaşı/Mermer	0.80±0.28	Çok Düşük
S9	Dolomit/Mermer	1.20±0.12	Düşük
SK1	Kireçtaşı	1.10±0.31	Düşük
SK2	Dolomitik Kireçtaşı	0.82±0.7	Çok Düşük
SK3	Dolomit	1.57±0.13	Düşük

CAI: Cerchar aşınma indeksi



#### 4.3.3.3. Kayaçların Sertliği

Kayaçların en önemli indeks özelliklerinden biri olan kayaç sertliği, ISRM (1978) tarafından önerilen batma deneyleri (Brinell, Rockwell C, Vickers, Knoop), geri sıçrama mekanizmalı sertlik deneyleri (Shore, Schmidt, Equotip) ve çizme sertlik deneyleri (Mohs) yöntemlerinin uygulanması yoluyla belirlenebilmektedir. Batma deney yöntemleri ucun kayaç içerisine batma mesafesi ya da batma süresini dikkate almakta, çizme deney yöntemleri ise kayaç sert bir cisimle çizilmektedir. Geri sıçrama mekanizmalı sertlik deneyleri ise daha çok ucun düşey düzlemde kayaç yüzeyine serbest düşüşü ve kayaç ile temasına bağlı olarak geri sıçrama değerinin ya da süresinin ölçülmesi yoluyla belirlenebilmektedir (Su 2017). Kayaç sertliğinin belirlenmesi amacıyla kullanımı kolay olan Shore sertliği ve Schmidt sertliği deney yöntemleri kaya mekaniği uygulamalarında oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Ancak bu iki yöntemin kendi içlerinde sahip oldukları bazı sınırlamalar mevcuttur. Shore sertliği laboratuvar koşulları için uygun olmak ile birlikte arazi çalışmaları için elverişli bir deney aleti değildir. Schmidt sertlik deney aleti ise hem arazi hem de laboratuvar koşullarında kullanım alanına sahip bir deney aleti olmak ile birlikte yüksek darbe enerjisine sahip olması nedeniyle özellikle zayıf, ayrışmış ve ufalanabilir – kırılğan kaya malzemelerinin sertliğinin belirlenmesi için uyumlu değildir. Ayrıca zayıf kayaçlar üzerinde Schmidt sertlik deneyi uygulaması sırasında ucun kayaç içine batması nedeniyle alınan değerler tam doğru sonuçları yansıtmayabilmektedir. Bu çalışma kapsamında kayaçların sertliklerinin belirlenmesinde, Schmidt ve Shore sertlik yöntemleriyle aynı çalışma prensibine sahip olan ve günümüzde uygulaması giderek yaygınlaşan Equotip sertlik yönteminden yararlanılmıştır. Equotip sertlik deney (ESD) aleti, 1975'te İsveçli araştırmacı Dietmar Leeb tarafından metaller için geliştirilen bir deney olmak ile birlikte son yıllarda kayaçlar üzerinde de kullanılmaya başlanmıştır. ESD aletinin en önemli özelliği, küçük bir darbe enerjisine sahip olup daha ufak yüzeyler üzerinde çalışılabilme imkanı vermesidir. Böylece, sağlam yüzeyler olduğu kadar daha hassas ve zayıf yüzeyler üzerinde de çalışma imkanı sağlanabilmektedir. ESD, zayıf malzeme koşulları için de kullanılabilir olması ve anlamlı sonuçlar vermesi nedeniyle oldukça geniş bir aralıkta malzeme ve kayaç sertliğinin ölçülmesinde kullanılabilir (Aoki ve Matsukura 2007, Yılmaz 2013, Yılmaz ve Göktaş 2018). Grima ve Babuska (1999) 226 kayaç örneği üzerinde yapmış oldukları çalışma kapsamında 5 – 280 MPa'lık aralıkta ESD ile sertlik tayini gerçekleştirmiş ve farklı dayanıma sahip kayaçlar üzerinde deney aletinin kullanılabilirliğini belirlemişlerdir.

Equatip deney aleti, sahip olduğu uç genişliği ve darbe enerjisine bağlı olarak kendi içinde C, D, DC, DL, E, G ve S tip olarak sınıflandırılmaktadır. Deney aletinin içerisinde yer alan yaylı mekanizmanın ucunda 3 mm çapında tungsten karbid bir ucun yer aldığı ve 11 Nmm'lik darbe enerjisine D tipi deney aleti Şekil 4.21'de gösterilmiştir (Su 2017).



**Şekil 4.21** Equatip sertlik ler.

Şekil 4.21'de de görüldüğü üzere ESD; taşınabilir, elektronik batarya ile çalışan ve oldukça kullanışlı bir deney aletidir. Deney aletinde alınan değerler enerjinin ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Deney sırasında, darbe ve geri sıçrama hareketinde bulunan yaylı mekanizmanın ucuna yerleştirilmiş olan kalıcı mıknatısın bir bobin içerisinden geçirilmesiyle elektriksel gerilim (voltaj) oluşmaktadır. Oluşan bu voltaj hız ile orantılıdır. Deney sırada, kayaç yüzeyinde deformasyona bağlı olarak oluşan enerji ve yerçekimi etkisini minimumda tutmak için darbe ve geri sıçrama hızları örnek yüzeyinden 1 mm yukarıda ölçülmektedir. ESD ile sertlik değerinin ( $H_L$ ) tayini, ucun geri sıçrama hızının ( $V_r$ ) darbe hızına ( $V_i$ ) oranına bağlı olarak belirlenebilmektedir (Eşitlik 4.7). Hız-zaman grafiği zaman bağlı olarak Şekil 4.22'de gösterilmiştir. ESD sırasında yumuşak kayaçlarda düşük hızlar gözlenirken, daha sert kayaçlar göz önünde bulundurulduğunda yk hız değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir (Yılmaz 2013, Su 2017, Yılmaz ve Göktan 2018).

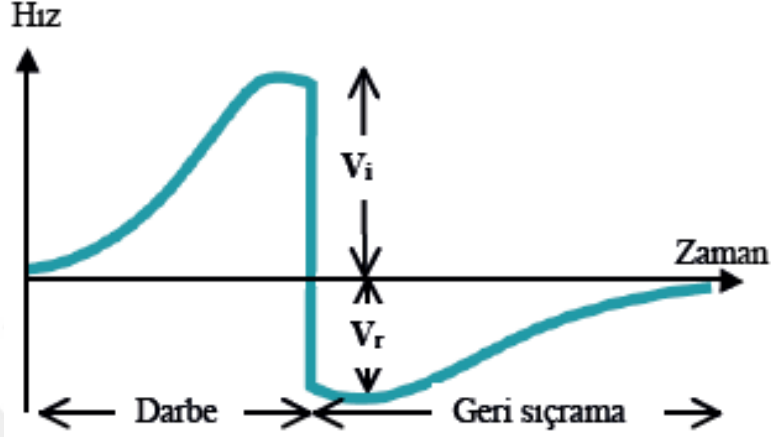
$$H_L=(V_r/V_i)1000 \quad (4.7)$$

Burada;

$H_L$ : Equotip sertlik değeri

$V_r$ : ucun geri sıçrama hızı ve

$V_i$ : ucun darbe hızı



Şekil 4.22 Equatip sertliği hız – zaman grafiği (Proceq 2013).

Literatürde, ESD için spesifik bir uygulama yöntemi olmaması ile birlikte farklı araştırmacılar tarafından önerilen dört farklı sertlik ölçüm yöntemi göz önünde bulundurulmaktadır (Yılmaz 2013):

- Birinci yöntem; her noktadan tek okuma olacak şekilde kayaç yüzeyinden alınan 20 ölçümün ortalamasının alınmasıyla sertlik değerinin belirlenmesi (Altındağ ve Güney 2006).
- İkinci yöntem; her noktadan tek okuma olacak şekilde kayaç yüzeyinden alınan 20 ölçümden en yüksek 10 değerın ortalamasının alınmasıyla sertlik değerinin belirlenmesi (ISRM 1978).
- Üçüncü yöntem; aynı nokta üzerinde tekrar eden 10 başarılı ölçümden sonra en yüksek sertlik değerinin alınması ile sertliğin tayini (Hucka 1965).
- Dördüncü yöntem; aynı nokta üzerinde tekrar eden 20 ölçümün ardından en yüksek 3 değerin ortalamasının alınması yoluyla belirlenmesi (Aoki ve Matsukura 2007).

Bu çalışma kapsamında ESD için hazırlanan disk örnekleri üzerinde her noktadan 1 ölçüm olacak şekilde 5 mm aralıkla ile 20 okuma yapılmış ve bu okumaların ortalamaları alınması yoluyla her bir kayaç için ayrı ayrı belirlenerek Çizelge 4.15'te sunulmuştur.

**Çizelge 4.15** Çalışmada kullanılan kayaçların Equotip sertlik değerleri.

<b>Kayaç Kodu</b>	<b>Kayaç Adı</b>	<b>Sertlik Değerleri (ESD)</b>
M1	Porfirik Bazaltik Andezit	613±84
M2	Porfirik Bazaltik Andezit	640±45
M3	Bazalt	818±27
M4	Granit	805±38
S1	Kuvarlı Kumtaşı	548±58
S3	İri Taneli Kumtaşı	700±50
S4	İri Taneli Kumtaşı	562±34
S5	Orta Taneli Kumtaşı	654±31
S6	İnce Taneli Kumtaşı	643±35
S15	Kumtaşı	693±31
S16	Kumtaşı	606±29
S8	Kireçtaşı/Mermer	605±35
S9	Dolomit/Mermer	560±46
SK1	Kireçtaşı	637±22
SK2	Dolomitik Kireçtaşı	685±14
SK3	Dolomit	620±39

ESD: Equotip sertliği

#### **4.3.4. Minerolojik ve Petrografik Özellikler**

Çalışma kapsamında magmatik, metamorfik ve sedimanter kökenli 16 kayaç türüne ait örneklerin polarizan mikroskop altında mineral bileşimleri, doku türü, tane boyu ve şekli, yuvarlaklık, küresellik, çimento türü ve çimentolanma derecesi, ayrışma derecesi belirlenmiş ve bu özellikleri dikkate alınarak petrografik sınıflandırmaları yapılmıştır (Çizelge 4.16). İncelemelerde standart mineral bileşim oranları, mineralojik bileşim, tane boyu, şekli doku türü, çimentolanma derecesi ve yuvarlaklık, küresellik gibi özelliklerde araştırılmış, incelenen örneklerin mikroskopik fotoğraflar (fotomikrografları) çekilmiştir (Şekil 4.23). Bu kapsamda gerçekleştirilmiş olan incelemeler özetle aşağıdaki gibidir. Ayrıca detay inceleme sonuçları Çizelge 4.17’de verilmiştir. Yapılan petrografik incelemeler Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı’nda Dr. Öğr. Üy. Gürkan Bacak

tarafından gerçekleştirilmiştir. Kayaçların mikroskopik fotoğraflar çekilmiş ve minerolojik bileşim – doku özellikleri dikkate alınarak örneklerin petrografik tanımlaması yapılmıştır. Sedimanter kırıntılı ve karbonatlı örneklerin tanımlaması, Folk (1974) sınıflamasına göre yapılmıştır. Diğer magmatik kayaçlar ise Streckeisen (1974, 1978) ve Le Maitre (2002) tarafından sınıflamaya tanımlanmıştır.

### **M1 (Porfirik Bazaltik Andezit)**

Mikrolitik porfirik doku hakimdir. Ayrıca lokal olarak Fluidal akış dokusu görülmektedir. Trikolitik boyutta plajiyoklaz, piroksen, kısmen amfibollerden oluşan hamur içerisinde iri kristalli plajiyoklaz, piroksen ve amfiboller (pseudomorfik-opaklaşmış) dağılım göstermektedir. Hamur içindeki tüm kristallerde ve iri – porfirik kristallerde lavın akışına bağlı yönelim Fluidal dokuda gelişmiştir. Minerolojik bileşimi plajiyoklaz (andezin), piroksen (ojit), amfibol (hornblend) ve opak (amfibol ve manyetit) minerallerinden oluşmaktadır.

### **M2 (Porfirik Bazaltik Andezit)**

Mikrolitik porfirik doku hakimdir. Dokuda yarı öz şekilli plajiyoklaz fenokristalleri (andezin ve labrador), amfibol ve piroksenler, mikrolitik plajiyoklaz ise piroksen ve amfibolden oluşan hamur içinde dağılım sunmaktadır. Hamur matriksinde silis egemendir. Minerolojik bileşimi serisitleşme – killeşmenin hakim olduğu plajiyoklaz (andezin ve oligoklaz) , kuvars, amfibol (hornblend), piroksen (ojit) ve opak (manyetit) mineralinden oluşmaktadır.

### **M3 (Bazalt (Olivinli) – Bazaltik Lav)**

Mikrolitik porfirik ve fluidal (akış dokusu) egemen olduğu gözlemlenmiştir. Dokuda mikrolitik plajiyoklaz, opak (manyetit), piroksen ve kısmen olivin kristallerinden oluşan iri kristalli piroksen ve olivinler dağılım göstermektedir. Kayaç tane şekli olarak %70-75 köşeli ve %20-25 yarı köşeli bileşenlerden oluşmuştur.

#### **M4 (Granit)**

Minerolojik bileşimi; kuvars, alkali feldspat, plajiyoklaz, amfibol, opak ve mikadan meydana gelmiştir. Kayacı oluşturan tanelerin şekli %70 köşeli, %20 yarı köşeli ve %10 yarı yuvarlak olarak dağılım göstermektedir. Doku'da silisli yapı hakimdir.

#### **S1 (Kuvars Arenit – Kumtaşı)**

Kırıntılı (Detritik) dokunun hakim olduğu kuvarslı kumtaşı örneği içerisinde, öz şekilsiz – yarı öz şekilli kuvars, opak (manyetit – pirit) ve litik kaya kırıntıları (metamorfik – volkanik) silisli hamur içerisinde gelişigüzel dağılım sunmaktadır. Doku matriksi kuvars mikro kristallerinden ve kısmen bu kristallerin çevresinde az hematit – diyorit bileşimli opak minerallerinden oluşan silisli ve kısmen demirli hamura sahiptir. Kayaç tane şekli olarak %80-85 yarı köşeli ve %15-20 yarı yuvarlak bileşenlerden oluşmuştur.

#### **S3 (Feldspatlı Litik Arenit – İri Taneli Kumtaşı)**

Detritik – kırıntılı doku egemen olup, doku içerisinde iri kum boyutu hakim olup öz şekilsiz, köşeli – yarı köşeli kuvars, feldspat (plajiyoklaz, ortoklaz, mikroklin), çoğunlukla kloritleşmiş mika (biyotit), opak (manyetit), karbonat (kalsit) ve litik kaya parçaları silisli – kısmen karbonatlı hamur içerisinde dağılım göstermektedir. Kayaç tane şekli, köşeli (%70-75), yarı köşeli (%20) ve yarı yuvarlak (%10) tanelerden oluşmuştur. Kayaç içerisinde yer alan kalsit; spar kalsit kristalleri şeklinde bazı volkanik (andezit – bazalt) – metamorfik (kuvarsit) kaya parçalarının çevresinde, kırık ve çatlaklarda ikincil gelişim sunan karbonat minerali olarak gelişmiştir. Feldspatlar genel olarak bozuşma ve ayrışma göstermemekle birlikte bazı plajiyoklazlarda serisitleşme izlenmiştir.

#### **S4 (Litik Arenit – İri Taneli Kumtaşı)**

Kayaç üzerinde kataklastik – kırıntılı (detritik) doku egemendir. Dokusu ise; yarı köşeli kuvars, litik kaya parçaları (metamorfik – volkanik), yarı köşeli plajiyoklaz (albit - oligoklaz), alkali feldspat (ortoklaz – mikroklin), ortoklaz, kalsit, opak (manyetit – pirit) ve mika (muskovit ve biyotit) minerallerinden oluşmaktadır.

### **S5 (Litik Arkoz – Orta Taneli Kumtaşı)**

Kayaç dokusu klastik – kırıntılı (detritik) yapıda olup, öz şekilsiz kuvars, yarı öz şekilli feldspat (plajiyoklaz – albit), ortoklaz – mikroklin, çoğunlukla kloritleşmiş biyotitlerden oluşan mika (biyotit - muskovit) ve litik kaya parçalarından (volkanik – metamorfik) oluşmaktadır.

### **S6 (Sublitik Arenit – İnce Taneli Kumtaşı)**

Kırıntılı (detritik) dokuya sahip kayaç içerisinde; kuvars, feldspat (albit – oligoklaz), mika (biyotit – muskovit), kalsit, opak (manyetit, hematit ve pirit) ve litik kaya parçalarının silisli bir hamur içerisinde yarı köşeli şekilde yer almaktadır. Kayacı oluşturan minerallerin tane şekli; köşeli %65-70, yarı yuvarlak %10-15 ve yarı köşeli %15-20 olarak dağılmıştır. Kayaç dokusunun egemen olduğu çimento türünde silis ve demir hakimdir.

### **S15 (Litik Arkozik Kumtaşı-Orta Taneli Kumtaşı)**

Kırıntılı (detritik) doku egemendir. mineral bileşiminde kuvars, alkali feldspat, plajiyoklaz, litik parçalar, mika ve opak minerallerinin dağılım göstermektedir. Kırıntılı (detritik) doku egemendir.

### **S16 (Sublitik Arenit Kumtaşı-Çok İnce Taneli Kumtaşı)**

Kırıntılı (detritik) – klastik dokunun egemen olduğu kayaç içerisinde, kuvars, alkali feldspat, plajiyoklaz, litik parçalar, mika ve opak minerallerinin dağılım göstermektedir.

### **S8 (Biyomikritik Kireçtaşı)**

Kayaç dokusunda biyomikritik doku olup, mikritik karbonat hamuru içerisinde kayaca biyomikritik özelliği kazandıran bol oranda kavkı (fossil) izi görülmektedir. Minerolojik bileşimi mikritik kalsit, karbonatlı kavkılar (fosiller), opak minerallerinden oluşmaktadır. Opak; çatlak dolgusu şeklinde hematit – limonit ile küçük kübik parçalar yer alan manyetitler şeklinde bulunmaktadır.

### **S9 (Dolomit)**

Kayaç dolomit kristallerinin grift (boşluksuz) dizilimiyle oluşmuştur. Öz şekilli dolomit kristalleri idiyotopik mozoyik doku oluşturacak şekilde dizilmiştir. Minerolojik bileşimi içerisinde dolomit (%95) ve spar kalsit mineralleri bulunmaktadır.

### **SK-1 (Damarlı Mitritik – Mitritik Kireçtaşı)**

Kayaç dokusunda mitritik doku hakim olup, bol miktarda sparitik kalsit dolgulu çatlaklar mevcuttur. Minerolojik bileşimi; mikritik kalsit, spar kalsit ve opak (manyetit) minerallerinden meydana gelmiştir. Kayaç tane şekli; yuvarlak (%80-85), yarı köşeli (%10-15) ve köşeli ( $\leq$ %1) dağılım göstermektedir. Kayaç doku hamurunda karbonat hakimdir.

### **SK-2 (Dolomitik Kireçtaşı)**

Oolitik – mitritik doku hakim olup, bol damarcıklı doku hamurunda çatlaklar ikincil spar kalsit ile dolguludur. Kayaçın mineral bileşimi; mikritik kalsit, spar kalsit ve opak (manyetit – pirit) minerallerinden oluşmaktadır. %70 mikrokristalin kalsit, mikrit hamurunu oluşturmaktadır. Kayaç, oolitik mitritik kireçtaşı ya da dolomitik kireçtaşı olarak tanımlanmıştır.

### **SK-3 (Dolomit)**

Dolomit kristalleri grift (boşluksuz) dizilimiyle oluşturmuş olduğu idiyotopik mozoyik – dolomitik doku hakimdir. Öz şekilli dolomit kristalleri çoğunlukla eş boyutlu grift dizilim sunmaktadır. Minerolojik bileşimi; dolomit, spar kalsit ve opak (limonit – hematit) minerallerinden oluşmaktadır. Kayaç tane şekli; köşeli (%87), yarı köşeli (%10) ve yarı yuvarlak (%3) olarak dağılım göstermektedir.



**Çizelge 4.16** Kayaçların mineral içeriği, dokusu, hamur özellikleri, ayrışma durumları ve petrografik sınıflandırılmaları.

No	Alındığı Yer	Mineral İçeriği	Doku	Ayrışma	Çimento türü	Çimentolanma derecesi (%)	Sınıflama
M1	Porfirik Bazaltik Andezit	plajiyoklaz (andezin), piroksen (ojit), amfibol (hornblend) ve opak (amfibol ve manyetit)	Mikrolitik Porfirik	-	Silisli	-	Porfirik Bazaltik Andezit
M2	Porfirik Bazaltik Andezit	plajiyoklaz (andezin ve oligoklaz), kuvars, amfibol (hornblend), piroksen (ojit) ve opak (manyetit)	Mikrolitik Porfirik	Serisitleşme - killeşme	Silisli	-	Porfirik Bazaltik Andezit
M3	Bazalt	plajiyoklaz, opak (manyetit), piroksen ve olivin	Mikrolitik Porfirik ve Fluidal (Akış Dokusu)	-	Silisli	30-35	Bazalt
M4	Granit	Kuvars, Feldspat, Plajiyoklaz, , Opak, Mika, Mikrokilin	Holokristalin - Fanaritik	-	Silisli	-	Alkali Tektonitik Granit
S1	Kuvarslı Kumtaşı	kuvars, opak (manyetit – pirit) ve litik kaya kırıntıları (metamorfik – volkanik)	Kırıntılı (Detritik)	-	Silisli	75-80	Kuvars Kumtaşı
S3	İri Taneli Kumtaşı	kuvars, feldspat (plajiyoklaz, ortoklaz, mikroklin), çoğunlukla kloritleşmiş mika (biyotit), opak (manyetit), karbonat (kalsit) ve litik kaya parçaları	Kırıntılı (Detritik)	Bazı plajiyoklazlarda serisitleşme ve mika minerallerinde kloritleşme	Silisli , Kısmen karbonatlı	70-75	İri Taneli Kumtaşı
S4	İri Taneli Kumtaşı	kuvars, litik kaya parçaları (metamorfik – volkanik), plajiyoklaz (albit - oligoklaz), alkali feldspat (ortoklaz – mikroklin), ortoklaz, kalsit, opak (manyetit – pirit) ve mika (muskovit ve biyotit)	Kataklastik – Kırıntılı (Detritik)	-	Silisli	55-60	İri Taneli Kumtaşı
S5	Orta Taneli Kumtaşı	feldspat (plajiyoklaz – albit), ortoklaz – mikroklin, çoğunlukla kloritleşmiş biyotitlerden oluşan mika (biyotit - muskovit) ve litik kaya parçalarından (volkanik – metamorfik)	Klastik – Kırıntılı (detritik)	Mika minerallerinde kloritleşme	Silisli	50-55	Orta Taneli Kumtaşı

**Çizelge 4.16** (devam ediyor).

No	Alındığı Yer	Mineral İçeriği	Doku	Ayrışma	Çimento türü	Çimentolanma derecesi (%)	Sınıflama
S6	İnce Taneli Kumtaşı	kuvars, feldspat (albit – oligoklaz), mika (biyotit – muskovit), kalsit, opak (manyetit, hematit ve pirit) ve litik kaya parçaları	Kırıntılı (Detritik)	Mika minerallerinde kloritleşme	Silisli ve demirli	75-80	İnce Taneli Kumtaşı
S15	Kumtaşı	Kuvars, alkali feldspat, plajiyoklaz, litik parçalar, mika, opak	Kırıntılı (Detritik) - Klastik	-	Silisli	-	Litik Arkozik Kumtaşı
S16	Kumtaşı	Kuvars, alkali feldspat, plajiyoklaz, litik parçalar, mika, opak	Kırıntılı (Detritik) -Klastik	-	Silisli	-	Sublitik Arenit Kumtaşı
S8	Mermer/Kireçtaşı	mikritik kalsit, karbonatlı kavkılar (fosiller), opak (hematit-manyetit)	Biyomikritik	-	Karbonatlı	-	Biyomikritik Kireçtaşı
S9	Mermer/Dolomit	dolomit ve spar kalsit	İdiyotopik Mozoyik	-	Karbonatlı	-	Dolomit
SK1	Kireçtaşı	mikritik kalsit, spar kalsit ve opak (manyetit)	Mitritik	-	Karbonatlı	-	Mikritik Kireçtaşı
SK2	Dolomitik Kireçtaşı	mikritik kalsit, spar kalsit ve opak (manyetit – pirit)	Oolitik – Mitritik	-	Karbonatlı	-	Dolomitik Kireçtaşı
SK3	Dolomit	dolomit, spar kalsit ve opak (limonit – hematit)	İdiyotopik Mozoyik – Dolomitik	-	Karbonatlı	-	Dolomit

**Çizelge 4.17** Kayaçların mineral ve doku içeriği.

No	Mineralojik Bileşim (%)	Yuvarlaklık (%)	Aşındırıcı min. ort. tane boyutu (mm)
M1 (Andezit)	PL: 15-20 Pir: 10-12 Amf: 7-8 Op: 10-12 Hamur: 50-55 (MPL: 25-30 Pir: 10-12 Amf: 5-6 Op: 2-3)	-	PL: 0.70-1.25 Pr: 0.3-1 Amf: 0.3-0.8 Op: 0.2-1
M2 (Andezit)	PL: 70-75 Kuv : 3-4 Pir: 10-15 Amf:7-8 Op: 2-3	-	PL: 0.25-1.20 Kuv : 1-1.20 Pr: 0.25-0.50 Amf: 0.1-0.35 Op: 0.08-0.2 Pr: 0.07-0.35
M3 (Bazalt)	Pir: 12-15 Ol: 15-17 PL: 65-70 Op:3-5	Köş:70-75 YKöş:20-25	Ol: 0.03 – 0.5 (%10) ve 0.08-0.25 (%7) PL: 0.025-0.1 Op: 0.025-0.09
M4 (Granit)	Kuv:50-55 Fe: 15-20 PL:10-15 Op:3-5 Mk:5-10 M:5-10	Köş:5-10 YKöş:85-90	Kuv:2-3(%35-40) 0.5-2 (%10-15) F: 0.75-1.5 PL:0.8-1.75 Op:0.3-1 Mk:0.5-1 M: 0.10-0.5 (%2-3) ve 0.6-1(%5-7)
S1 (Kumtaşı)	Kuv : 85-90 Fe: 3-5 LP : 3-5 Op: 1-2	YKöş:80-85 YYuv:15-20	Kuv:0.175(%30) ve -0.3 (%70) F: 0.150-0.25 LP:0.125-0.375 Op: 0.07-0.09
S3 (Kumtaşı)	Kuv:55-60 Fe: 10-12 LP: 15-20 K:3-5 M:3-5 Op:1-2	Köş:70 YKöş:20 YYuv:10	Kuv:0.5-1(%40) ve 0.15-0.4(%20) F: 0.15-0.3 (%5) ve 0.3-0.7(%10) LP: 0.2-0.7(%5) ve 0.8-1.2(%15) K:0.05-0.08 M:0.15-0.35 Op:0.08-0.2
S4 (Kumtaşı)	Kuv:40-45 AF: 8-10 LP: 40 K:2-3 M:3-5 PL:5-7 Op:2-3	-	Kuv: 0.5-1.2 AF: 0.5-0.8 LP: 0.5-0.3 K: 0.7-1 M: 0.25-0.35 PL: 0.5-1 Op: 0.1-0.25

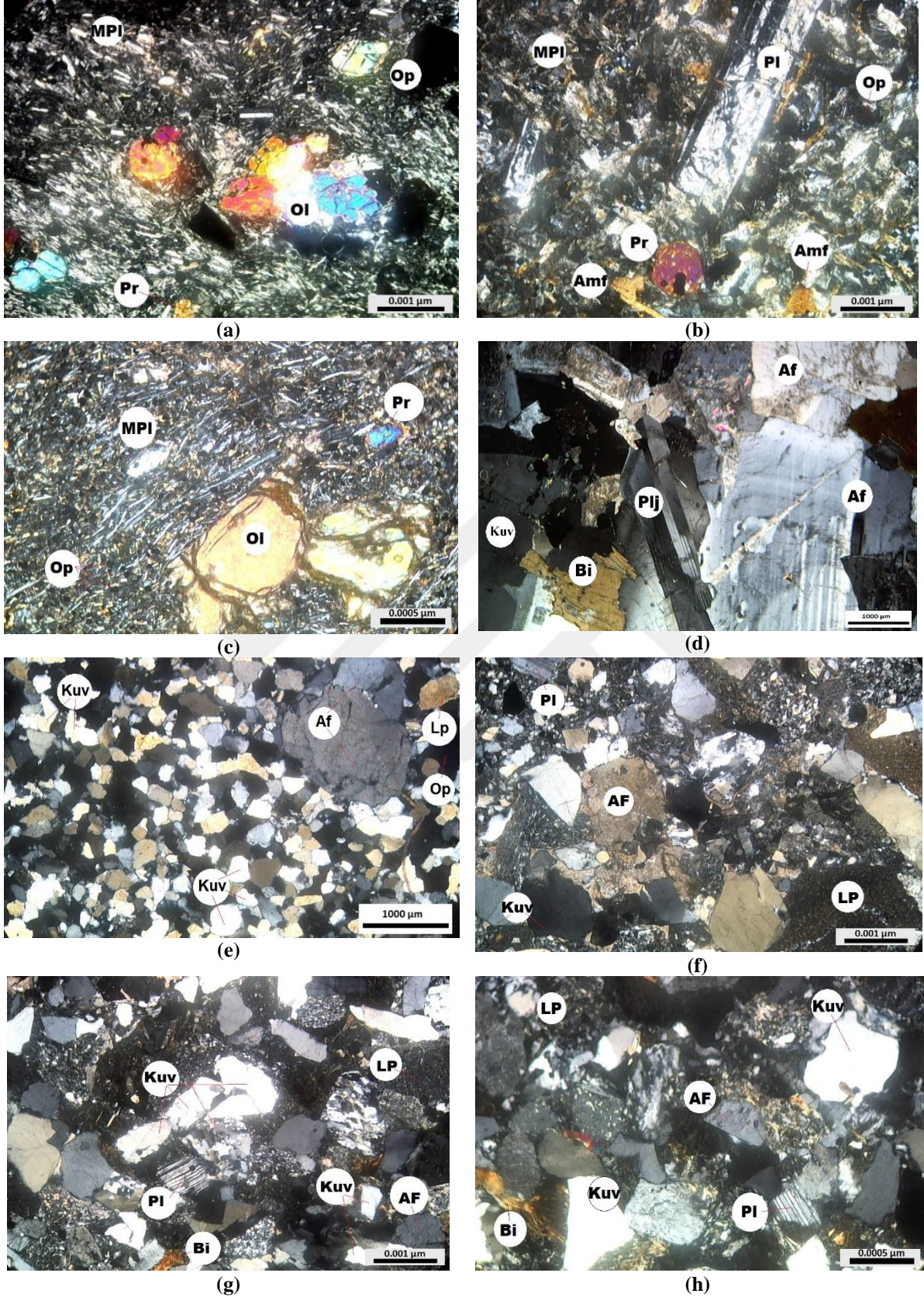
Kuv: Kuvars, LP: Litik parça, AF: Alkali feldspat, Bi: Biyotit, Op: Opak mineral, PL: MPL: Mikrolitik Plajiyoklaz, Dol: Dolomit, M: Mika, Kav: Kavkı, MK: Mitritik kalsit, Ool: Oolit, Sk: Spar kalsit, Mk: Mikrokilin, Fe: Feldspat, Pir: Piroksen, Amf: Amfibol

**Çizelge 4.17** (devam ediyor).

No	Mineralojik Bileşim (%)	Yuvarlaklık (%)	Aşındırıcı min. ort. tane boyutu (mm)
S5 (Kumtaşı)	Kuv: 60-65 PL: 5-10 LP: 10-12 O-MK: 3-5 M: 7-8	-	Kuv: 0.15-0.35 PL: 0.15-0.3 LP: 0.35-0.5 O-MK: 0.2-0.4 M: 0.1-0.3
S6 (Kumtaşı)	Kuv:55-60 Fe:5-7 M: 10-15 K:5-6 Op:5-7 LP:5-10	Köş:65-70 YKöş:15-20 YYuv:10-15	Kuv: 0.25(%60) ve 0.05-0.08(%10) F:0.05-0.20 M: 0.03-0.3 K:0.05-0.1 Op:0.03-0.09(%2) ve 0.1-0.3(%3-4) LP:0.05-0.25
S15 (Kumtaşı)	Kuv: 40-45 AF: 15-20 PL: 5-10 LP:20 M:3-5 Op: 1-2	YKöş:90 YYuv:10	Kuv: 0.25-0.75 AF:0.25-0.80 PL:0.25-0.85 LP:0.35-1 M:0.35-0.80 Op: 0.1-0.25
S16 (Kumtaşı)	Kuv: 50-55 AF: 5-10 PL: 3-5 LP: 20-25 M: 5-7 Op: 3-5	Köş:10 YKöş:90	Kuv: 0.09-2 AF: PL: 0.09-0.15 LP: 0.08-0.8 M: 0.075-0.70 Op:
S8 (Kireçtaşı)	MK-Kav: 95 Op: 1-2	-	MK:0.007-0.009 Kav:0.1-1 (%70) ve 1-2(%25) Op: 0.05-0.1
S9 (Dolomit)	Dol: 95 SK:4-5	-	Dol: 0.1-0.20 SK:0.2-0.35
SK1 (Kireçtaşı)	MK:80-85 SK:10-15 Op:≤1	Yuv:80-85 YKöş:10-15 Köş:≤1	MK: ≤0.005 Sk:0.125-0.85 Op: 0.05
SK2 (Dolomitik Kireçtaşı)	MK:70 Sk:20-25 Op:3-5	-	MK:0.0072-0.009 Sk:0.1-0.6 Op: 0.05-0.5
SK3 (Dolomit)	Dol:90 Sk: 3-5 Op:3-5	Köş:87 YKöş:10 YYuv:3	Dol: 0.05-0.1 SK: 0.25-0.8 Op: 0.05-0.1

Kuv: Kuvars, LP: Litik parça, AF: Alkali feldspat, Bi: Biyotit, Op: Opak mineral, PL: MPL: Mikrolitik Plajiyoklaz, Dol: Dolomit, M: Mika, Kav: Kavkı, MR: Mitritik kalsit, Ool: Oolit, SK: Spar kalsit, Fe: Feldspat, K: Kalsit, Mk: Mikrokilin, Pir: Piroksen, Amf: Amfibol

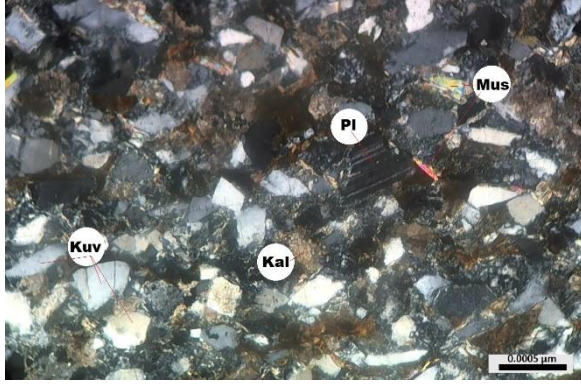




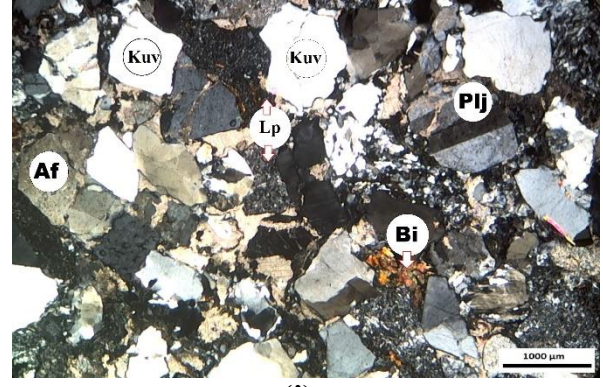
a-M1 (andezit), b-M2 (andezit), c-M3 (bazalt), d-M4 (granit), e-S1, f-S3, g-S4, h-S5 (kumtaşları)  
 Kuv: Kuvars, LP: Litik parça, AF: Alkali feldspat, Bi: Biyotit, Op: Opak mineral, PL: MPL: Mikrolitik Plajiyoklaz,  
 Dol: Dolomit, M: Mika, Kav: Kavkı, MK: Mitritik kalsit, Ool: Oolit, Sk: Spar kalsit, Fe: Feldspat, Pir: Piroksen,  
 Amf: Amfibol (XNikol)

Şekil 4.23 Kayaçların polarizon mikroskobu altındaki görüntüleri.

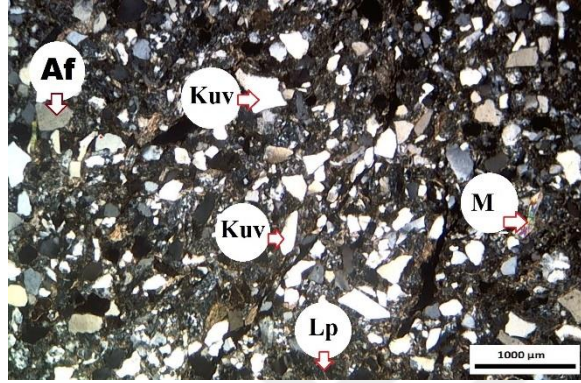




(i)



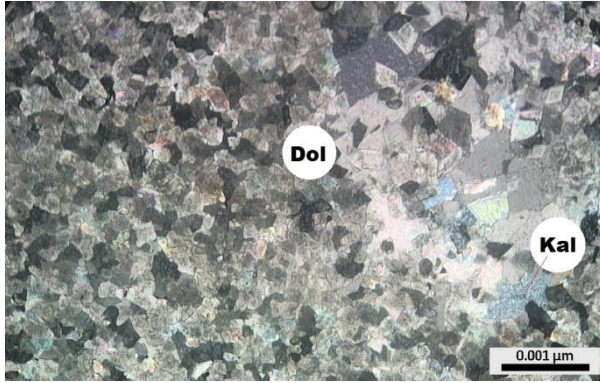
(j)



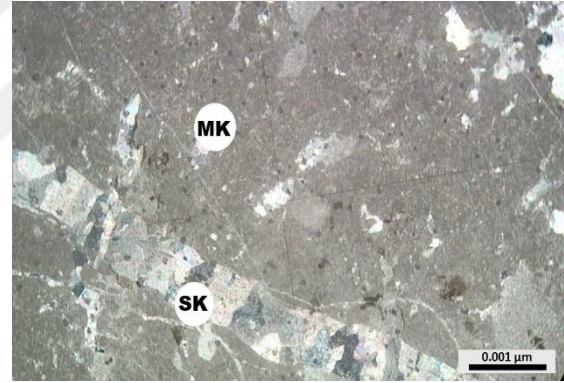
(k)



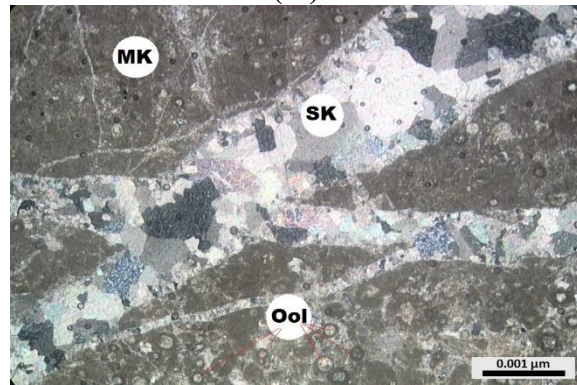
(l)



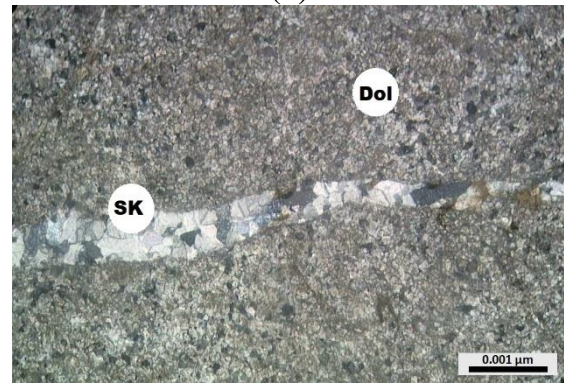
(m)



(n)



(o)



(ö)

i-S6, j-S15, k-S16 (kumtaşları), l-S8 (kireçtaşı), m-S9 (dolomit), n-SK1 (kireçtaşı), m-SK2 (dolomitik kireçtaşı),  
ö-SK3 (dolomit)

LP: Litik parça, AF: Alkali feldspat, Bi: Biyotit, Op: Opak mineral, PL: Plajiyoklaz, Ol: Olivin, Pir:Piroksen,  
MPL: Mikrolitik Plajiyoklaz, Dol: Dolomit, M: Mika, Kav: Kavkı, MK: Mitritik kalsit, Ool: Ooolit, Sk: Spar kalsit,  
Fe: Feldspat, Amf: Amfibol (XNikol)

Şekil 4.23 (devam ediyor).

Kayaçların çimento türüne bakılarak McFeat-Smith (1977)'e göre çimentolanma katsayıları (cementation coefficient) belirlenmiştir (Çizelge 4.18). Kayaç örneklerine ait “Doku Sağlamlık Katsayısı (DSK)” çimentolanma derecesi ile çimento türünün çarpılması yoluyla ayrıca belirlenmiştir. Çalışmada yer alan her bir kayaç için eş değer kuvars içerikleri ( $Q_{eqv}$ ), Schormair vd. (2006) tarafından kayaçların Rosival aşındırıcılık katsayısı (Çizelge 4.19) tablosu göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (Çizelge 4.120). Ayrıca, kayaç dokusu içerisinde yer alan aşındırıcı minerallerin ortalama tane boyları ( $d_{ort}$ ) da hesaplanmış ve Çizelge 4.20’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.18** Kayaçların çimentolanma katsayısı (McFeat-Smith 1977).

