

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MAÇKA VE ÇAYKARA (TRABZON) KARAYOLU TÜNELLERİNDEKİ
KAYAÇLARIN DELİNEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Müh. Batnyam BATMUNKH

**KASIM 2016
TRABZON**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalında
Batnyam BATMUNKH tarafından hazırlanan

**MAÇKA VE ÇAYKARA (TRABZON) KARAYOLU TÜNELLERİNDEKİ KAYAÇLARIN
DELİNEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİN ARAŞTIRILMASI**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 18/ 10/ 2016 gün ve 1672 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇAPIK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ayberk KAYA


.....

.....

.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Gerek tez çalışmamda gerekse tüm yüksek lisans öğrenimim boyunca bana her türlü desteği veren ve engin bilgileri ile tez çalışmalarımda bana ışık tutan çok değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇAPIK'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez izleme komitesinde yer alarak çalışmalarımın destek veren Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ'a ve Yrd. Doç. Dr. Ayberk KAYA'a teşekkür ederim.

Tezin Mineroloji-Petrografi tayinlerinde yardımcı olan Doç. Dr. İrfan TEMİZEL'e teşekkür ederim.

Maçka ve Çaykara tünel inşaat işlerini gerçekleştiren Cengiz İnşaat ve Örnek İnşaat Firması yetkileri ve özellikle çalışmalarımın yardımcıları esirgemeyen, tünel kontrol mühendisi Arif DEMİRÖZ'e ve diğer bütün mühendislere sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tünellerde çalışan formen, çavuş, işçi, operatör ve bütün personellere teşekkür ederim.

Ayrıca tüm hayatım boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen annem Tungalag'a, kardeşlerime ve hep yanımda olan Trabzonda okuyan tüm Moğol öğrencilere teşekkürlerimi sunarım. Son olarak bana Türkiye'de okuma imkânını sağlayan Türkiye Cumhuriyeti Devletine sonsuz teşekkür ederim.

Batnyam BATMUNKH

Trabzon, 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Maçka ve Çaykara (Trabzon) Karayolu Tünellerindeki Kayaçların Delinebilirlik Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇAPİK’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim 10/11/2016.

Batnyam BATMUNKH

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi	1
1.3. Yeni Avusturya Tünel Yönteminin Tarihsel Gelişimi.....	2
1.4. Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde Kazı Metodları.....	2
1.5. Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Kazı Aşamaları.....	3
1.6. NATM’da Kullanılan Tahkimat Elemanları.....	5
1.6.1. Püskürtme Beton.....	6
1.6.2. Çelik Hasır	7
1.6.3. Kaya Bulonu	8
1.6.4. Çelik İksa	9
1.6.5. Süren	10
1.7. Kayaçlarda Delinebilirlik.....	11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	13
2.1. Çalışma Alanları	14
2.2. Çalışma Alanının Genel Jeolojisi	15
2.2.1. Maçka Tüneli ve Çevresinin Jeolojisi.....	15
2.2.2. Çaykara Tüneli ve Çevresinin Genel Jeolojisi.....	16
2.3. Arazi Çalışmaları	18
2.3.1. Tünelde Delme İşleminde Kullanılan Delici Jumbo Makinaları.....	18
2.3.2. Delici Jumbo Makinaların Spesifik Enerji Değerleri	19

2.3.3.	Delici Jumbo Makinaların Delik Delme Hızı	22
2.4.	Laboratuvar Çalışmaları	24
2.4.1.	Tünellerde Örnek Alım Noktaları.....	24
2.4.2.	Örnek Hazırlama İşlemi.....	24
2.5.	Laboratuvarda Gerçekleştirilen Deneyler.....	25
2.5.1.	Kayaçların Fiziksel Özellikleri	25
2.5.1.1.	Yoğunluk ve Birim Hacim Ağırlık	26
2.5.1.2.	Su Emme Oranı.....	28
2.5.1.3.	Görünür Porozite Tayini	30
2.5.2.	Kayaçların Mekanik Özellikleri	31
2.5.2.1.	Tek Eksenli Basınç Deneyi.....	32
2.5.2.2.	Dolaylı Çekme Deneyi (Brazilian Yöntemi)	33
2.5.2.3.	Nokta Yükleme Deneyi	34
2.5.2.4.	Schmidt Çekici Deneyi	36
2.5.2.5.	Ultrasonik P-dalga Hızı Deneyi.....	38
2.5.3.	Aşınma Deneyleri	40
2.5.3.1.	Cerchar Aşındırıcılık İndeksi Deneyi (CAI).....	40
2.5.4.	Delinebilirlik Deneyleri	42
2.5.4.1.	Kırılma Deneyi	42
2.5.4.2.	Sievers Minyatür Deneyi	44
2.5.4.3.	Delme Oran İndeks Tayini.....	46
2.5.5.	Mineralojik ve Petrografik Özellikleri.....	47
3.	DENEY VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	52
3.1.	Arazi Çalışmaları	52
3.1.1.	Jumbo Makinasının Delik Delme Hızının Değerlendirilmesi	52
3.1.2.	Jumbo Makinalarının Spesifik Enerji Değerlerinin Değerlendirilmesi	58
3.1.3.	Bit Aşınma Hızının Değerlendirilmesi	65
3.1.4.	Buton Aşınımı Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	68
3.2.	Laboratuvar Çalışmaları	70
3.2.1.	Sievers Minyatür Testi ile Delme Hızının Değerlendirilmesi	70
3.2.2.	Sievers Minyatür Delme Testine ait Spesifik Enerji Değerlerinin Değerlendirilmesi	72

3.2.3.	Cerchar Aşındırıcılık İndeksinin Değerlendirilmesi.....	76
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	80
5.	KAYNAKLAR	83
6.	EKLER	89

ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MAÇKA VE ÇAYKARA (TRABZON) KARAYOLU TÜNELLERİNDEKİ KAYAÇLARIN
DELİNEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Batnyam BATMUNKH

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇAPIK
2016, 88 Sayfa, 5 Sayfa Ek

Bu tez çalışması Maçka ve Çaykara Karayolları Tünellerinden arazi ve laboratuvar çalışması olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmalarından 11 farklı tünel kazı aynasına ait spesifik enerji (kJ/m^3), delik delme hızları (m/dak) ve bit aşınma hızı (mg/m) değerleri hesaplanmıştır. Delme hızları ve bit aşınma hızlarını belirlemek için 3 adet yarı balistik butonlu bit kullanılmıştır. Ayrıca, delgi işlemi sonrasında buton uçlarında görülen aşınma değişimleri incelenmiştir. Laboratuvar çalışmaları için tünellerden 11 farklı kazı aynasından numune alınmış ve alınan kayaç örnekleri üzerinde delinebilirlik, aşındırıcılık, fiziko-mekanik özellikler, spesifik enerji değerleri ve delik delme hızları hesaplanmıştır. Sonuç olarak elde edilen verilerin korelasyon analizleri yapılmış ve sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Spesifik enerji, Delik delme hızı, Bit aşınma hızı, Aşındırıcılık

Master Thesis
SUMMARY

INVESTIGATION OF THE DRILLABILITY PROPERTIES OF ROCKS IN MAÇKA AND
ÇAYKARA (TRABZON) HIGHWAY TUNNELS

Batnyam BATMUNKH

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Ass. Prof. Dr. Mehmet ÇAPIK
2016, 88 Pages, 5 Pages Appendix

This thesis was undertaken in two stages field and laboratory work in Maçka and Çaykara highway tunnels. 11 different excavation glasses with specific energy (kJ/m^3), drilling rates (m/min) and bit wear rate (mg/m) values were calculated. In order to determine the drilling and bit wear rate speeds, 3 pieces with semi-ballistic button bit were used. Also, the wear changes observed at the tip of the button were examined after punching. For the purposes of laboratory studies, 11 different excavation glass samples were taken from Maçka and Çaykara tunnels and on the rock samples taken, the drillability abrasiveness, physico-mechanical properties, specific energy values and drilling speeds were calculated. As a result, the correlation analysis of the data was conducted and they were statistically evaluated.

Key Words: Specific energy, Drilling rate, Bit wear rate, Abrasiveness

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1	NATM Tünellerinde genel uygulamalar döngüsü.....	3
Şekil 1.2.	NATM kazı ilerlemeleri-1	4
Şekil 1.3.	NATM kazı ilerlemeleri-2	4
Şekil 1.4.	Yumuşak formasyonlarda aşamalı tünel kazısı	5
Şekil 1.5.	Tünelde püskürtme beton uygulaması	7
Şekil 1.6.	Tünel içinde tahkimat amaçlı olarak kullanılan çelik hasır	8
Şekil 1.7.	Kaya bulonu uygulaması ve sonrası tünel yüzeyinin görünümü	9
Şekil 1.8.	Tünelin göçmemesi için tünel içinde tahkimat amaçlı olarak kullanılan çelik iksalar.....	10
Şekil 1.9.	Ön süren uygulaması	11
Şekil 1.10	Delinebilirliği etkileyen faktörler	12
Şekil 2.1.	Maçka karayolu tüneline ait yer bulduru haritası	14
Şekil 2.2.	Çaykara karayolu tüneline ait yer bulduru haritası.....	15
Şekil 2.3.	Çalışma alanı ve çevresine ait genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit.....	17
Şekil 2.4.	Tünellerde delme işlem için kullanılan makinalar Sandvik DT820 ve Atlas Copco Rocket Boomer 282.....	18
Şekil 2.5.	Jumbo makinalarının spesifik enerji değerlerini hesaplamak için akım ölçümleri alımı.....	19
Şekil 2.6.	Maçka tüneline kullanılan Sandvik DT820 Jumbo makinasına ait akım zaman grafiği (M1 nolu örnek).....	21
Şekil 2.7.	Çaykara tüneline kullanılan Atlas Copco Rocket Boomer 282 Jumbo makinasına ait akım zaman grafiği (Ç2 nolu örnek)Atlas Copco Rocket Boomer 282 Jumbo makina akım zaman grafiği (Ç2).....	21
Şekil 2.8.	Sievers' minyatür delme aletine ait akım zaman grafiği (M4 nolu örnek)	21
Şekil 2.9.	Sievers minyatür delme testi akım zaman grafiği (M4)	22