Çimento Türü	Katsayı
Çimentolanmamış kayaçlar veya %20’den daha fazla boşluklu	1
Demir	2
Demir ve kil	3
Kil	4
Kil + karbonat	5
Karbonat	6
Silt; kil veya silisli kalsit	7
Silisli silt	8
Silisli, parçacıklı kuvars taneli	9
Silis; %2’den daha az boşluklu	10

**Çizelge 4.19** Kayaçların Rosival aşındırıcılık katsayısı değerleri (Schormair vd. 2006).

Mineral	Rosival aşındırıcılık katsayısı (%)
Feldspat	32
Piroksen	43
Kuvars	100
Pirit ve biotit	55
Kalsit kil	4
Mika	4
Plajiolklas	25
Potasyum feldspat	25

**Çizelge 4.20** Kayaçların petrografik özellikleri.

Kayaç No	Kayaç Adı	$d_{ort}$ (mm)	$Q_{eqv}$ (%)	Çimentolanma Katsayısı	Çimentolanma Derecesi	DSK
M1	Porfirik Bazaltik Andezit	0.31	21.52	9	-	-
M2	Porfirik Bazaltik Andezit	0.63	27.96	9	-	-
M3	Bazalt	0.48	23.18	9	35	315
M4	Granit	0.76	62.49	9	-	-
S1	Kuvarslı Kumtaşı	0.27	89.36	9	80	720
S3	İri Taneli Kumtaşı	0.43	61.92	7	75	525
S4	İri Taneli Kumtaşı	0.51	47.78	9	60	540
S5	Orta Taneli Kumtaşı	0.20	65.48	9	55	495
S6	İnce Taneli Kumtaşı	0.20	60.92	7	80	560
S15	Kumtaşı	0.38	50.98	9	60	540
S16	Kumtaşı	0.56	55.96	9	60	540
S8	Kireçtaşı/Mermer	0.02	3.88	6	-	-
S9	Dolomit/Mermer	0.01	0.20	6	-	-
SK1	Kireçtaşı	0.07	4.00	6	-	-
SK2	Dolomitik Kireçtaşı	0.10	4.00	6	-	-
SK3	Dolomit	0.02	0.32	6	-	-

$d_{ort}$  = Aşındırıcı mineral ortalama tane boyutu,  $Q_{eqv}$ = Eşdeğer kuvars içeriği, DSK= Doku Sağlamlık Katsayısı

#### 4.4. PORTATİF DOĞRUSAL KESME SETİ İLE YAPILAN KESME DENEYLERİ

Çalışma kapsamında; iki magmatik (M1 ve M2 andezit örnekleri), beş adet sedimanter kırıntılı (S1, S3, S4, S5 ve S6 kumtaşı örnekleri) ve üç adet sedimanter karbonat kökenli (SK1, SK2 ve SK3 örnekleri, sırasıyla kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve dolomit) kayaç örnekleri üzerinde taşınabilir doğrusal kesme seti (PLCM) kullanılarak kesme deneyleri yapılmış ve elde edilen spesifik enerji değerleri Çizelge 4.21’de sunulmuştur. Kesme deneylerinde, döner delik delme setinden alınan karot örnekleri kullanılmıştır. İlk olarak, alınan karot örnekleri aksenal olarak yaklaşık eşit olacak şekilde iki parçaya ayrılmış ve özel metal kutu içerisine yerleştirilmiştir.



Daha sonra, yüzey düzeltme işlemi yapılmış ve örnekler kesme deneyi için hazır hale getirilmiştir. Son olarak her bir örnek üzerinde standart keski kullanılarak kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve kesmeye bağlı spesifik enerji değerleri hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.21** Taşınabilir doğrusal kesme setinden elde edilen spesifik enerji değerleri.

<b>Kayaç No</b>	<b>Kayaç Adı</b>	<b>SE<sub>PLCM</sub> (MPa)</b>
M1	Porfirik Bazaltik Andezit	77.2
M2	Porfirik Bazaltik Andezit	26.88
S1	Kuvarslı Kumtaşı	35
S3	İri Taneli Kumtaşı	91.39
S4	İri Taneli Kumtaşı	62.4
S5	Orta Taneli Kumtaşı	79.73
S6	İnce Taneli Kumtaşı	93
SK1	Kireçtaşı	18.31
SK2	Dolomitik Kireçtaşı	76
SK3	Dolomit	22.28

SE<sub>PLCM</sub>: Taşınabilir doğrusal kesme setinden elde edilen spesifik enerji değerleri

Çizelge 4.21 incelendiğinde, en yüksek spesifik enerji değerleri sedimanter kumtaşı kökenli kayalarda elde edilmiştir. Ayrıca M1 (andezit) ve SK2 (dolomitik kireçtaşı) örneklerinde de yüksek spesifik enerji değerlerine ulaşılmıştır.



## BÖLÜM 5

### DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ

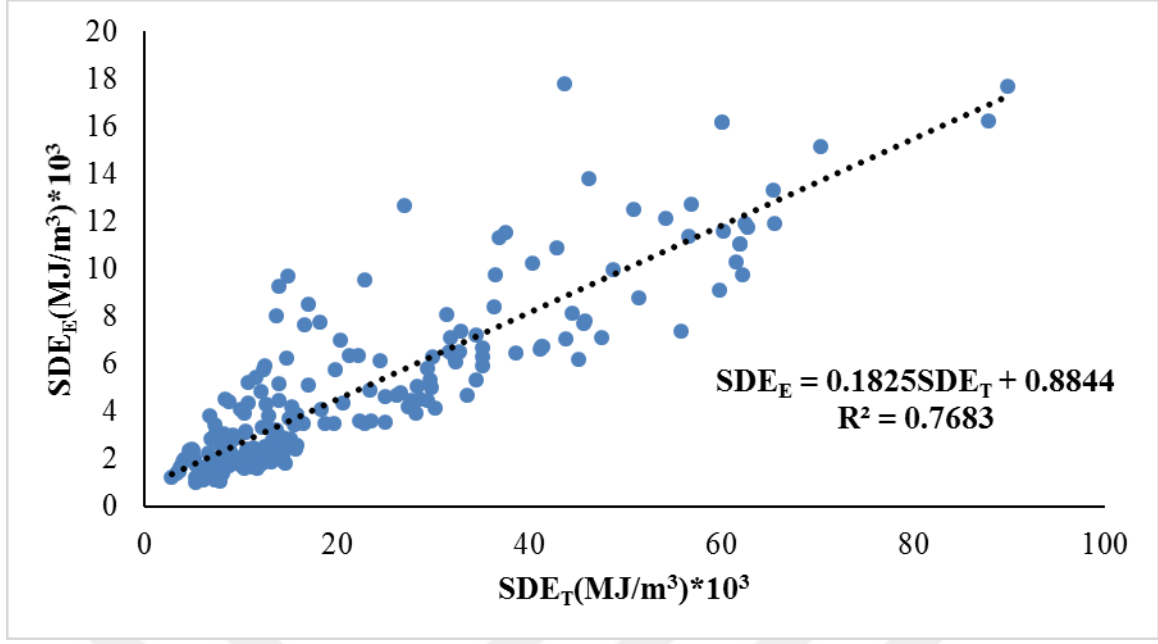
Bu bölümde; delme performansının değerlendirilmesinde en önemli kriterlerden spesifik delme enerjisi (SDE) ve ilerleme hızı (PR) parametreleri, makina ve kayaç özellikleri (mekanik, indeks ve minerolojik özellikleri) açısından değerlendirilmiştir. Bu amaçla, laboratuvarında yeni deney seti kullanılarak 16 farklı kayaç türü üzerinde delme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kayaçlar, kökenlerine ve dokusal özelliklerine göre magmatik (M1, M2, M3 ve M4), kırıntılı sedimanter (S1, S3, S4, S5, S6, S15 ve S16) ve karbonatlı sedimanter (S8, S9, SK1, SK2 ve SK3) kayaçlar olarak gruplandırılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

#### 5.1. DELME PARAMETRELERİNİN DELME VERİMİNE ETKİSİ

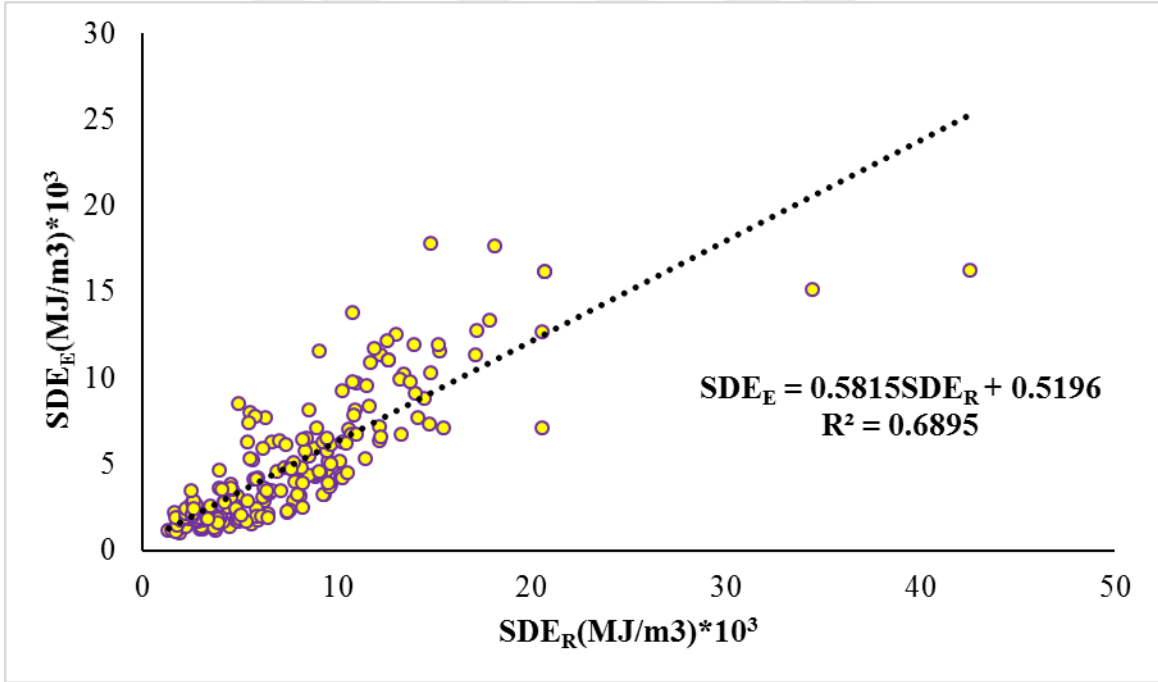
##### 5.1.1. Spesifik Delme Enerjisi (SDE)

Çalışma kapsamında, döner delik delme deney seti kullanılarak yürütülen delme deneylerinde elektriksel ve mekanik yöntemler göz önünde bulundurularak SDE değerleri tüm kayaçlar türleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu amaçla, Şekil 5.1’de kayaç üzerinde yapılan delme işlemi sırasında elde edilen SDE ( $SDE_T$ ,  $SDE_R$  ve  $SDE_E$ ) değerlerinin deney süresince değişimi gösterilmiştir. Bu amaçla, temsilen seçilen M2 örneği üzerinde, 330 dev/dk ve 90 kg koşulunda gerçekleştirilen deney sırasında alınan veriler kullanılmış ve SDE değerleri önerilen eşitliklerden hesaplanmıştır. Şekil 5.1 incelendiğinde,  $SDE_R$  yaklaşımı göz önünde bulundurulduğunda, elde edilen spesifik enerji değerlerinin sabit/doğrusal kaldığı görülmektedir. Bu durum  $SDE_R$  yaklaşımında kullanılan değişkenlerin deney süresince sabit ya da sabite yakın kalmasıyla açıklanabilmektedir. Ancak,  $SDE_T$  ve  $SDE_E$  yaklaşımlarında, spesifik enerji değerleri karotiyer, kayaç içerisinde ilerledikçe değişim göstermektedir. Bu durum,  $SDE_T$  ve  $SDE_E$  yaklaşımları için önemli değişkenler olan kesme torku ve makine gücü değerlerinin, bir karot boyu boyunca kayacın heterojen yapısı nedeniyle sabit kalamamasından kaynaklanmaktadır. Özellikle, delme esnasında, kayaç ile delici uç arasındaki zorlanmaya bağlı



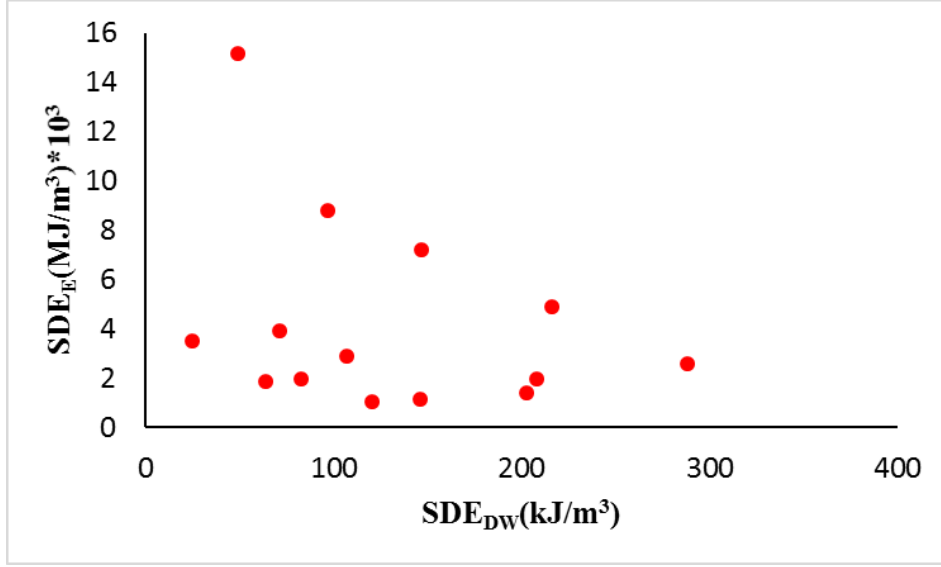


Şekil 5.2 Elektriksel spesifik delme enerjisi ile mekanik spesifik delme enerjisi (Teale 1965) arasındaki ilişki.



Şekil 5.3 Elektriksel spesifik delme enerjisi ile mekanik spesifik delme enerjisi (Rabia 1982, 1985) arasındaki ilişki.

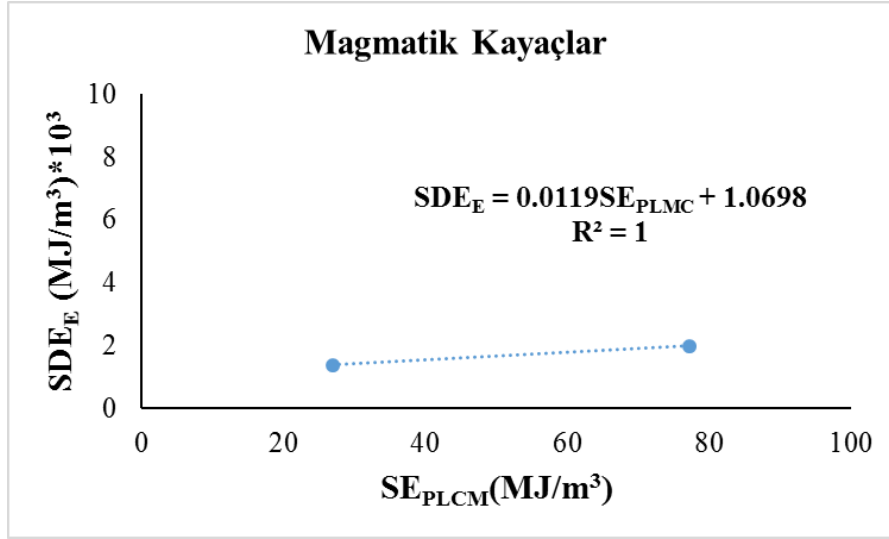
Çalışmalar sırasında SDE, kayaçların tek eksenli basınç dayanımı altında birim deformasyon enerjisi ( $SDE_{DW}$ ) şeklinde ayrıca belirlenmiştir. M4 ve S6 örneklerinin  $SDE_{DW}$  değerleri, uygun boyutta örnek hazırlanamadığı için belirlenememiştir. Diğer 14 kayaç türüne ait  $SDE_{DW}$  ile  $SDE_E$  değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



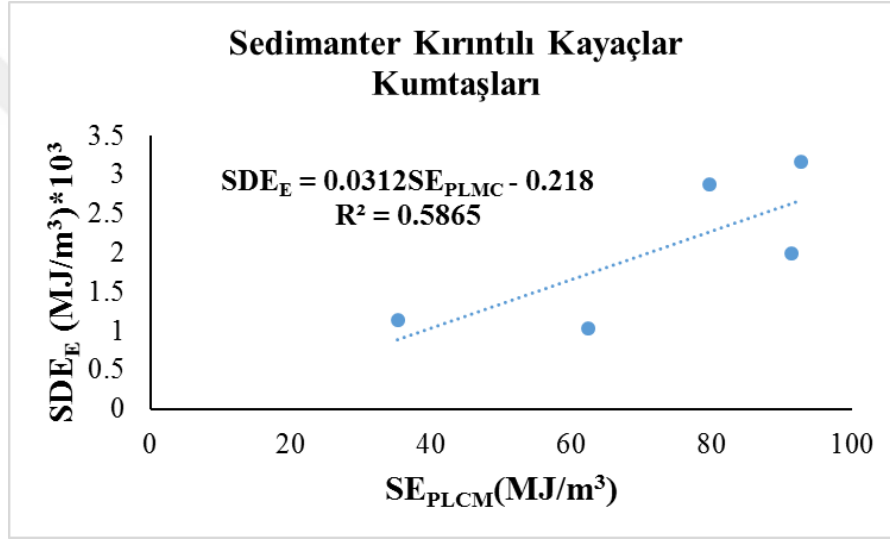
**Şekil 5.4** Elektriksel spesifik delme enerjisi ile birim deformasyon enerjisi arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

Şekil 5.4'te görüldüğü üzere, birim deformasyon enerjisi ile SDE<sub>E</sub> değerleri arasında anlamlı bir ilişki elde edilememiştir. Kayaçlar kökenlerine göre ayrılarak, daha küçük ölçekte incelendiklerinde de benzer şekilde anlamlı ilişkiler belirlenemediği için SDE<sub>E</sub> ve SDE<sub>DW</sub> arasındaki ilişki tüm kayaç türleri birlikte değerlendirilmiştir.

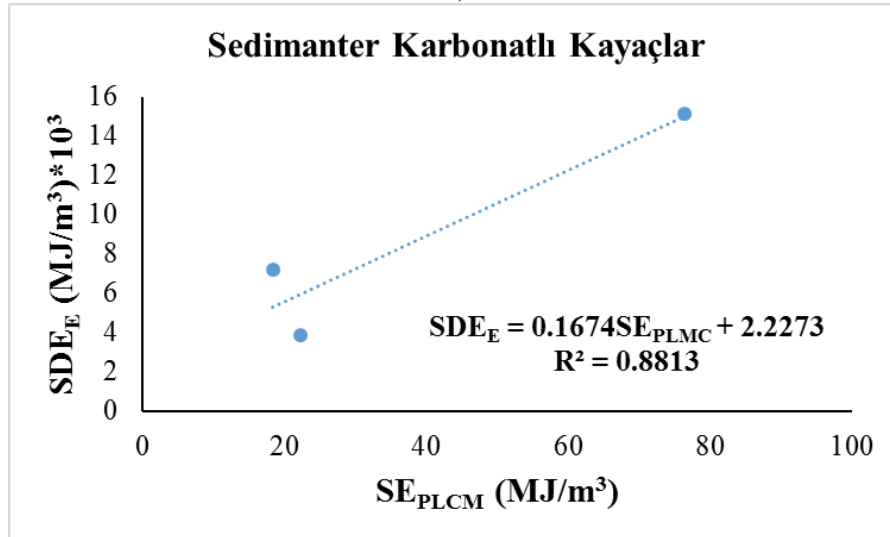
Çalışma kapsamında, taşınabilir doğrusal kesme setinden elde edilen spesifik enerji (SE<sub>PLCM</sub>) değerleri ile SDE<sub>E</sub> değerleri arasındaki ilişki tüm kayaçlar için incelendiğinde anlamlı ilişkiler belirlenememiştir. Ancak, kayaçlar kökenlerine göre değerlendirildiğinde elde edilen ilişkiler Şekil 5.5'te sunulmuştur. Çalışma kapsamında; M1 ve M2 andezit örnekleri, S1, S3, S4, S5 ve S6 kumtaşı örnekleri ve SK1, SK2 ve SK3 sırasıyla kireçtaşı, dolomitik kiretaşı ve dolomit kayaç örnekleri üzerinde taşınabilir doğrusal kesme seti (PLCM) kullanılarak kesme deneyleri yapılmıştır. Kayaçlar kökenlerine göre incelendiklerinde; Magmatik kayaçlar için yapılan analizlerde örnek sayısının az olması nedeniyle elde edilen ilişkinin yüksekliği göz ardı edilebilir (Şekil 5.5a). Ancak sedimanter kırıntılı (kumtaşları) ve sedimanter karbonatlı kayaç örnekleri için kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji değerleri ile çalışmada kullanılan döner delik delme setinden elde edilen spesifik enerji değerleri arasında anlamlı ilişkiler belirlenmiştir (Şekil 5.5b ve c). Özellikle karbonat kökenli kayaçlar ile kesme setinden elde edilen spesifik enerji arasında yüksek ilişki katsayısı belirlenmiştir. Elde edilen eşitliklerin doğruluğunun artırılması amacıyla daha fazla örnek üzerinde deneyler yürütülmelidir.



a)



b)



c)

**Şekil 5.5** Elektriksel pesifik delme enerjisi ( $SE_{PLCM}$ ) ile taşınabilir doğrusal kesme setinden elde edilen spesifik enerji ( $SE_{PLCM}$ ) arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

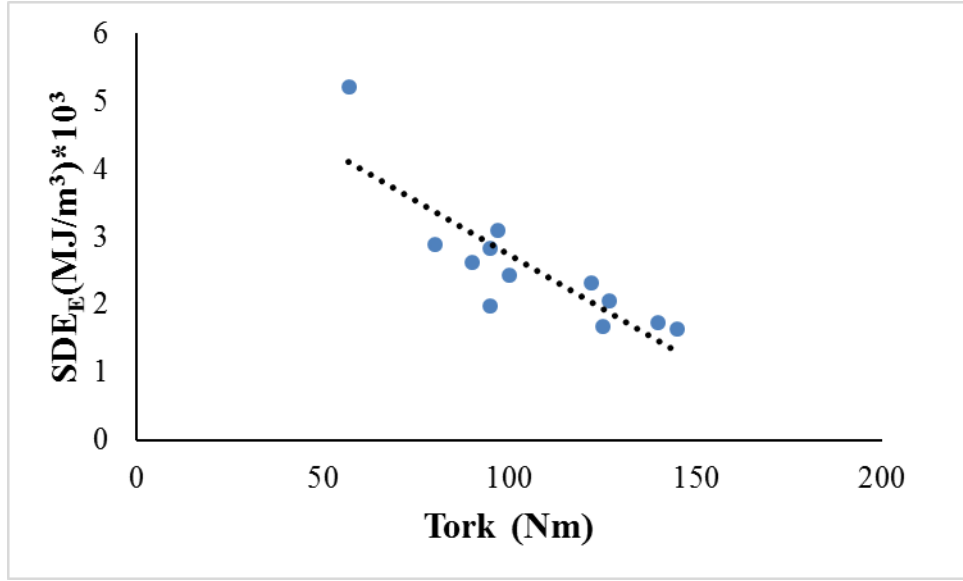
### 5.1.1.1. Tork – Elektriksel Spesifik Delme Enerjisi Arasındaki İlişki

Delme işleminde, deliklerin sağlıklı bir şekilde delinebilmesi için kayaç ile ucun etkileşimi sırasında uygulanan tork değerinin kayacı parçalayacak düzeyde olması gerekmektedir. Kayaç ile ucun etkileşimi sırasında ölçülen tork değerleri, dönme hızı/devir başına yapılan anlık ilerlemeye bağlı olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Detourney vb. 2008, Franca 2011). Dönme hızı/devir sabit tutulduğunda, baskı yükündeki artış ile birlikte kayaç ile delici uç arasındaki direnç artmış ve tork değerleri yükselmiştir. Tork değerlerinin yükselmesiyle, kayacı delmek ve ondan parça koparmak için daha fazla kuvvet ortaya çıkmaktadır.

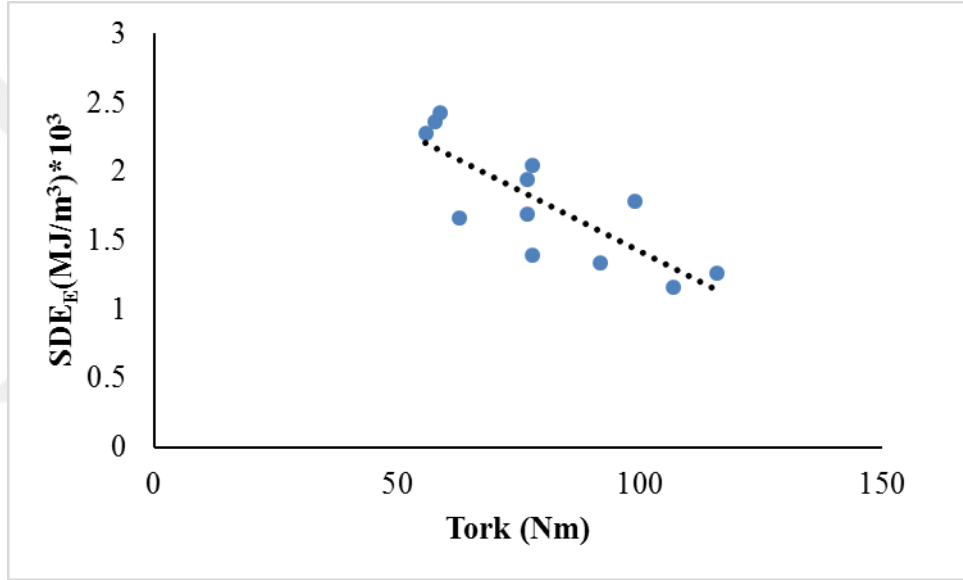
Yapılan çalışmada, delici uç üzerinde uygulanan baskı yükünün artırılmasıyla yüksek tork değerleri elde edilmiş ve dolayısıyla da kayaç içerisinde yapılan anlık ilerleme değerleri artarken,  $SDE_E$  değerleri azalmıştır. Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8’de çalışmada kullanılan her kayaç için hesaplanan  $SDE_E$  değerleri ile ölçülen tork değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Buna göre, tork arttıkça  $SDE_E$  değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, kayacı delmek ya da başka bir ifade ile parçalayabilmek için yeteri kadar tork kuvvetinin uygulanması gerektiği ile açıklanabilmektedir. Tork değeri düştükçe kayacı delebilmek için daha fazla enerji sarfiyatı gerekecektir. Ancak, Şekil 5.7’de S4 örneği için tork ve  $SDE_E$  değerleri arasında anlamlı bir oran belirlenememiştir.



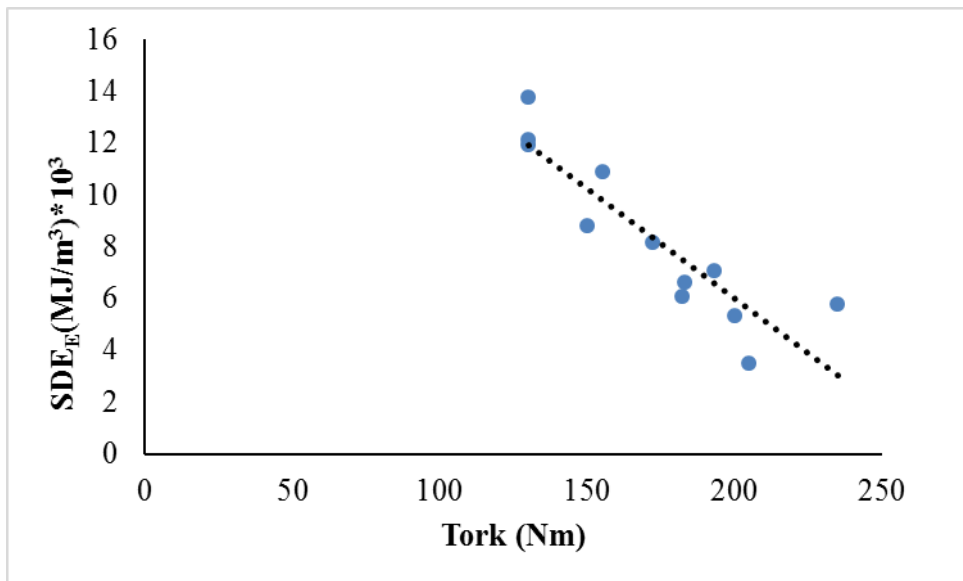
M1  
(Andezit)



M2  
(Andezit)

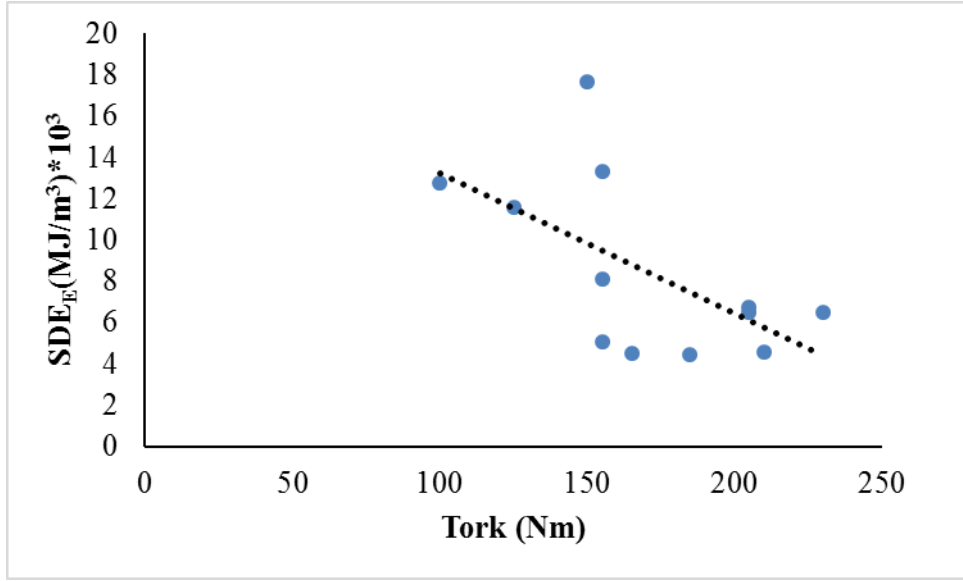


M3  
(Bazalt)

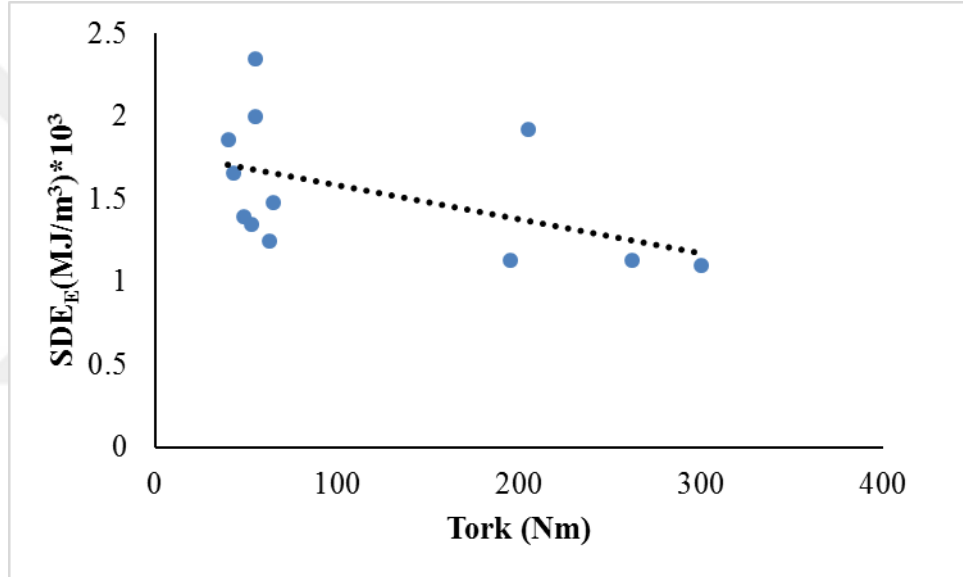


Şekil 5.6 Magmatik kayalarda tork-elektriksel spesifik delme enerjisi ilişkisi.

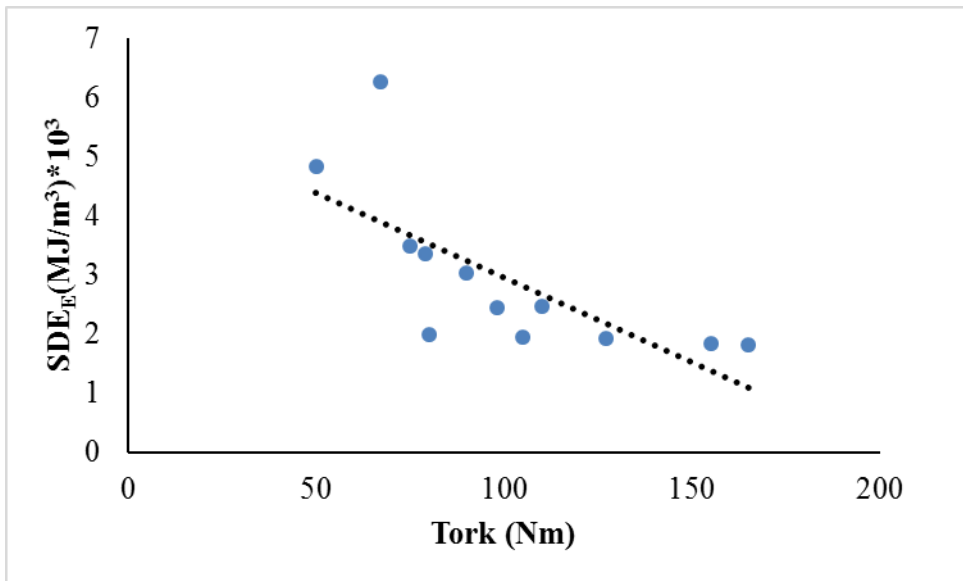
M4  
(Granit)



S1  
(Kuv.  
Kumtaşı)

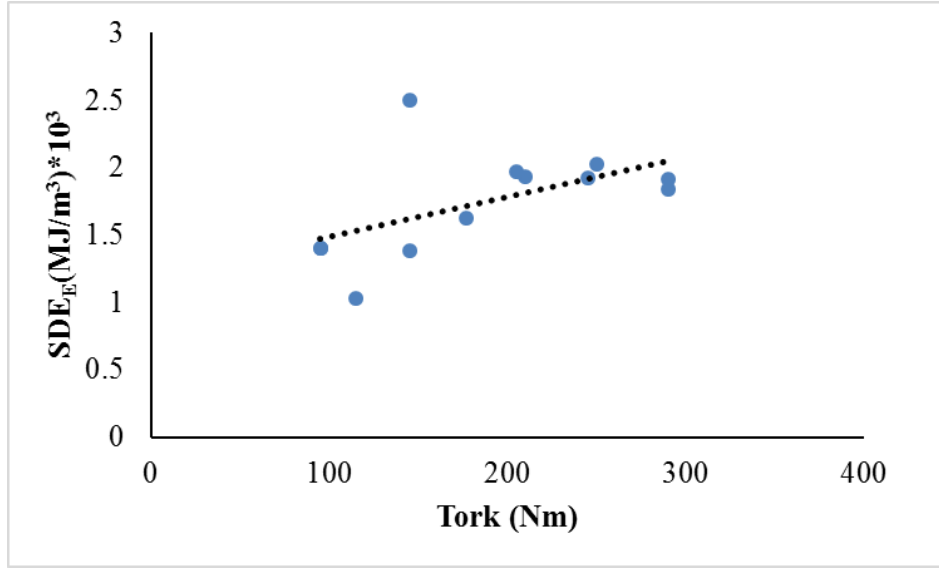


S3  
(Kumtaşı)

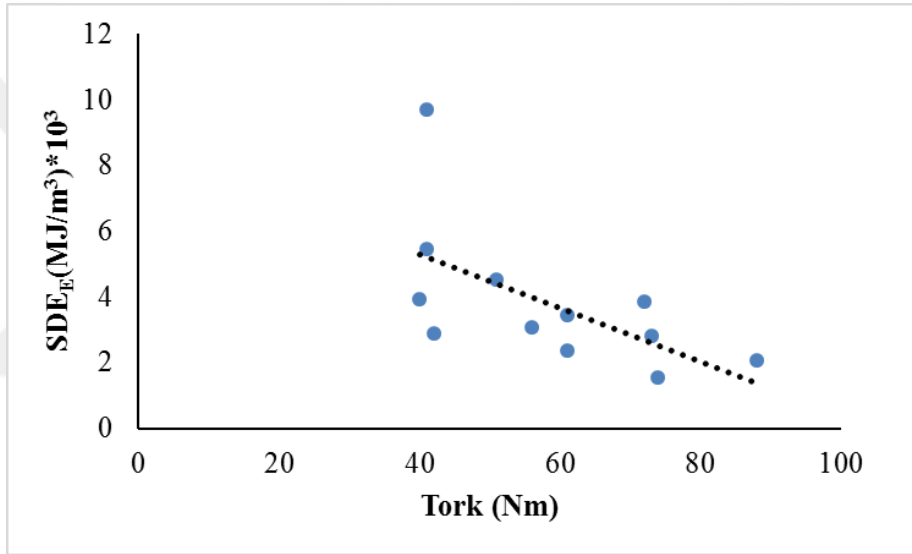


Şekil 5.6 (devam ediyor).

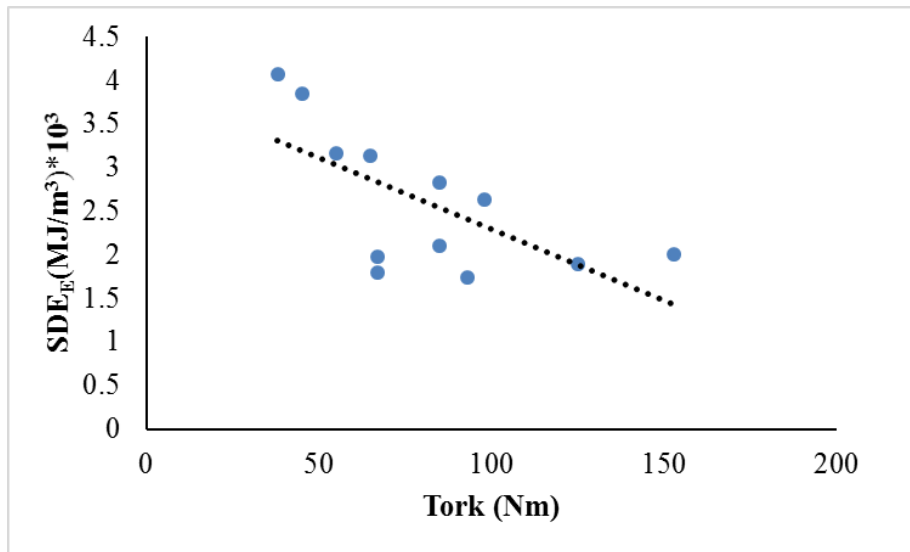
S4  
(Kumtaşı)



S5  
(Kumtaşı)

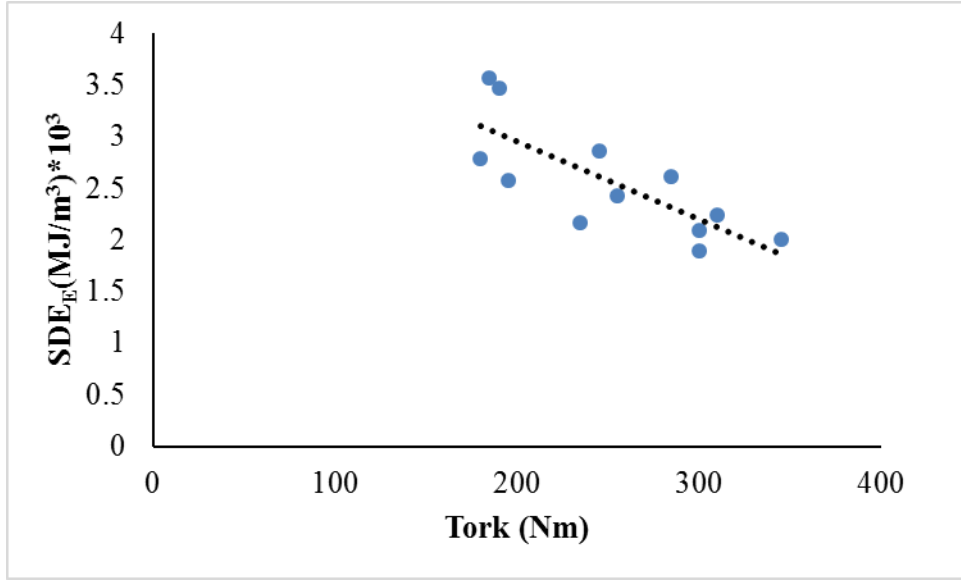


S6  
(Kumtaşı)

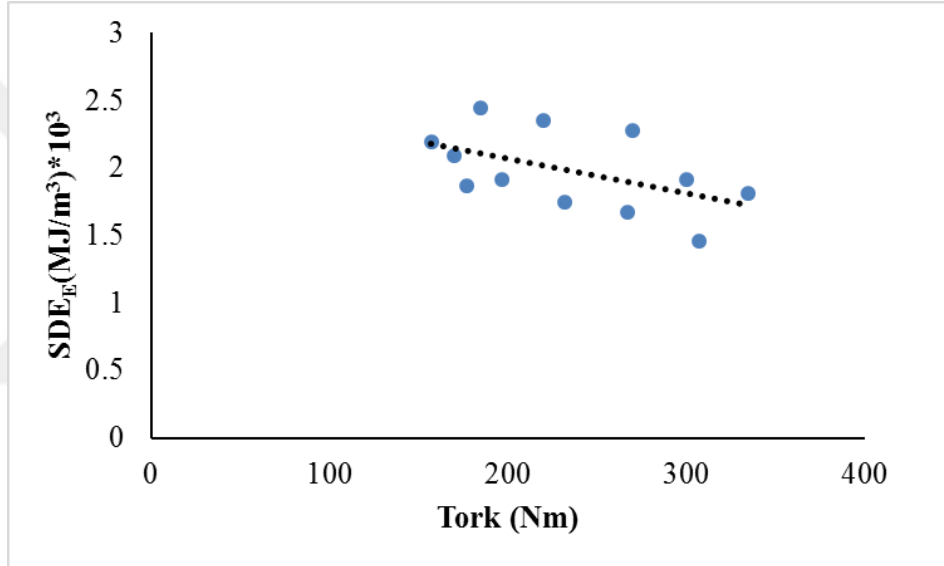


Şekil 5.7 Sedimanter kırıntılı kayalarda tork- elektriksel spesifik delme enerjisi ilişkisi.

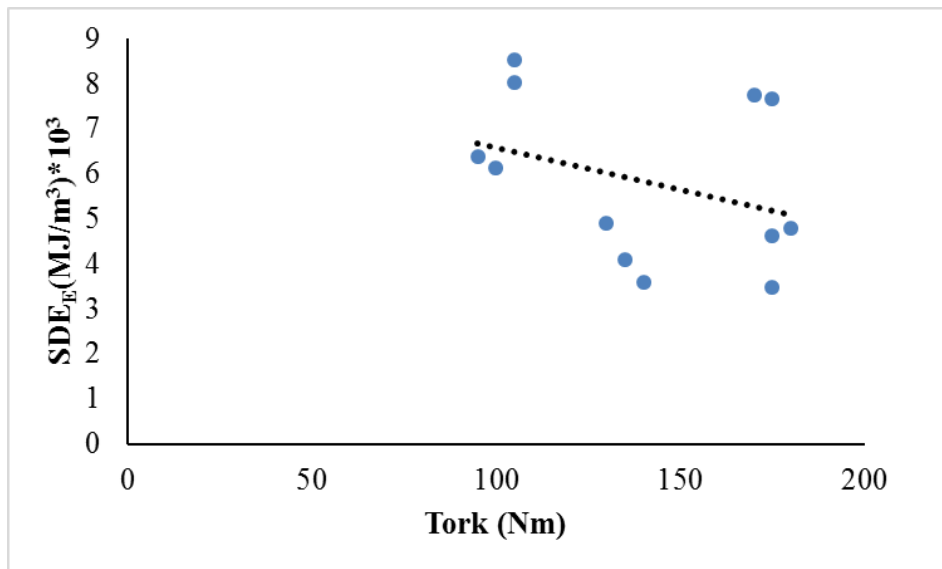
S15  
(Kumtaşı)



S16  
(Kumtaşı)

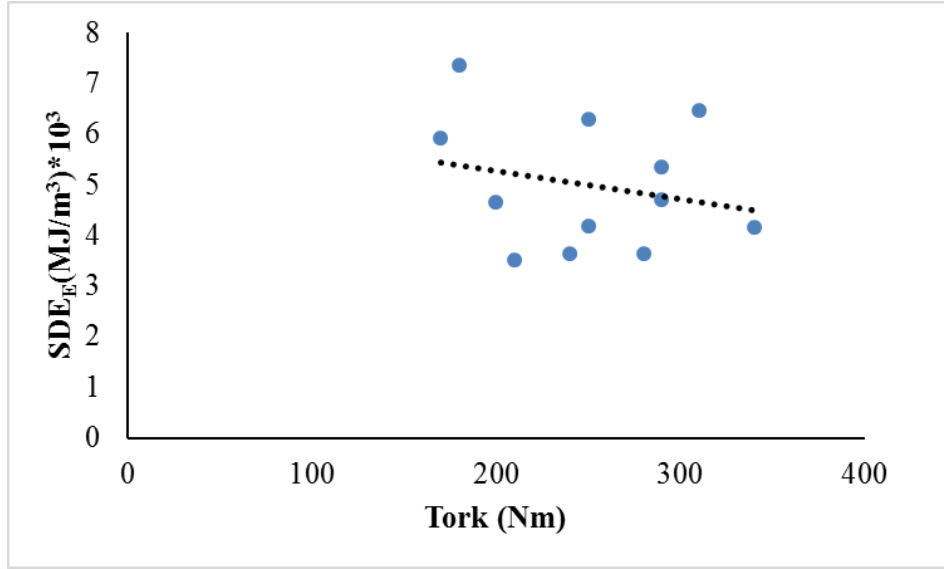


S8  
(Kireçtaşı)

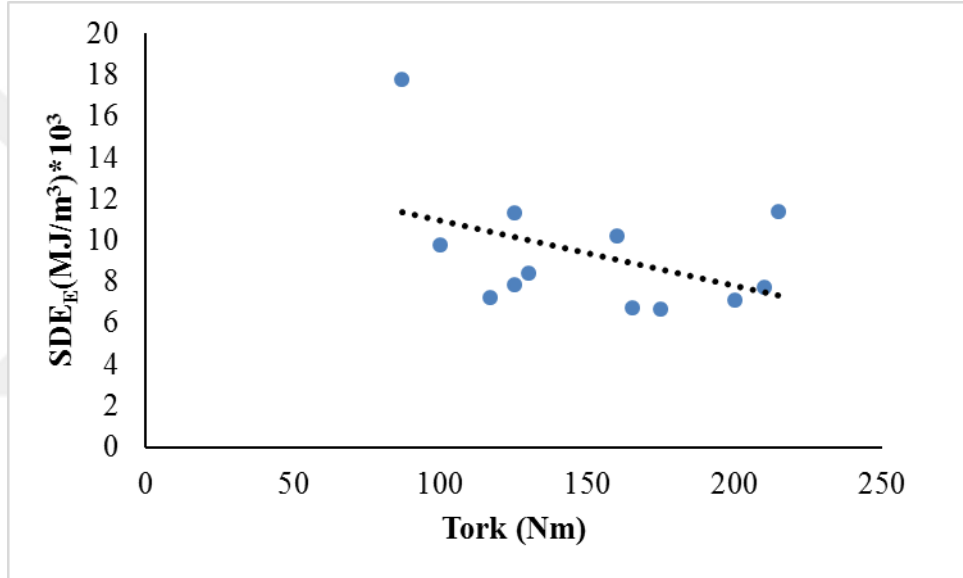


Şekil 5.7 (devam ediyor).

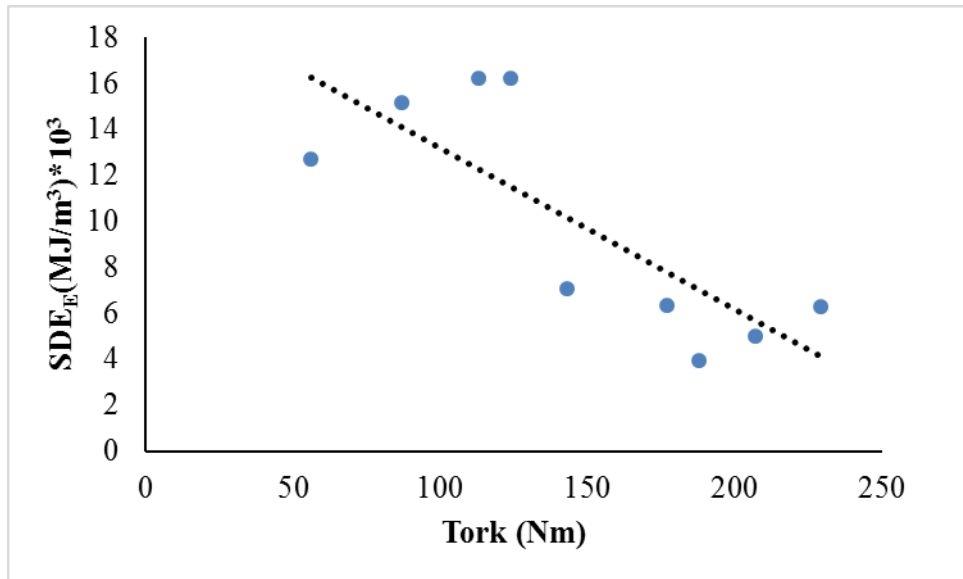
S9  
(Dolomit)



SK1  
(Kireçtaşı)

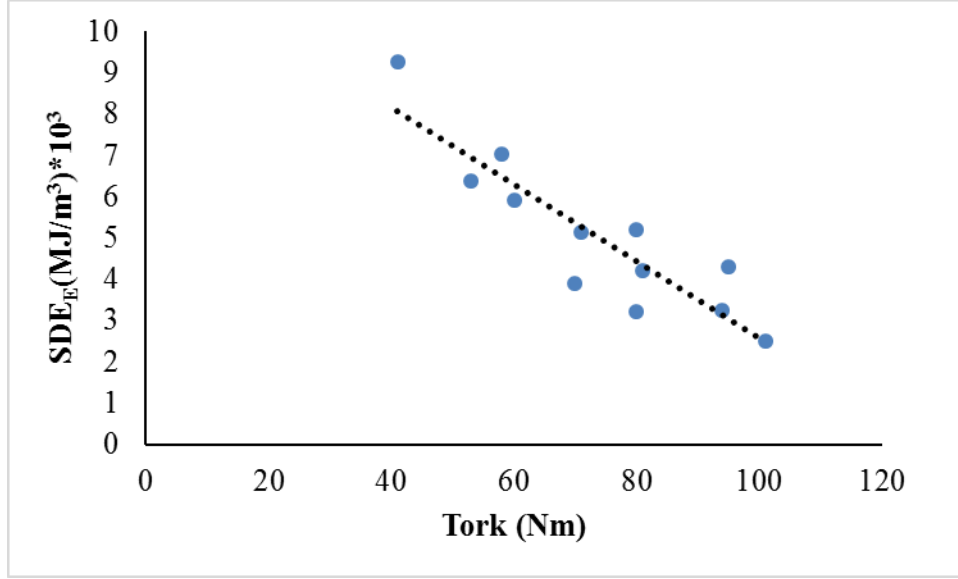


SK2  
(Dolomitik  
Kireçtaşı)



Şekil 5.8 Sedimanter karbonatlı kayalarda tork- elektriksel spesifik delme enerjisi ilişkisi.

SK3  
(Dolomit)



Şekil 5.8 (devam ediyor).

#### 5.1.1.2. Baskı Yüğü – Elektriksel Spesifik Delme Enerjisi Arasındaki İlişki

Çalışma kapsamında 4 farklı baskı yükü (50, 70, 90 ve 110 kg) altında delme deneyleri gerçekleştirilmiş ve baskı yükünün spesifik delme enerjisi (SDE) üzerine olan etkileri incelenmiştir. Dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükündeki değişim kayaç gruplarına göre Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11’de sunulmuştur.

Çalışmada kullanılan tüm kayaçlar birlikte değerlendirildiğinde, baskı yükündeki artışa bağlı olarak SDE<sub>E</sub> değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.9’de magmatik kayaçlar grubu için sabit dönme hızı/devirde uygulanan baskı yükü ile SDE<sub>E</sub> değerleri arasındaki ilişki sunulmuştur. Buna göre Şekil 5.9 incelendiğinde, en yüksek SDE<sub>E</sub> değerleri M3 ve M4 kayaçları için elde edilmiştir. Grup kayaç bazında incelendiğinde, M1, M2 (andezitler) ve M4 (granit) örnekleri için 470 dev/dk ve 110 kg’lık çalışma koşullarında SDE<sub>E</sub> optimum değerlerine ulaşmaktadır. M3 (bazalt) örneği incelendiğinde ise 330 dev/dk ve 110 kg koşulunda SDE<sub>E</sub> optimum değerine ulaşmaktadır.

Şekil 5.10’da sedimanter kırıntılı kayaçlar (kumtaşları) grubu için dönme hızı/devir sabit tutulduğunda, baskı yüküne bağlı olarak SDE<sub>E</sub> değerlerindeki değişim gösterilmiştir. Böylece, grup içerisinde yer alan kayaçlar için optimum SDE<sub>E</sub> değerleri elde edilmiştir. S3 ve S16 örnekleri için en uygun SDE<sub>E</sub> değerleri 210 dev/dk ve 110 kg’lık çalışma koşullarında

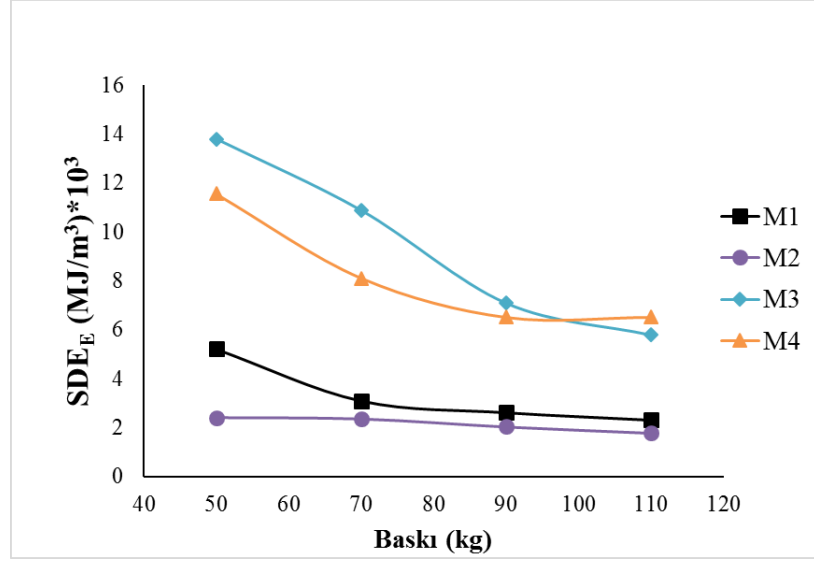
sağlanmıştır. S4 örneği için  $SDE_E$ 'nin en küçük olduğu değerler 470 dev/dk ve 70 kg'lık baskı yükü altında edilmiştir. S1, S5, S6 ve S15 örnekleri için  $SDE_E$  değerleri 470 dev/dk ve 110 kg'lık baskı yükü koşullarında optimum delme performansına ulaşmıştır.

Benzer çalışma Şekil 5.11'de yer alan sedimanter karbonatlı kayalar grubu için de gerçekleştirilmiş ve sabit dönme hızı/devir koşulları altında baskı yükü arttırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelenerek çalışmada kullanılan karbonatlı kayalar için optimum  $SDE_E$  değerleri belirlenmiştir. S8 (kireçtaşı) kayaç örneği için  $SDE_E$  değerlerinin en uygun olduğu çalışma şartı 330 dev/dk ve 110 kg'lık baskı yükü koşulunda sağlanmıştır. Benzer bir durum en uygun çalışma devri açısından SK1 (kireçtaşı) ve SK2 (dolomitik kireçtaşı) kayaları içinde belirlenmiştir. Ancak SK1 ve SK2 kayaları için  $SDE_E$ 'nin en düşük olduğu değerler baskı yükü 90 kg olduğunda sağlanmıştır. S9 (dolomit) örneği için  $SDE_E$ 'nin en küçük olduğu koşullar 470 dev/dk ve 70 kg'lık çalışma şartlarında sağlanmıştır. SK3 (dolomit) örneğinde ise, 470 dev/dk ile 110 kg'lık çalışma şartları  $SDE_E$  en uygun değerleri almıştır.

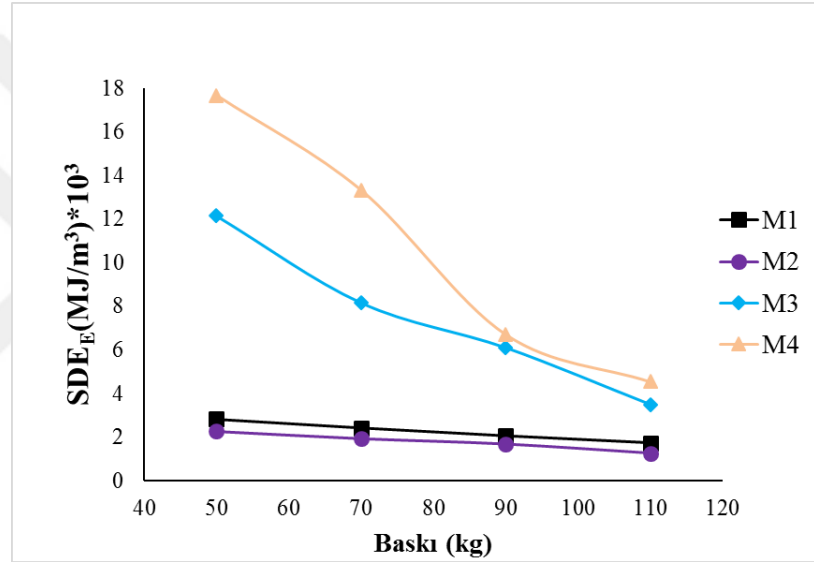
Baskı yükü ile  $SDE$  değerleri arasındaki ters ilişki farklı araştırmacılar tarafından da ortaya konmuştur (Teale 1965, Huang ve Wang 1997, Ersoy 2003, Celeda vd. 2012).

Delme performansı üzerinde tüm makine parametreleri incelendiğinde, en önemli etkinin delici uç üzerinde baskı tarafından sağlandığı yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir. Delme çalışmaları sırasında, delici uç üzerindeki baskı yükü arttırıldıkça tork değerleri artmakta ve buna bağlı olarak  $SDE_E$  değerleri azalmaktadır.

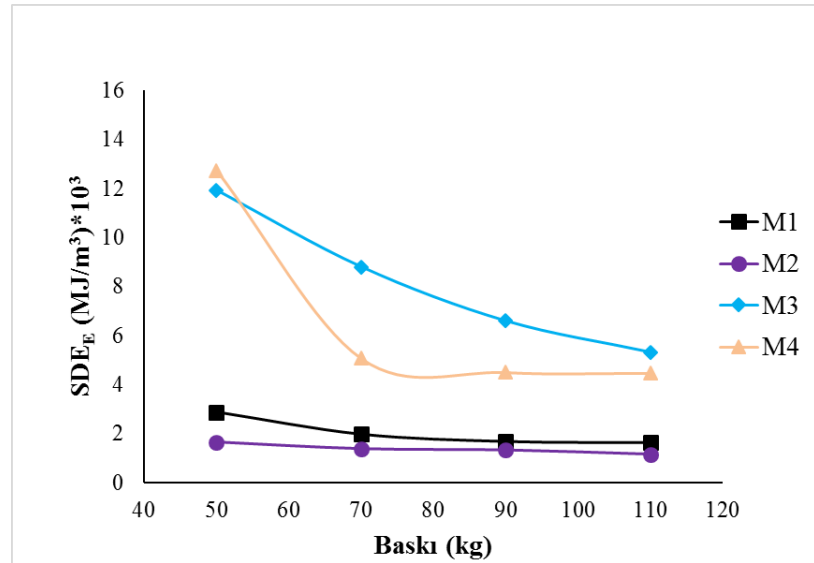
210  
dev/dk



330  
dev/dk



470  
dev/dk

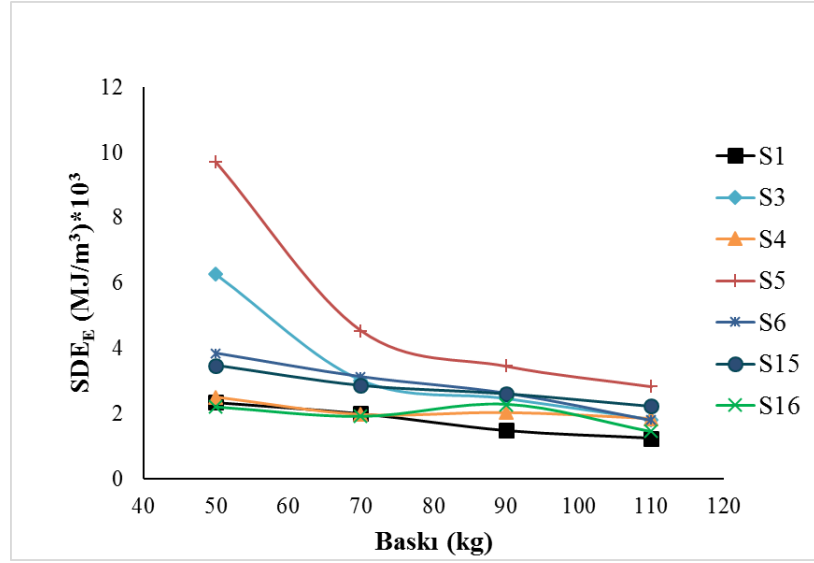


(M1 ve M2 andezit, M3 bazalt ve M4 granit)

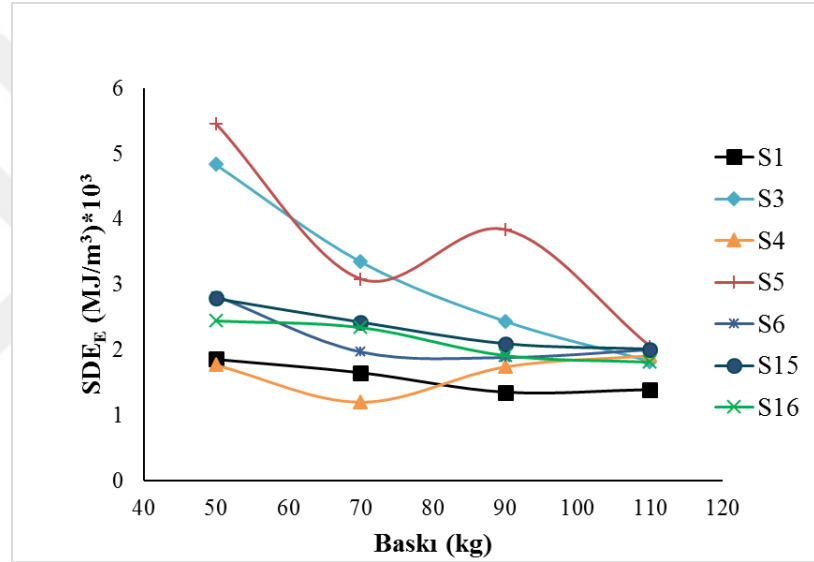
Şekil 5.9 Magmatik kayaçlar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki.



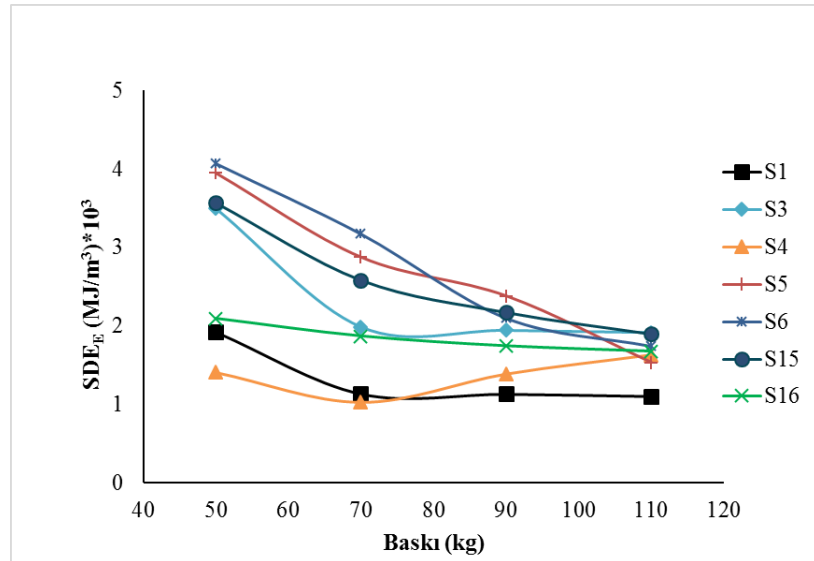
210  
dev/dk



330  
dev/dk



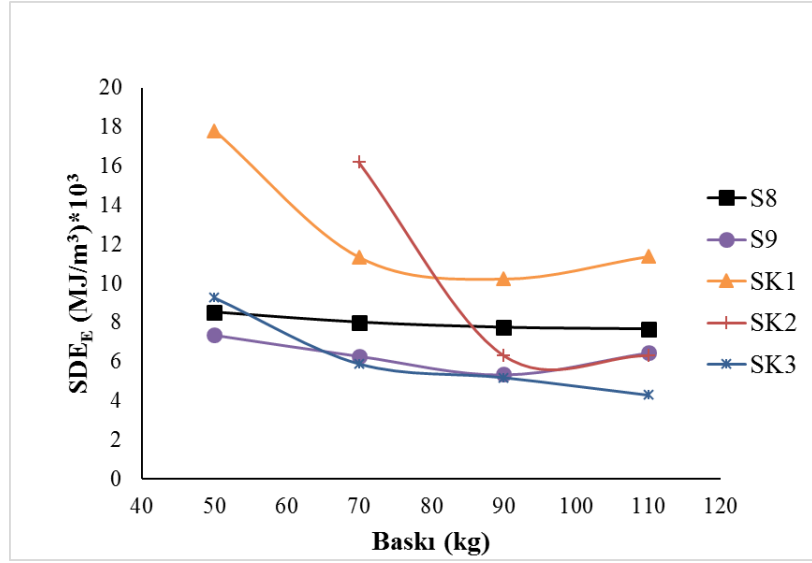
470  
dev/dk



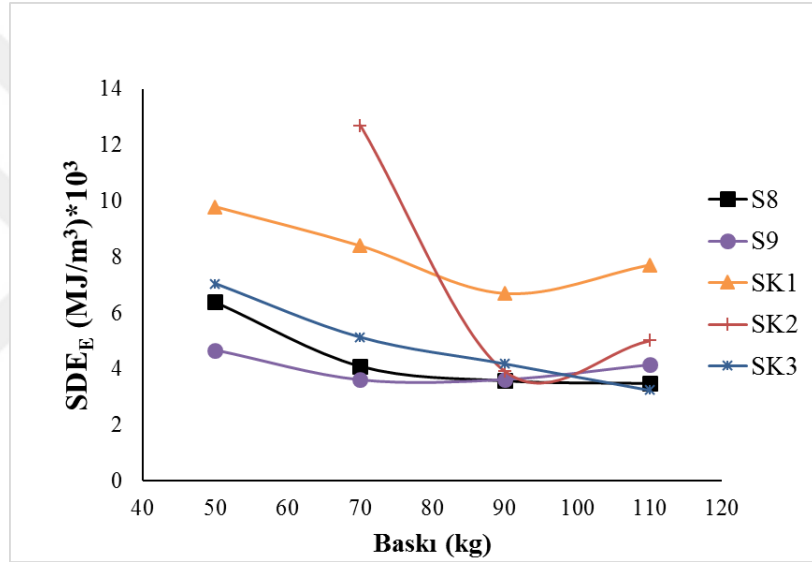
(S1, S3, S4, S5, S6, S15 ve S16 kumtaşları)

Şekil 5.10 Sedimanter kırıntılı kayalar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki.

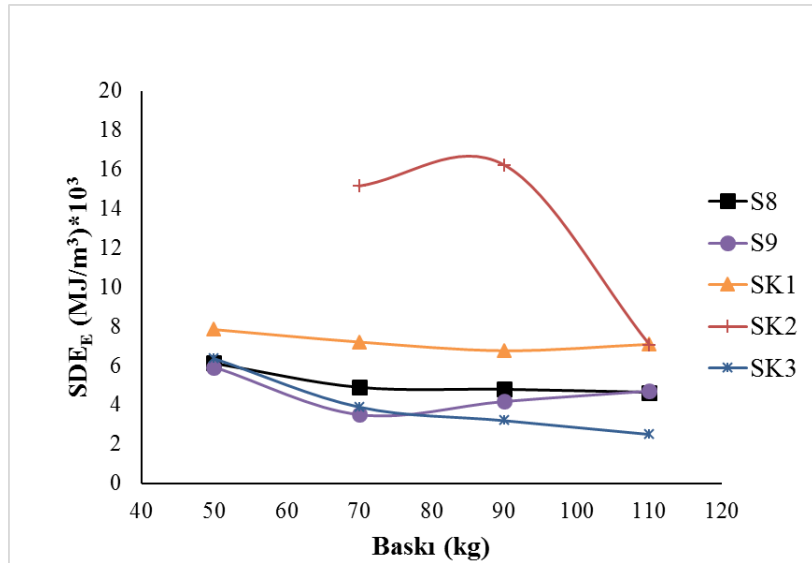
210  
dev/dk



330  
dev/dk



470  
dev/dk

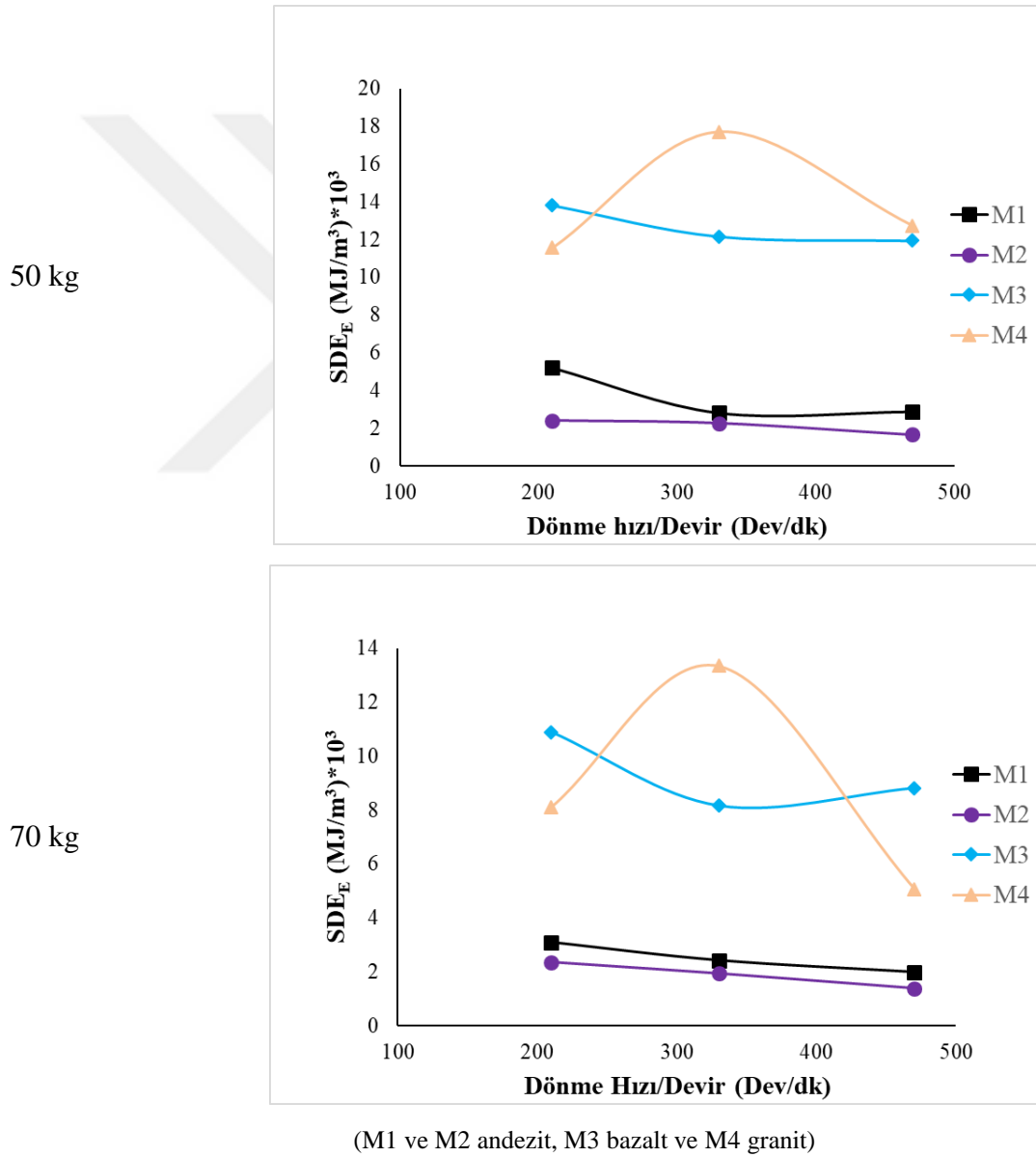


(S8 kireçtaşı, S9 dolomit, SK1 kireçtaşı, SK2 dolomitik kireçtaşı ve SK3 dolomit)

Şekil 5.11 Sedimanter karbonatlı kayalar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki.

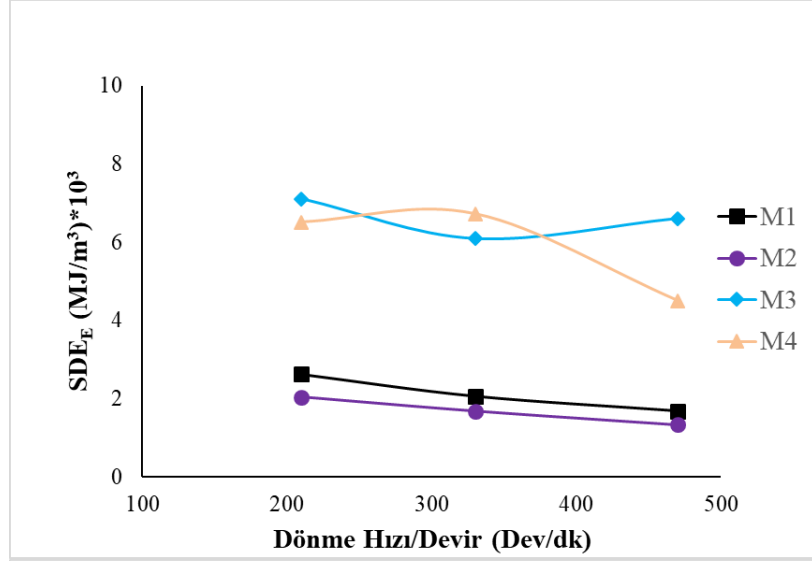
### 5.1.1.2. Dönme Hızı/Devir – Elektriksel Spesifik Delme Enerjisi Arasındaki İlişki

Döner delik delme deney seti ile yapılan çalışmalar 270 dev/dk, 330 dev/dk, 470 dev/dk olmak üzere 3 farklı dönme hızı koşulunda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, SDE verileri hesaplanırken kayaç ile delici ucun etkileşimi sırasında ölçülen fiili dönme hızları kullanılmıştır. Delme setinin çalışması sırasında, dönme hızı ile  $SDE_E$  verileri arasındaki ilişki Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14'te gösterilmiştir. Yapılan çalışmalar, dönme hızı/devirdeki değişimin SDE değerlerinden daha çok ilerleme hızını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur.

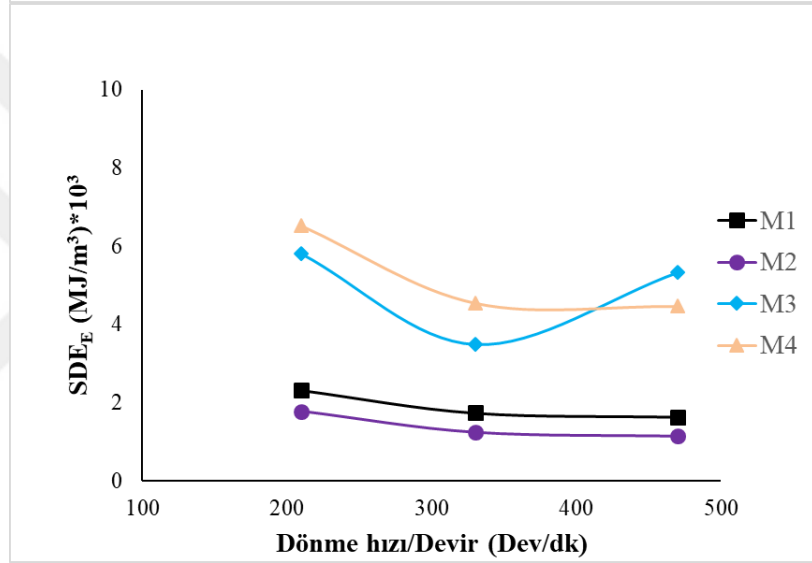


Şekil 5.12 Magmatik kayaçlar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki.

90 kg

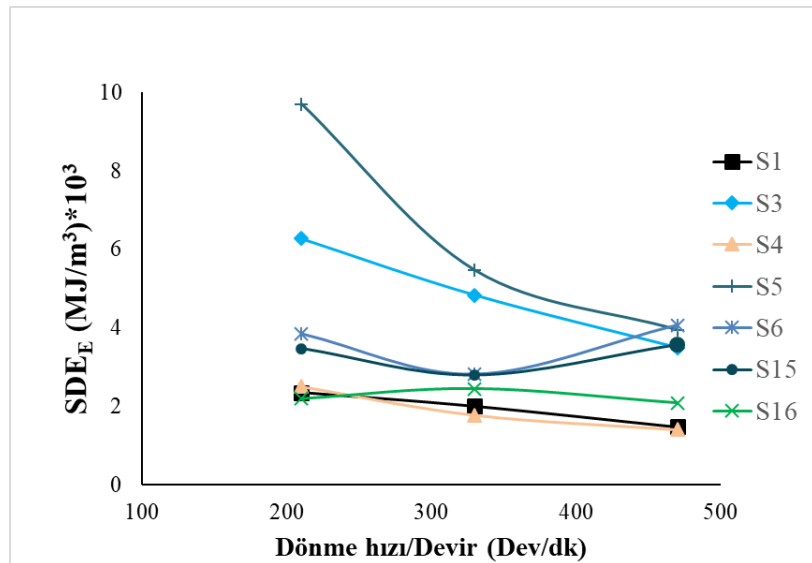


110 kg



Şekil 5.12 Devam ediyor.

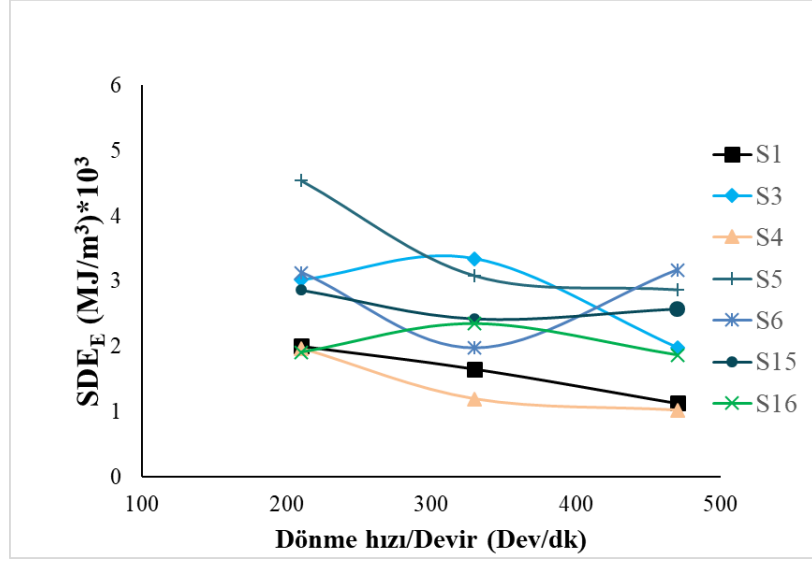
50 kg



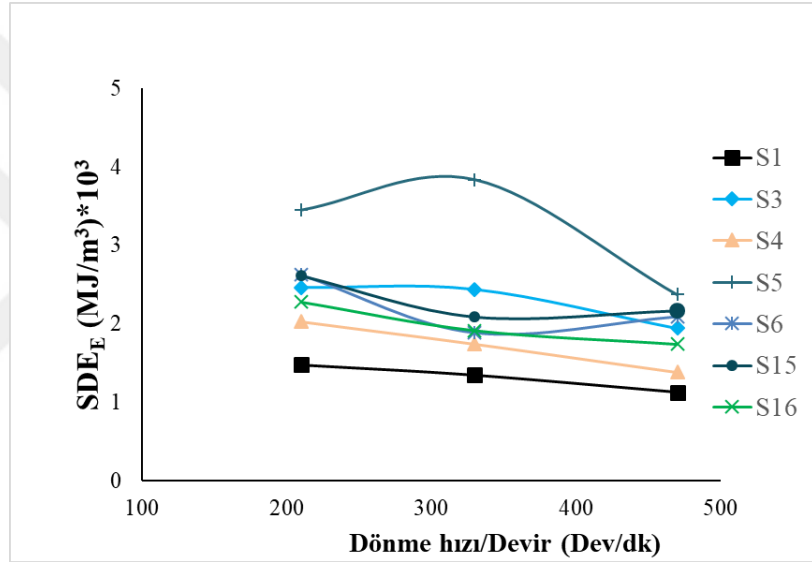
(S1, S3, S4, S5, S6, S15 ve S16 kumtaşları)

Şekil 5.13 Sedimanter kırıntılı kayalar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki.