Şekil 2.10. a) Karot Alma b) karot düzeltme c) hazırlanan numuneler ç) hazırlanan numuneler	25
Şekil 2.11. Kayaçların fiziksel özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen aşamalar a) Suya doyurma b) Suya doymuş numuneler c) Arşimet terazisiyle numune tartımı ç) Fırında kurutma.....	29
Şekil 2.12. Tek eksenli basma dayanımı deneyin yapılışı	32
Şekil 2.13. Numune yerleştirmesi ve kırılan numune.....	33
Şekil 2.14. Nokta yük deneyi aleti ve deney sonrası kırılmış kayaç örnekleri kayaçlar.....	35
Şekil 2.15. Klasik ve Silver Schmidt çekiçleri	37
Şekil 2.16. Titreşim hızı test devresinin şematik diyagramı ve ultrasonik deneyi yapılışı.....	38
Şekil 2.17. Cerchar aşınma indeks aleti ve deneyde kullanılan kayaç örnekleri	40
Şekil 2.18. CAI deneylerinde kullanılan uçlar ve mikroskop altında okunması	40
Şekil 2.19. Uşınma sonrası uçların mikroskop altında bir görünüşü.....	41
Şekil 2.20. Kırılmalık deneyinin yapılışı, a) deney düzeneği, b) deney aleti	43
Şekil 2.21. Sievers minyatür delme düzeneği ve delme deneyi aleti.....	45
Şekil 2.22. SJ deneylerinde kullanılan uçlar ve deneyde kullanılan kayaç örnekleri	45
Şekil 2.23. Delme oranı indeks'nin değerlendirilmesi için kullanılan diyagram	47
Şekil 2.24 Maçka tüneline ait ince kesitler, (M1,M2,M3) Altere Bazalt Çift nikol görüntüsü ve içerdiği mineraller: Plajiyoklas (Plj), Opak mineral (Op), Klinopiroksen (Cpx)	50
Şekil 2.25. Maçka tüneline ait ince kesitler, (M4,M5,M6) Altere Bazalt Çift nikol görüntüsü ve içerdiği mineraller: Plajiyoklas (Plj), Opak mineral (Op), Klinopiroksen (Cpx)	50
Şekil 2.26. Çaykara tüneline ait ince kesitler, (Ç1,Ç2,Ç3,Ç4,Ç5) Altere Bazalt Çift nikol görüntüsü ve içerdiği mineraller: Plajiyoklas (Plj), Opak mineral (Op), Klinopiroksen (Cpx)	51
Şekil 3.1. Jumbo makinalarının delme hızları ile tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişki.....	54
Şekil 3.2 Jumbo makinalarının delme hızları ile nokta yük dayanımı ve ultrasonik hızı arasındaki ilişkisi	55

Şekil 3.3. Jumbo makinalarının delme hızları ile klasik Schmidt çekici ve silver Schmidt çekici arasındaki ilişkisi	55
Şekil 3.4. Jumbo makinalarının delme hızları ile görünür porozite ve doğal birim ağırlık arasındaki ilişki	56
Şekil 3.5. Jumbo makinalarının delme hızları ile delme oran indeksi ve sievers minyatür testi delme hızı arasındaki ilişkisi	57
Şekil 3.6. Jumbo makinalarının delme hızları ile Cerchar aşındırıcılık indeksi arasındaki ilişkisi.....	58
Şekil 3.7. Jumbo makinalarının spesifik enerji ile tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişkisi	60
Şekil 3.8. Jumbo makinalarının spesifik enerji ile nokta yük dayanımı ve ultrasonik hızı arasındaki ilişkisi	61
Şekil 3.9. Jumbo makinalarının spesifik enerji ile klasik Schmidt çekici ve silver Schmidt çekici arasındaki ilişkisi	61
Şekil 3.10 Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri ile görünür porozite ve doğal birim hacim ağırlık arasındaki ilişki	62
Şekil 3.11. Jumbo makinalarının spesifik enerji ile delme oranı indeksi (DRI) ve Jumbo delme hızı arasındaki ilişkisi	63
Şekil 3.12. Jumbo makinalarının spesifik enerji ile Cerchar aşındırıcılık indeksi arasındaki ilişki	64
Şekil 3.13. Jumbo makinalarının spesifik enerji ile laboratuvar spesifik enerji arasındaki ilişkisi.....	64
Şekil 3.14. Bit aşınma hızı ile tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişkisi	66
Şekil 3.15. Bit aşınma hızı ile nokta yük dayanımı ve Schmidt çekici arasındaki ilişkisi.....	66
Şekil 3.16. Bit aşınma hızı ile ultrasonik hızı ve görünür porozite arasındaki ilişki	67
Şekil 3.17. Bit aşınma hızı ile delme oranı indeksi ve kırılma deneyi arasındaki ilişkisi .	68
Şekil 3.18. Atlas Copco'nun yarı balistik butonlu bitlerin aşınım.....	68
Şekil 3.19. Bitlerin yarı balistik butonlu bitlerde uç aşınımı aşınımı	69
Şekil 3.20. Yarı balistik butonlu bitlerde buton alt çapının aşınım	69

Şekil 3.21. Yarı balistik butonlu bitlerde buton üst çapının aşınım.....	69
Şekil 3.22. Sievers minyatür testi delme hızı ile tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişkisi.....	71
Şekil 3.23. Sievers minyatür testi delme hızı ile nokta yük dayanımı ve Schmidt çekici arasındaki ilişkisi	71
Şekil 3.24. Sievers minyatür testi delme hızı ile ultrasonik hızı ve delme oran indeksi arasındaki ilişkisi	72
Şekil 3.25. Sievers minyatür testi delme hızı ile Cerchar aşındırıcılık indeksi arasındaki.....	72
Şekil 3.26. Sievers minyatür spesifik enerji ile sievers minyatür testi net delme hızı ve tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişkisi.....	74
Şekil 3.27. Sievers minyatür spesifik enerji ile Brazilian çekme dayanımı ve nokta yük dayanımı arasındaki ilişkisi	74
Şekil 3.28. Sievers minyatür spesifik enerji ile Schmidt çekici ve ultrasonik hızı arasındaki ilişkisi	75
Şekil 3.29. Sievers minyatür testine ait spesifik enerji ile görünür porozite ve delme oranı indeksi arasındaki ilişki	75
Şekil 3.30. Sievers minyatür testine ait spesifik enerji ile Cerchar aşındırıcılık indeksi ilişkisi.....	76
Şekil 3.31. Cerchar aşındırıcılık indeksi ile tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişkisi.....	77
Şekil 3.32. Cerchar aşındırıcılık indeksi ile nokta yük dayanımı ve görünür porozite arasındaki ilişkisi	78
Şekil 3.33. Cerchar aşındırıcılık indeksi ile klasik Schmidt çekici ve silver Schmidt çekici arasındaki ilişkisi.....	78
Şekil 3.34 Cerchar aşındırıcılık indeksi ile delme oranı indeksi arasındaki ilişkisi	79