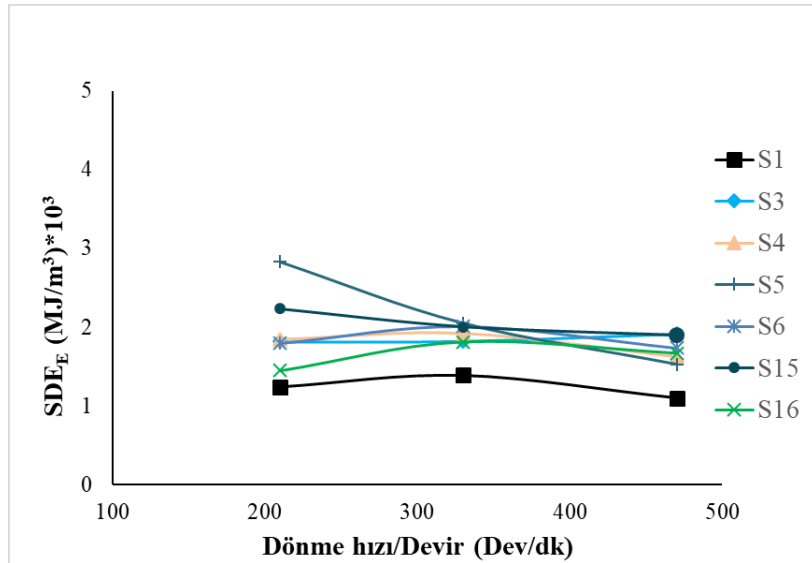
70 kg



90 kg

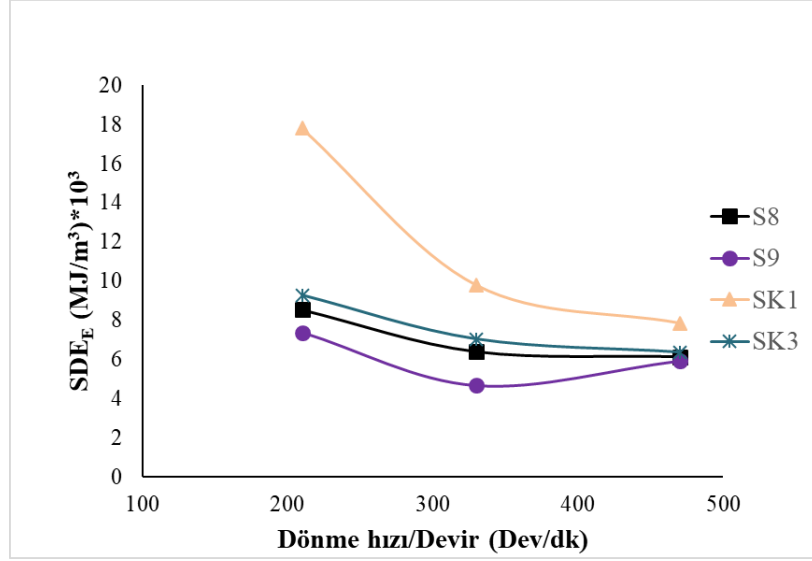


110 kg

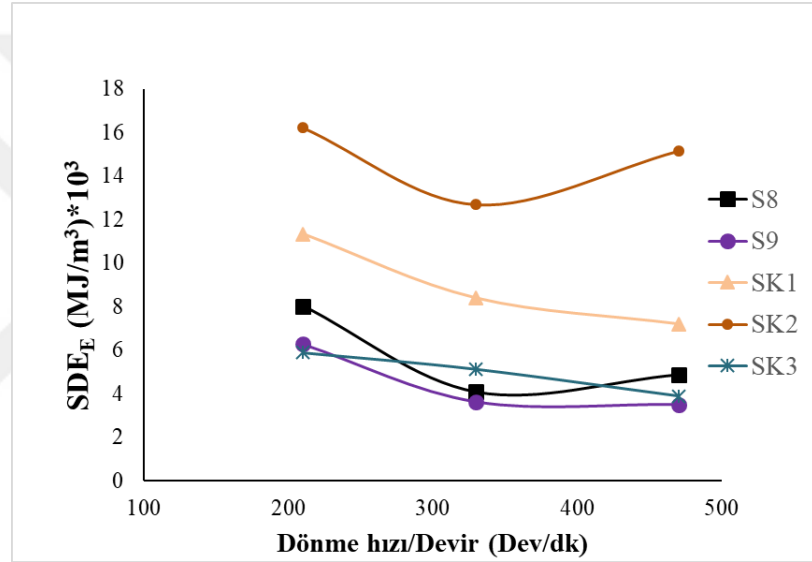


Şekil 5.13 (devam ediyor).

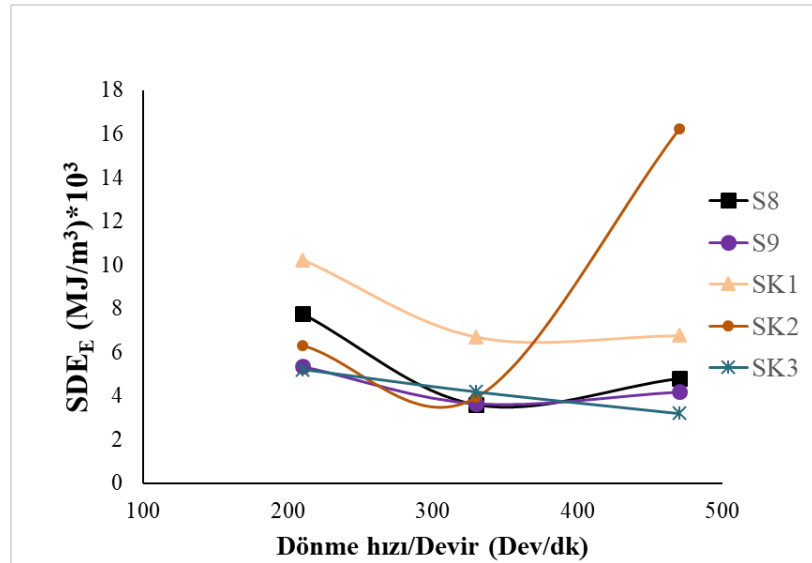
50 kg



70 kg



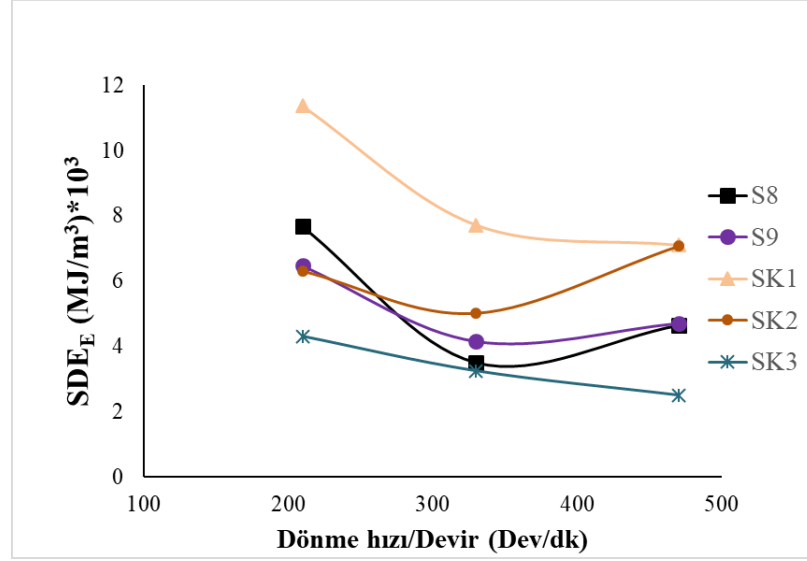
90 kg



S8 kireçtaşı, S9 dolomit, SK1 kireçtaşı, SK2 dolomitik kireçtaşı ve SK3 dolomit

Şekil 5.14 Sedimanter karbonatlı kayalar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile elektriksel spesifik delme enerjisi arasındaki ilişki.

110 kg



Şekil 5.14 (devam ediyor).

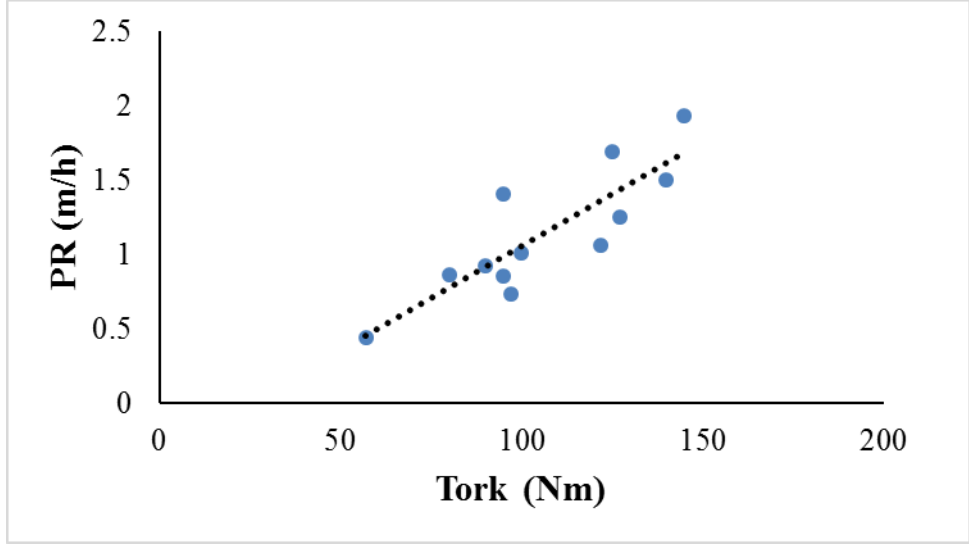
### 5.1.2. İlerleme Hızı (PR)

Delme performansının belirlenmesinde kullanılan bir diğer önemli parametre ise kayaç içerisinde delici ucun yapmış olduğu ilerleme hızıdır. Bu çalışma kapsamında, döner delik delme deney seti ile kayaç örnekleri üzerinde yapılan deneylerde, operasyonel makine parametrelerinin ilerleme hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

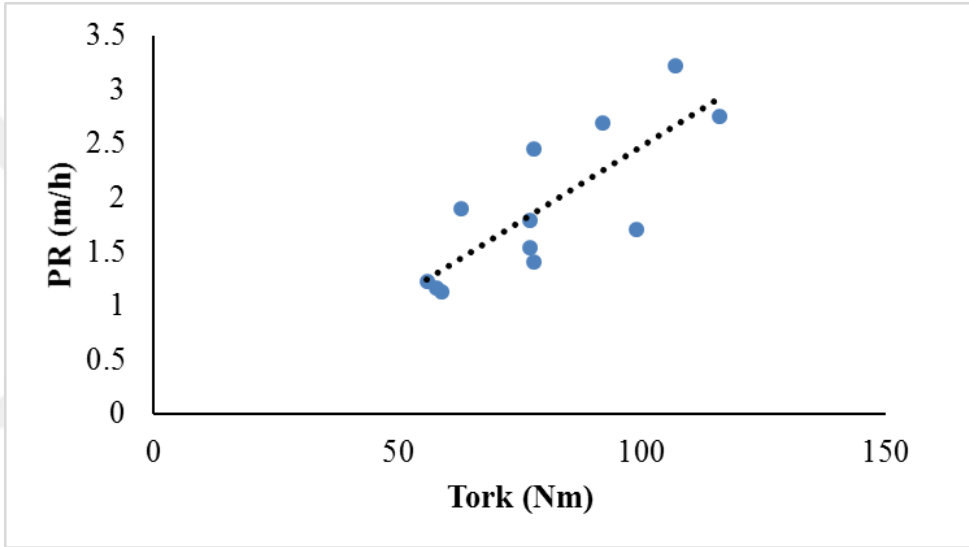
#### 5.1.2.1. Tork – İlerleme Hızı Arasındaki İlişki

Kayaç ile delici ucun etkileşimi sırasında makinadan ölçülen tork değerleri ile delinen delik uzunluğuna bağlı olarak hesaplanan PR değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17’de sunulmuştur. Tüm kayaçlar ayrı ayrı göz önünde bulundurulduğunda, tork arttıkça PR değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.

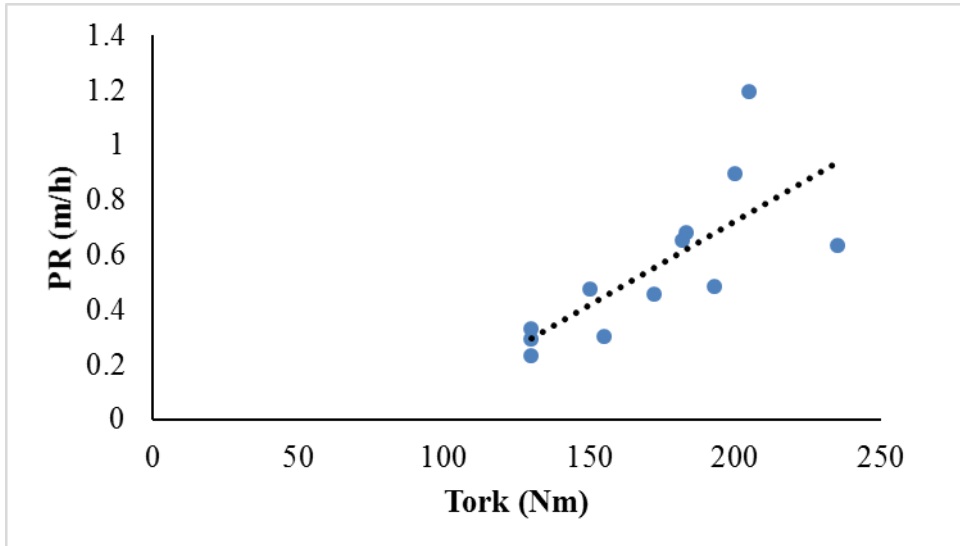
M1  
(Andezit)



M2  
(Andezit)



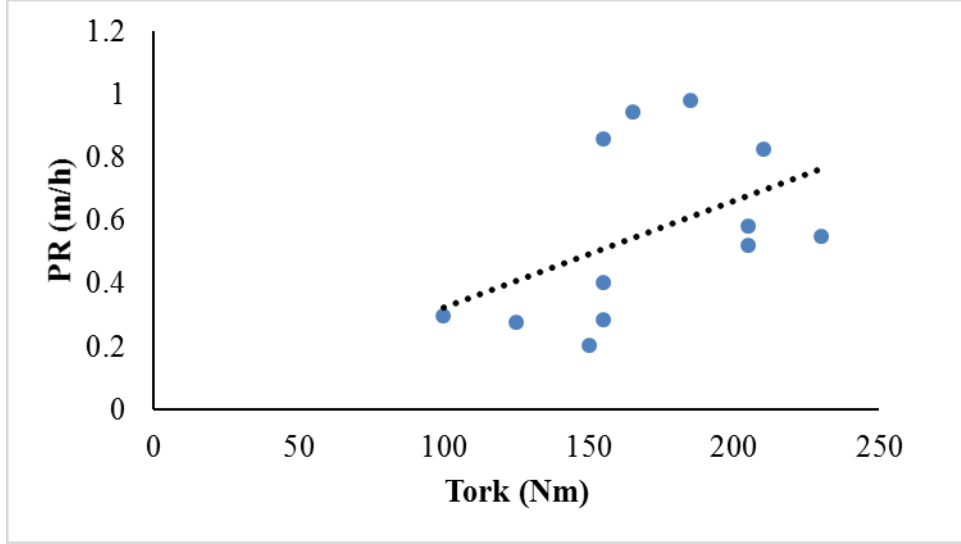
M3  
(Bazalt)



Şekil 5.15 Magmatik kayalarda tork – ilerleme hızı arasındaki ilişki.

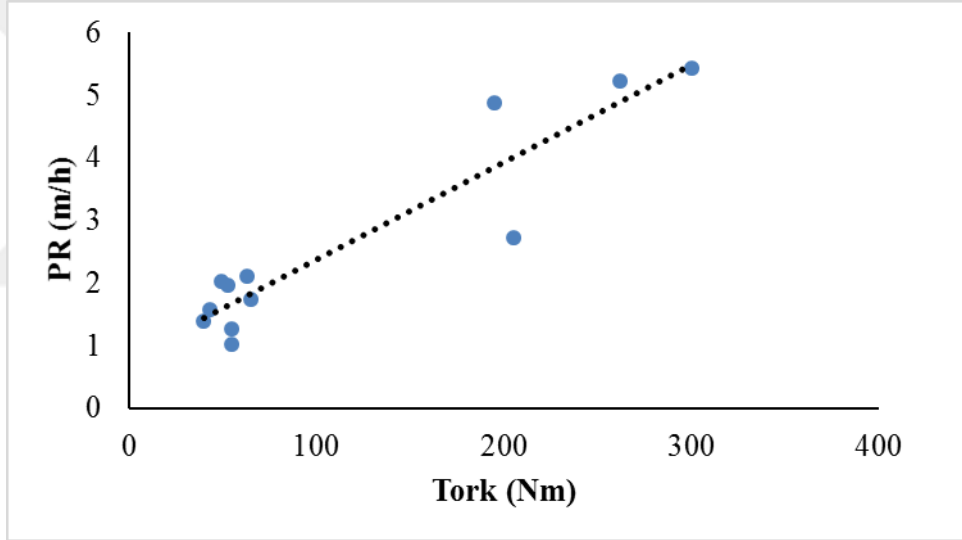


M4  
(Granit)

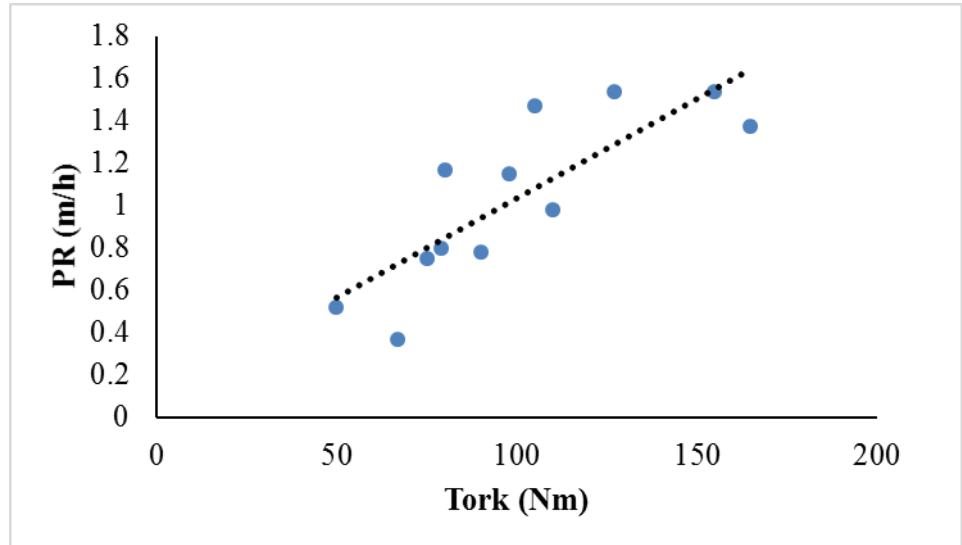


Şekil 5.15 (devam ediyor).

S1  
(Kumtaşı)

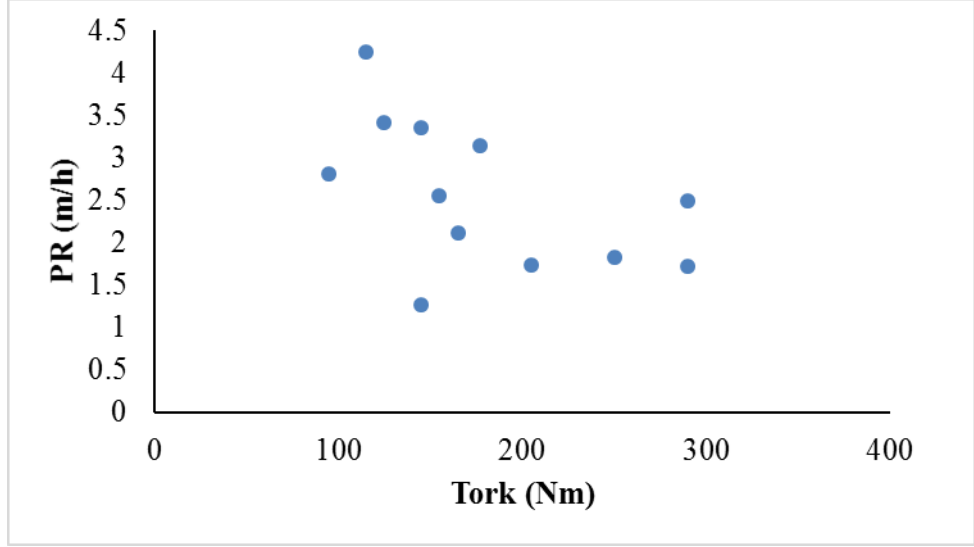


S3  
(Kumtaşı)

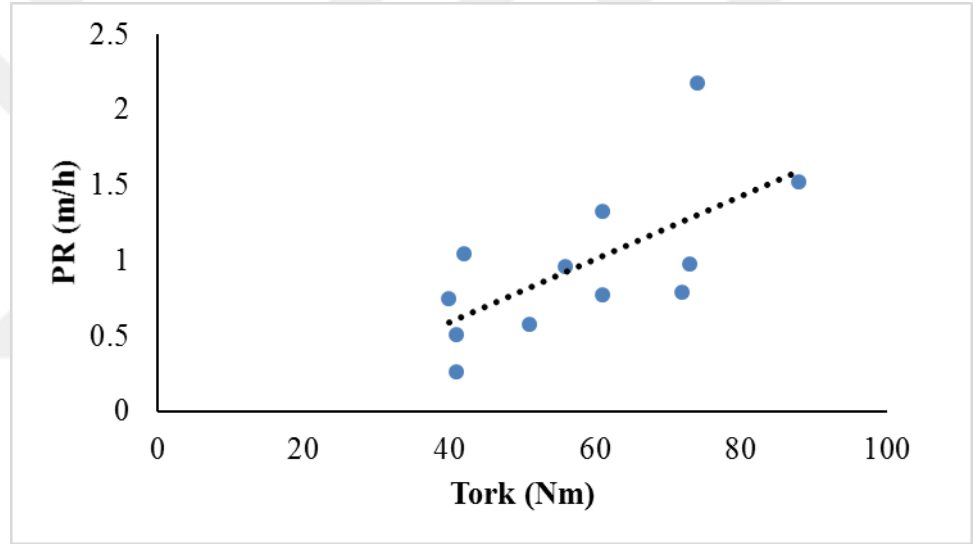


Şekil 5.16 Sedimanter kırıntılı kayaçlarda tork – ilerleme hızı arasındaki ilişki.

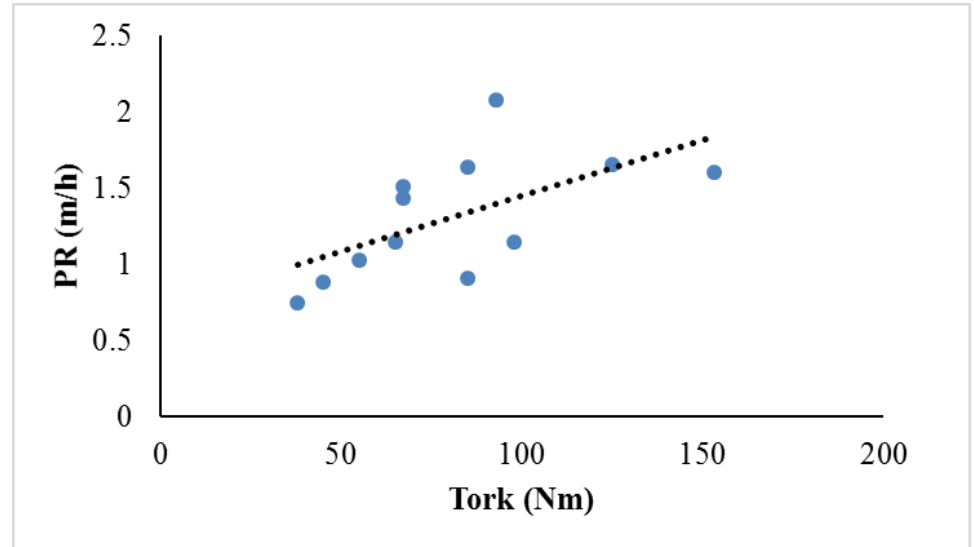
S4  
(Kumtaşı)



S5  
(Kumtaşı)

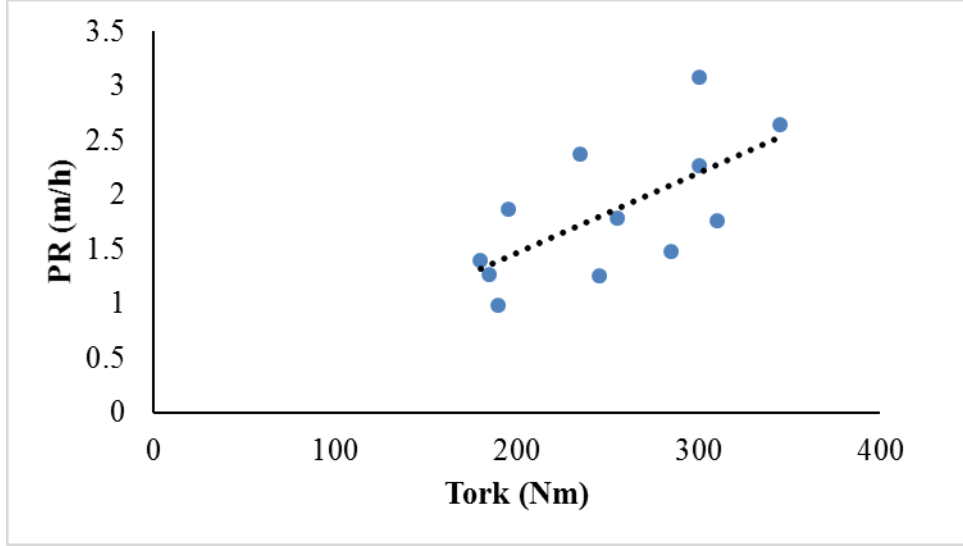


S6  
(Kumtaşı)

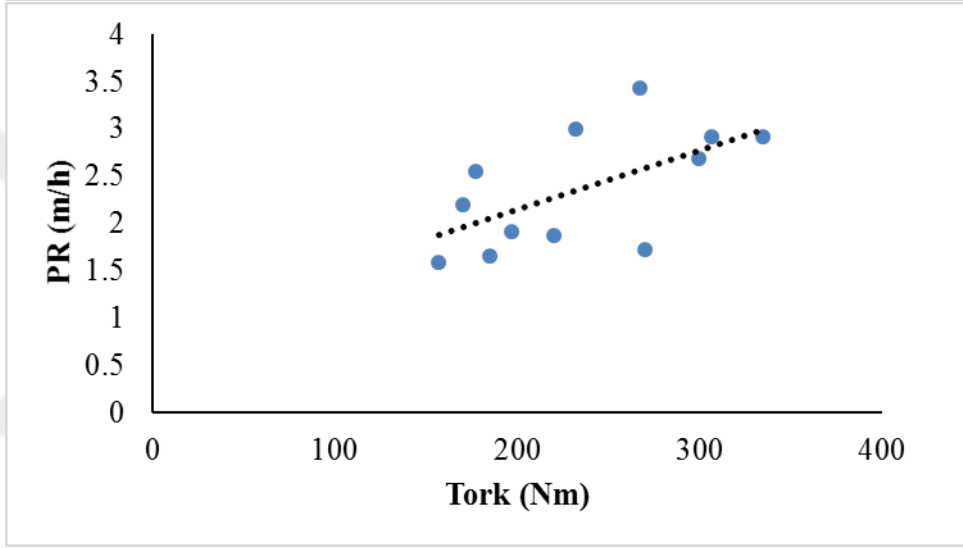


Şekil 5.16 (devam ediyor).

S15  
(Kumtaşı)

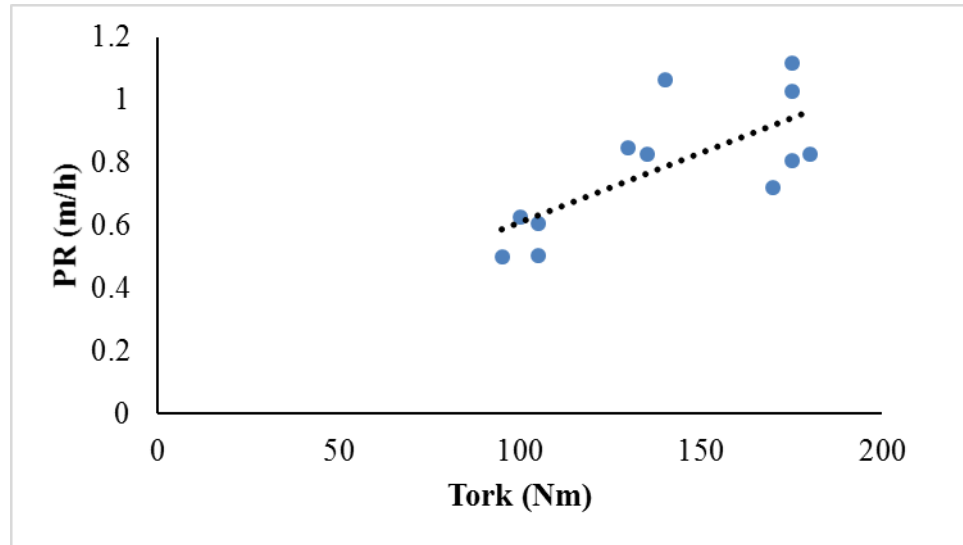


S16  
(Kumtaşı)



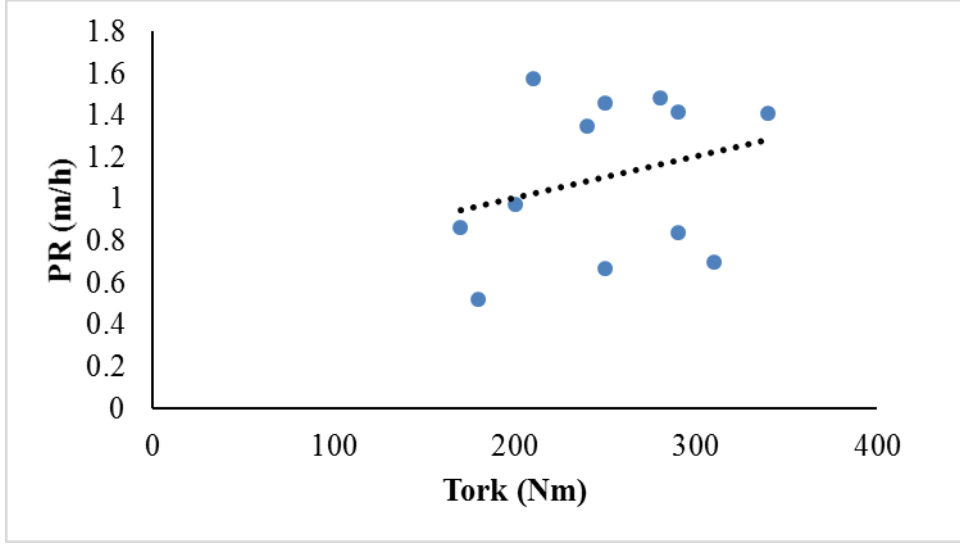
Şekil 5.16 (devam ediyor).

S8  
(Kireçtaşı)

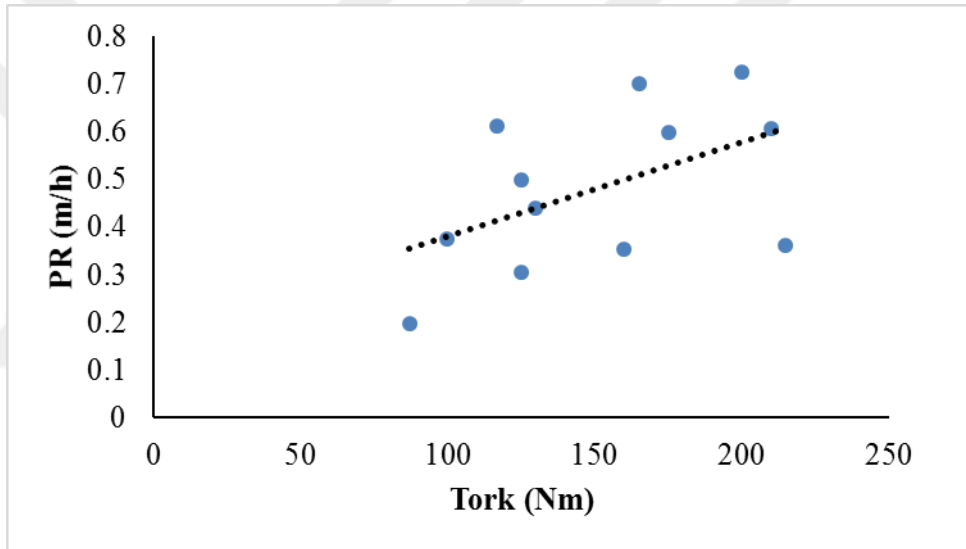


Şekil 5.17 Sedimanter karbonatlı kayalarda tork – ilerleme hızı arasındaki ilişki.

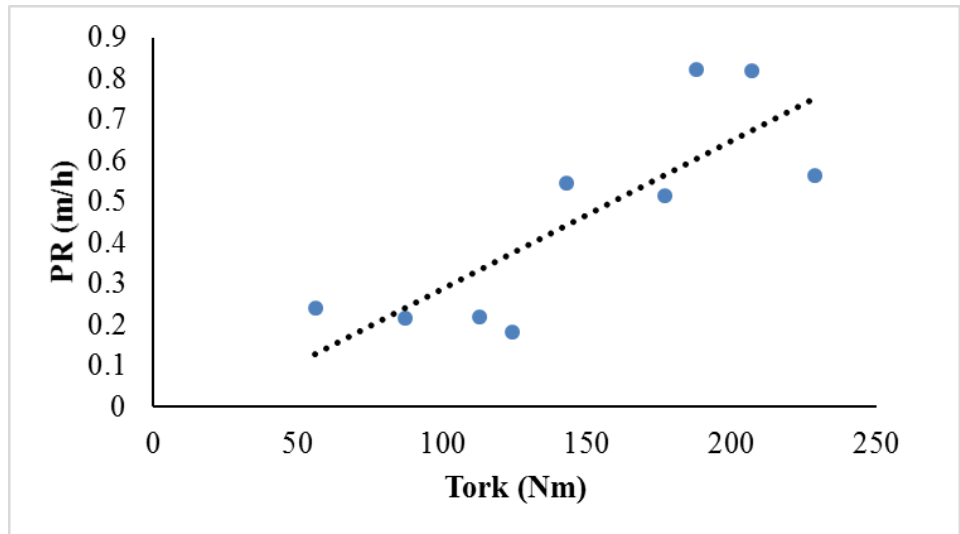
S9  
(Dolomit)



SK1  
(Kireçtaşı)

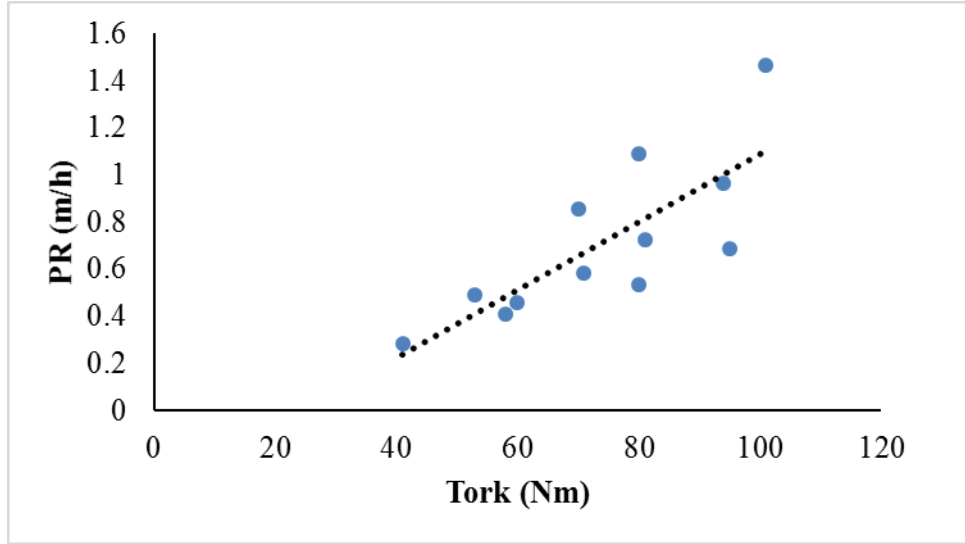


SK2  
(Dolomitik  
Kireçtaşı)



Şekil 5.17 (devam ediyor).

SK3  
(Dolomit)



Şekil 5.17 (devam ediyor).

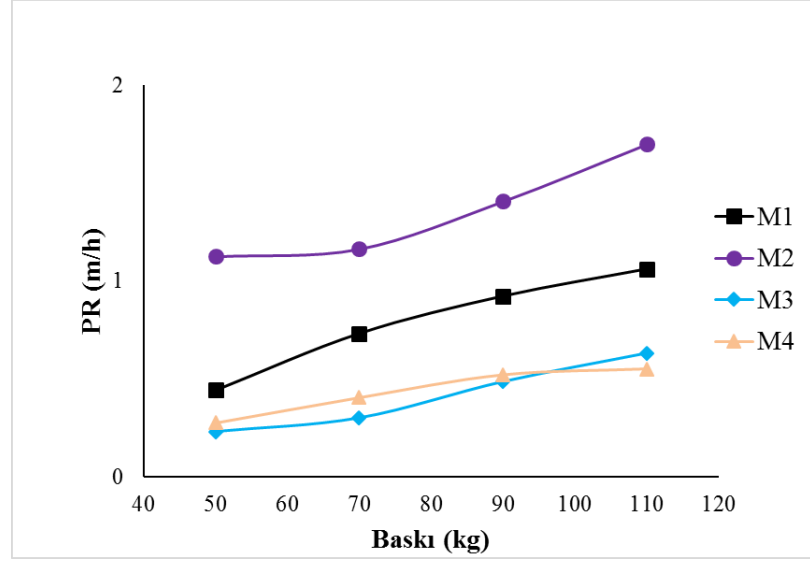
### 5.1.2.2. Baskı Yüğü – İlerleme Hızı Arasındaki İlişki

Yapılan çalışmalarda delici uç üzerindeki baskı yükündeki artışa bağlı olarak daha yüksek PR değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir. 3 kayaç grubu için dönme hızı/devir sabit tutulup, baskı yükü arttırıldığında PR değerlerindeki artış Şekil 5.18, 5.19 ve 5.20’de gösterilmiştir.

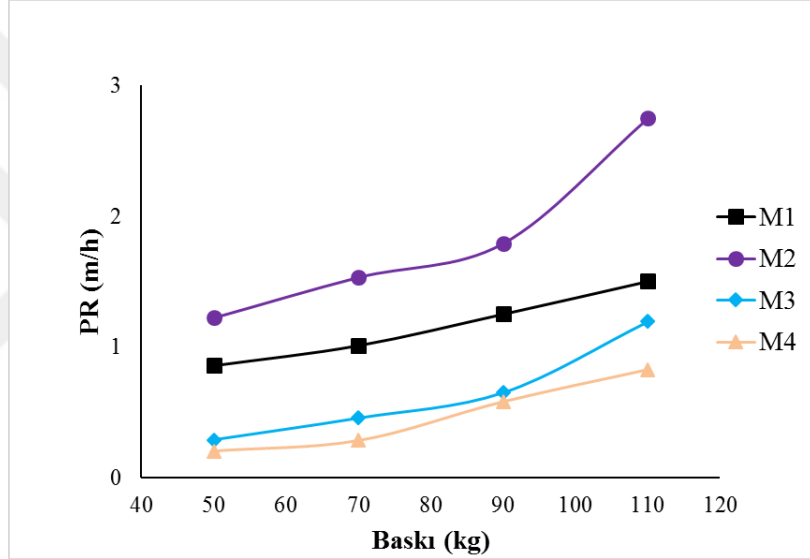
Buna göre; magmatik kayaçlar grubu için sabit dönme hızı/devirde uygulanan baskı yükü ile PR değerlerinin değişimi incelendiğinde, M1, M2 (andezitler) ve M4 (granit) örnekleri için 470 dev/dk ve 110 kg’lık çalışma koşullarında ve M3 (bazalt) örneği incelendiğinde ise 330 dev/dk ve 110 kg koşulunda en yüksek PR değerleri elde edilmiştir (Şekil 5.18).

Sedimanter kırıntılı kayaçlar (kumtaşları) grubu için dönme hızı/devir sabit tutularak baskı yükündeki değişime bağlı olarak PR incelendiğinde; S3 ve S16 örnekleri 210 dev/dk ve 110 kg, S4 örneği için 470 dev/dk ve 70 kg ve S1, S5, S6 ile S15 örnekleri için 470 dev/dk ve 110 kg’lık baskı yükü koşullarında en uygun PR değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir (Şekil 5.19). Aynı durum sedimanter karbonatlı kayaçlar grubu için de incelendiğinde; S8 (kireçtaşı) kayaç örneği için 330 dev/dk ve 110 kg, SK1 (kireçtaşı) ve SK2 (dolomitik kireçtaşı) kayaçları için 330 dev/dk ve 90 kg, S9 (dolomit) örneği için 470 dev/dk ve 70 kg ve SK3 (dolomit) örneği için ise 470 dev/dk ile 110 kg’lık çalışma şartlarında en uygun PR değerlerine ulaşılmıştır (Şekil 5.20).

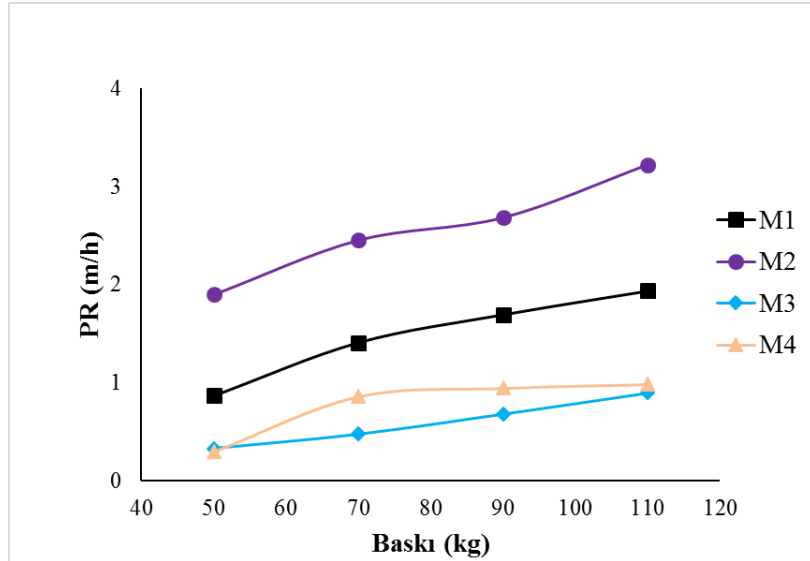
210  
dev/dk



330  
dev/dk



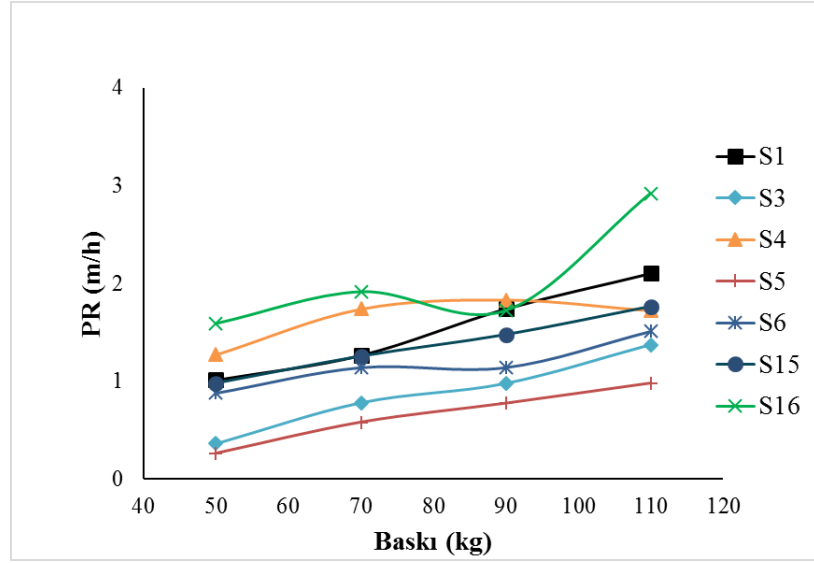
470  
dev/dk



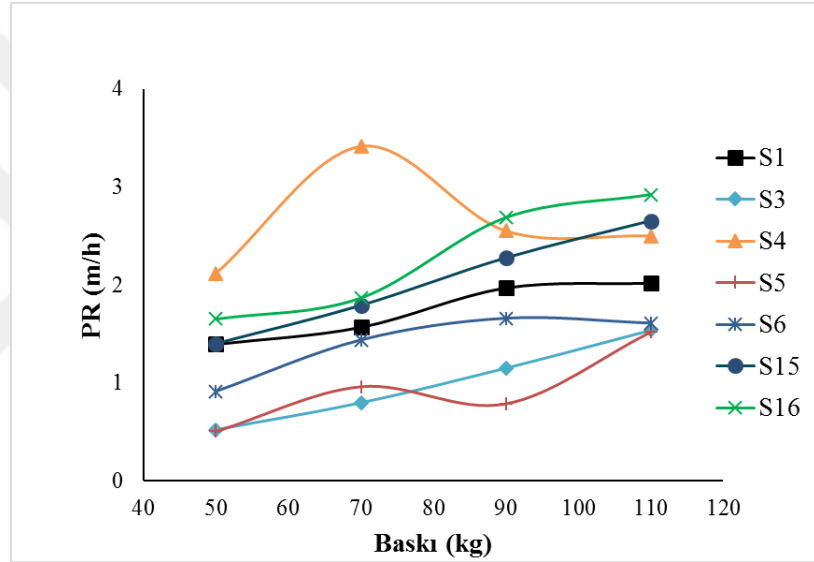
(M1 ve M2 andezit, M3 bazalt ve M4 granit)

Şekil 5.18 Magmatik kayalar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile ilerleme hızı arasındaki ilişki.

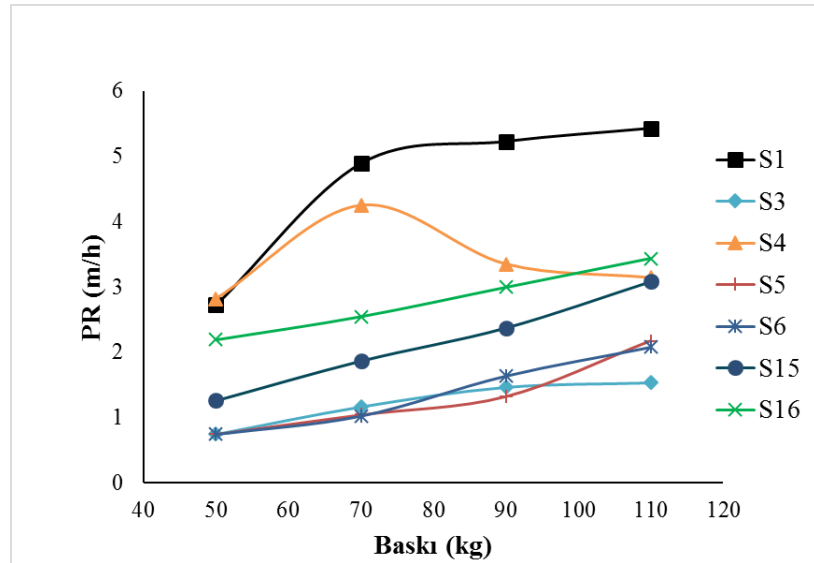
210  
dev/dk



330  
dev/dk



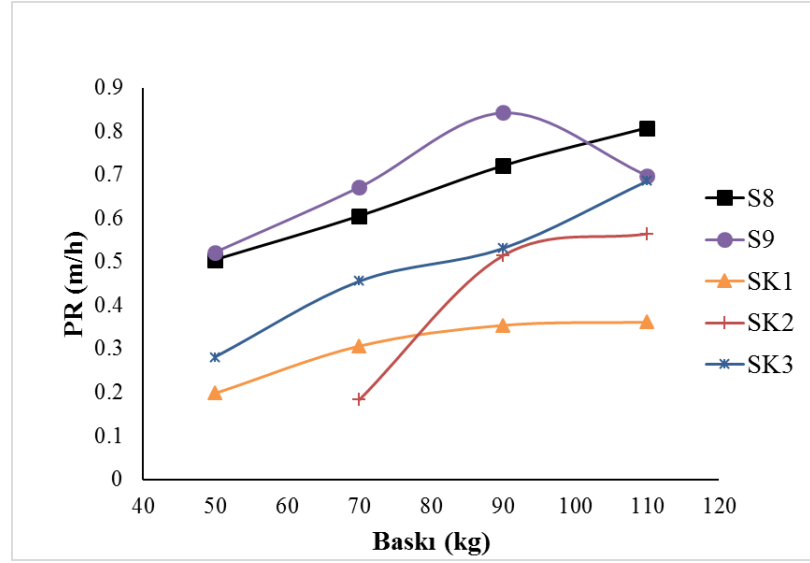
470  
dev/dk



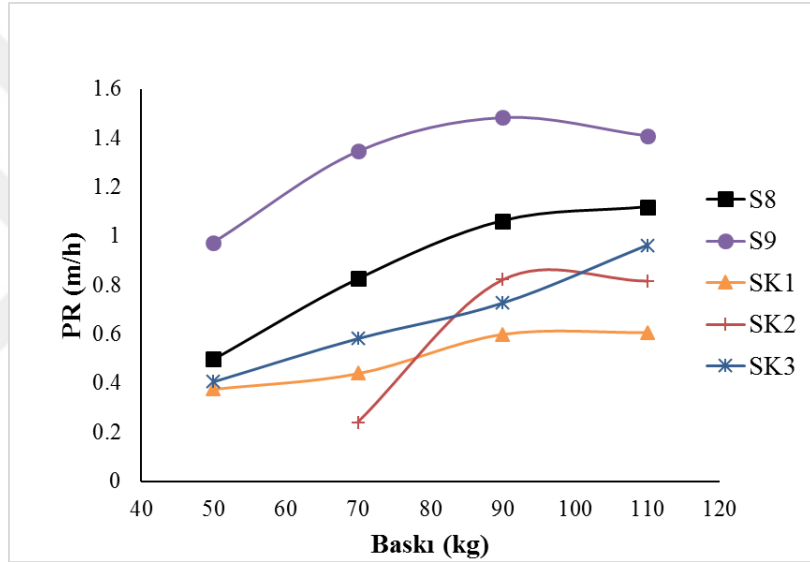
(S1, S3, S4, S5, S6, S15 ve S16 kumtaşları)

Şekil 5.19 Sedimanter kırıntılı kayaçlar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile ilerleme hızı arasındaki ilişki.

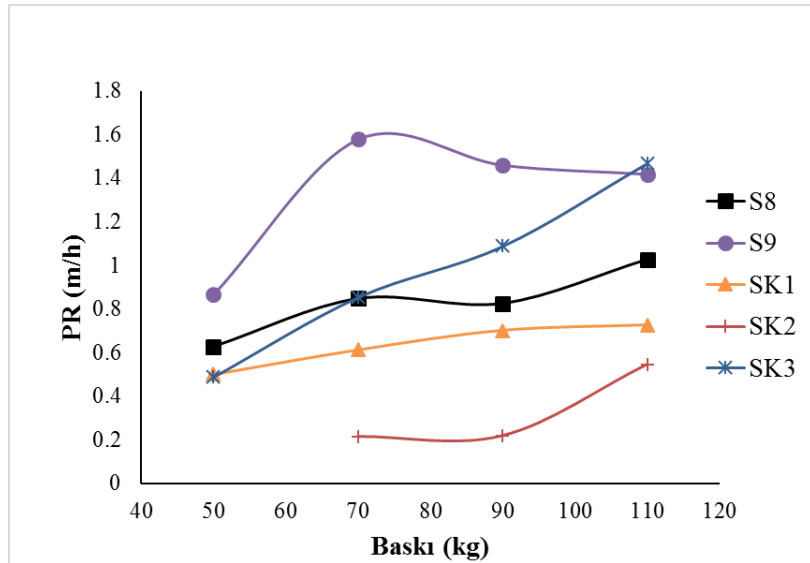
210  
dev/dk



330  
dev/dk



470  
dev/dk



(S8 kireçtaşı, S9 dolomit, SK1 kireçtaşı, SK2 dolomitik kireçtaşı ve SK3 dolomit)

Şekil 5.20 Sedimanter karbonatlı kayalar için, dönme hızı/devir sabit tutulduğunda baskı yükü ile ilerleme hızı arasındaki ilişki.



Makine parametrelerine bağı olarak delme performansı incelendiğinde, PR değerlerine etki eden en önemli parametrenin baskı olduğu belirlenmiştir. Delici uç üzerine uygulanan baskıya bağı olarak kayaçlar içerisinde yapılan ilerleme miktarı artmaktadır.

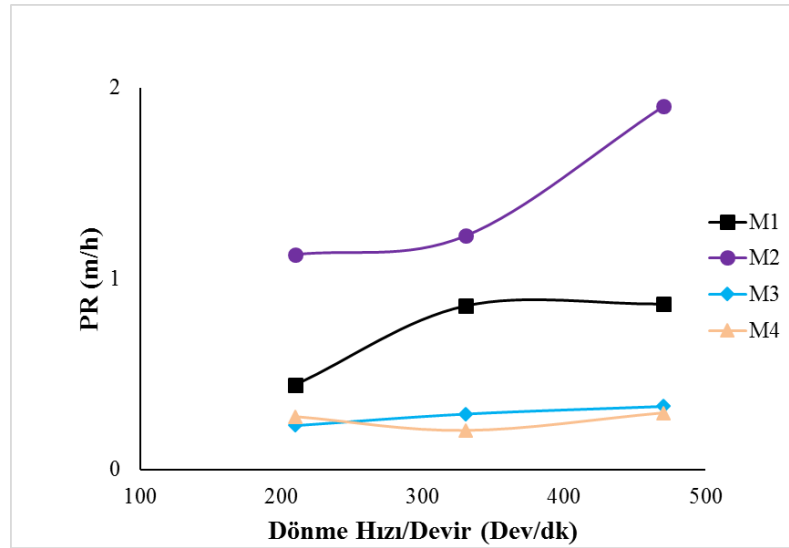
### 5.1.2.3. Dönme Hızı/Devir – İlerleme Hızı Arasındaki İlişki

Yapılan çalışmalar, makinanın devrindeki artışın PR değerlerini olumlu bir şekilde etkilediğini göstermiştir. Kayaçın üzerindeki baskı yükü ve makinanın dönme hızını birlikte arttırıldığında yüksek PR değerlerine ulaşılmıştır. Özellikle dönme hızı/devirdeki değişimin PR üzerinde önemli bir etkisi olduğu Şekil 5.21, 5.22 ve 5.23'te gösterilmiştir.

Şekil 5.21, 5.22 ve 5.23'te 3 kayaç grubu için de baskı koşulları sabit tutulduğunda dönme hızı/devir değişim ile PR arasındaki ilişki incelenmiştir.

Bu durum literatürde farklı araştırmacılar (Huang ve Wang 1997, Bhatnagar vd. 2011, Alireza vd. 2012, Shaabani vd. 2015, Deng vd 2016) tarafından yapılan çalışmalar ile de benzerlikler göstermektedir.

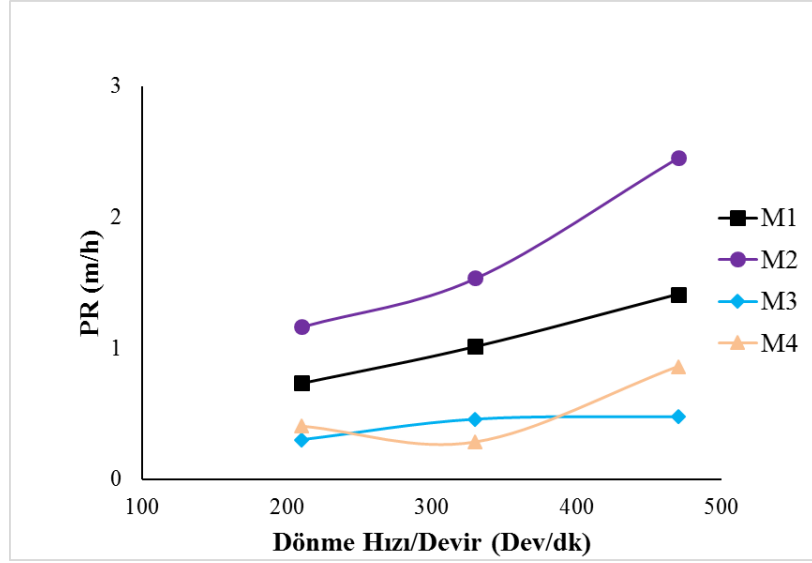
50 kg



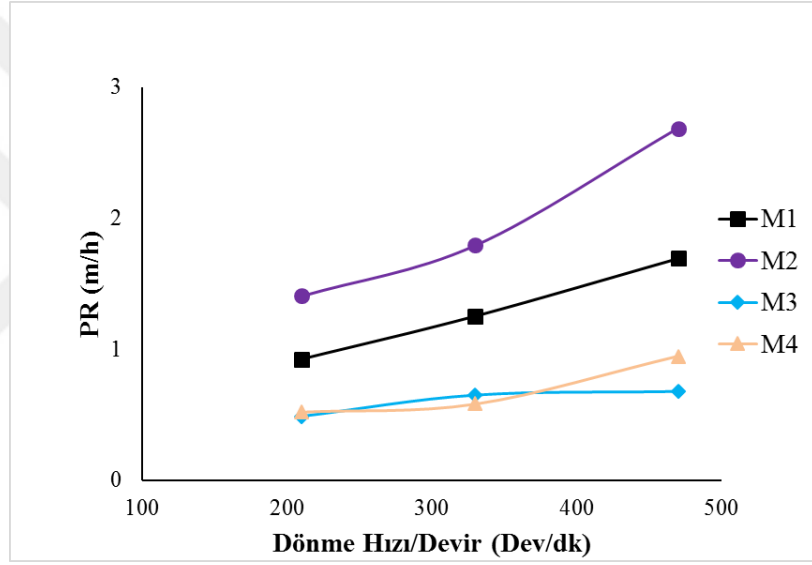
(M1 ve M2 andezit, M3 bazalt ve M4 granit)

**Şekil 5.21** Magmatik kayaçlar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile ilerleme hızı arasındaki ilişki.

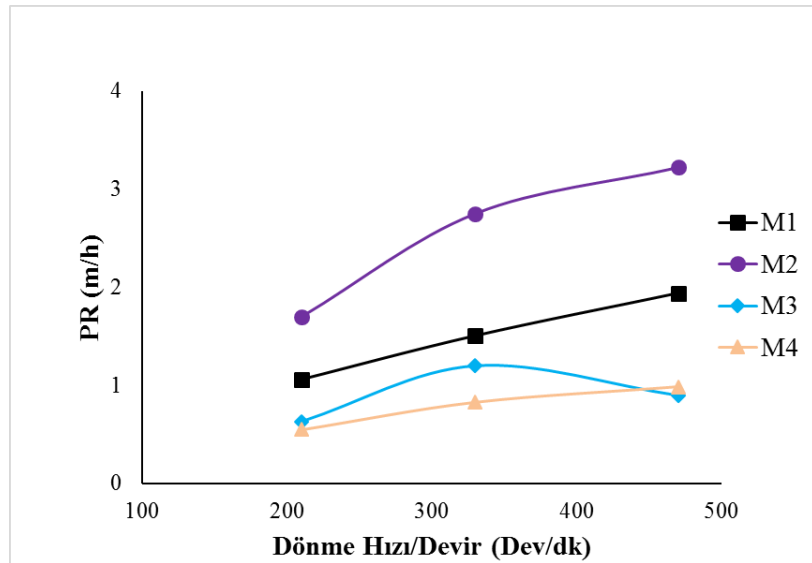
70 kg



90 kg



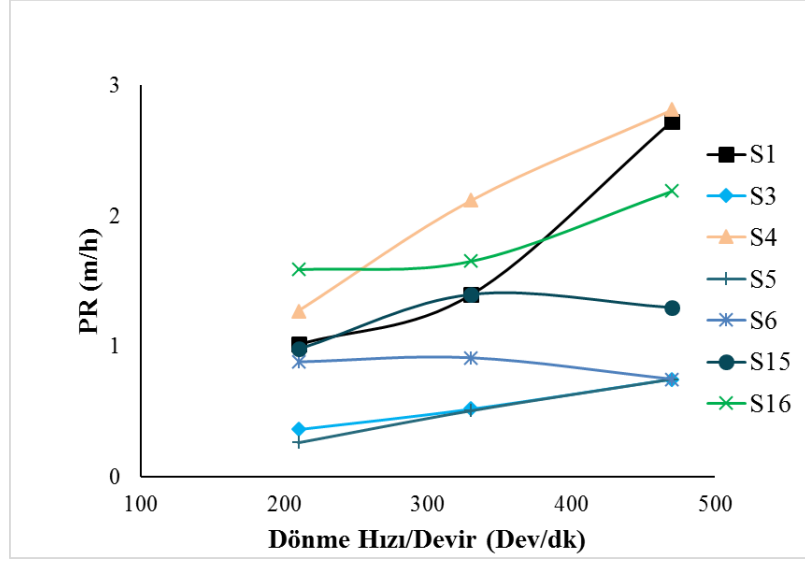
110 kg



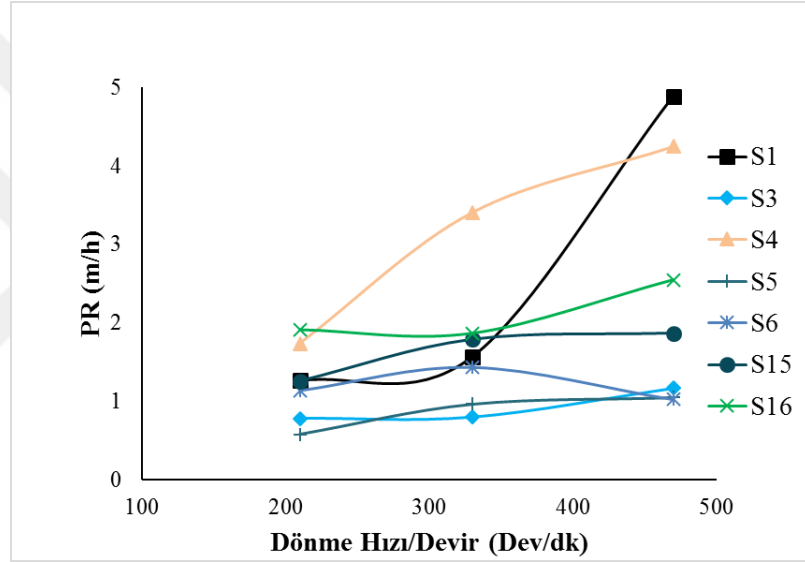
(M1 ve M2 andezit, M3 bazalt ve M4 granit)

Şekil 5.21 (devam ediyor).

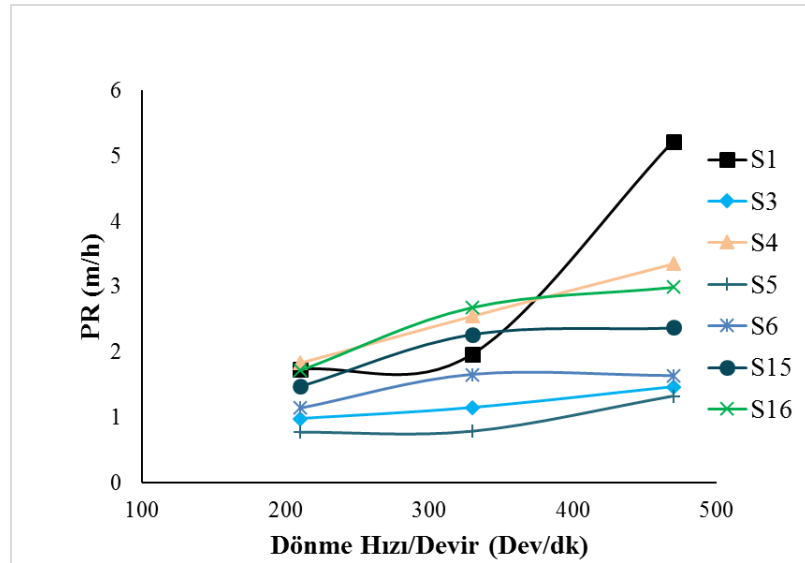
50 kg



70 kg



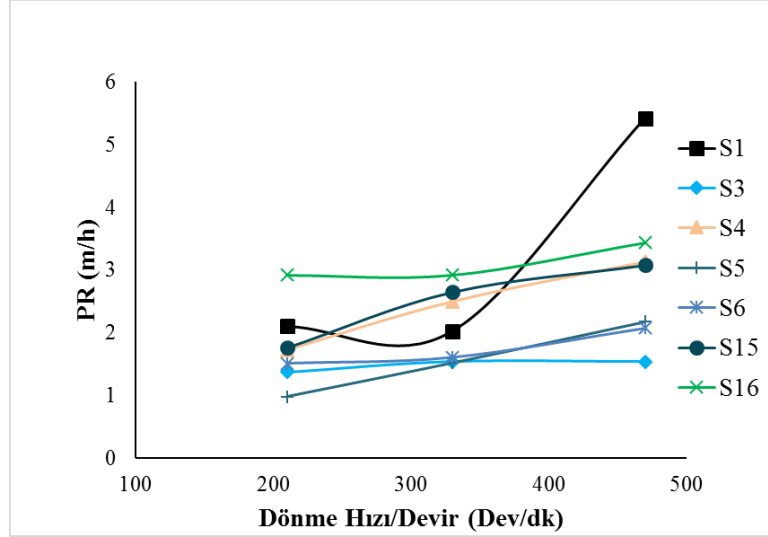
90 kg



(S1, S3, S4, S5, S6, S15 ve S16 kumtaşları)

Şekil 5.22 Sedimanter kırıntılı kayalar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile ilerleme hızı arasındaki ilişki.

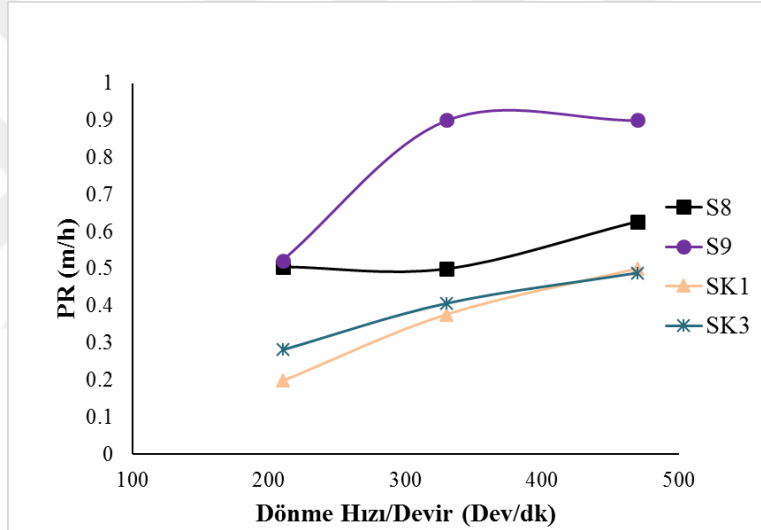
110 kg



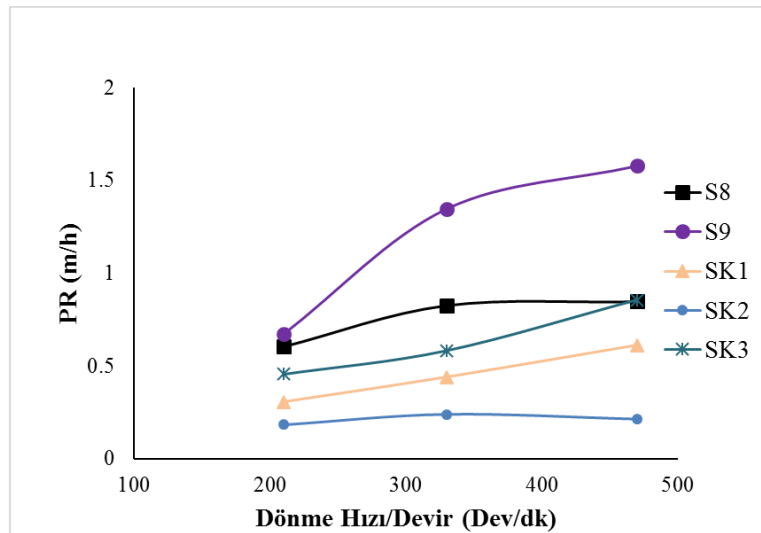
(S1, S3, S4, S5, S6, S15 ve S16 kumtaşları)

Şekil 5.22 (devam ediyor).

50 kg



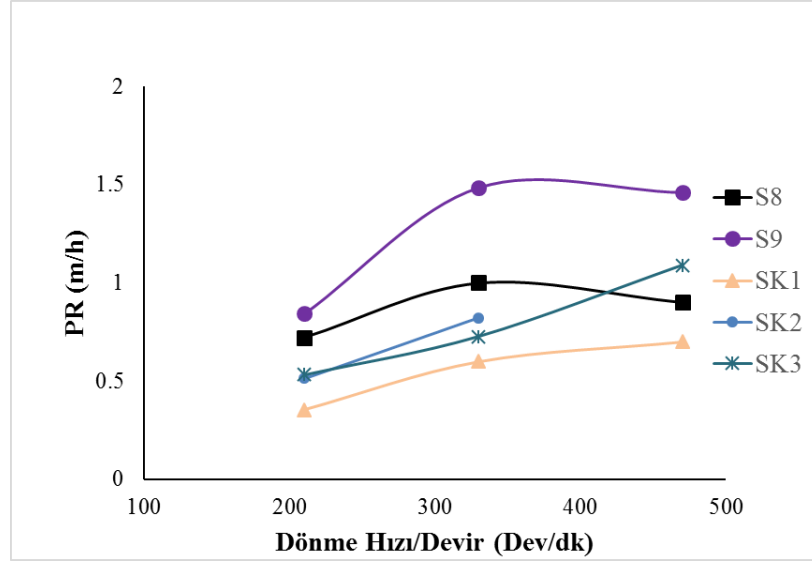
70 kg



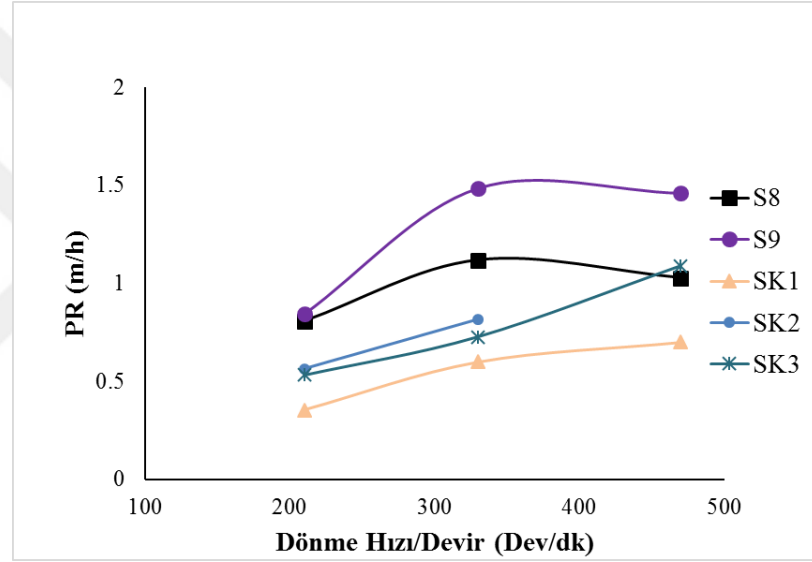
(S8 kireçtaşı, S9 dolomit, SK1 kireçtaşı, SK2 dolomitik kireçtaşı ve SK3 dolomit)

Şekil 5.23 Sedimanter karbonatlı kayalar için, baskı yükü sabit tutulduğunda dönme hızı/devir ile ilerleme hızı arasındaki ilişki.

90 kg



110 kg



(S8 kireçtaşı, S9 dolomit, SK1 kireçtaşı, SK2 dolomitik kireçtaşı ve SK3 dolomit)

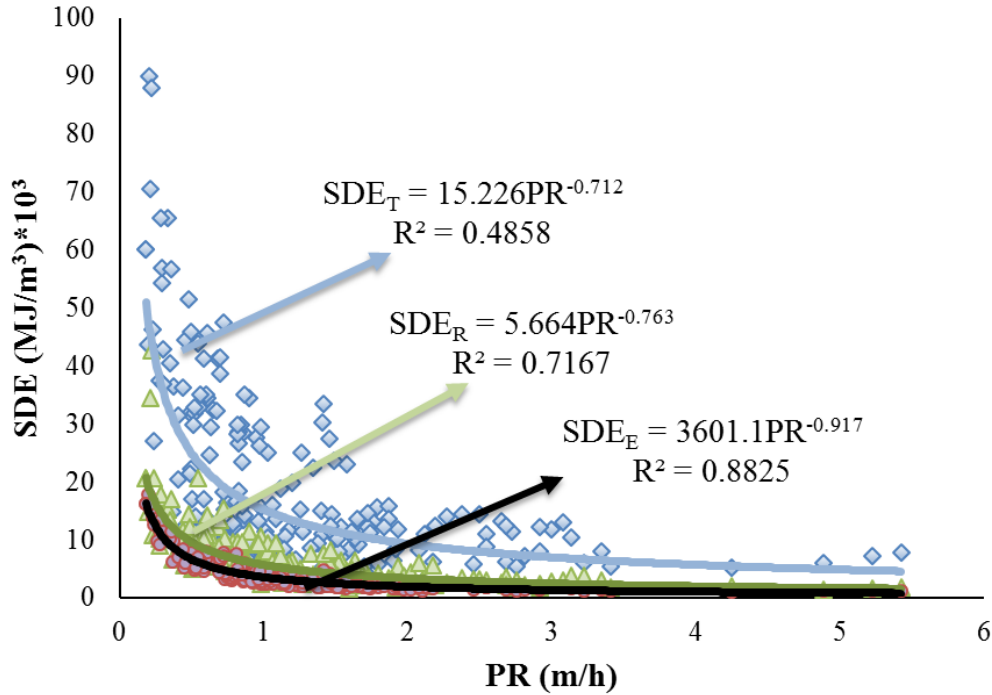
Şekil 5.23 (devam ediyor).

Şekil 5.22’de görüldüğü üzere, S1 kuvarslı kumtaşı örneğinin 470 dev/dk koşullarında gerçekleştirilen delme deneylerinden elde edilen PR değerleri oldukça yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni araziden alınan farklı bloklar üzerinde delme çalışmalarının yapılmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, çalışmada gidişatını değiştirmiş böylece araziden alınan kaya bloklarının her biri üzerinde tüm makine değiştirgelerinin etkisi incelenmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, S1 örneği, çalışma üzerinde olumlu bir etki yapmış ve deneylerin daha sağlıklı bir şekilde yapılması için önemli bir kazanım sağlamıştır. Şekil 5.23’te görüldüğü üzere, karbonatlı kayaç grubu için baskı yükü sabit tutularak dönme hızı/devir değiştirilmiş ve buna bağlı olarak PR değerleri incelenmiştir. Sedimanter karbonatlı kayaç grubu içerisinde yer alan SK2 dolomitik kireçtaşı örneği üzerinde 50 kg koşulunda sağlıklı veri alınamamıştır. Bu

nedenle, Şekil 5.23'te 50 kg koşulunda çizilen grafikte SK2 örneği değerlendirmeye alınamamıştır.

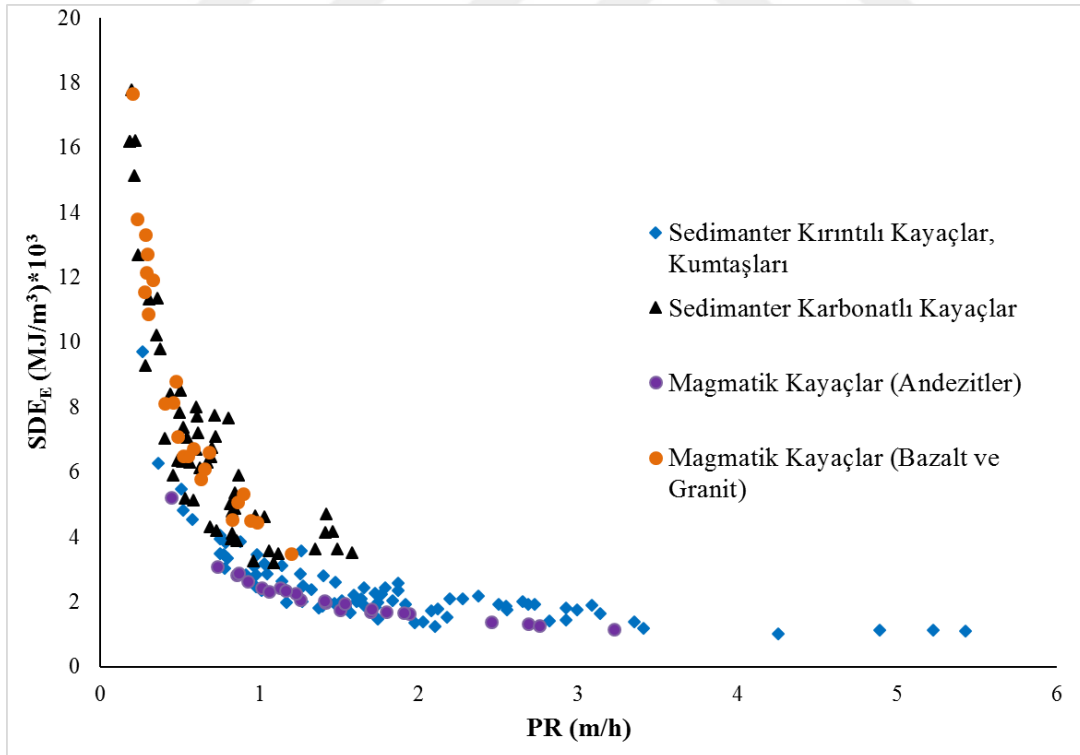
### 5.1.3. Elektriksel Spesifik Delme Enerjisi – İlerleme Hızı Arasındaki İlişki

Spesifik enerji kayacı parçalayabilmek ve ondan belirli bir hacim koparabilmek için gerekli olan enerji miktarıdır. Bu nedenle de en iyi spesifik enerji koşulu, delme işlemi sırasında herhangi bir problem oluşturmadan en yüksek ilerleme hızı değerlerinin elde edildiği koşullarda gerçekleşir. Bu kapsamda, delme performansının tanımlanmasında kullanılan en önemli iki ölçüt spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı arasındaki ilişki Şekil 5.24 ve 5.25'te incelenmiştir. Şekil 5.24 ve 5.25'te çalışmada kullanılan tüm kayalar birlikte değerlendirilmiş ve mevcut çalışma koşullarının tümü göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak, elektriksel enerji  $SDE_E$  ile PR arasında üssel ( $R^2=0.88$ ) bir ilişkinin olduğu ve çalışmada kullanılan tüm kayalar için optimum  $SDE_E$  değerlerine 1.5 m/h'lik PR değerlerinde ulaşılabileceği belirlenmiştir (Şekil 5.24). Mekanik enerji  $SDE_T$  ve  $SDE_R$  değerleri ile PR değerleri incelendiğinde ise benzer şekilde üssel bir ilişki olduğu görülmektedir (Şekil 5.24). Aynı konu üzerine çalışmalar Teale (1965), Pessier (1992), Sudani (2017) tarafından da yapılmıştır.



Şekil 5.24 Kayaçların farklı yaklaşımlara göre spesifik delme enerjisi değerleri ile ilerleme hızı arasındaki ilişki.

Spesifik delme enerjisi ile ilerleme hızı arasındaki ilişki kayaç türlerine göre değerlendirildiğinde ise oluşan durum Şekil 5.25'te gösterilmiştir. Şekil 5.25 göz önüne alındığında, spesifik delme enerjisi düşük ancak ilerleme hızı en yüksek kayaç türü olarak sedimanter kırıntılı kayaçlar öne çıkmıştır. Şekil 5.25'te görüldüğü üzere, magmatik kayaç grubu ise kendi içinde andezitler (M1 ve M2) ve bazalt – granit (M3 ve M4) olmak üzere ikiye ayrılmıştır. M1 ve M2 (andezitler) üzerinde gerçekleştirilen delme deneylerinde düşük spesifik delme enerjisi ve yüksek ilerleme hızları elde edilirken, M3 (bazalt) ve M4 (granit) örneklerine ait sonuçlar değerlendirildiğinde yüksek spesifik delme enerjisi ve düşük ilerleme hızı değerleri belirlenmiştir. Sedimanter karbonatlı kayaç örneklerine ait spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı değerleri incelendiğinde, yüksek enerji değerleri elde edilen magmatik kayaç (M3, bazalt ve M4, granit) örnekleri ile yaklaşık değerler belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan kayaçlar spesifik delme enerjisi değerlerine göre; yüksek enerji değerlerine ulaşılan sedimanter karbonatlı kayaçlar ve magmatik (M3 bazalt ve M4 granit) kayaçlar ile daha düşük enerji değerlerinin elde edildiği sedimanter kırıntılı ve magmatik (M1 ve M2 andezitler) kayaçlar olmak üzere genel anlamda iki gruba ayrılmıştır.



Şekil 5.25 Tüm kayaçlar için elektriksel spesifik delme enerjisi değerleri ile ilerleme hızı arasındaki ilişki.

## 5.2. KAYAÇ ÖZELLİKLERİNİN DELME VERİMİNE ETKİSİ

Bu bölümde; spesifik delme enerjisi deneyleri ile elde edilen karot örnekler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar analizleri neticesinde (Bkz. Bölüm 4) belirlenen kayaç özelliklerinin (fiziksel, mekanik ve indeks)  $SDE_E$  ve PR ile olan ilişkileri incelenmiştir. Böylece, bağımlı yani kontrol edilebilen makine parametrelerinin yanında bağımsız yani kontrol edilemeyen (değişken) kayaç özelliklerinin  $SDE_E$  ve PR'ye olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, makinaya bağlı parametreler sabit tutularak farklı kayaç türleri üzerinde delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular kurulan basit istatistiksel yöntemler ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında kurulan basit istatistiksel analizlerde magmatik, sedimanter kırıntılı ve sedimanter karbonatlı kayaç grupları ile  $SDE_E$  ve PR arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Veriler arasında ilişki düzeyinin belirlenmesi amacıyla korelasyon analizlerinden yararlanılmıştır. Bu amaçla, her kayaç grubu için ayrı bir korelasyon matrisi oluşturulmuştur. Korelasyon katsayısı, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi sayısal olarak tanımlamaya olanak sağlamakta ve -1 ile +1 arasında değişim göstermektedir. Korelasyon katsayısı 0 olduğunda değişkenler arasında bir ilişkiden bahsedilemez ancak  $\pm 1$ 'e yakın olması durumunda değişkenler arasında kuvvetli ilişkilerin varlığından bahsedilebilmektedir. Korelasyon katsayısının aldığı negatif ya da pozitif işareti ise azalan ya da artan ilişkiyi tanımlamaktadır. Yapılan çalışmalarda SDE ve PR değerlerinin dönme hızı/devir ve baskı yüküne bağlı olarak değişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm kayaç türleri için kayaç özellikleri ile optimum delme performans sonuçları arasındaki ilişki birlikte değerlendirildiğinde istatistiksel olarak tutarlı sonuçlar elde edilememiştir. Ancak SDE ve PR değerlerinin elde edilmesi için sabit çalışma koşulları içinde en tutarlı sonuçlar 470 dev/dk ve 70 kg'lık baskı yükü şartlarında belirlenmiştir. Buna göre, 470 dev/dk ve 70 kg'lık baskı yükü altında hesaplanan SDE ve PR değerleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Magmatik kayaç türleri için; yoğunluk, çekme ve basınç dayanımı, elastisite modülü, delme oranı indeks ve sertlik özellikleri ile spesifik delme enerjisi arasında anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. İlerleme hızı açısından incelendiğinde ise; yoğunluk, çekme dayanımı ve delme oranı indeksi ile pozitif ve negatif anlamlı ilişkiler elde edilmiştir (Çizelge 5.2). Sedimanter kırıntılı kayaç türlerine ait; yoğunluk, çekme dayanımı, delme oranı indeksi, sertlik özellikleri ile  $SDE_E$  arasındaki pozitif ve negatif anlamlı ilişkiler elde edilmiştir. PR göz önünde bulundurulduğunda ise; yoğunluk, çekme dayanımı, delme oranı indeksi ve kayaç sertlik özellikleri ön plana çıkmaktadır (Çizelge 5.3). Sedimanter karbonatlı kayaç türleri incelendiğinde, delme oranı indeksi, sertlik ve kayaç mineralojik özelliklerinin  $SDE_E$  ve PR ile



anlamli ilişkiler ortaya koyduğu belirlenmiştir (Çizelge 5.4). Magmatik, sedimanter kırıntılı ve sedimanter karbonatlı kayaç özelliklerinin delme performans parametrelerine (spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı) olan etkisi incelendiğinde, farklı kayaç grupları için birçok kayaç özelliği ön plana çıkmıştır. Bu kapsamda yapılan istatistiksel değerlendirmelerde en anlamli ilişkilerin, delme oranı indeks değerleri kurulduğu belirlenmiştir. Bu durum, delinebilirlik ile ilgili olan çalışmalarda delme oranı indeks deneyinin önemli bir parametre olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca başta delme oranı indeksi olmak üzere diğer kayaç özelliklerinin delme performansına olan etkisi tezin ilerleyen kısımlarında detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu aşamada, kayaç özellikleri ile delme performans parametreleri ile arasındaki ilişki, yapılan basit regresyon analizleri ile de değerlendirilmiş ve Şekil 5.24 – 5.33'te sunulmuştur.