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Püskürtme beton dayanım değerleri	6
Tablo 2.1. Tez Çalışma plan ve gerçekleştirilen parameterleri.....	13
Tablo 2.2. Tünellerde kullanılan delgi işleminde kullanılan delici jumbo makinaların teknik özellikleri	18
Tablo 2.3. Yerinde ve laboratuvarında ölçülen spesifik enerji değerleri	20
Tablo 2.4. Yerinde ve Laboratuvarında ölçülen delme hızları.....	23
Tablo 2.5 Maçka ve Çaykara tünellerinde numune alım noktaları	24
Tablo 2.6. Doğal birim hacim ağırlık sonuçları.....	27
Tablo 2.7. Kuru birim hacim ağırlık sonuçları.....	27
Tablo 2.8. Doygun birim hacim ağırlık sonuçları	28
Tablo 2.9 Hacim su emme oranı sonuçları	29
Tablo 2.10. Ağırlıkça su emme oranı sonuçlar	30
Tablo 2.11. Gözeneklilik Porozite değerleri	31
Tablo 2.12. Boşluk oranı değerleri.....	31
Tablo 2.13. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması	32
Tablo 2.14. Tek Eksenli Basınç dayanımı (σ_c) değerleri ve sınıfları.....	33
Tablo 2.15. Çekme Daynımı (σ_t) deney değerleri.....	34
Tablo 2.16. Nokta yükü dayanım indeksine göre kayaçların sınıflandırılması	36
Tablo 2.17. Nokta yük dayanım indeksi ($I_{s(50)}$) değerleri ve sınıfları.....	36
Tablo 2.18. Klasik Schmidt çekici geri sıçrama değerleri	37
Tablo 2.19. Silver Schmidt Çekici sonuçları	38
Tablo 2.20. Ultrasonik hızı sınıflandırılması	39
Tablo 2.21. P dalga hızı değerleri ve sınıfları.....	39

Tablo 2.22. Cerchar aşındırıcılık sınıflandırması	41
Tablo 2.23. Cerchar aşındırıcılık indeksinin HRC 40 uçlara göre belirlenmiş değerleri ve sınıfları	41
Tablo 2.24. Cerchar aşındırıcılık indeksinin HRC 55 uçlara göre değerleri ve sınıfları	42
Tablo 2.25. Kırılmalık deneyi (S ₂₀) sınıflaması.....	43
Tablo 2.26. Kırılmalık deneyiden elde edilen değerler ve sınıfları	44
Tablo 2.27. Sievers minyatür delme (SJ) değerlerinin sınıflaması.....	45
Tablo 2.28 Sievers minyatür delme değerleri deney ve sınıfları	46
Tablo 2.29. Delme oranı indeksinin sınıflandırılması	47
Tablo 2.30. Kayaçların delme oranı indeks sonuçları ve sınıflaması	48
Tablo 2.31. Maçka ve Çaykara tünellerinden alınan örneklerin tanımlanması	48
Tablo 3.1. Atlas Copco Jumbo makinasına ait delik delme hızları için geliştirilen modeller ve Korelasyon katsayıları	53
Tablo 3.2. Jumbo makinası spesifik enerji değerleri için geliştirilen modeller ve Korelasyon katsayıları	59
Tablo 3.3. Bit aşınma hızı tahmini için geliştirilen modeller ve Korelasyon katsayıları	65
Tablo 3.4. Sievers minyatür deneyinde delme hızı tahmini için geliştirilen modeller ve Korelasyon katsayıları	70
Tablo 3.5. Sievers minyatür testi üzerinde ölçülen spesifik enerji değerleri için geliştirilen modeller ve Korelasyon katsayıları	73
Tablo 3.6. Cerchar aşındırıcılık indeksi tahmini için geliştirilen modeller ve Korelasyon katsayıları.....	76

SEMBOLLER DİZİNİ

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
ISRM	: Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi
CAI	: Cerchar Aşındırıcılık İndeksi
DRI	: Delme Oran İndeks
HRC	: Rockwell Sertliği
SJ	: Sievers Minyatür Delme
S ₂₀	: Kırılma Deneyi
SE	: Spesifik Enerji
P	: Güç
V	: Volt
I	: Akım
NKH	: Net Kazı Hızı
I _{s(50)}	: Düzeltilmiş Nokta Yüğü Dayanımı
V _p	: P dalga hızı
σ_t	: Dolaylı Çekme Dayanımı
σ_c	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Son yıllarda hızla artan teknolojik ilerlemelerin sonucunda mekanize kazı makinelerinde görülen gelişmeler ile birlikte jeoteknik bilimindeki ilerlemeler, tünel ve metro gibi yeraltı yapılarının inşası kolay ve hızlı bir hale dönüştürmüştür. Tünel kazılarında farklı metotlar ve modern teknikler kullanılırken bunlar arasındaki en güncel olanı konvansiyonel kazıda en çok kullanılan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemidir. Bu yöntem özellikle her türlü zemin koşuluna kolaylıkla adapte olabilmesi sebebiyle kısa sürede tüm dünyada yaygınlaşmıştır.

Ülkemizde bir çok karayolu tünel inşası projesinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) kullanılmaktadır. Maçka ve Çaykara Tünelleri de bu yöntemle açılmaktadır. Bu yöntemin kazı çalışmalarında genellikle delme patlatma kullanılmaktadır. Bu işlem için delik delici makinalar (Jumbo) kullanılmaktadır. İşletmeler açısından için istenilen temel prensip ise projelerin hızlı ve ekonomik olarak yürütülmesidir. Bunun için delinecek kayacın jeolojik yapısının yanında, fiziko-mekanik özellikleri, kayacın delinebilirliği ve aşındırıcılığı bilinmesi işletmeler için önemli bir avantaj sağlayacaktır. Bu özellikleri göz önünde bulundurarak, kazı işlemleri devam eden Maçka ve Çaykara karayollu tünellerinde kullanılan delici Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri, delik delme hızları, bit aşınma hızları hesaplanmış ve buton aşınma şekilleri incelenmiştir. Laboratuvar deneyleri yapılarak kayaların delinebilirlik, aşındırıcılık, fiziko-mekanik özellikleri, Sievers minyatür testine ait spesifik enerji değerleri ve delik delme hızları belirlenmiştir.

1.2. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)

İlk kez Prof. L.V. Rabcewicz tarafından ortaya atılan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) dünyada ve Türkiye’de yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. Bu güne kadar geçerliğini koruyan NATM, tanım olarak ince geçici bir destekleme yerleştirmek ve deformasyonlara izin vermek yoluyla kaya basıncının düşürülmesi ve bu basıncın çevreleyen kayaya dağıtılmasıdır. Böylece son destekleme sistemine daha az yüklenecek ve sonrasında daha da ince bir yapı halinde son destekleme yerleştirilebilecektir (Okyay, 2015).

NATM kaya ortamına kendisini taşıması prensibi ile ortaya çıkan bir yöntemdir. En uygun kazı ve tahkimat yöntemleri kullanılarak kazıdan sonra oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların, yapılan tahkimatlar ile birlikte kayaya taşıtılmasıdır. Tünel kesitini çevreleyen kayaç zonunun ilk sağlamlığının olabildiğince korunarak, tüneli çevreleyen bölgenin kendi kendini tutarak doğal bir tahkimat oluşturması amaçlanmaktadır. Böylelikle boşluğu çevreleyen kayaç zonunun yük oluşturan değil yük taşıyan bir konuma geçmesi sağlanır. NATM’da kazı kesitleri ne kadar yuvarlak seçilirse yöntem o kadar iyi çalışmaktadır. Bu Yöntemin temel tahkimat elemanları çelik hasır, çelik iksa, püskürtme beton, süren ve bulonlardır (Polat, 2010).

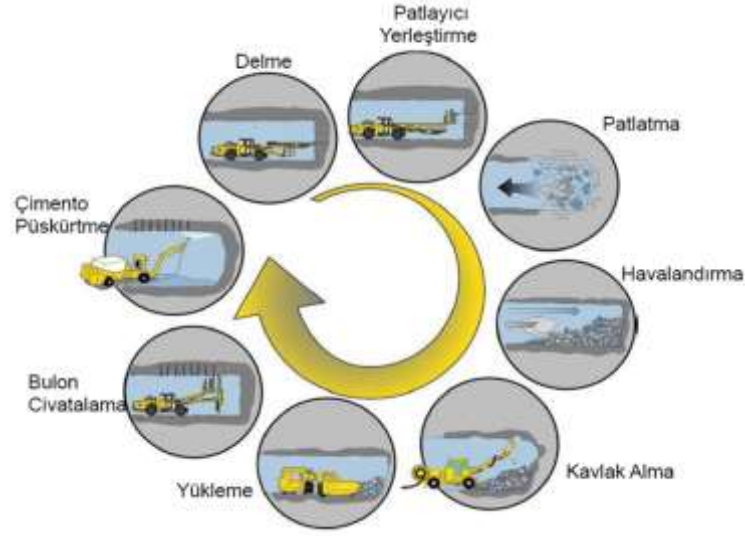
1.3. Yeni Avusturya Tünel Yönteminin Tarihsel Gelişimi

NATM’nin ilk temelleri 1948 yılında Prof. L.v. Rabcewicz’in patent başvurusu üzerine ortaya çıkmıştır (Okyay, 2015). Rabcewicz, 1962 yılında, Salzburg’da düzenlenen XIII. Geomekanik konferansında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Austrian Tunneling Method) olarak tanıtmış ve 1964 yılında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi’nin kısaltılmış adını “NATM” olarak belirlemiştir.

1966’da ilk defa Avusturya’da, daha sonra kullanımı hızla artarak Fransa, Almanya ve İtalya’da uygulanmıştır. 1969 yılında yöntem, resmi olarak ilk defa Frankfurt Metrosu inşaatında uygulanmış olup daha sonra Avrupa’da birçok tünel uygulamasında kullanılmıştır (Ayış, 2010).

1.4. Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde Kazı Metodları

Tünel, metro gibi yeraltı kazılarında en önemli amaç kazının hızlı ve ekonomik bir şekilde yapılmasıdır. Kazı işlemi yapılırken tünel duvarlarındaki kayaçlara mümkün olduğunca zarar vermemeye dikkat edilmelidir. Çünkü iyi bir patlatma tasarımı tünel duvarlarının zarar görmeyecek durumuna göre yapılmasıdır. NATM’da ilk aşama delici Jumbo makinaları ile kayaç delme işlemidir (Şekil 1.1).



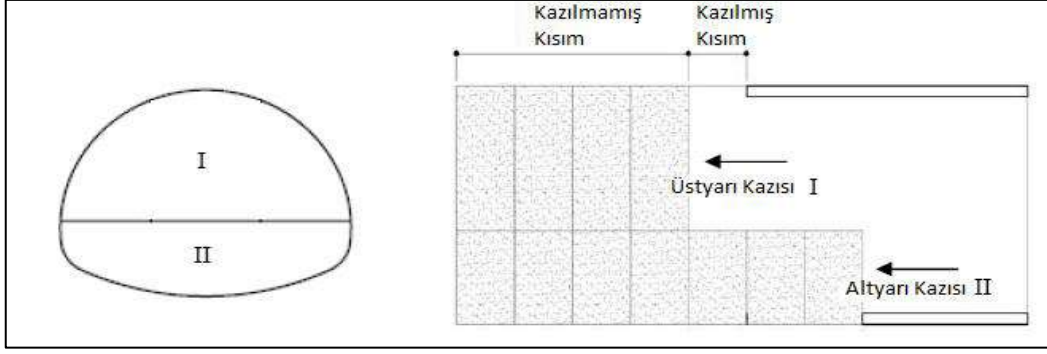
Şekil 1.1. NATM Tünellerindeki genel uygulamalar döngüsü

Tahkimat işlemlerinden ilk aşama olarak birinci kat püskürtme beton kullanılmasıdır. Püskürtme beton tünel çevresinde bulunan zeminin gevşemesini önlemek ve kontrol etmek amacı ile kullanılır. İkinci aşamada çelik iksa kullanılmaktadır. Bazı kayaç formasyonlarında gerek duyulmayabilir. Üçüncü aşama donatılı püskürtme beton aşamasıdır. Son olarak kaya bulonu yapılır (Polat, 2010).