**Çizelge 5.1** Kayaçların spesifik delme enerjisi (SDE) ve ilerleme hızı (PR) değerleri (470 dev/dk ve 70 kg baskı yükü).

Kayaç Kökeni	Kayaç Kodu	Mekanik SDE		Elektriksel SDE	PR (m/h)
		SDE <sub>T</sub> (MJ/m <sup>3</sup> )	SDE <sub>R</sub> (MJ/m <sup>3</sup> )	SDE <sub>E</sub> (MJ/m <sup>3</sup> )	
Magmatik Kayaçlar	M1	10,999	4,850	1,986	1.41
	M2	5,853	31,73	1,389	2.45
	M3	51,416	14,497	8,815	0.48
	M4	28,423	7,755	5,072	0.86
Sedimanter Kırıntılı Kayaçlar	S1	6,027	1,307	1,132	4.89
	S3	11,523	6,086	1,986	1.17
	S4	5,227	1,905	1,026	4.25
	S5	7,671	7,723	2,873	1.05
	S6	10,498	8,071	3,171	1.03
	S15	15,865	3,441	2,582	1.87
	S16	10,966	2,620	1,868	2.55
Sedimanter Karbonatlı Kayaçlar	S8	23,475	7,604	4,892	0.85
	S9	22,924	4,577	3,513	1.58
	SK1	34,495	12,176	7,211	0.61
	SK2	70,427	34,471	15,151	0.21
	SK3	15,770	9,528	3,898	0.85

SDE<sub>T</sub>: Teale (1965) tarafından önerilen spesifik delme enerjisi, SDE<sub>R</sub>: Rabia (1982, 1985) tarafından önerilen spesifik delme enerjisi, SDE<sub>E</sub>: elektriksel spesifik delme enerjisi, PR: ilerleme hızı

**Çizelge 5.2** Magmatik kayaç için elde edilen ilişki matrisi.

	SDE <sub>E</sub>	PR	d	σ <sub>c</sub>	σ <sub>t</sub>	E	ν	SJ	S20	DRI	ESD	CAI	d <sub>ort</sub>	Q <sub>eqv</sub>
SDE <sub>E</sub>	1.00													
PR	-0.87	1.00												
d	0.99	-0.93	1.00											
σ <sub>c</sub>	0.93	-0.64	0.87	1.00										
σ <sub>t</sub>	0.76	-0.77	0.76	0.64	1.00									
E	0.71	-0.50	0.64	0.77	0.88	1.00								
ν	-0.34	0.66	-0.46	-0.03	-0.08	0.32	1.00							
Sj	-0.84	0.65	-0.81	-0.82	-0.25	-0.28	0.44	1.00						
S20	-0.39	0.35	-0.35	-0.39	-0.86	-0.88	-0.38	-0.17	1.00					
DRI	-0.97	0.85	-0.95	-0.91	-0.88	-0.84	0.20	0.67	0.60	1.00				
ESD	0.90	-0.80	0.91	0.82	0.42	0.34	-0.57	-0.97	0.05	-0.77	1.00			
CAI	0.23	-0.64	0.38	-0.11	0.16	-0.30	-0.96	-0.22	0.24	-0.15	0.40	1.00		
d <sub>ort</sub>	0.09	0.06	0.08	0.15	-0.59	-0.50	-0.35	-0.64	0.85	0.14	0.48	0.11	1.00	
Q <sub>eqv</sub>	0.10	-0.24	0.18	-0.05	-0.43	-0.63	-0.80	-0.53	0.83	0.12	0.51	0.65	0.82	1.00

SDE<sub>E</sub>: elektriksel spesifik delme enerjisi, PR: ilerleme hızı, d: yoğunluk, σ<sub>c</sub>: tek eksenli basınç dayanımı, σ<sub>t</sub>: dolaylı çekme dayanımı, E: elastisite modülü, ν: Poisson oranı  
S20: kırılgenlik, SJ : sievers minyatür delme, DRI: delme oranı indeksi, ESD : Equotip sertlik değeri, CAI: Cerchar aşınma indeksi, d<sub>ort</sub>: ortalama tane boyu ve Q<sub>eqv</sub>: eşdeğer kuvars içeriği

470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

**Çizelge 5.3** Sedimanter kırıntılı kayalar için elde edilen ilişki matrisi.

	SDE <sub>E</sub>	PR	d	$\sigma_c$	$\sigma_t$	E	$\nu$	SJ	S20	DRI	ESD	CAI	d <sub>ort</sub>	Q <sub>eqv</sub>
SDE <sub>E</sub>	1.00													
PR	-0.89	1.00												
d	0.66	-0.84	1.00											
$\sigma_c$	0.38	-0.38	0.11	1.00										
$\sigma_t$	0.92	-0.96	0.79	0.19	1.00									
E	-0.05	-0.06	0.05	0.44	-0.11	1.00								
$\nu$	-0.76	0.62	-0.68	0.25	-0.78	0.38	1.00							
Sj	-0.09	0.22	0.03	-0.90	-0.02	-0.40	-0.51	1.00						
S20	-0.87	0.74	-0.70	-0.04	-0.86	0.11	0.91	-0.23	1.00					
DRI	-0.92	0.80	-0.73	-0.20	-0.88	0.06	0.86	-0.07	0.99	1.00				
ESD	0.71	-0.88	0.67	0.72	0.73	0.24	-0.23	-0.63	-0.42	-0.54	1.00			
CAI	-0.29	0.12	-0.43	0.54	-0.32	0.33	0.81	-0.72	0.69	0.59	0.27	1.00		
d <sub>ort</sub>	-0.57	0.30	0.16	-0.08	-0.44	0.40	0.37	-0.08	0.37	0.37	-0.14	-0.02	1.00	
Q <sub>eqv</sub>	-0.20	0.33	-0.71	-0.12	-0.20	-0.07	0.32	-0.03	0.22	0.26	-0.36	0.31	-0.54	1.00

SDE<sub>E</sub>: elektriksel spesifik delme enerjisi, PR: ilerleme hızı, d: yoğunluk,  $\sigma_c$ : tek eksenli basınç dayanımı,  $\sigma_t$ : dolaylı çekme dayanımı, E: elastisite modülü,  $\nu$ : Poisson oranı  
S20: kırılgenlik, SJ : sievers minyatür delme, DRI: delme oranı indeksi, ESD : Equotip sertlik değeri, CAI: Cerchar aşınma indeksi, d<sub>ort</sub>: ortalama tane boyu ve Q<sub>eqv</sub>: eşdeğer kuvars içeriği

470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

**Çizelge 5.4** Sedimanter karbonatlı kayalar için elde edilen ilişki matrisi.

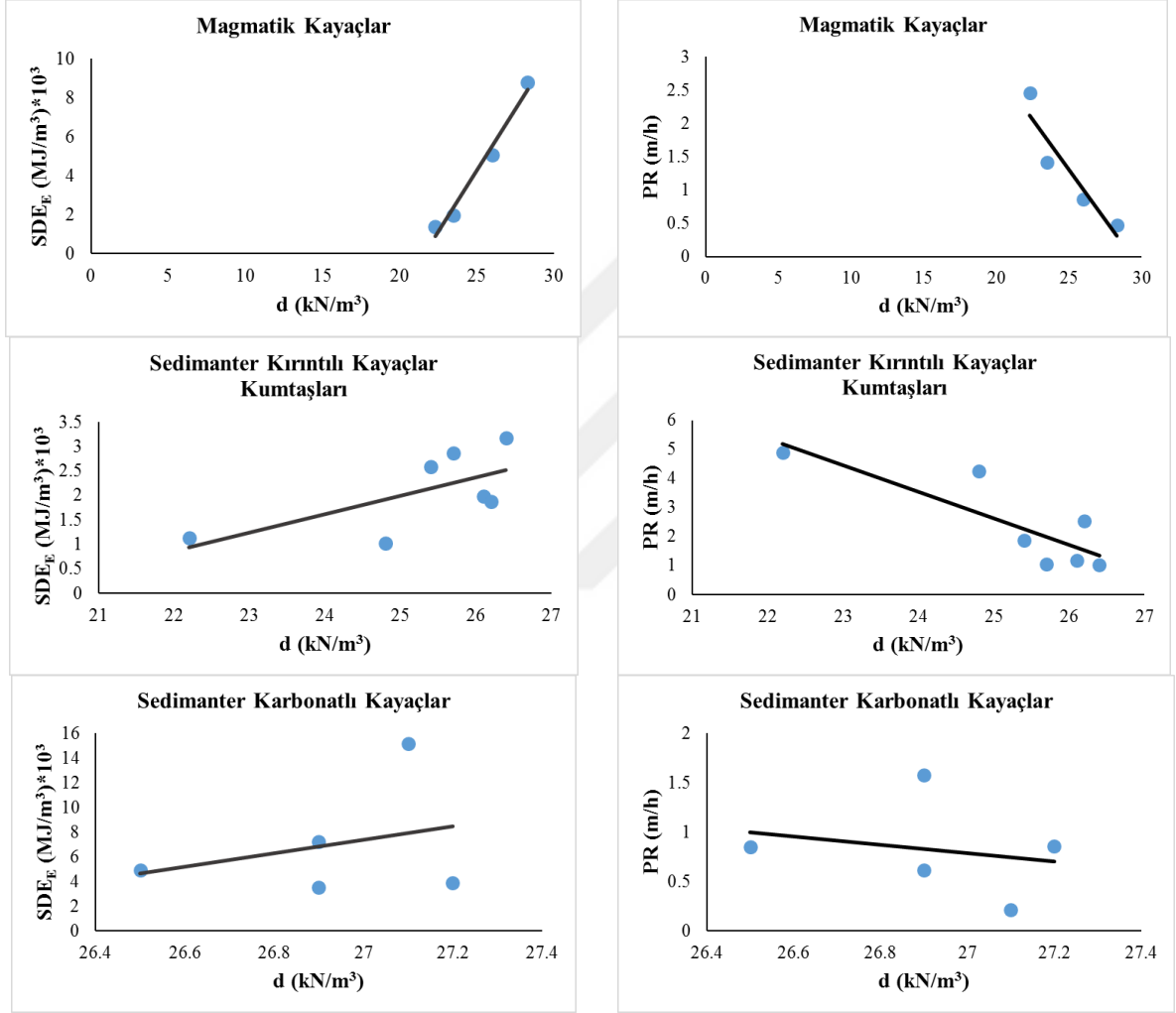
	SDE <sub>E</sub>	PR	d	$\sigma_c$	$\sigma_t$	E	$\nu$	SJ	S20	DRI	ESD	CAI	d <sub>ort</sub>	Q <sub>eqv</sub>
SDE <sub>E</sub>	1.00													
PR	-0.81	1.00												
d	0.30	-0.23	1.00											
$\sigma_c$	0.08	-0.52	-0.34	1.00										
$\sigma_t$	-0.22	-0.33	-0.24	0.93	1.00									
E	0.34	0.03	0.69	-0.35	-0.44	1.00								
$\nu$	-0.21	0.35	0.53	-0.13	-0.05	0.81	1.00							
Sj	-0.20	-0.40	-0.10	0.66	0.82	-0.67	-0.38	1.00						
S20	-0.62	0.76	0.09	-0.79	-0.53	-0.10	0.02	-0.21	1.00					
DRI	-0.89	0.82	-0.56	-0.23	-0.01	-0.55	-0.16	0.08	0.71	1.00				
ESD	0.88	-0.98	0.39	0.37	0.18	0.14	-0.25	0.26	-0.70	-0.90	1.00			
CAI	-0.57	0.40	0.61	-0.27	0.07	0.23	0.57	0.20	0.54	0.24	-0.34	1.00		
d <sub>ort</sub>	0.94	-0.86	0.32	0.03	-0.19	0.11	-0.43	0.02	-0.45	-0.78	0.91	-0.47	1.00	
Q <sub>eqv</sub>	0.63	-0.74	-0.42	0.47	0.22	-0.50	-0.81	0.32	-0.59	-0.35	0.65	-0.82	0.69	1.00

SDE<sub>E</sub>: elektriksel spesifik delme enerjisi, PR: ilerleme hızı, d: yoğunluk,  $\sigma_c$ : tek eksenli basınç dayanımı,  $\sigma_t$ : dolaylı çekme dayanımı, E: elastisite modülü,  $\nu$ : Poisson oranı S20: kırılgenlik, SJ : sievers minyatür delme, DRI: delme oranı indeksi, ESD : Equotip sertlik değeri, CAI: Cerchar aşınma indeksi, d<sub>ort</sub>: ortalama tane boyu ve Q<sub>eqv</sub>: eşdeğer kuvars içeriği

470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

### 5.2.1. Fiziksel Özelliklerin Etkisi

Çalışma kapsamında her bir kayaç için yoğunluk ayrı ayrı belirlenmiştir. Buna göre, kayaçların birim hacim ağırlığı ile  $SDE_E$  ve PR arasında kurulan ilişki Şekil 5.26'da sunulmuştur. Şekil 5.26 incelendiğinde, sadece magmatik kayaçlar grubu için  $SDE_E$  ve PR değerleri ile kayaç yoğunluğu arasında yüksek bir ilişki bulunmuştur.



Şekil 5.26 Delme performans parametreleri ile kayaç yoğunlukları arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

Magmatik kayaçlar için  $SDE_E$  ve PR ile yoğunluk arasındaki korelasyona bakıldığında yüksek katsayılı (sırasıyla  $r=0.99$  ve  $r=-0.93$ ) bir ilişkinin elde edildiği görülmektedir (Çizelge 5.2). Sedimanter kırıntılı kayaçlar grubunda da benzer şekilde  $SDE_E$  ile  $r=0.66$  artan ve PR ile  $r=-0.84$  azalan yüksek katsayılı ilişkiler belirlenmiştir. Sadece sedimanter karbonatlı kayaçlar grubunda  $SDE_E$  ile  $r=0.30$  ve PR ile  $r=-0.23$ 'lük düşük katsayılı ilişkiler belirlenmiştir. Bu

durum, çalışmada kullanılan karbonatlı kayalara ait yoğunluk değerlerinin küçük bir aralıkta değişmesinden kaynaklanmaktadır. Tüm kayaç grupları birlikte değerlendirildiğinde, genel eğilim kayaç yoğunluğundaki artışa bağlı olarak  $SDE_E$  değerlerinin arttığı ve PR değerlerinin ise azaldığı yönündedir (Şekil 5.26).

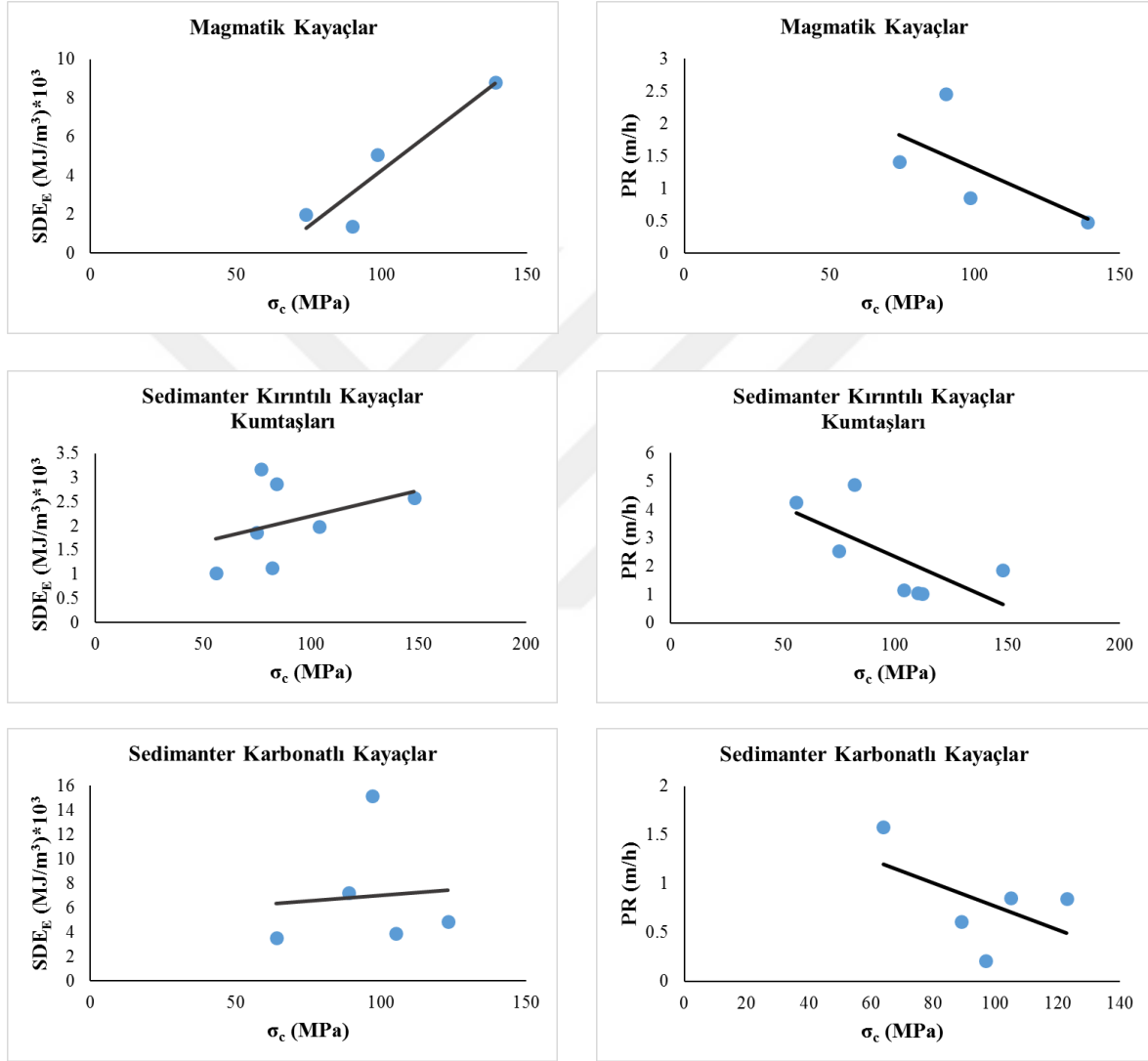
### 5.2.2. Mekanik Özelliklerin Etkisi

Kayaçların mekanik özelliklerinin kazılabilirlik, duraylık vb. mühendislik yapılarının tasarımında büyük önemi bulunmaktadır. Bu nedenle de kayaçların  $\sigma_c$ ,  $\sigma_t$ , E ve  $\nu$  gibi mekanik büyüklüklerinin iyi tanımlanmış olması gerekmektedir. Çalışma kapsamında 16 kayaç türü üzerinde yapılan deneyler ile her bir kayaca ait mekanik büyüklükler elde edilmiştir (Bkz. Bölüm 4). Sadece M4 ve S6 kayaç örneklerinden istenilen uzunlukta örnek alınamadığı için deformabilite deneyi yapılamamış ve dolayısıyla da E ve  $\nu$  değerleri elde edilememiştir. Kayaçların mekanik büyüklükleri göz önüne alınarak  $SDE_E$  ve PR ile olan korelasyon ilişkileri Çizelge 5.2-5.4'te verilmiştir.

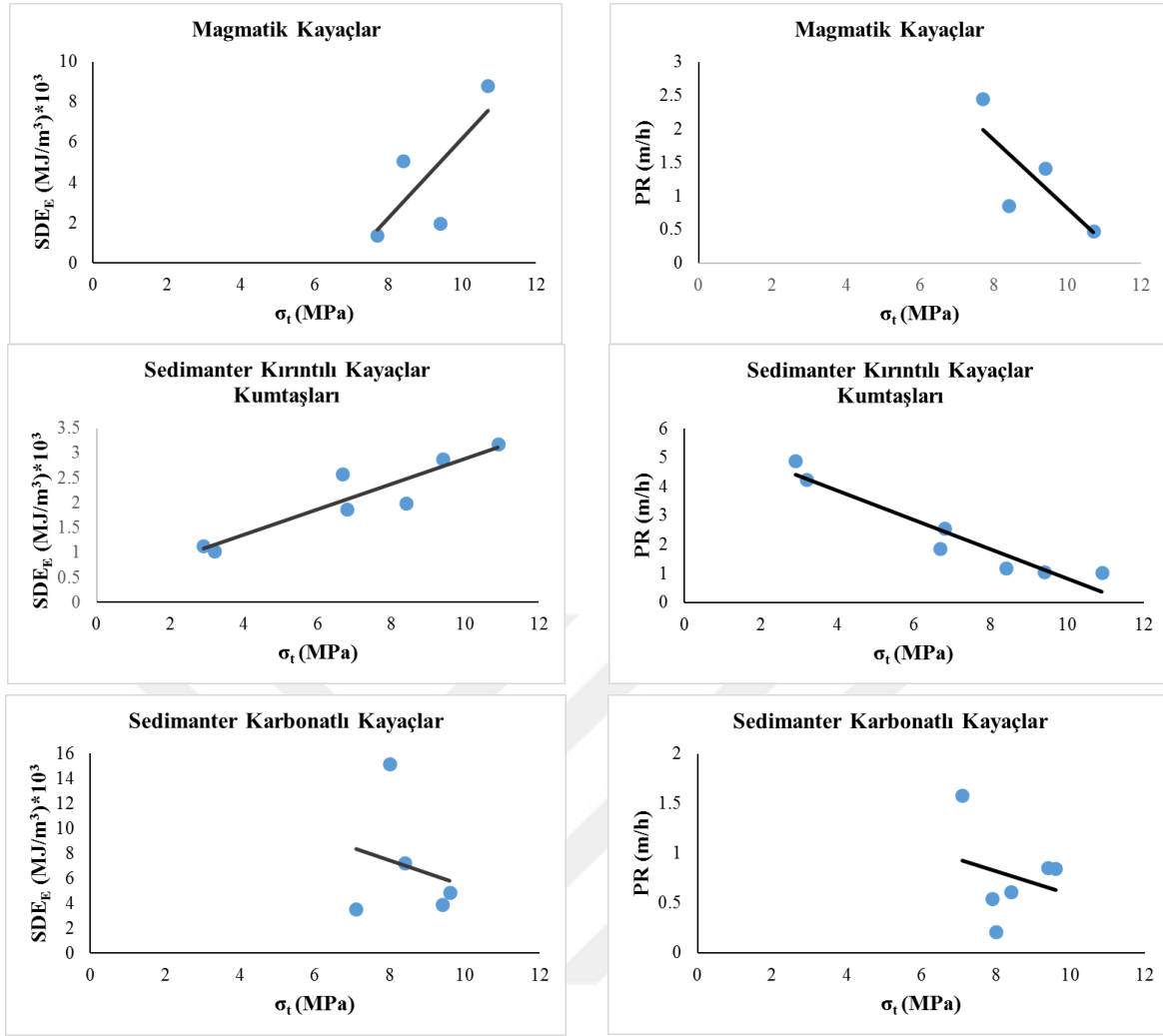
Kayaçların  $\sigma_c$  değerleri ile  $SDE_E$  ile PR arasındaki ilişki Şekil 5.27'de sunulmuştur. Kayaçların basınç dayanımları arttıkça, kayaçta delme işlemini yapabilmek için gerekli enerji miktarı artmakta ve dolayısıyla da ilerleme hızı düşmektedir. Şekil 5.27'de sunulan grafikler incelendiğinde, tüm kayaç gruplarına ait basınç dayanımları ile  $SDE_E$  değerleri arasında artan ve PR değerleri ile azalan bir ilişki belirlenmiştir. Magmatik kayalara ait  $\sigma_c$  değerleri ile  $SDE_E$  ve PR değerleri arasında sırasıyla  $r=0.93$  ve  $r=-0.64$ 'lük yüksek katsayılı ilişkilerin olduğu belirlenmiştir. Ancak sedimanter kırıntılı ve karbonatlı kayaç gruplarında  $SDE_E$  ile  $\sigma_c$  arasında sırasıyla  $r=0.38$  ve  $r=0.08$  ve yine PR ile  $\sigma_c$  arasında ise sırasıyla  $r=-0.38$  ve  $r=-0.52$  düşük ilişkiler belirlenmiştir.

Kayaçların çekme dayanımları göz önünde bulundurulduğunda (Şekil 5.28); magmatik sedimanter kırıntılı kayaçlar için  $SDE_E$  ile  $\sigma_t$  arasında sırasıyla  $r=0.76$  ve  $r=0.92$  katsayılı artan bir ilişki elde edilmiştir. Aynı kayaç gruplarında PR ile  $\sigma_t$  ilişkisi incelendiğinde, sırasıyla  $r=-0.77$  ve  $r=-0.96$  azalan bir ilişkinin olduğu elde edilmiştir. Her iki kayaç grubu göz önünde bulundurulduğunda, kayaçların çekme dayanımları ile  $SDE_E$  ve PR değerleri arasında yüksek korelasyon katsayıları belirlenmiştir. Ancak, karbonatlı kayalarda hem  $SDE_E$  hem de PR değerleri ile  $\sigma_t$  arasında anlamlı ilişkiler belirlenememiştir.

Kayaçların basınç ve çelmeye karşı olan dayanım parametreleri ile  $SDE_E$  ve PR değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde, çelme dayanımı için elde edilen korelasyon ilişkisi katsayılarının basınç dayanımı için belirlenen korelasyon katsayısından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle delme performans analizlerinde, kayaçların basınç dayanımları kadar çelme dayanımlarının da ayrıca değerlendirilmesinin gerektiği düşünülmektedir.



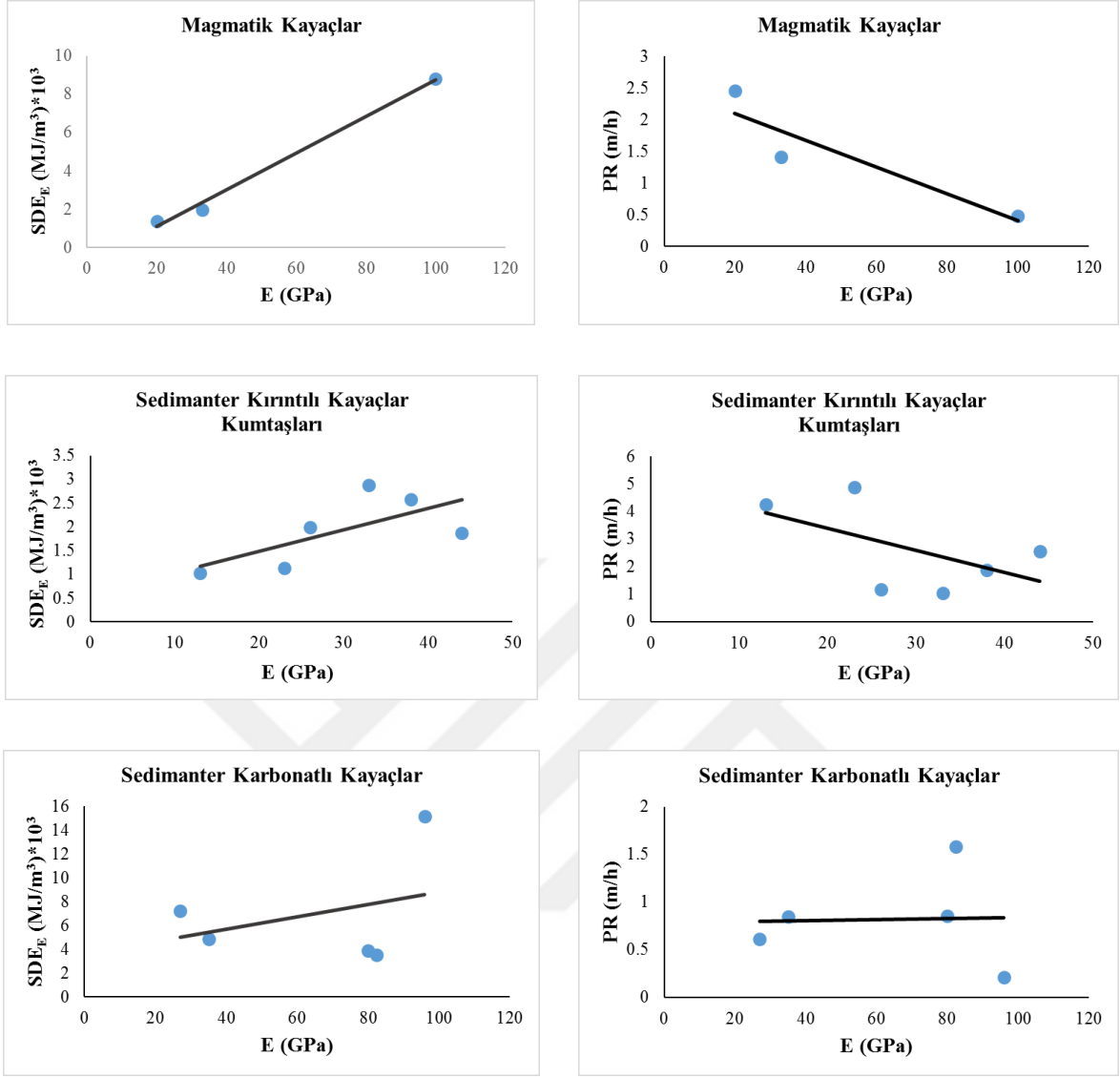
**Şekil 5.27** Delme performans parametre değerleri ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).



**Şekil 5.28** Delme performans parametre değerleri ile dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

Kayaçların elastisite modülü (E) ile olan ilişkisi incelendiğinde, tüm kayaçlar için  $SDE_E$  değerlerinin E ile artan bir ilişkisinin olduğu Şekil 5.29 gösterilmiştir. Şekil 5.29'da PR değerleri ile E arasında doğrusal ilişkiler belirlenmiştir. Kayaçların deformasyon özellikleri ile delme performansı arasındaki ilişkiler incelendiğinde E için magmatik kayaçlar grubunda en yüksek korelasyon katsayıları belirlenmiştir. Buna göre magmatik kayaçlar için korelasyon katsayıları,  $SDE_E$  ile E arasında  $r=0.71$  ve PR ile E arasında ise  $r=-0.50$  olarak elde edilmiştir. Karbonatlı kayaçlar grubunda ise delme performansı ve deformasyon özellikleri arasında anlamlı ilişkiler elde edilmemiştir.





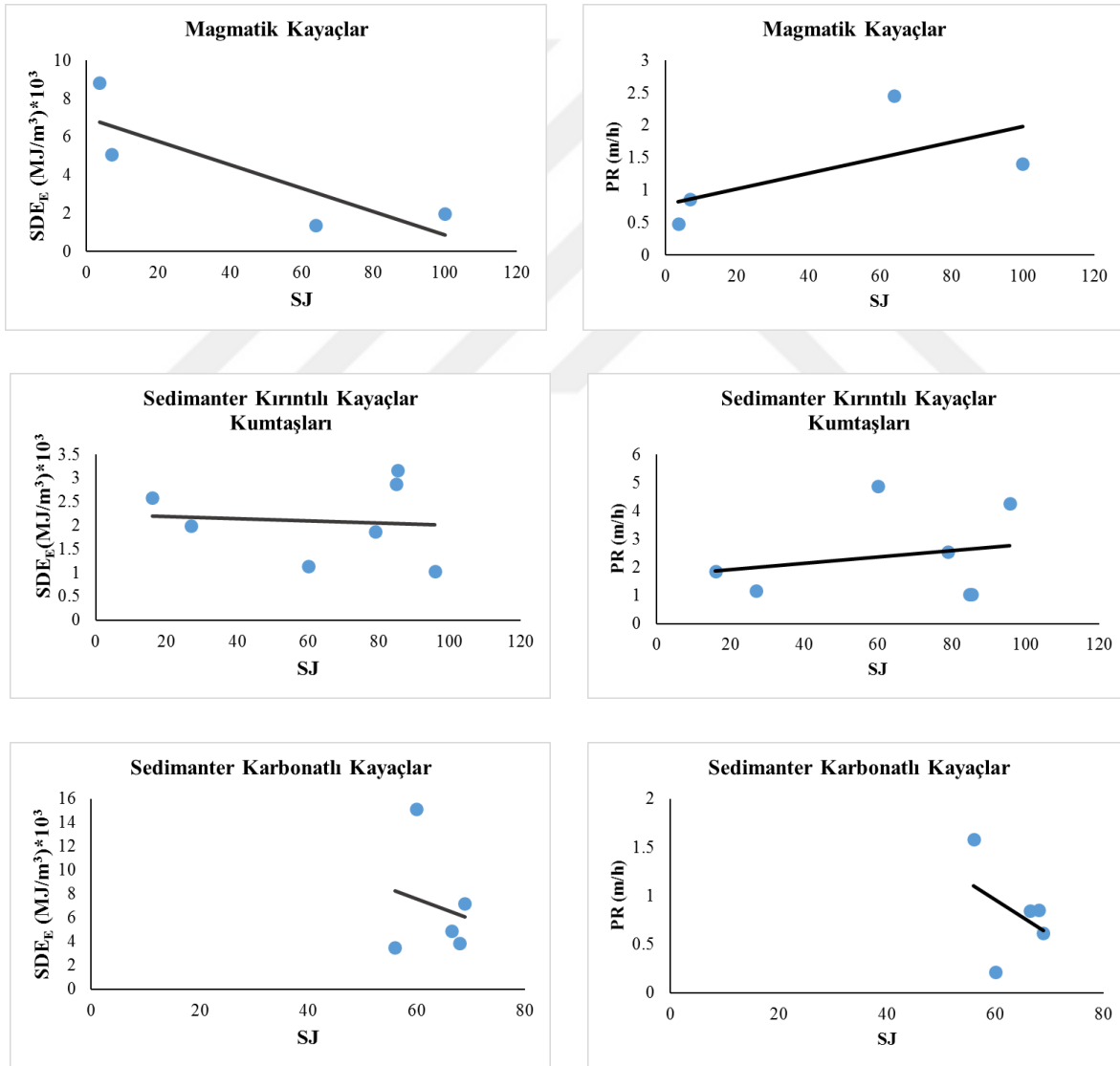
Şekil 5.29 Delme performans parametre değerleri ile elastisite modülü arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

### 5.2.3. İndeks Özelliklerin Etkisi

Kayaçların temel özelliklerini pratik bir yaklaşımla belirleyebilmek için indeks deney yöntemleri kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında, delme oranı indeksi (DRI), Equatip sertlik (ESD) ve Cerchar aşınma indeksi (CAI) deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.30-34'te sunulmuştur.

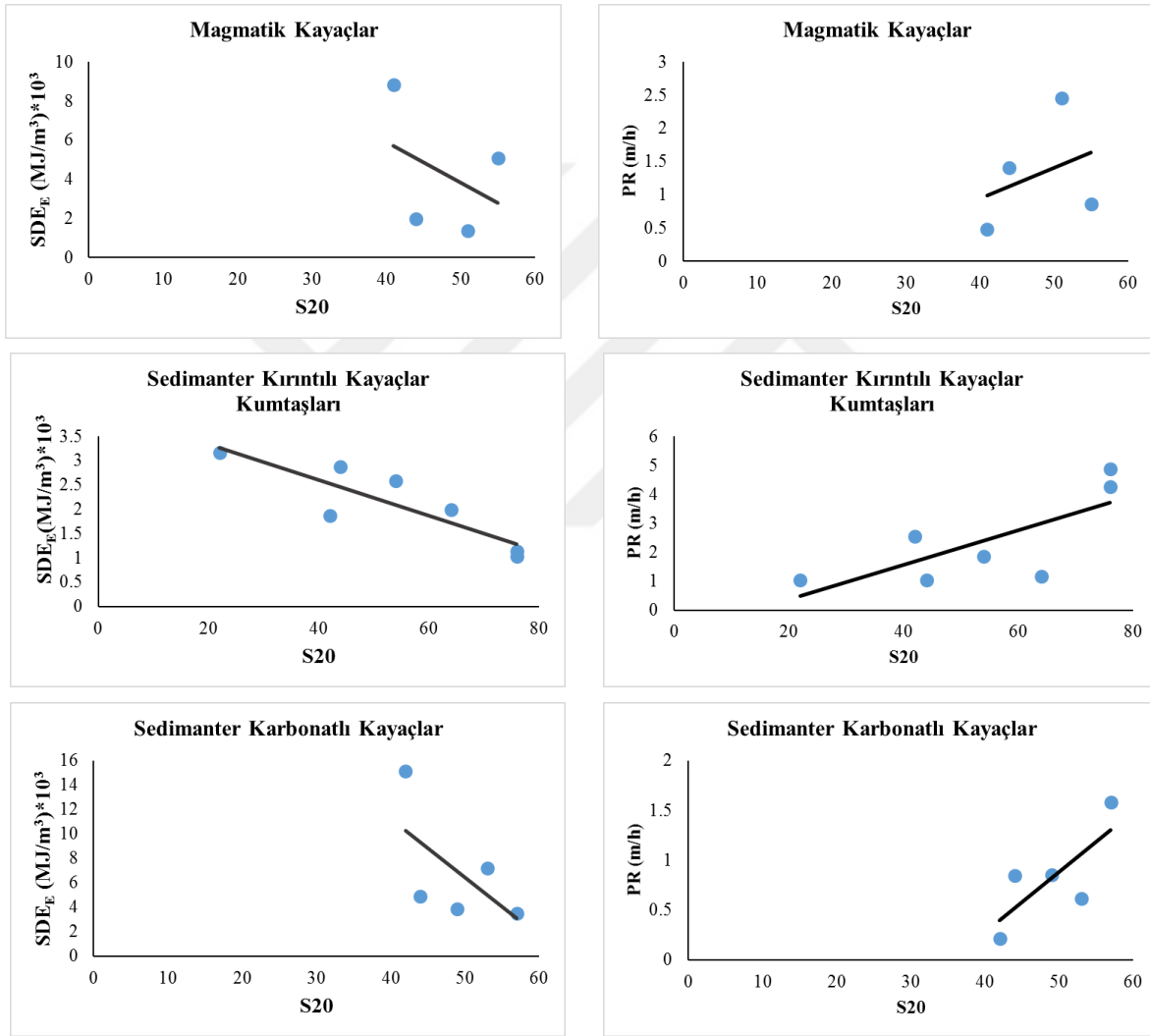
Delme oranı indeksinin belirlenmesi amacıyla yapılan kırılgenlik (S20) ve sievers minyatür delme (SJ) deneyleri sonuçları ile delme performans parametreleri arasındaki ilişki Şekil 5.30 ve 5.31’de gösterilmiştir.

Sievers minyatür delme (SJ) deneyi için delme performans parametreleri  $SDE_E$  ve PR ile magmatik kökenli kayalar arasında sırasıyla  $r=-0.84$  azalan ve  $r=0.65$  artan yüksek korelasyonlu ilişkiler belirlenmiştir. Ancak benzer ilişkiler, sedimanter kırıntılı ve sedimanter karbonat kökenli kayalarda elde edilememiştir. Kayaç kökenlerine göre, delme performans paramterleri ile SJ arasındaki ilişki Şekil 5.30’da sunulmuştur.



Şekil 5.30 Delme performans parametre değerleri ile sievers minyatür delme arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

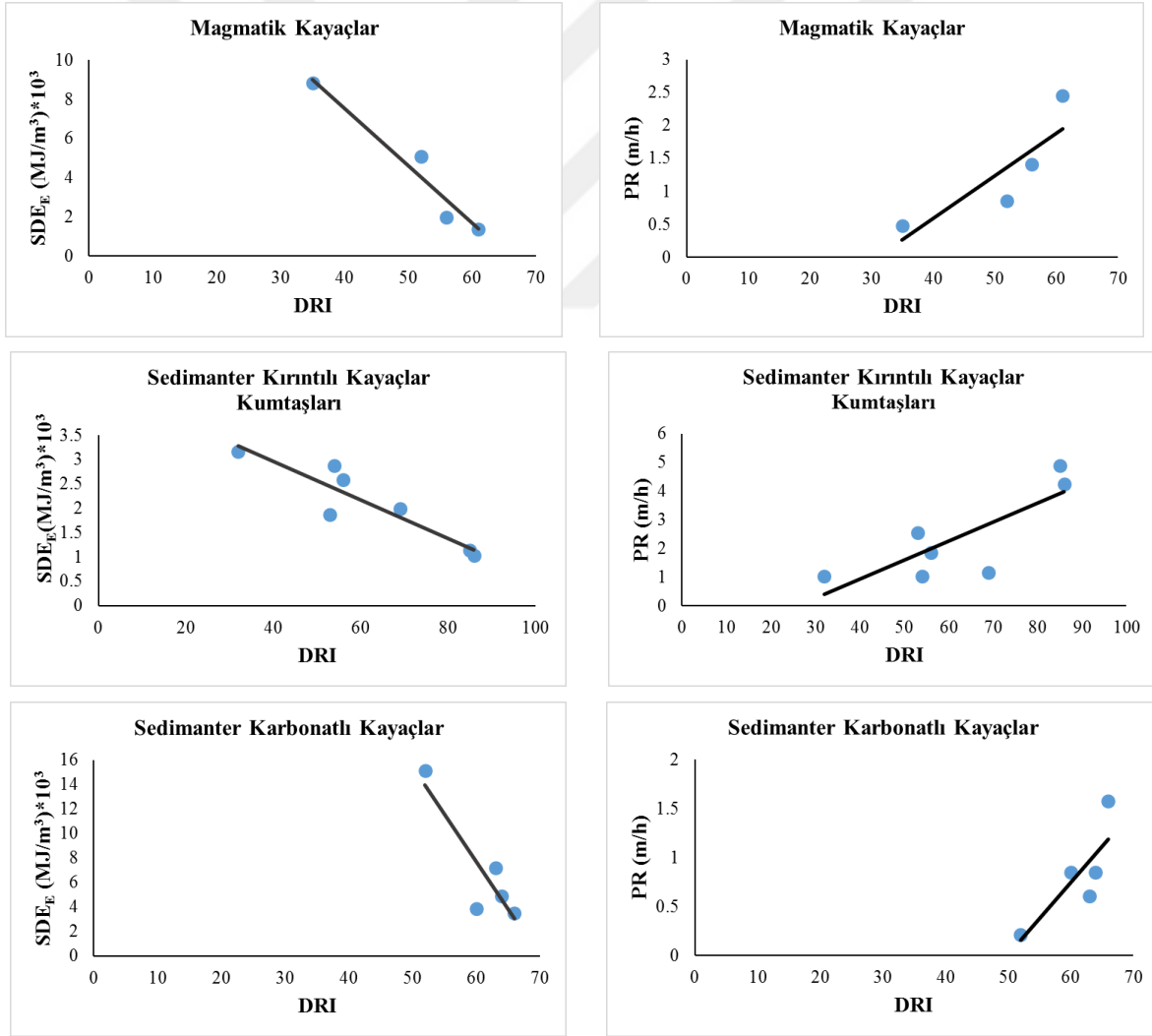
Kırılgenlık indeksi (S20) ile delme performans parametreleri arasındaki ilişki incelendiğinde, sedimanter kırıntılı ve karbonat kökenli kayaçlar ile yüksek korelasyonlu ilişkiler belirlenirken, magmatik kökenli kayaçlarda düşük korelasyonlu ilişkiler elde edilmiştir (Şekil 5.31). Sedimanter kırıntı kökenli kayaçlar için delme performans parametreleri SDE<sub>E</sub> ve PR ile S20 arasında sırasıyla  $r=-0.87$  azalan ve  $r=0.74$  artan ilişkiler belirlenmiştir. Sedimanter karbonat kökenli kayaçlar ile delme performans parametreleri SDE<sub>E</sub> ve PR arasında sırasıyla  $r=0.62$  azalan ve  $r=0.76$  artan ilişkiler belirlenmiştir.