1.5. Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Kazı Aşamaları

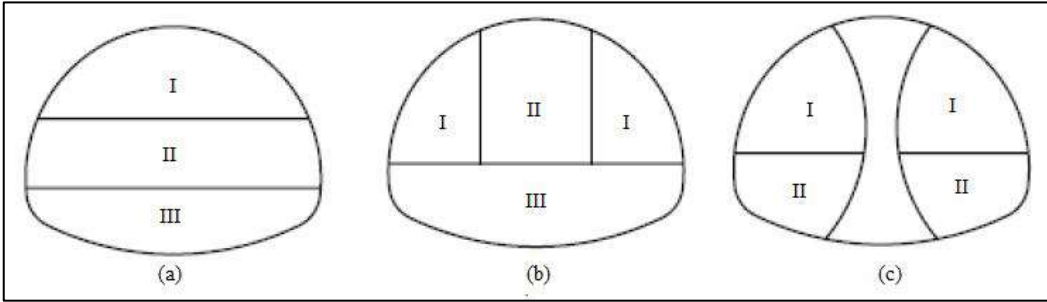
NATM ile açılacak bir tünelin kazı şekli, zemin durumuna ve tünel geometrisinin yanında tünelin kazılacağı güzergahtaki yerüstü yapılarına göre de değişiklik göstermektedir. Dairesel olmayan bir tünel kesitinde, tam kesit kazı yapılacağı gibi, çok parçalı kazı yapılması da mümkündür. NATM'a göre üst yarı ve alt yarı olmak üzere iki aşamalı kazıların genel görünümü Şekil 1.2'de verilmiştir (Selman, 2014).

Kazı yapılırken üst yarı kazısı her zaman alt yarı kazısından önde kazılarak ilerlenir ve tahkimat sistemi inşa edilerek devam edilmektedir. Sağlam kaya ortamında gidilmesi durumunda alt yarıya iksa imalatı yapılmayabilir.



Şekil 1.2. NATM'da iki kademeli kazı ilerlemeleri

Açılacak yeraltı yapısındaki formasyonun ayrışması veya kötüleşmesi durumunda deformasyonların sınırlandırılması için üst yarı kazısı bölümlenebilir (Şekil 1.3). Şekilde görüldüğü gibi üst yarı kazısı (a ve b) ya da çapraz diyagram Yöntemi (c) ile kazı işlemi yapılabilmektedir. Özellikle makas tünelleri gibi büyük kazı kesitlerinde (b) ile belirtilen biçimde yani üst yarının bölümlenerek kazılması durumu sıkça tercih edilir. Bazı projelerde alt yarının da bölümlenerek kazılması planlanabilir. Şekil 1.4'de baskılı ve yumuşak formasyonlarda NATM kazı aşamaları görülmektedir.



Şekil 1.3. NATM'a göre üç ve daha fazla kazı aşamaları



Şekil 1.4. Yumuşak formasyonlarda aşamalı tünel kazısı (Lunardi, 2008).

1.6. NATM'da Kullanılan Tahkimat Elemanları

Bir yeraltı kazı boşluğunun çevresindeki kayanın yük taşıma özelliğini koruması ve duraylılığın artırılması için açılan kazı bölgesine formasyonuna göre gerekli tahkimat elemanının yerleştirilmesi ve kayanın zaten var olan direncinin de harekete geçirilmesi ile kaya sağlamlaştırma işlemi yapılmaktadır. Bu işlem sayesinde NATM'ın temel ilkelerinden olan kaya kütlelerinin kendi kendini taşıması ilkesinin önemi artmaktadır. Çünkü tahkimat elemanları ile birlikte kaya sağlamlaşır ve kaya kütlesi bir bütün halinde hareket eder. Buradan, tünellerde desteklemenin amacı kazılmış açıklığın etrafında bir kemerlenme ile bir koruyucu zon oluşturarak zeminin ana taşıma elemanı olarak çalışmasını sağlamaktır.

Tünellerde sağlamlaştırma iki aşamada gerçekleşir. Geçici sağlamlaştırma adı verilen birincil destekleme ve kalıcı sağlamlaştırma adı verilen nihai betonarme kaplama sistemidir. Kendini tutamayacak kadar parçalı bir formasyonda yapılan destekleme sistemlerinin aralıkları azaltılarak ve ön süren tekniği kullanılarak kazı yapılacak alanın ve çevresel taşıyıcı zonun güçlendirilmesi sağlanmaktadır.

Günümüz tünelciliğinde püskürtme beton, çelik hasır, çelik iksa, bulon ana destekleme elemanlarıdır. Bu tür mühendislik elemanları kullanılarak kaya kütlelerinin hareketleri kontrol edilmektedir. Destek elemanlarının uygulanması; formasyon durumu, tünel enkesitinin büyüklüğüne ve gerilme durumuna göre değişmektedir.

1.6.1. Püskürtme Beton

Püskürtme beton, agrega, çimento, su ve priz hızlandırıcı karışımından oluşan ve hava basınçlı pompalar yardımıyla kazı yüzeyine püskürtme ile yerleşen bir beton olarak tanımlanır.

Püskürtme beton tünel etrafındaki zeminin gevşemesini önlemek ve kayanın kesme dayanımını artırmak amacıyla kullanılır. Kaya çatlaklarını kaplayıp sıkıştırarak kırılmalarını ve kaya düşmelerini önler. Püskürtme betonun zemin yüzeyine boşluksuz bir biçimde uygulanması ve yüzeyi tamamen kaplaması gerekmektedir. Püskürtme beton tek seferde değil tabakalar halinde yüzeye uygulanmalıdır. Püskürtme betonun en önemli özelliği karışımındaki priz hızlandırıcılar yardımı ile erken priz almasıdır. Püskürtme beton uygulamalarda kuru karışım ve yaş karışım olmak üzere ikiye ayrılır.

Kuru karışımında; kuru çimento ile agrega hava yoluyla karıştırıcıdan tabancaya iletilir ve burada suyla karıştırılarak yüzeye uygulanır. Çimentonun agrega ile aderansının sağlanması için agreganın, ağırlığınca %3-8 oranında nem içermesi gerekmektedir. Priz hızlandırıcı katkı maddesi su ve kuru toz halinde ki çimento-agrega karışımı ile birlikte karışıma girmelidir. Su çimento oranı kuru karışımlar için 0,3-0,5 arasında değişir. Bu karışım değişen şartlara kolayca uyarlanabilmesi, ıslak yüzeylere kolayca uygulanabilmesi açısından tercih sebebi olmaktadır.

Yaş püskürtme beton karışımları normal beton karışımları gibi hazırlanarak beton pompasına verilmektedir. Karışımın yüzeye püskürtülmesi için gerekli olan 7-15 m³/dk arasındaki debi ve 7 bar hava basıncı hava püskürtme ucunda priz hızlandırıcı ile birleşerek yüzeye püskürtülmektedir. Erken priz alan püskürtme beton karışımının zamanla mukavemet değerleri Tablo 1.1'de verilmiştir. (Arıoğlu vd., 2008). Şekil 1.5'de püskürtme beton uygulaması görülmektedir

Tablo 1.1. Püskürtme beton dayanım değerleri

Zaman	Mukavemet(N/mm ²)
6 dk	0.2-0.5
1 saat	0.5-1.0
24 saat	8-20
7 gün	30-35



Şekil 1.5. Tünelde püskürtme beton uygulaması

1.6.2. Çelik Hasır

Çelik hasırlar püskürtme betonun statik özelliklerini arttırmak ve beton priz alana kadar gerekli stabiliteyi sağlamak amacı ile kullanılır. Hasır çelik püskürtme betonun kesme kuvvetine karşı mukavemetini arttırmaktadır. Çelik hasırlar püskürtme betonla birlikte kullanıldıklarında kayaca sağlamlık verir, hava ve nem etkilerine karşı korur ve bulonların sağlamlaştırma etkilerine ek olarak rijit bir diyafram oluşturarak sağlamlık etkisini geniş bir alana yayar. Çelik hasır uygulamaları genellikle yoğun işçilik gerektiren ve personelin küçük kaya düşmelerine maruz kalabileceği riskli uygulamalar olmasına rağmen küçük kaya kopmalarını tutarak oluşabilecek iş kazalarını minimuma indirir. Montaj kolaylığı olması ve sıçrama miktarının azaltılması için donatı açıklıkları 100 mm'den büyük olmalı ve donatı çapı ise 10 mm' den küçük olmalıdır (Kolymbas, 2005). Şekil 1.6'da tünelde çelik hasır uygulaması görülmektedir.



Şekil 1.6. Tünel içinde tahkimat amaçlı olarak kullanılan çelik hasır

1.6.3. Kaya Bulonu

Tünel ve metro kazılarının ana destekleme sistemlerinden olan kaya bulonları, tünel kazısı sırasında duvar ve tavanda çözülmüş, kopmak üzere olan kayaların yerlerinde kalmalarını sağlayan ve güvenliği artıran bir elemanlardır. Bulonlar kaya bloklarının sabitlenmesini sağlamak ve kayanın çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek, süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmaktadır. Kaya sınıfına bağlı olarak tünellerin tavan ve yan duvarlarına yerel ve sistematik olarak uygulanmaktadır (Şekercioğlu, 2007). Yeraltı kazılarında kullanılan bulonların uzunlukları ve tipleri tünel açıklığına ve kaya formasyonuna göre değişmektedir. Tünel tavan ve duvarlarına delinen delikler içine yerleştirilen bulonlar, çimento enjeksiyonu yapılarak plaka ve somun yardımı ile kayaya doğru itilip sıkıştırılırlar. Bulonlar gerilmesiz, mekanik gerilmeli, uçtan yapışan olarak üç ana tipe ayrılır. Gerilmesiz bulonlar, enjeksiyonlu ve sürtünmeli tip olarak ikiye ayrılırlar. Şekil 1.7'de tünelde kaya bulonu uygulaması görülmektedir.



Şekil 1.7. Kaya bulonu uygulaması ve sonrası tünel yüzeyinin görünümü

1.6.4. Çelik İksa

Tünel kazısı esnasında, kendini tutamayan zayıf zeminlerde, kazı yapılırken zemini tutmak için kullanılan yapılara iksa denir. Çelik iksa, kazı yapılan tünel kesitinde püskürtme betonun dayanım kazanmasına kadar geçen sürede açıklığın güvenliğini sağlamak ve püskürtme betonda yük dağılımına yardımcı olmak amacıyla kullanılırlar. Uygulanan çelik iksa tipleri kaya ortamına göre I, H, TH veya U hadde profiller olarak seçilebilir. Bu tür destekleme elemanları az eklemlili kaya ortamlarında kullanılabildiği gibi kazıyı müteakip aşırı çatlakların oluştuğu kaya ortamlarında da kullanılabilir. Çelik iksa hemen hemen her kayaç formasyonunda uygulanan önemli tünel destekleme birimidir. Çelik iksalar kazıyı çevreleyen kaya kütlelerini güçlendirmezler. Ancak, deformasyon sonucu zayıflayan çevre kayasına destek olur. İksalar topograf gözetiminde bir önceki iksaya işban vasıtası ile bağlanmaktadır. Şekil 1.8’de çelik iksa uygulaması görülmektedir.