**Şekil 5.31** Delme performans parametre değerleri ile kırılgenlık değeri arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

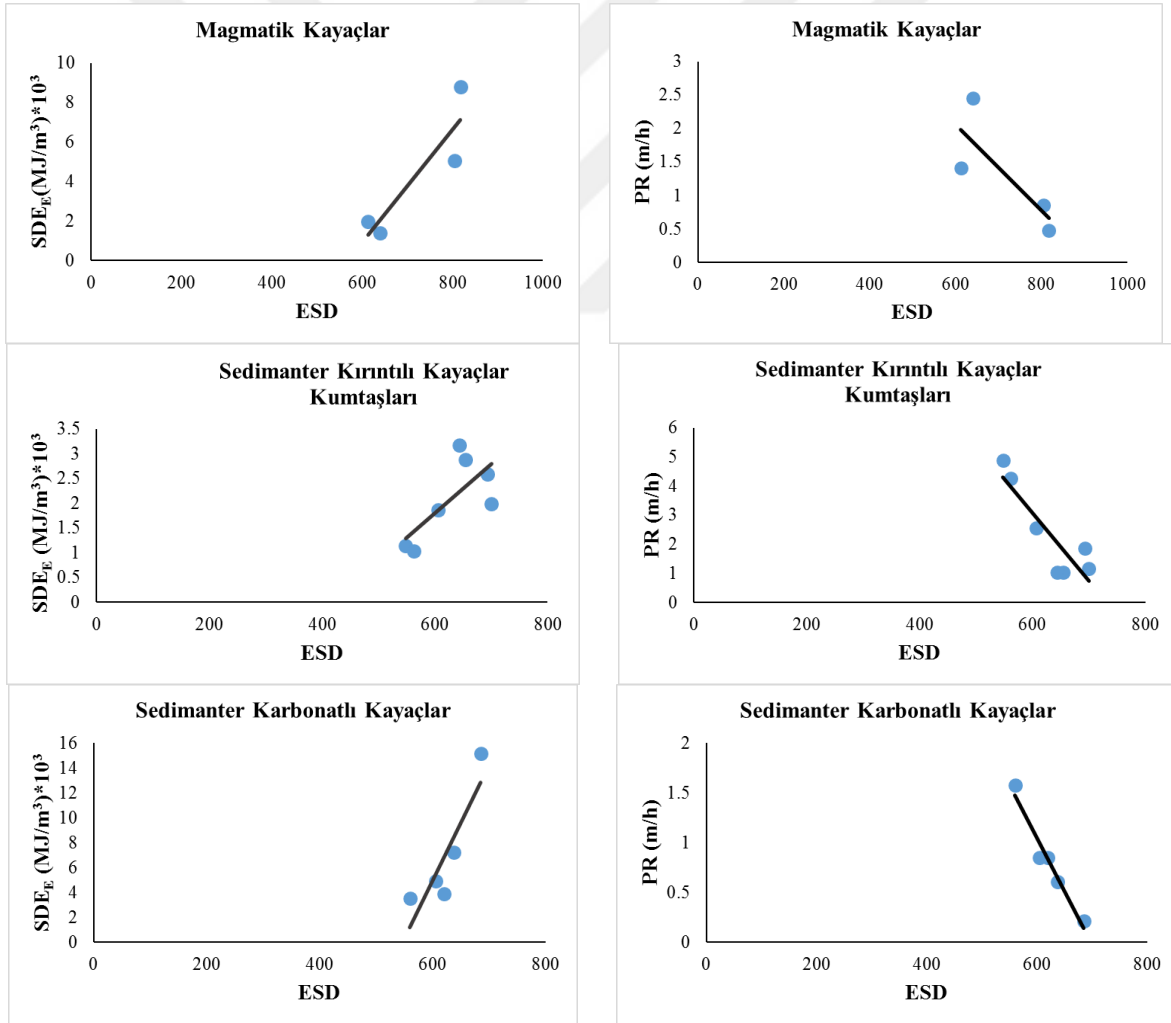
Kayaçların delinebilirlik özelliklerinin tanımlanmasında DRI yaygın olarak kullanılmaktadır. Laboratuvarda gerçekleştirilen delme deneyleri neticesinde elde edilen SDE<sub>E</sub> ve PR değerleri ile DRI arasındaki ilişki Şekil 5.32'de gösterilmiştir. Buna göre 3 kayaç grubu ayrı ayrı

değerlendirildiğinde, DRI değerleri ile  $SDE_E$  arasında doğrusal ve PR değerleri ile ise ters bir ilişkinin olduğu görülmektedir (Şekil 5.32). Ayrıca, tüm kayaç grupları için DRI ile  $SDE_E$  ve PR değerleri arasında korelasyon katsayılarının yüksek olduğu anlamlı ilişkiler elde edilmiştir. Buna göre DRI ile  $SDE_E$  arasında, magmatik kayaçlar için  $r=-0.97$ , sedimanter kırıntılı kayaçlar için  $r=-0.92$  ve karbonatlı kayaçlar için  $r=-0.89$  olarak belirlenmiştir. PR ile DRI arasındaki korelasyon katsayıları ise, magmatik kayaçlar için  $r=0.85$ , sedimanter kırıntılı kayaçlar için  $r=0.80$  ve sedimanter karbonatlı kayaçlar grubunda ise  $r=0.82$  olarak belirlenmiştir. Bir kayacın DRI değeri ne kadar yüksek ise onu delmek için gereken enerji miktarı o kadar az ve yine o kayaç içerisinde yapılan ilerleme miktarı da bir o kadar fazla olacaktır. Bu kapsamda, DRI bir indeks özellik olmak ile birlikte kayaçların delme performansının tanımlanmasında en önemli kayaç özelliklerinden biri olarak etkili olacağı düşünülmektedir.



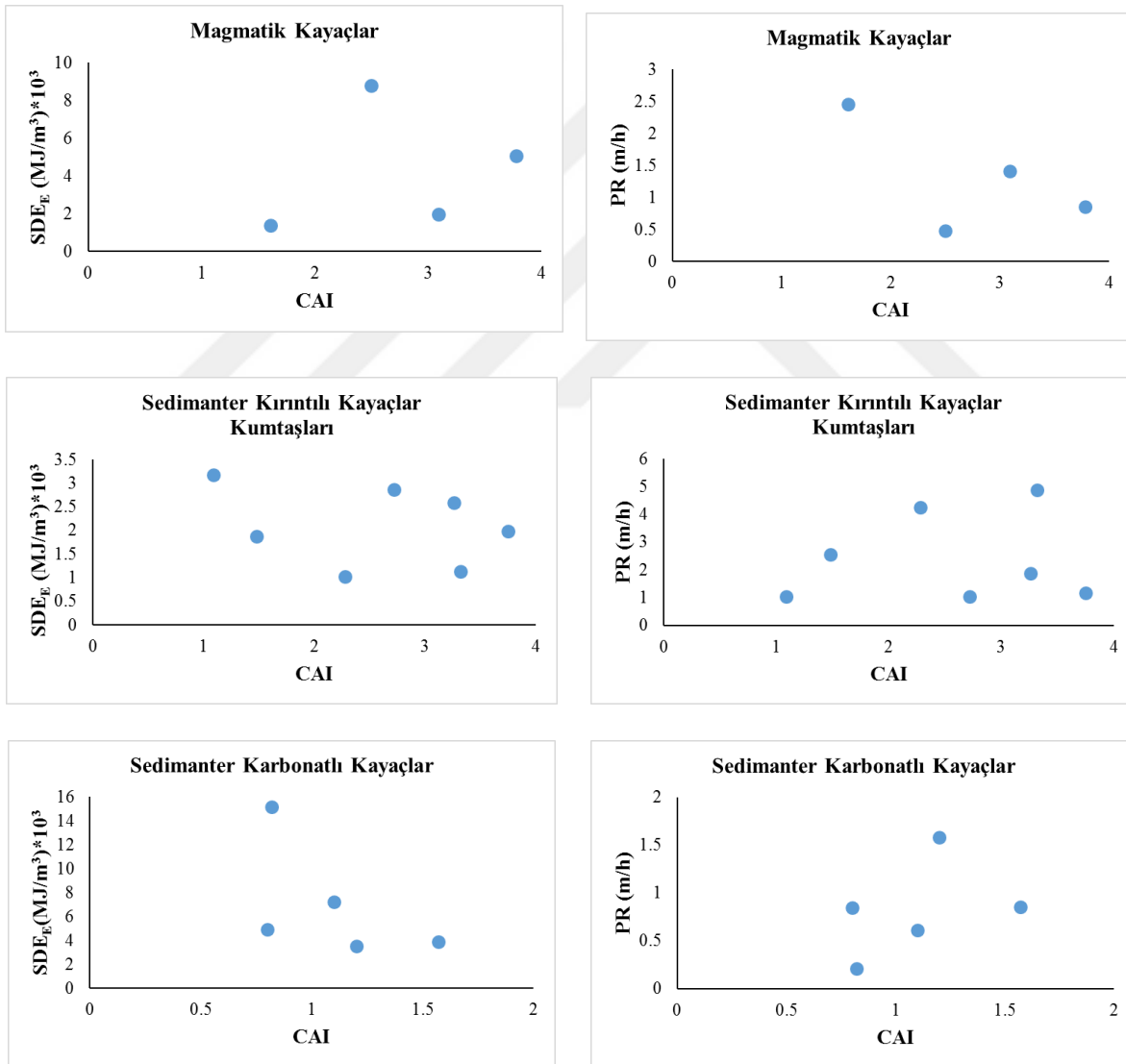
Şekil 5.32 Delme performans parametre değerleri ile delme oranı indeksi arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

Kayacı oluşturan minerallerin sertlikleri, delme işlemi sırasında kayacın göstereceği direnci belirleyerek  $SDE_E$  değerlerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle mineral sertliğine bağlı olarak delici uçtaki aşınmanın boyutları delme performansı açısından oldukça önemli olmaktadır. Şekil 5.33'te çalışmada kullanılan kayaların sertlik değerleri (ESD) ile  $SDE_E$  ve PR arasındaki ilişki incelenmiştir. Tüm kayaç grupları incelendiğinde, ESD değerleri arttıkça harcanan  $SDE_E$  değerleri de artmakta ve PR değerleri azalmaktadır (Şekil 5.33). ESD ile  $SDE_E$  ve PR arasındaki ilişki tüm kayaç grupları için ayrı ayrı incelendiğinde; sırasıyla magmatik kayaçlarda  $r=0.98$  ve  $r=-0.80$ , sedimanter kırıntılı kayaçlarda  $r=0.71$  ve  $r=-0.88$  ve sedimanter karbonatlı kayaçlarda  $r=0.88$  ve  $r=-0.98$ 'lik yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, tüm kayaç gruplarında delme performansı ile kayaç sertliği arasında yüksek anlamlı ilişkiler elde edilmiştir.



Şekil 5.33 Delme performans parametre değerleri ile kayaç sertliği arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

Çalışmada kullanılan kayaçların aşınma değerleri ile  $SDE_E$  ve PR değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.34'te sunulmuştur. Bu kapsamda çalışmada yer alan kayaçlar üzerinde, önemli bir indeks deney olan Cerchar aşınma indeksi (CAI) deneyi yapılmış ve kayaçların aşındırıcılıkları belirlenmiştir. Şekil 5.34'te de görüldüğü üzere magmatik, sedimanter kırıntılı ve sedimanter karbonatlı kayaç gruplarında yer alan kayaçların aşındırıcılıkları ile delme performans değerleri arasında anlamlı ilişkiler elde edilememiştir. Kayaçların aşındırıcılığı arttıkça özellikle delici ucun körelmesine bağlı olarak gereken enerji miktarının artması ve ilerleme hızlarının düşmesi bilinen bir gerçektir. Ancak bu çalışmada yer alan kayaç türleri üzerinde gerçekleştirilen delme çalışmalarından elde edilen performans değerleri ile aşınma değerleri arasındaki korelasyon katsayıları anlamlı biri ilişkinin kurulması için yeterli değildir.

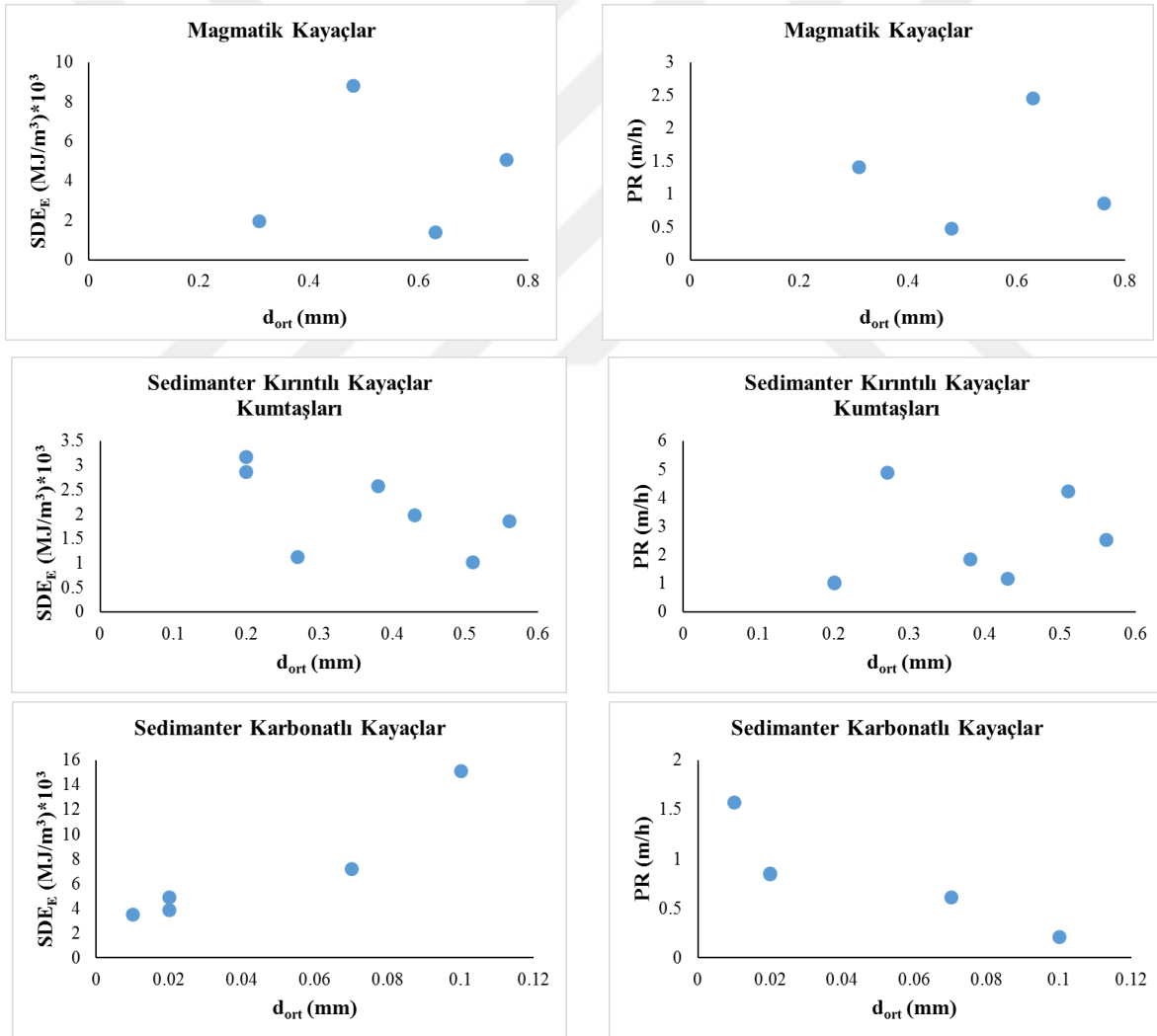


**Şekil 5.34** Delme performans parametre değerleri ile Cerchar aşınma indeksi arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

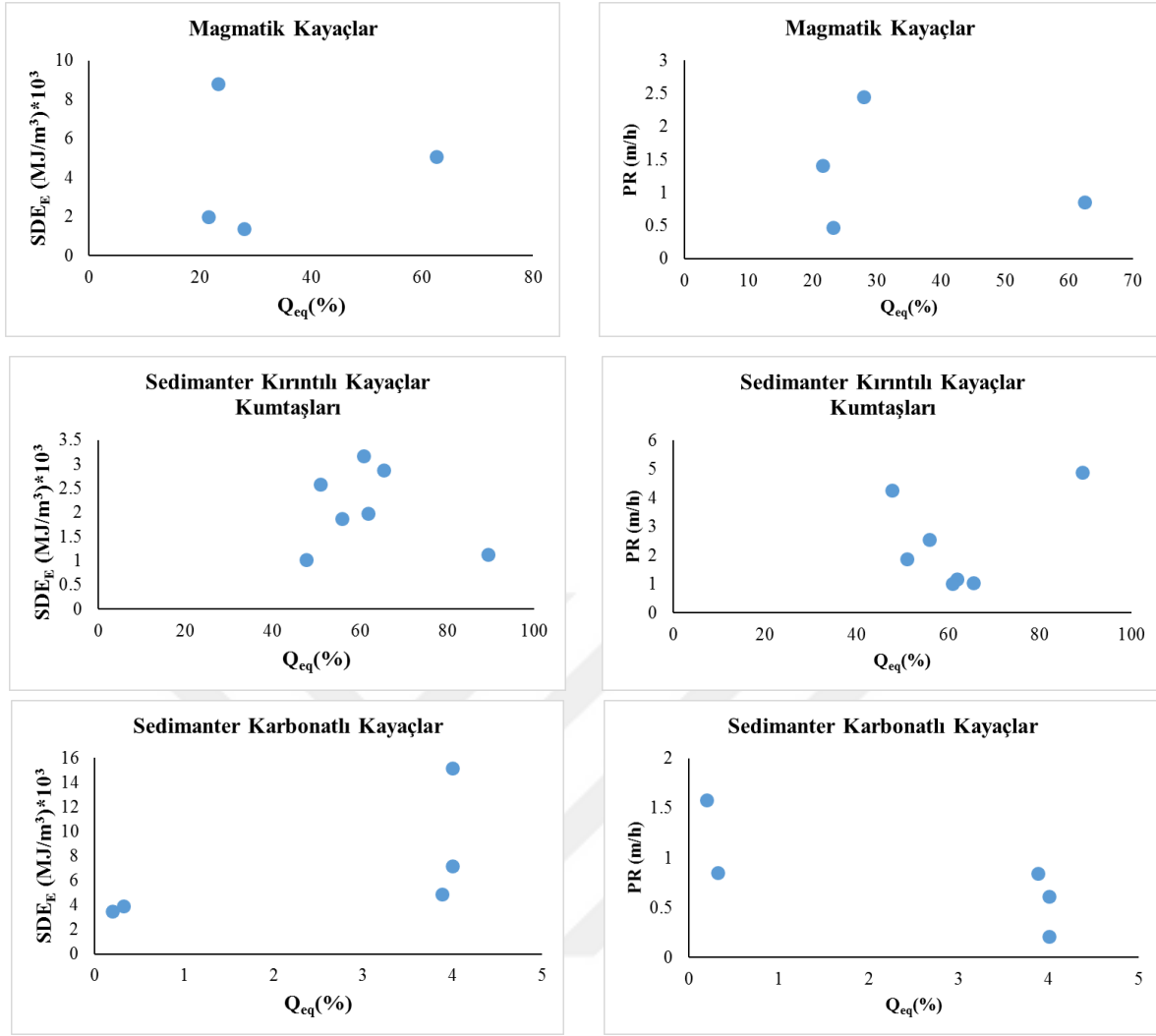
Tüm kayaç grupları için  $SDE_E$  ve PR değerleri ile CAI arasındaki korelasyon ilişkisine bakıldığında; sırasıyla magmatik kayaçlar için  $r=0.23$  ve  $r=-0.64$ , sedimanter kırıntılı kayaçlarda  $r=-0.29$  ve  $r=0.12$ , sedimanter karbonatlı kayaçlarda  $r=-0.57$  ve  $r=0.40$  düşük ilişkiler elde edilmiştir.

#### 5.2.4. Minerolojik Özelliklerin Etkisi

Çalışma kapsamında magmatik ve sedimanter kökenli 16 kayaç türüne ait örneklerin mineralojik analizleri yaptırılmış ve kayaçların ortalama tane boyu (Şekil 5.35) ve eş değer kuvars içerikleri (Şekil 5.36) ile delme performansı arasındaki ilişki incelenmiştir.



Şekil 5.35 Delme performans parametre değerleri ile ortalama tane boyu arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).



**Şekil 5.36** Delme performans parametre değerleri ile eş değer kuvars içeriği arasındaki ilişki (470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır).

Yapılan analizlerde  $d_{ort}$  ve  $Q_{eqv}$  ile delme performansı değerleri arasında korelasyon katsayısı en yüksek sedimanter karbonatlı kayalarda belirlenmiştir. Buna göre,  $d_{ort}$  ile  $SDE_E$  arasında  $r=0.94$  ve PR ile ise  $r=-0.86$ 'lık anlamlı ilişkiler elde edilmiştir. Sedimanter karbonatlı kayaların  $Q_{eqv}$  ile  $SDE_E$  ve PR arasındaki korelasyon ilişkisi incelendiğinde ise sırasıyla  $r=0.63$  ve  $r=-0.74$ 'lük katsayılar belirlenmiştir. Sedimanter kırıntılı ve magmatik kayaç gruplarında ise delme performans değerleri ile  $d_{ort}$  ve  $Q_{eqv}$  ile anlamlı ilişkiler elde edilememiştir.  $d_{ort}$  ile  $SDE_E$  ve PR değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde, magmatik kayalarda sırasıyla  $r=0.09$  ve  $r=0.06$  ve sedimanter kırıntılı kayalarda ise  $r=-0.57$  ve  $r=0.30$ 'luk düşük korelasyon değerleri elde edilmiştir. Benzer durum  $Q_{eqv}$  için de belirlenmiş olup,  $SDE_E$  ve PR değerleri ile kurulan korelasyon katsayıları magmatik kayalarda sırasıyla  $r=-0.20$  ve  $r=0.33$  ve sedimanter kırıntılı kayalarda sırasıyla  $r=-0.20$  ve  $r=0.33$  olarak elde edilmiştir.



Çalışma kapsamında minerolojik özelliklerin etkisi üzerine genel bir değerlendirme yapıldığında,  $SDE_E$  değerlerinin yüksek olması kayacı oluşturan minerallerin sertliği ve dokusu düşünüldüğünde magmatik kayalar için beklenen bir durumdur. Ancak çalışmalar sırasında sedimanter karbonatlı kayaların  $SDE_E$  değerlerinde oldukça yüksek ve PR değerlerinde ise oldukça düşük sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, çalışmada kullanılan karbonatlı kayaların minerolojik dokusu ve ufak boyutlu kalsit tanelerinin zaman içerisinde kenetlenmesi ve daha kompakt bir yapı oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Sedimanter kırıntılı kayalarda elde edilen  $SDE_E$  değer aralığı yakın olmak ile birlikte tane boyu arttıkça  $SDE_E$ 'nin azaldığı belirlenmiştir.

### 5.3. KAYAÇ DELME PERFORMANS TAHMİNİ

Uygun delme tekniğinin (döner, darbeli vs.) yanında seçilen yöntemin daha verimli ve ekonomik bir şekilde sürdürülebilir olması için ilk yatırım maliyeti oldukça yüksek olan delici makinanın performans analizlerinin önceden yapılması delinebilirlik üzerine yürütülen çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Tüm kazı sistemlerinde olduğu gibi delici makinaların performansının belirlenmesinde, belirli bir hacimdeki kayacı kazmak için gerekli enerji miktarı ya da kayaç içerisinde yapılan ilerleme hızı kavramlarından yararlanılmaktadır. Kayaların delinebilirliğinin analizinde, operasyonel makina parametrelerine bağlı olarak optimum koşulların belirlenmiş olması gerekmektedir. Ayrıca, tercih edilen delici makinadan optimum performans alabilmek ancak çalışılacak kayacın fiziksel, mekanik, indeks ve minerolojik özelliklerinin iyi bir şekilde tanımlanmasıyla mümkün olmaktadır. Başarılı bir performans tahmini yapabilmek için doğruluğu ve güvenilirliği kabul görmüş ve amacına uygun olarak yapılmış teçhizat kullanıldığı laboratuvar deneylerine ya da görgül yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Laboratuvar deneyleri oldukça zahmetli ve maliyetli çalışmalar sonucunda tamamlanmaktadır. Aksine görgül yaklaşımlar ise pek çok çalışmadan elde edilen verilerin istatistiksel olarak yorumlanmasıyla elde edilmektedir. Böylece kayaların delinebilirlik koşulları, basit istatistiksel yöntemlerin kullanılmasıyla belirlenebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kayaların performans değerlendirmesi, spesifik delme enerjisi ( $SDE_E$ ) ve ilerleme hızı (PR) değerleri şeklinde ifade edilmiş ve yapılan regresyon analizleri (doğrusal) ile geliştirilen modellerin anlamlılıkları istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, sabit çalışma parametrelerinde (470 dev/dk ve 70 kg baskı yükü) yapılan delme deneylerinden elde edilen spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı değerleri ile kayaç özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Kurulan regresyon analizlerinde; çalışmada kullanılan 16 kayaca ait  $SDE_E$  ve PR

değerleri bağımlı değişken, diğer fiziksel, indeks, mekanik ve minerolojik özellikler ise bağımsız değişkenler olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle geliştirilen modellerin, mevcut çalışma şartları ile uyumlu olacağı göz ardı edilmemelidir.

Tüm kayaç grupları için istatistiksel olarak yapılan analizlerde, farklı kayaç özellikleri ile anlamlı ilişkiler kurulmuştur:

- Magmatik kayaçlar için; yoğunluk, basınç dayanımı, çekme dayanımı, delme oranı indeksi ve sertlik değerleri ile  $SDE_E$  değerleri arasında anlamlı ilişkiler tespit edilmiştir ve tahmin modelleri geliştirilmiştir (Çizelge 5.5).
- Sedimanter kırıntılı kayaçlarda, yoğunluk, çekme dayanımı, delme oranı indeksi ve sertlik değerleri ile anlamlı modeller belirlenmiştir (Çizelge 5.6).
- Sedimanter karbonatlı kayaçlar için ise, kayaçların daha çok minerolojik özellikleri ön plana çıkmış ve ortalama tane boyu, delme oranı indeksi ve sertlik değerleri ile anlamlı ilişkilerin kurulduğu modeller geliştirilmiştir (Çizelge 5.7).

**Çizelge 5.5** Magmatik kayaçlarda spesifik delme enerjisi için önerilen tahmin modelleri

Eşitlik	r	R <sup>2</sup>	Standart Hata
$SDE_E = 12602d - 27221$	0.99	0.98	627
$SDE_E = 115\sigma_c - 7221$	0.93	0.87	1492
$SDE_E = 1978 \sigma_t - 13586$	0.76	0.57	2729
$SDE_E = -294DRI + 19289$	0.97	0.95	971
$SDE_E = 28.5ESD - 16187$	0.90	0.81	1819

$SDE_E$ : elektriksel spesifik delme enerjisi, d: yoğunluk,  $\sigma_c$ : tek eksenli basınç dayanımı,  $\sigma_t$ : dolaylı çekme dayanımı, E: elastisite modülü, DRI: delme oranı indeksi, ESD: Equotip sertlik değeri, 470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

Çizelge 5.5, 5.6 ve 5.7’de verilen regresyon analizleri incelendiğinde 3 kayaç grubu içinde en anlamlı sonuçlar kayaçların DRI ve ESD değerleri ile elde edilmiştir. Bu nedenle kayaçların delinebilirlik ve sertlik gibi indeks özelliklerinin, delinebilirlik performans değerlendirmelerinde oldukça önemli bir yere sahip oldukları unutulmamalıdır.

**Çizelge 5.6** Sedimanter kırıntılı kayalarda spesifik delme enerjisi için önerilen tahmin modelleri

Eşitlik	r	R <sup>2</sup>	Standart Hata
$SDE_E = 3763d - 7413$	0.66	0.43	684
$SDE_E = 254 \sigma_t + 335.6$	0.92	0.85	351.6
$SDE_E = -39DRI + 4536$	0.92	0.84	367
$SDE_E = 9.88ESD - 4128$	0.71	0.51	637
$SDE_E = -3256d_{ort} + 3277$	0.57	0.33	747

SDE<sub>E</sub>: elektriksel spesifik delme enerjisi, d: yoğunluk,  $\sigma_t$ : dolaylı çekme dayanımı,  $\nu$ : Poisson oranı, DRI: delme oranı indeksi, ESD : Equotip sertlik değeri,  $d_{ort}$ : ortalama tane boyu 470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

**Çizelge 5.7** Sedimanter karbonatlı kayalarda spesifik delme enerjisi için önerilen tahmin modelleri

Eşitlik	r	R <sup>2</sup>	Standart Hata
$SDE_E = -779DRI + 54511$	0.88	0.79	2562
$SDE_E = 93ESD - 50865$	0.88	0.78	2623
$SDE_E = -8659CAI + 16440$	0.57	0.32	4574
$SDE_E = 115287d_{ort} + 1860$	0.94	0.88	1945
$SDE_E = 1484Q_{eqv} + 3252$	0.63	0.39	4338

SDE<sub>E</sub>: elektriksel spesifik delme enerjisi, DRI: delme oranı indeksi, ESD : Equotip sertlik değeri, CAI: Cerchar aşınma indeksi,  $d_{ort}$ : ortalama tane boyu ve  $Q_{eqv}$ : eşdeğer kuvars içeriği 470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

Delme performans değerlendirmelerinde diğer önemli ölçüt PR ile kayaç özellikleri arasında anlamlı ilişkiler kayaç kökenlerine göre Çizelge 5.8, 5.9 ve 5.10'da sunulmuştur. Tüm kayaç gruplarında PR'nin tahminine yönelik geliştirilen modellerde DRI ile anlamlı ilişkiler elde edilmiştir. Kayaç grupları ayrı ayrı incelendiğinde:

- Magmatik kayaçların d, DRI ve ESD özellikleriyle,
- Sedimanter kırıntılı kayaçların d,  $\sigma_t$  ve DRI özellikleriyle ve
- Sedimanter karbonatlı kayaçların DRI, ESD ve  $d_{ort}$  özellikleriyle PR arasında yüksek ilişkili tahmin modelleri elde edilmiş ve Çizelge 5.8-5.10'da sunulmuştur.

Sedimanter kayaçların çekmeye karşı olan dayanımları ile PR arasında oldukça yüksek ( $R^2=0.96$ ) bir ilişki olduğu görülmektedir. Sedimanter karbonatlı kayaçlar incelendiğinde ise,

kayaçların mineralojik özellikleri ( $d_{ort}$  için  $R^2=0.86$ ) ile PR arasında yüksek anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Ayrıca magmatik ve sedimanter kırıntılı kayaçlar için kayaç yoğunluğunun da PR'nin tahmin edilmesinde önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir.

**Çizelge 5.8** Magmatik kayaçlarda ilerleme hızı için geliştirilen tahmin modelleri.

Eşitlik	r	$R^2$	Standart Hata
$PR = -3d+8.8$	0.93	0.87	0.37
$PR = 0.06DRI - 2$	0.85	0.73	0.55
$PR = -0.006ESD + 6$	0.80	0.64	0.62

PR: ilerleme hızı, d: yoğunluk, DRI: delme oranı indeksi ve ESD : Equotip sertlik değeri 470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

**Çizelge 5.9** Sedimanter kırıntılı kayaçlarda ilerleme hızı için geliştirilen tahmin modelleri.

Eşitlik	r	$R^2$	Standart Hata
$PR = -9d+25$	0.84	0.70	0.95
$PR = -0.5\sigma_t + 6$	0.96	0.91	0.51
$PR = -5.6DRI + 101$	0.88	0.78	9.85

PR: ilerleme hızı, d: yoğunluk,  $\sigma_t$ : dolaylı çekme dayanımı ve DRI: delme oranı indeksi 470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

**Çizelge 5.10** Sedimanter karbonatlı kayaçlarda ilerleme hızı için geliştirilen tahmin modelleri.

Eşitlik	r	$R^2$	Standart Hata
$PR = 0.7DRI - 3.69$	0.81	0.66	0.33
$PR = -0.01ESD + 7.45$	0.98	0.96	0.12
$PR = -11d_{ort} + 1.30$	0.86	0.73	0.30

PR: ilerleme hızı, DRI: delme oranı indeksi, ESD: Equotip sertlik değeri ve  $d_{ort}$ : ortalama tane boyu 470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

$SDE_E$  ile PR arasındaki ilişki incelendiğinde ise, en anlamlı ilişki makinanın gücüne bağlı olarak elde edilen  $SDE_E$  değeri ile üssel olarak ( $R^2=0.88$ ) belirlenmiştir (Şekil 5.26). Şekil 5.26 incelendiğinde  $SDE_E$  ile PR arasındaki ilişki Eşitlik 5.1'de sunulmuştur.

$$SDE_E = 3601.7PR^{-0.92} \quad (5.1)$$

Çalışmada kullanılan tüm kayaçlar kökenlerine ayırmaksızın birlikte değerlendirildiğinde ise, delme performans parametreleri ile kayaç özellikleri arasında istatistiksel olarak elde edilen basit ilişkiler Çizelge 5.11 ve 5.12’de sunulmuştur.

**Çizelge 5.11** Spesifik delme enerjisi ile kayaç özellikleri arasında geliştirilen tahmin modelleri.

Eşitlik	R <sup>2</sup>
$SDE=5373e^{-0.015Q_{eqv}}$	R <sup>2</sup> =0.32
$SDE=2203d_{ort}^{-0.21}$	R <sup>2</sup> =0.14
$SDE=4724CAI^{-0.64}$	R <sup>2</sup> =0.22
$SDE=105.2e^{0.0052ESD}$	R <sup>2</sup> =0.30
$SDE=-5236\ln(DRI)+25354$	R <sup>2</sup> =0.14
$SDE=9289SJ^{-0.29}$	R <sup>2</sup> =0.14
$SDE=291\sigma_t^{1.18}$	R <sup>2</sup> =0.36
$SDE=7.77 \sigma_c^{1.33}$	R <sup>2</sup> =0.22
<b><math>SDE=0.66e^{0.33d}</math></b>	<b>R<sup>2</sup>=0.58</b>

SDE<sub>E</sub>: elektriksel spesifik delme enerjisi, d: yoğunluk,  $\sigma_c$ : tek eksenli basınç dayanımı,  $\sigma_t$ : dolaylı çekme dayanımı, SJ : sievers minyatür delme, DRI: delme oranı indeksi, ESD : Equotip sertlik değeri, CAI: Cerchar aşınma indeksi,  $d_{ort}$ : ortalama tane boyu ve  $Q_{eqv}$ : eşdeğer kuvars içeriği  
470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

**Çizelge 5.12** İlerleme hızı ile kayaç özellikleri arasında geliştirilen tahmin modelleri.

Eşitlik	R <sup>2</sup>
$PR=0.71e^{0.0159 Q_{eqv}}$	R <sup>2</sup> =0.29
$PR=0.1e^{0.33d_{ort}}$	R <sup>2</sup> =0.11
$PR=0.80\ln CAI+1.13$	R <sup>2</sup> =0.11
$PR=-7\ln ESD+47$	R <sup>2</sup> =0.38
$PR=0.065DRI-2.2$	R <sup>2</sup> =0.50
$PR=0.07S20-1.76$	R <sup>2</sup> =0.46
<b><math>PR=-3.19\ln\sigma_t+8</math></b>	<b>R<sup>2</sup>=0.85</b>
$PR=690.3 \sigma_c^{-1.4}$	R <sup>2</sup> =0.21
$PR=-0.55d+15.67$	R <sup>2</sup> =0.51

PR: ilerleme hızı, d: yoğunluk,  $\sigma_c$ : tek eksenli basınç dayanımı,  $\sigma_t$ : dolaylı çekme dayanımı, S20: kırılgenlik, DRI: delme oranı indeksi, ESD: Equotip sertlik değeri, CAI: Cerchar aşınma indeksi,  $d_{ort}$ : ortalama tane boyu ve  $Q_{eqv}$ : eşdeğer kuvars içeriği  
470 dev/dk ve 70 kg baskı koşulunda yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

Tüm kayaçlar birlikte değerlendirildiğinde, spesifik delme enerjisi ile kayaç özellikleri arasında istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler elde edilememiştir (Çizelge 5.11). Benzer bir çalışma, ilerleme hızı için de yapılmış ve yalnızca kayaçların çekme dayanımı değerleri ile yüksek bir ilişki katsayısı ( $R^2=0.85$ ) elde edilirken, diğer kayaç özellikleri ile ilerleme hızı değerleri arasında anlamlı ilişkiler belirlenememiştir.

Spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızının tahminine yönelik geliştirilen performans analizlerinde ya da modellerinde, tek bir kayaç özelliğinden ziyade kayaçların fiziksel, mekanik, indeks ve minerolojik birçok özelliğinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan performans değerlendirmelerinde, SDE ve PR parametreleri ile kayaçların fiziksel, mekanik, indeks ve minerolojik gibi çeşitli özelliklerinin birlikte değerlendirildiği çoklu regresyon analiz modelleri yapılmış ancak tüm kayaçlar için delme performans parametrelerini istatistiksel olarak açıklayan bir ilişki belirlenememiştir. Çalışmada, kayaçlar kökenlerine göre incelendiğinde ise oluşturulan çoklu modellere katılan veri sayısı yeterli büyüklükte olmadığından çoklu regresyon modellemesi yapılmamıştır.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tüm kazı sistemlerinde olduğu gibi delicilerin verimliliğinin değerlendirilmesinde spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı değerleri önemli bir yer tutmakta olup, kayaç delme performansını etkileyen parametrelerin başında gelmektedirler. Bu amaçla, yapılan delme deneylerinde, spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı parametreleri ön planda tutulmuştur. Literatürde delinebilirlik ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, delinebilirliği etkileyen pek çok parametrenin olduğu görülmektedir. Bu parametreler; kayaç özelliklerine ve makine özelliklerine bağlı olmak üzere iki ana başlık altında toplanmıştır. Bu çalışmada, kayaç özelliklerinin ve operasyonel makine parametrelerinin spesifik delme enerjisi üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle spesifik delme enerjisi değerlerinin, döner delik delme deney setine ve kayaç özelliklerine göre tahmin edilebilmesi bu çalışmanın aslını oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında; sedimanter ve magmatik kökenli 16 kayaç türü üzerinde, ZBEU Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Laboratuvarında yeniden tasarımılandırılan döner delik delme deney setinin kullanılmasıyla delme çalışmaları yapılmıştır. Delme performans parametrelerinin pratik bir şekilde hesaplanması, deneylerin tekrar edilebilir ve güvenilir olması oldukça önemlidir. Bu amaçla, deney seti, taşınabilir karot alma makinasının yeniden tasarımılandırılması ile oluşturulmuştur. Böylece hem araziden alınan kaya blokları üzerinden karot alınabilmekte hem de delme sırasında makinarya bağlı parametreler ölçülebilmektedir. Çalışmalar sırasında elmas emprenyeli ve karot alınan delici uç kullanılmış böylece alınan karot örnekleri üzerinde kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, laboratuvarda taşınabilir bir karot alma makinasının kullanılarak döner deliciler için performans tahminin pratik bir şekilde yapılabileceğini göstermektedir.

Delme işlemi sırasında spesifik delme enerjisi ne kadar düşükse, makinanın delme performansı o kadar verimli olmaktadır. Özellikle sondaj çalışmaları sırasında delme performansı sürekli takip edilmekte ve çalışmanın verimli bir şekilde gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Bu amaçla, döner delicilerin delme performanslarının belirlenmesi için günümüzde operasyonel makine parametrelerinin (baskı, dönme hızı/devir, tork, makinanın gücü vb.) göz önünde bulundurulduğu yaklaşımlar kullanılmaktadır (Bkz. Bölüm 3). Çalışma kapsamında, döner delik delme için önerilen yaklaşımlar incelenerek, deney seti oluşturulmuş ve delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında baskı yükü ve dönme hızı/devir değişkenleri, makinanın operasyonel parametreleri olarak çalışma koşullarını belirlemiştir. Çalışmalar sırasında operasyonel makine parametreleri için 4 farklı baskı (50, 70, 90 ve 110 kg) ve 3 farklı dönme hızı/devir (210, 330 ve 470 dev/dk) koşulu belirlenmiştir. Dönme torku, makinanın çektiği güç ve delici uç ile kayacın teması sırasında fiili dönme hızı ise makinadan alınan karşılıklar olarak ölçülmüştür. Böylece, deney seti kullanılarak yapılan delme deneylerinden alınan veriler önerilen yaklaşımlarda kullanılarak SDE değerleri mekanik ve elektriksel olarak hesaplanmıştır. SDE değerleri ile operasyonel makine parametreleri arasında ilişki incelendiğinde, özellikle delici uç üzerindeki baskı yükü arttıkça delik delmenin kolaylaştığı ve delme veriminin arttığı belirlenmiştir. Bu durum Teale 1965, Huang ve Wang 1997, Rao vd. 2002, Ersoy 2003, Celeda vd. 2012 tarafından yapılan çalışmalar ile de benzerlik göstermektedir.

Kayaçların fiziksel (yoğunluk), mekanik (basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı), indeks (delme oranı indeksi, Cerchar aşınma indeksi ve sertliği) ve minerolojik özellikleri (tane boyu, dokusu, eş değer kuvars içeriği) yapılan deneyler ile ayrı ayrı tanımlanmıştır. Kayaçların delme performans parametre (spesifik delme enerjisi ve ilerleme hızı) değerleri ile magmatik, sedimanter kırıntılı ve sedimanter karbonat kökenli kayaç özellikleri arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak incelenmiş ve performans tahmin modelleri geliştirilmiştir.

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında elde edilen başlıca sonuçlar özetlenmiş ve aynı konuda ileride yapılabilecek çalışmalara öneriler sunulmuştur.



## 6.1. SONUÇLAR

Bu kapsamda ilk olarak operasyonel makine parametrelerinin spesifik delme enerjisi (SDE) ve ilerleme hızı (PR) üzerindeki etkileri incelenmiş daha sonra ise kayaçların fiziksel, mekanik, indeks ve minerolojik özelliklerinin SDE ve PR üzerindeki etkileri özetlenmiştir.

Operasyonel makine parametrelerinin delme performansı üzerine etkisi 4 farklı baskı (50, 70, 90 ve 110 kg) ve 3 farklı dönme hızı/devir (210, 330 ve 470 dev/dk) koşulunda incelenmiş ve sonuçların tümü birlikte değerlendirilerek elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur:

- Çalışma kapsamında SDE değerleri mekanik ( $SDE_T$  ve  $SDE_R$ ), elektriksel ( $SDE_E$ ) ve birim deformasyon enerjisi ( $SDE_{DW}$ ) olarak hesaplanmış ve aralarındaki ilişkiler incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda tüm kayaçlar için elektriksel değerler ( $SDE_E$ ) ile mekanik değerler ( $SDE_T$  ve  $SDE_R$ ) arasında sırasıyla %76 ve 69'luk anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. SDE'nin mekanik olarak elde edilebilmesi için gerekli parametrelere ihtiyaç duyulmadan doğrudan makinanın gücüne bağlı olarak belirlenebileceğini ortaya koymuştur.
- Çalışmada kullanılan kayaçlar üzerinde, İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Kazı Mekaniği Laboratuvarı'nda geliştirilen portatif doğrusal kesme seti ile kesme deneyleri yapılmış ve özellikle sedimanter karbonat kökenli kayaçlar ile yüksek ilişki katsayısı ( $R^2=0.88$ ) belirlenmiştir.
- Kayaçlar spesifik delme enerjisi değerlerine göre; yüksek enerji değerlerinin elde edildiği sedimanter karbonatlı kayaçlar ve magmatik (M3 bazalt ve M4 granit) kayaçlar ile daha düşük enerji değerlerinin belirlendiği sedimanter kırıntılı ve diğer magmatik (M1 ve M2 andezitler) kayaçlar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır.
- Kayaçlar kökenlerine göre değerlendirildiğinde ise;
  - Magmatik kayaçlar için 1,000 – 18,000 MJ/m<sup>3</sup> SDE ve
  - Sedimanter kırıntılı kayaçlarda 1,000 – 10,000 MJ/m<sup>3</sup> ve
  - Sedimanter karbonatlı kayaçlarda 1,000 – 18,000 MJ/m<sup>3</sup> arasında değişen SDE değerlerine ulaşılmıştır.
- Kayaç türü dahil olmak üzere tüm delme parametreleri (dönme hızı, baskı vb) göz önünde bulundurulduğunda, delici uç üzerindeki baskı delik delme işlemini etkileyen en önemli parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

- Tüm kayaç grupları ayrı ayrı incelendiğinde yüksek baskı değerlerinde tork artmakta ve  $SDE_E$  değerleri azalmaktadır.
- Dönme hızı ve delici uç üzerindeki baskı arttırıldıkça daha yüksek PR değerleri elde edilebilmektedir.
- PR değerleri ve tork, baskı ile artmakta ancak bu durum kayaç özellikleri ve dönme hızına bağlı olarak değişim gösterebilmektedir.
- Yüksek tork değerlerinde daha yüksek PR değerleri elde edilebilmektedir.
- Dönme hızı daha çok kayaç içerisinde yapılan ilerleme hızı ile ilişkilidir.
- Tüm kayaçlarda, tur başına delinen delik uzunluğu arttıkça  $SDE_E$  değerleri azalmaktadır.
- $SDE_E$  değerinin makinadaki aşırı zorlanmaya bağlı olarak arttığı görülmüştür. Bu durum aşırı güç kaybına ve delici ucun sıkışmasına neden olmakta ve delme esnasında ilerleme hızı azalmakta ve enerji sarfiyatı artmaktadır.
- Delme işlemi sırasında yenilme mekanizması öğütme şeklinde olmaktadır. Bu nedenle, mevcut çalışma koşullarında gerçekleştirilen delme deneylerinde oldukça yüksek enerji değerleri elde edilmiştir.
- Kayaçların kökenlerine göre optimum çalışma koşulları:
  - Magmatik kayaç grubu için: M1, M2 (andezitler) ve M4 (granit) örneklerinde 470 dev/dk ve 110 kg'lık çalışma koşullarında, M3 (bazalt) örneği incelendiğinde ise 330 dev/dk ve 110 kg koşulunda delme performansı optimum değerlerine ulaşmaktadır.
  - Sedimanter kırıntılı kayaç (kumtaşları) grubu için: S3 ve S16 örneklerinde 210 dev/dk ve 110 kg, S4 örneğinde 470 dev/dk ve 70 kg, S1, S5, S6 ve S15 örnekleri için ise 470 dev/dk ve 110 kg'lık baskı yükü koşullarında en optimum değerler elde edilmiştir.
  - Sedimanter karbonatlı kayaç grubu için: S8 (mermer/kireçtaşı) kayaç örneğinde 330 dev/dk ve 110 kg, SK1 (kireçtaşı) ve SK2 (dolomitik kireçtaşı) örnekleri 330 dev/dk ve 90 kg, S9 (mermer/dolomit) örneğinde 470 dev/dk ve 70 kg, SK3 (dolomit) örneğinde ise 470 dev/dk ile 110 kg'lık çalışma şartlarında en optimum delme performans değerleri belirlenmiştir.

Laboratuvarda döner delik delme seti ve kayaçların fiziksel, mekanik, indeks ve minerolojik özellikleri kullanılarak performans tahminini partik olarak yapılabilmektedir. Bu kapsamda, kayaç özelliklerinin delme performansı üzerindeki etkisi, makine parametreleri 470 dev/dk ve 70 kg'da sabit tutularak incelenmiş ve bulgular aşağıda sunulmuştur:

- Tüm kayaç türleri birlikte incelendiğinde, SDE ile istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. Ancak PR ile çekme dayanımı arasında  $R^2=0.88$ 'lik logaritmik bir ilişki belirlenmiştir.
- Çalışmada kullanılan tüm kayaçlar için makine parametreleri sabit tutulduğunda (470 dev/dk ve 70k kg, Bkz. Çizelge 5.14); magmatik kayaçlarda M3 (bazalt) örneği (8,815 MJ/m<sup>3</sup>), sedimanter kırıntılı kayaçlarda S6 (kumtaşı) örneği (3,000 MJ/m<sup>3</sup>) ve sedimanter karbonatlı kayaçlarda SK2 (dolomitik kireçtaşı) örneğinde (15,000 MJ/m<sup>3</sup>) en yüksek SDE<sub>E</sub> değerleri elde edilmiştir. En yüksek PR değerlerine ise, magmatik kayaçlarda M2 (andezit) örneğinde (2.45 m/h), sedimanter kırıntılı kayaçlarda S1 (kumtaşı) örneğinde (4.89 m/h) ve sedimanter karbonatlı kayaçlarda S9 (mermer/dolomit) örneğinde (1.58 m/h) ulaşılmıştır.
- Delinebilirlik performansı ile kayaç fiziksel özelliklerinden yoğunluk parametresi göz önünde bulundurulmuş ve yapılan analizlerde kayaç yoğunluğunun önemli bir etken olabileceği belirlenmiştir. Tüm kayaç gruplarında genel durum, kayaç yoğunluğu arttıkça SDE<sub>E</sub> artma ve PR değerleri azalma eğilimindedir. Kayaç yoğunlukları ile SDE<sub>E</sub> arasında en anlamlı ilişkiler magmatik kayaçlar grubu ( $r=0.99$ ) için belirlenmiştir. Sedimanter kırıntılı ve sedimanter karbonatlı kayaç gruplarında ise sırasıyla orta ( $r=0.66$ ) ve düşük ( $r=0.30$ ) korelasyon katsayıları elde edilmiştir.
- Kayaçların dayanım özellikleri (çekme ve basınç dayanımları) göz önüne alındığında, beklendiği gibi kayaç dayanımları ile SDE<sub>E</sub> arasında artan ve PR ile ise azalan bir eğilim elde edilmiştir. Ancak, kayaç grupları ayrı ayrı incelendiğinde basınç dayanımı ile SDE<sub>E</sub> arasında sadece magmatik kayaçlarda ( $r=0.93$ ) yüksek korelasyon katsayılı anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Sedimanter kırıntılı ve karbonatlı kayaçlarda ise basınç dayanımı ile SDE<sub>E</sub> arasında anlamlı ilişkiler elde edilememiştir. Çekme dayanımları göz önünde bulundurulduğunda ise, yalnızca sedimanter kırıntılı kayaç grubu ( $r=0.92$ ) için yüksek katsayılı anlamlı ilişkiler elde edilmiştir.
- Çalışmada kullanılan kayaçların, gerilme birim deformasyon eğrilerinden elde edilen SDE<sub>DW</sub> ile delme performans parametreleri arasında anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir.
- Delinebilirlik tanımlanmalarında oldukça yaygın bir kullanım alanı bulunan DRI ile delme performans parametreleri arasındaki ilişki incelendiğinde, 3 kayaç grubu için de yüksek korelasyon katsayılı negatif anlamlı ilişkiler elde edilmiştir. Yapılan incelemelerde her kayaç grubunda, DRI arttıkça kayacı delmek için gereken SDE<sub>E</sub> azalmakta ve PR değerleri artmaktadır. Magmatik kayaç grubu için  $r=-0.97$ , sedimanter

kırıntılı kayaç grubu için  $r = -0.92$  ve sedimanter karbonatlı kayaç grubu için  $r = -0.89$  negatif anlamlı korelasyon katsayıları belirlenmiştir. Bu durum, DRI yüksek kayaçların daha kolay delinebilir olmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmada, bir indeks deney olan DRI'nın delme performans parametreleri  $SDE_E$  ve PR'yi daha anlamlı açıkladığı belirlenmiştir.

- Bu çalışmada, aynı koşullarda gerçekleştirilen delme deneylerinden elde edilen spesifik delme enerjisi değerleri ile kayaç özellikleri arasındaki ilişkiler Bölüm 5.3'te verilmiştir. Çizelge 5.5 – 5.10 incelendiğinde, döner delik delme setinden elde edilen spesifik delme enerjisi değerlerini tüm kayaç gruplarında en iyi açıklayan parametre olarak delme oranı indeksi değerleri öne çıkmıştır. Bu kapsamda, her kayaç grubu için spesifik delme enerjisi değerleri Eşitlik 6.1, 6.2 ve 6.3'teki gibi bulunmuştur.

$$SDE_E = -294DRI + 19289 \quad \text{Magmatik kayaç grubu} \quad (6.1)$$

$$SDE_E = -39DRI + 4536 \quad \text{Sedimanter kırıntılı kayaç grubu} \quad (6.2)$$

$$SDE_E = -779DRI + 54511 \quad \text{Sedimanter karbonatlı kayaç grubu} \quad (6.3)$$

- Kayaçların sertliği ile delme performans parametreleri arasında anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Yapılan çalışmada kayaç sertliği arttıkça onu delmek için gerekli enerji miktarının da arttığı belirlenmiştir. Aynı zamanda da, kayaç içerisinde yapılan ilerleme miktarı azalmaktadır. Yapılan istatistiksel değerlendirmede, magmatik kayaç grubu için  $r = 0.90$ , sedimanter kırıntılı kayaç grubu için  $r = 0.71$  ve sedimanter karbonatlı kayaç grubu için  $r = 0.88$  pozitif anlamlı korelasyon katsayıları belirlenmiştir.
- Kayaç aşındırıcılığı ile  $SDE_E$  değeri arasındaki ilişki oldukça önemlidir. Yapılan analizlerde CAI ile  $SDE_E$  arasında anlamlı ilişkiler ortaya çıkmasa da aşındırıcı bir kayacın delici uç üzerinde yapacağı aşındırma nedeniyle, uygulanması gereken kuvvet ve güç gereksiniminin ve dolayısıyla da  $SDE_E$  artması beklenen bir durumdur. Ek olarak, uçtaki aşınma arttıkça da yapılan ilerleme miktarı azalmaktadır.
- Ayrıca çalışmalarda, sert minerallerin tane boylarının delme işlemini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Kayaç grupları kendi içerisinde incelendiğinde, magmatik kayaç grubunun içerisinde yer alan örneklerin tane boyutu yüksek olmak ile birlikte sert mineral tanelerinden oluşmaktadır. Bu nedenle delme performansı açısından değerlendirildiğinde yüksek enerji ve düşük ilerleme hızları elde edilmiştir. Sedimanter kırıntılı kayaç grubu

incelendiğinde, ortalama tane boyu daha küçük olan örneklerin üzerinde yapılan deneylerde daha yüksek  $SDE_E$  değerleri elde edilmiştir. Çalışmada en küçük tane boyu karbonatlı kayalarda belirlenmiştir. Tane boyunun düşük olması ve tanelerin birbiri ile kenetlenmesi nedeniyle en yüksek  $SDE_E$  değerleri karbonatlı kayalarda elde edilmiştir.

- Çalışmada kullanılan tüm kayalar üzerinde yapılan delinebilirlik deneyleri sırasında sadece bir tek kayaç özelliğinin dikkate alınarak bir değerlendirme ya da bir delme performans analizi yapılması yanlış sonuçlara neden olabileceğinden, tüm özelliklerin birlikte değerlendirilmesi oldukça önemli olmaktadır. Bu amaçla,  $SDE$  ve  $PR$  parametreleri ile kayaların çeşitli özelliklerinin birlikte değerlendirildiği çoklu regresyon analiz modelleri yapılmış ancak tüm kayalar için delme performans parametrelerini istatistiksel olarak açıklayan bir ilişki belirlenmemiştir.

Sonuç olarak, madencilik, inşaat vb. faaliyetlerinin yürütüldüğü yerüstü ve yeraltı yapılarında, kazı işleminin daha verimli ve ekonomik bir şekilde gerçekleşmesi için mekanize kazı sistemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, mekanik kazı makinelerinin seçilmesinden önce, gerekli olan delme enerjisine göre kazı performansının önceden doğru bir şekilde tahmin edilmesi oldukça önemli olmakta ve bunun olması için de  $SDE$  ile kayaç özellikleri ve makine parametreleri arasındaki ilişkinin iyice incelenmiş olması gerekmektedir. Bu çalışmada, kayaç özellikleri (fiziksel, mekanik, indeks ve minerolojik) ile birlikte makine parametrelerinin  $SDE$  üzerindeki etkileri dikkate alınmıştır. Elde edilen bulgular, laboratuvarla taşınabilir bir karot alma makinasının kullanılarak döner deliciler için performans tahminin pratik bir şekilde yapılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada ulaşılan bulgular mevcut çalışma şartları ve kayaç koşulları için geçerlidir. Elde edilen bulguların doğruluğunun artırılması amacıyla daha fazla örnek üzerinde deneyler yürütülmeli ve delici makinelerin yerinde performans ölçümleri yapılarak, laboratuvarla geliştirilen modeller ile aralarındaki ilişkiler incelenmelidir.

## 6.2. ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında yapılan irdellemelere göre; ileride delinebilirlik konusunda çalışmalar yapacak araştırmacılar için aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Bu tez çalışmasında, yalnızca döner delik delme sistemleri göz önünde bulundurulmuştur. Döner delme sisteminin her türlü kayaç koşullarında uygulama alanına sahip olsa da

özellikle sağlam kaya yapılarında, kayaçtan koparılan parça boyutu ve ilerleme hızı düşük olmaktadır. İleriki yıllarda daha yüksek ilerleme hızlarının sağlanabileceği döner darbeli delici sistemler göz önünde bulundurularak laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilebilir.

- Gelecekteki çalışmalarda, geliştirilen modellerin güvenilirliği için arazide kullanılan delicilerin performansları incelenmeli ve laboratuvarında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmalıdır.
- Delme çalışmaları, karotlu ya da karotsuz farklı türde delici uçlar kullanılarak incelenmelidir.
- Delme işlemi sırasında yenilme mekanizmasının öğütme şeklinde olması sebebiyle kayaların öğütülebilirlik özelliklerinin de özel olarak incelenmelidir.
- Çalışmalar sırasındaki gözlemlere dayanarak, kayaların gözenekliliğinin de delme performansını olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir. Bu nedenle, kayaların delme performans değerlendirmelerinde kayaç gözenekliği de göz önünde bulundurulmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Adamson W R** (1984) Correlation of Model Excavating Machine Performance with Rock Properties and Rotary Drilling Performance Data, *Master Thesis*, Univ. of Queensland, Queensland, Australia, 124 pp.
- Adebayo B, Opafunso Z O and Akande J M** (2010) Drillability and strength characteristics of selected rock in Nigeria, *Assumption University Journal of Technology*, 14(1): 56-60.
- Akisanmi O A** (2016) Automatic Management Of Rate Of Penetration In Heterogeneous Formation Rocks. *Master Thesis*, Petroleum Engineering/Well and Drilling Technology Program, Faculty of Science and Technology, University of Stavanger, Stavanger, Norway, 127 pp.
- Alber M, Yaralı O, Dahl F, Bruland A, Käsling H, Michalakopoulos T N, Cardu M, Hagan P, Aydın H and Ozarlan A** (2014) ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the Cerchar abrasivity test, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1): 261-266.
- Alireza C, Seyed H K, Kouros S and Jafar K H** (2012) An estimation of the penetration rate of rotary drills using the specific rock mass drillability index. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22: 187-193.
- Altındağ R** (2000) Darbeli delme performans analizlerinde kayaç gevrekliğinin rolü. 5. *Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu*, 30-31 Ekim, Isparta, 105-112.
- Altindag R** (2002) The evaluation of rock brittleness concept on rotary blasthole drills. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 102: 61–66.
- Altindag R** (2003) Correlation of specific energy with rock brittleness concept on rock cutting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 103: 163–171.
- Altindag R and Guney A** (2006) ISRM suggested method for determining the Shore Hardness value for rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 43: 19-22.
- Amadi K, Iyalla I and Gordon R** (2012) Application of mechanical specific energy techniques in reducing drilling cost in deepwater development. *Society of Petroleum Engineers*, Paper SPE156370, 1-10.
- Andrews R, Hareland G and Nygaard R** (2007) Methods of using logs to quantify drillability. Paper No. SPE 106571, *Society of Petroleum Engineers*, April 16–18, Denver, CO, 7 pp.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Antoljak D, Kuhinek D, Korman T and Kujundzic T** (2018) Dependency of specific energy of rock cutting on specific drilling energy. *The Mining Geology Petroleum Engineering Bulletin*, DOI: 10.17794/rgn.2018.3.3, 23-32.
- Aoki H and Matsukura Y** (2007) A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: an application of the Equatip hardness tester to weathering studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 1759-1769.
- ASTM** (1972) *Standard Practices for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances*, Designation: D 4543-01.
- ASTM** (2010) *Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method*, Designation: D7625-10.
- Atıcı Ü and Ersoy A** (2009) Correlation of specific energy of cutting saws and drilling bits with rock brittleness and destruction energy, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 2602 – 2612.
- Atkinson R H** (1993) Hardness tests for rock characterization, *Comprehensive Rock Engineering*, 3(5): 105-117
- Aydın G** (2012) Kesici Disklerin Kayaç Kesme Performansının Araştırılması Ve Performans Tahminine Yönelik Modellerin Geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, 200 s.
- Balcı C** (2004) Mekanize Kazı Makinalarının Seçiminde Küçük Boyutlu Kazı İle Tam Boyutlu Kazı Deneylerinin Karşılaştırılması, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 269 s.
- Balcı C ve Bilgin N** (2005) Mekanize kazı makinalarının seçiminde küçük ve tam boyutlu kazı deneylerinin karşılaştırılması. *İTÜ Dergisi*, 4(3): 76-86.
- Balcı C, Bilgin N, Çopur H, Tumaç D ve Akgül M** (2007) Tünel açma makinelerinin tam boyutlu kesme deneti ile performans tahmini, *I. Maden Makinaları Sempozyumu*, TMMOB, MMO, Kütahya, 61 – 70.
- Balcı C ve Bilgin N** (2007) Correlative study of linear small and full – scale rock cutting tests to select mechanized excavations machines, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44: 468-476.
- BAP** (2017) *Spesifik Enerjinin Kayaçların Delinebilirliğine Ve Asındırıcılığına Olan Etkisinin İncelenmesi*, Yükseköğretim Kurumları Tarafından Destekli Bilimsel Araştırma Projesi, BAP, 2015-98150330-01, 114 s.
- BAP** (2016) *Kayaçların Delinebilirliğine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi*, Yükseköğretim Kurumları Tarafından Destekli Bilimsel Araştırma Projesi, 28/10/2014 - 28/03/2016, BAP, 2015-98150330-03.



## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Baş N** (1993) Elektro Hidrolik Delicilerin Delme Performansının İncelenmesi. *Yüksek Mühendislik Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 141 s.
- Bhatnagar A, Khandelwal M and Rao K U M** (2011) Laboratory investigations for the role of flushing media in diamond drilling of marble. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44: 349 – 356.
- Bilgin N** (1982) Zonguldak kömür havzasındaki formasyonların jeomekanik özelliklerinin burgu davranışlarına etkisi. *Türkiye 3. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Zonguldak, 95-111.
- Bilgin N, Eskikaya S, Balcı C and Ergunalp D** (1997) Full scale and small scale cutting tests for equipment selection in a celestite mine. *Sixth International Mine Planning and Equipment Selection*, eds. V. Strakos et al., Ostrava, Czech Republic, 387-392.
- Bilgin N and Kahraman S** (2003) Drillability prediction in rotary blast hole drilling. *International Mining Congress Exhibition of Turkey*, IMCET 2003, Antalya, Turkey, 177-182.
- Boryczko P** (2012) Drill Bit Selection and Optimization in Exploration Well 6507/6-4A int the Nordland Ridge Area. *Master Thesis*, Faculty of Science and Technology, Petroleum Engineering/Drilling program, The University of Stavanger, Stavanger, Norway, 83 pp.
- CERCHAR** (1986) *Centre d' Etudes et Recherches de Charbonnages de France, The Cerchar Abrasiveness Index*, 1-12.
- Chen X and Rowe W B** (1996) Analysis and simulation of the grinding process. Part II: mechanics of grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(8): 883-896.
- Chen X, Fan H, Guo B, Gao D, Wei H and Ye Z** (2014) Real – time prediction and optimization of drilling performance based on a new mechanical specific energy model. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39: 8221-8231.
- Cherif H and Bits S** (2012) FEA modelled MSE/UCS values optimise PDC design for entire hole section. *Society of Petroleum Engineers*, Paper SPE149372, 1-11.
- Copur H, Tunçdemir H, Bilgin N ve Dinçer T** (2001) Spesific energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkish mines, *Institution of Mining and Metallurgy, Transactions, Mining Technology*, 110(A): 149-157.
- Dahl F** (2003) *DRI Standards*, NTNU, Angleggsdrift, Trondheim. 21 pp.
- Dahl F, Bruland A, Jakobsen P D, Nilsen B and Grov E** (2012) Classifications of properties influencing the drillability of rocks based on the NTNU/SINTED test method. *Tunneling and Underground Spacing Technology*, 28: 150-158.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Deng Y, Mian C, Jin Y, Zhang Y, Zou D and Lu Y** (2016) Theoretical and experimental study on the penetration rate for roller cone bits based on the rock dynamic strength and drilling parameters. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 36: 117-123.
- Deketh H J R** (1995) *Wear of rock cutting tools - Laboratory experiments on the abrasivity of rock*, Rotterdam, 144 pp.
- Detournay E, Richard T and Shepherd M** (2008) Drilling response of drag bits: theory and experiment, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45: 1347 – 1360.
- Dipova N** (2012) Bir Tünel Güzergahındaki Zayıf Kireçtaşlarının Aşınma ve Dayanım Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Araştırılması, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 36(1): 24-25.
- Dupriest F E and Koederitz W L** (2005) Maximizing drill rates with real – time surveillance of mechanical energy, *Society of Petroleum Engineers*, Paper SPE/IADC 92194, 1-10.
- El Biblawi M M, Sayed M A, Mohamed M T and El Rawy W R** (2007) Some drilling parameters as tool to predict different categories of rocks. *Journal of Engineering Sciences*, Assiut University, 35(4): 995-1008.
- Epiroc** (1.12.2017) Klasik karotlu *sondaj*, Adres: <https://www.epiroc.com/tr-tr/products/rock-drilling-tools/core-drilling-tools/conventional-core-drilling>.
- Ersoy A** (2003) Automatic drilling control based on minimum drilling specific energy using PDC and WC bits. *Min. Technol: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*. 112: A86–A96.
- Folk R L** (1974) *Petrology of Sedimentary Rocks*, Hemphill Publishing Company Austin, Texas 78703. 16-30.
- Fowell R J** (1993) The mechanics of rock cutting. In: Hudson JA, editor, *Comprehensive Rock Engineering*, 4: 155–75
- Fowell R J and Pycroft A S** (1980) Rock machinability studies for the assessment of selective tunneling machine performance. *Proceedings of the 21st US Symposium On Rock Mechanics*, University of Missouri, Rolla, 149–62.
- Franca L** (2011) A bit – rock interaction model for rotary – percussive drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48: 827-835.
- Gerçek H** (2008) *Kaya Mekaniği Ders Notları (yayınlanmamış)*, BEÜ Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak.
- Gokhale B V** (2010) *Rotary Drilling And Blasting In Large Surface Mines*, CRC Press, 748 pp.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Grima M A and Babuska R** (1999) Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples, *Rotary Drilling And Blasting In Large Surface Mines*, 36: 339-349
- Han G, Bruno M and Dusseault M B** (2005) Dynamically modelling rock failure in percussion drilling, American Rock Mechanics Association, *The 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, 25-29 June, Anchorage, Alaska, 7 pp.
- Howarth D F, Adamson W R and Berndt J R** (1986) Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 23: 57-85.
- Howarth D F and Rowland J C** (1987) Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20: 57-85.
- Hoesinie S H, Aghababaei H and Pourrahimian Y** (2008) Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45:1-10.
- Hoseinie S H, Ataei M and Osanloo M** (2009) A new classification system evaluating rock penetrability. *International Journal of Rock Mechanics And Rock Engineering*, 46: 1329 - 1340.
- Hole Products (HP)** (1.12.2017) *Hole products: drill bits*, Adres: <http://www.holeproducts.com/search?query=Drill+Bits>.
- Huang S and Wang W** (1997) The mechanics of diamond core drilling of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34: 3-4.
- Hucka V** (1965) A rapid method of determining the strength of rocks in situ. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And Geomechanics Abstracts*, 2:127-134
- Hughes H** (1972) Some aspects of rock machining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9: 205-211
- ISRM** (1978) Suggested method for determining tensile strength of rock materials, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And Geomechanics Abstracts*, 15: 99-103
- ISRM** (1978) Suggested Methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And Geomechanics Abstracts*, 15:89-97
- ISRM** (1979) Suggested Method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And Geomechanics Abstracts*, 16: 135.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- ISRM** (1980) Basic geotechnical desaiption of rock masses *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And Geomechanics Abstracts*, 18: 85-110
- İTÜ** (7.12.2018) Kazı teknolojileri ve maden makineleri laboratuvarı, <http://www.madenmuh.itu.edu.tr/hakkimizda/laboratuvarlar/kazi-teknolojileri-ve-maden-makineleri-laboratuvari>.
- Junhyeok P** (2016) Estimation of Rock Comminution Characteristics by Using Drill Penetration Rates. *Master Thesis*, Department of Mining and Geological Engineering, The University of Arizona, Arizona, USA, 165 pp.
- Kahraman S** (1999) Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36: 981–989.
- Kahraman S, Balcı C, Yazıcı S and Bilgin N** (2000) Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37 : 729-743.
- Kahraman S** (2002) Correlation of TBM and drilling machine performances with rock brittleness. *Engineering Geology*, 65: 269-283.
- Kahraman S, Bilgin N and Feridunoğlu C** (2003) Dominant rock proprties affecting penetration rate of percussive drills. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 711-723.
- Karpuz C, Paşamehmetoğlu A C, Dinçer T and Müftüoğlu Y** (1990) Drillability studies on the rotary blast hole drilling on lignite overburden series. *International Journal Surfine Mining, Reclamation and Environmet*, 4(2): 89-93.
- Kelessiddis V C** (2011) Rock drillability prediction from in situ determined unconfined compressive strength of rock. *The Journal of The Southern African Institution of Mining and Metalurgy*. 111: 429 – 436.
- Kim K Y, Kim K S and Kim C Y** (2009) Assessment of specific energy in rotary percussive drilling on the homogeneous rock mass, <http://www.ctta.org/FileUpload/ita/2009/papers/P-06/P-06-20.pdf>.
- Kramadibrata S, Made A R, Juanda J, Simangunsong G M and Priagung N** (2001) The use of dimensional analysis to anlyse the relationship between penetration rate of Jack Hammer and rock properties and operational characteristics. *Proceedings Indonesian Mining Conference and Exhibition*, Jakarta, Indonesia.
- Kel K** (2003) Zonguldak Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Kazılabilirliğinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden Müh. Anabilim Dalı, Zonguldak, 181 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Li W, Zhao X, Li Y, Ji Y, Peng H, Liu L and Yang Q** (2015) Laboratory investigations on the effects of surfactants on rate of penetration in rotary diamond drilling. *Journal Of Petroleum Science and Engineering*. 13: 114-122.
- Le Maitre R W** (2002) *Igneous Rocks. A Classification And Glossary Of Terms. Recommendations Of The International Union Of Geological Sciences Subcommission On The Systematics Of Igneous Rocks*, 2nd Ed. Xvi + 236 pp. Cambridge.
- McFeat-Smith I and Fowell R J** (1977) Correlation of rock properties and the cutting performance of tunneling machines, *In Proceedings of a Conference on Rock Engineering*, 581-602.
- McFeat-Smith I and Fowell R J** (1979) The selection and application of roadheaders for rock tunnelling. *International Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Atlanta, Georgia, 1: 261–279.
- Mellor M** (1972) Normalization of specific energy values, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9: 661-663.
- Miller D and Ball A** (1990) Rock drilling with impregnated diamond micro bits—an experimental study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 27: 363–371.
- Miranda A and Mello-Mendes F** (1983) Drillability and drilling methods. *International Proceedings of the Fifth Congress International Society on Rock Mechanics*, Melbourne, 5: 195–200.
- Moein M J A, Shaabani E and Rezaeian M** (2014) Experimental evaluation of hardness models by drillability tests for carbonate rocks, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 113: 104 -108.
- Nilsen B and Özdemir L** (1993) Hard rock tunnel boring prediction and field performance. Chapter 52, *RETC Conference Proceedings*, Boston MA, 833 – 852.
- Özçelik Y** (1999) Mermercilikte Elmas Tel Kesme Makinalarının Çalışma Koşullarının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 236 s.
- Özdemir L and Nilsen B** (1999) Recommended laboratory rock testing for TBM projects, *American Underground Association (AUA) News*, 14(2): 21-35.
- Park N** (2006) Discrete Element Modeling of Rock Fracture Behavior: Fracture Toughness and Time Dependent Fracture Growth. *Ph.D. Thesis*, The University of Texas at Austin, Department of Petroleum and Geosystems Engineering, Austin, Texas, 263 pp.
- Pathinkar A G and Misra G B** (1980) Drillability of rocks in percussive drilling from energy per unit volume as determined with a micro bit. *Mining Engineering.*, 32: 1407–10.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Pessier R C and Fear M J** (1992) Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction, *Society of Petroleum Engineers*, Paper SPE 24584, 373 – 378.
- Plinninger R J** (2010) Hardrock abrasivity investigation using the Rock Abrasivity Index (RAI), 11th. *International Association of Engineering Geology (IAEG)*, eds. Williams et al., Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60034-7, 3445-3452.
- Proceq** (2013) Equotip 3 taşınabilir sertlik ölçüm cihazı tanıtım kılavuzu, İsviçre, 6 s.
- Protodyakonov M M** (1962) Mechanical properties and drillability of rocks. *International Proceedings of the 5th Symposium on Rock Mechanics*, University of Minnesota, Minneapolis, 103 - 118.
- Rabia H** (1982) Specific energy as a criterion for drilling performance prediction, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 19: 39-42.
- Rabia H** (1985) A unified prediction model for percussive and rotary drilling. *Mining Science and Technology*, 2: 207–16.
- Rao K U M, Bhatnagar A and Misra B** (2002) Laboratory investigations on rotary diamond drilling. *Geotech and Geological Engineering*, 20: 1-16.
- Rashidi B, Hareland G, Fazaelizadeh M and Svirig M** (2010) Comparative study using rock energy and drilling strength models. *American Rock Mechanics Association, ARMA-10-254*.
- Reddish D J and Yasar E** (1996) A new portable rock strength index test based on specific energy of drilling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 33 (5): 543-548.
- Rostami J, Neil D M and Ozdemir L** (1993) Roadheader application for the Yucca Mountain experimental study facility. *Final Report for Raytheon Services*, Nevada, USA. Earth Mechanics Institute, Colorado School of Mines.
- Rostami J, Ozdemir L and Neil D M** (1994) Performance prediction: a key issue in mechanical hard rock mining, *Mining Engineering*, 1263–1267.
- Rostami J, Özdemir L and Nilsen B** (1996) Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models. *International Proceedings 16th Institution ISDT. Symposium*. Las Vegas, USA, 1-11.
- Shaabani E, Rezaeian M, Moein M J A and Maarefvand P** (2016) Experimental investigation into rate of penetration in carbonated rocks. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 11 (4): 1 – 11

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Speight H E** (1997) Observations on drag tool excavation and the consequent performance of roadheaders in strong rock. *The Australasian Institute of Mining and Metallurgy*. 1: 17–32.
- Streckeisen A L** (1974) Classification and nomenclature of plutonic rocks, Recommendations of the UUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks, *Geologische Rundschau, Internationale Zeitschrift für Geologie*, Stuttgart, 63: 773-785
- Streckeisen A L** (1978) Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites and Melilite Rocks, IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks, *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, 141: 1-14.
- Su O** (2010) Kalem Uçlu Kesmelerle Kayaç Kesme Mekanizmasının Üç Boyutlu Sayısal Modellenmesi, *Doktora Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 207 s.
- Su O, Yaralı O and Akçin N A** (2013) Comparison of drilling performance of chisel and button bits on the electro hydraulic drillers. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46 (6): 1577-1587.
- Su O** (2016) Performance evaluation of buttons bits in coal measure rocks by using multiple regression analyses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(2): 541 – 553.
- Su O** (2017) Kayaçlarda geri sıçrama mekanizmalı sertlik ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması ve Equotip sertlik ölçerle delme hızının tahmini. *Türkiye 25. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı*, IMCET2017, 11-14 Nisan 2017, Antalya, Türkiye, 191 – 198.
- Tamrock** (1987) *Handbook of Underground Drilling*, Tamrock Drills SF-33310 Tampere, Finland, 327 pp.
- Tamrock** (1999) *Rock Excavation Handbook for Civil Engineering*, ed. R. Heneö, 99-808-GB6000, Sandvik Tamrock Corp., 364 pp.
- Teale R** (1965) The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2: 57-71
- Thuro K** (1997) Drillability Prediction Geological Influences in hard rock drill and blast tunneling, *International Journal Earth Science*, 86(2): 426-437
- Thuro K and Plinninger R** (1998) *Einführung in die Ingenieurgeologie*, 7, Auflage, Lehrstuhl für Allgewandie und Ingenieurgeologie Technische Universität, München, 71-75.
- Thuro K and Spaun G** (1996) Introducing the ‘detruction work’ as a to new rock property of toughness refering to drillability in conventional drill and blast tunnelling. ed. M. Barla, *Eurock’96 Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Enginnering*, 2-5 September, Turin, Italy, 2: 707-13.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Tiryaki B** (2008) Application of artificial neural Networks for predicting the cuttability of rocks by drag tools. *Tunneling and Underground SpaceTech*, 23: 273-280.
- Tiryaki B and Dikmen A C** (2006) Effects of rock properties on specific cutting energy in linear cutting of sandstones by picks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39(2): 89-120.
- Tönshoff H K, Hillmann-Apmann H and Asche J** (2002) Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications, *Diamond and Related Materials*, 31: 517-525.
- Tumaç D, Hanifi Ç, Balcı C, Er S and Avunduk E** (2018) Investigation into the effects of textural properties on cuttability performance of a chisel tool, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(4): 1227-1248
- Tunçdemir H** (2002) Kollu Galeri Açma Makinelerinin Veya Benzer Makinelerin Cevher Kazısında Kullanımlarının Araştırılması. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 295 s.
- Valantin A** (1973) An Examination of the Various Conventional Procedures to Determine the Resistance of Rock to Mechanized Winning, Development and Exploratory Techniques in Coal Mines. Commission of the European Commercial Shearing Co., Youngstown, 15-99.
- Yaralı O** (2005) Zonguldak taşkömür havzası kömür çevre kayaçlarının aşındırıcılık özelliklerinin araştırılması, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı*, 9-12 Haziran, İzmir, 243-10.
- Yaralı O, Yaşar E, Bacak G and Ranjith G** (2008) A Study of Rock Abrasivity and Tool Wear in Coal Measures Rocks, *International Journal of Coal Geology*, 74( 1): 53-6
- Yaralı O** (2017) *Kayaçların Delinebilirliği (yayınlanmamış ders notu)*, BEÜ Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak.
- Yaralı O and Kahraman S** (2011) The drillability assessment of rocks using the different brittleness values. *Tunneling and Underground Space Technology*, 26: 406 – 414.
- Yaşar E, Ranjith P G and Viète D R** (2010) An experimental investigation into the drilling and physico-mechanical properties of a rock – like brittle material. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 76: 185 – 193.
- Yazıcı S** (1984) Galeri açma makinalarının seçimi için kazılabilirliğin saptanması. *Madencilik*, 22 (2): 23-33.
- Yılmaz N G** (2013) The influence of testing procedures on uniaxial compressive strength prediction of carbonate rocks from Equotip hardness tester (EHT) and proposal of a new testing methodology: Hybrid dynamic hardness (HDH). *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 46: 95-106.



## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Yılmaz N G and Gökten R M** (2018) Analysis of the Leeb hardness test data obtained by using two different rock core holders. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 22(1):24-31.
- Zare S and Bruland A** (2013) Applications of NTNU/SINTEF drillability indices in hard rock tunneling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46: 179 – 187.
- Zhang X, Zhai Y H, Xue C J and Jiang T X** (2012) A study of the distribution of formation drillability, *Petroleum Science and Technology*, 29: 149 – 159.
- Zum Gahr K H** (1987) *Microstructure And Wear Of Materials*, Tribology Series 10, Elsevier, Rotterdam, 559 pp.
- Wang Z W** (1995) The Mechanics of Diamond Core Drilling of Rocks. *Ph. D. Thesis*, University of Alaska, Department of Mining & Geological Engineering, Fairbanks, Alaska, 225 pp.
- West G** (1986) A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measures sediments. *International Journal of Mining and Geological Engineering*. 4: 73-78.
- Whittaker B N, Singh R N and Sun G** (1992) *Rock Fracture Mechanics, Principles, Design and Applications*, Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier, 570 pp.
- Wilbur L D** (1982) Rock Tunnels, *Chapter 7 in Tunnel Engineering Handbook*, Ed. By Bickel and Kuesel, Florida, 123 – 207.



## BİBLİYOGRAFYA

- Chugh C** (1992) *High Technology In Drilling And Exploration*. Oxford ve IBH, India, 789 pp.
- Fish B G** (1968) The basic variables in rotary drilling. *Mine & Quarry Engineering*, 27: 74-81.
- Paone J and Bruce W** (1963) Drillability studies-diamond drilling. *US Bureau of Mines*, RIUSBM 6324.
- Rowlands D** (1973) Rock Fracture by Diamond Drilling. *Ph.D. Thesis*, University of Melbourne, Brisbane, Australia, 157 pp.
- Roxborough F F** (1985) Research in mechanical excavation, progress and prospects. *Proceedings of the Rapid Excavation Tunn Conference*, Las Vegas, USA, 225-44.
- Schmidt R L** (1972) Drillability studies-percussive drilling in the field, *US Bureau of Mines*, RI 7684. 36 pp.
- Selim A A and Bruce W E** (1970) Prediction of penetration rate for percussive drilling, *USBM RI 7396*.
- Selmer-Olsen R and Blindheim O T** (1970) On the drillability of rock by percussive drilling. *In: Proceedings of the Second Congress International Society on Rock Mechanics*, 21-26 September, Beograd, Serbia, 65-70.



## ÖZGEÇMİŞ

Utku SAKIZ 1987’de Bandırma’da doğdu, ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Kemal Pireci Lisesi’nden mezun olduktan sonra 2004 yılında Zonguldak Bülent Ecevit (eski adıyla Zonguldak Karaelmas Üniversitesi) Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü’ne girdi. 2009 yılında “iyi” derece ile mezun oldu, aynı yıl içinde ZBEÜ Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı ve 2012 yılında “Maden Yüksek Mühendisi” unvanını aldı. 2013 yılında ZBEÜ Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı. Halen ZBEÜ Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitimini sürdürmekte olup, 2011 yılından itibaren ZBEÜ Maden Mühendisliği Bölümü, Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

## ADRES BİLGİLERİ

Adres: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Maden Mühendisliği Bölümü  
67100 ZONGULDAK

Tel: (372) 291 1992  
Faks: (372) 257 4023  
E posta: utku.sakiz@beun.edu.tr