Şekil 1.8. Tünelin göçmemesi için tünel içinde tahkimat amaçlı olarak kullanılan çelik iksalar

1.6.5. Süren

Süren tünel kazılarında ön desteleme olarak uygulanmaktadır. Tünel ilerleme yönünde kullanılan enjeksiyonlu ön sürenler ortamı iyileştirici, kayacın dayanımını artırıcı özelliğe sahip olduğu gibi, ayna önünde oluşan kesme gerilmelerini de kontrol etme amacı ile kullanılmaktadır. Tamamen ayrılmış ve büyük bloklar içeren zeminlerde kazı yapıldığı zaman, tahkimattan önce tünel tavanı ve aynada göçmeler meydana gelir.

Bu durumun önüne geçebilmek maksadı ile kazıya başlamadan önce en son çelik iksanın üzerinden yatayla maksimum 5-10 derece açı yapacak şekilde çakılırlar ve sayıları uygulanan destek tipine göre farklılık gösterirler. Uygulamada 6-9 m'lik uzunluğunda 32 mm veya 51 mm çapında borular yerleştirilerek destekleme işleme yapılır. Şekil 1.9'da ön süren uygulaması görülmektedir.



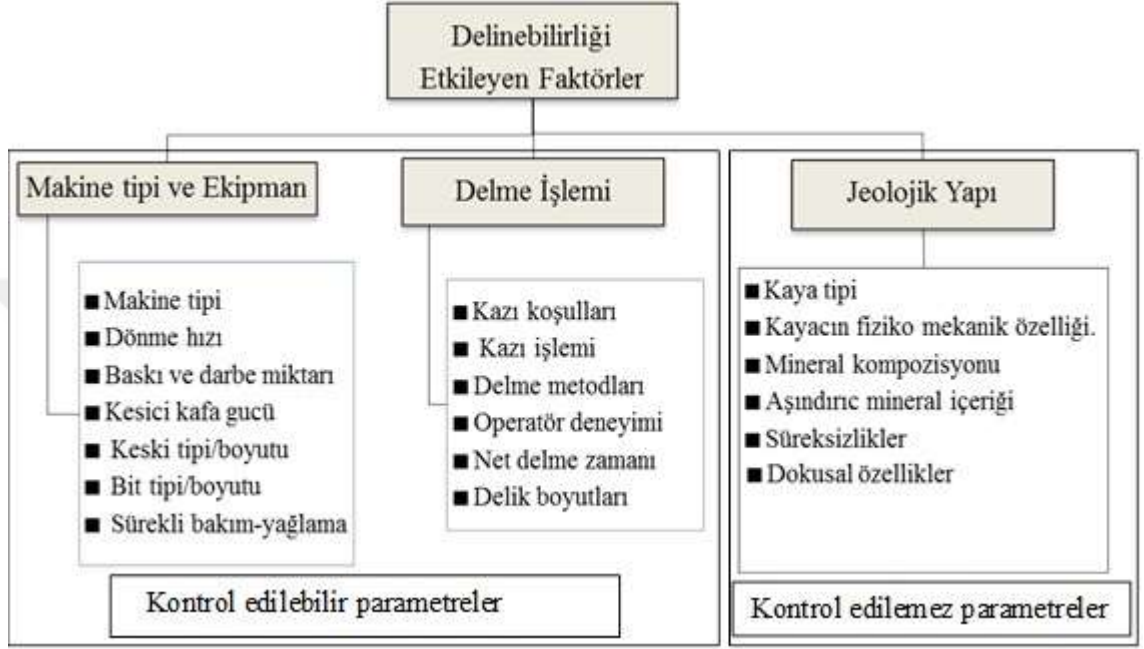
Şekil 1.9. Ön süren uygulaması

1.7. Kayaçlarda Delinebilirlik

Delinebilirlik, matkabının kayaç içinde ilerleme yapabilme oranı olarak tanımlanmaktadır (Tamrock, 1987). Bir başka ifadeyle delinebilirlik; delici makinaların gücüne, matkapların hızına, tabancanın darbe ve basma kuvvetine, kayacın jeolojik ve mekanik özelliğine, operatör tecrübesine ve işletmenin çevresel koşulları gibi pek çok değişken parametrelere bağlı olarak matkabın kayaç içinde ilerleme yapması olarak tanımlanabilir (Çapık vd., 2013a-2015). Delinebilirlik tanımlanmasında pek çok yöntem uygulanmakta olup bunların çoğu ampirik yaklaşımlara dayanmaktadır (Kahraman, 1999).

Delinebilirlik üzerine pek çok çalışma olmasına rağmen delinebilirliği etkileyen temelde üç parametre vardır. Bunlar; makine tipi ve ekipman, delme işlemi ve jeolojik formasyona bağlı parametrelerdir (Şekil 1.10). Makine tipi- ekipman ve delme işlemi kontrol edilebilir parametreler iken, jeolojik özelliklere bağlı parametreler arazi yapısıyla ilgili olduğundan değiştirmesi zor ve kontrol edilemeyen parametreler olarak tanımlanmaktadır (Kahraman, 2002). Makine tipi ve ekipmana bağlı parametreler; delmede kullanılacak makinenin düzenli bakımı delinebilirlik için çok önemlidir. Çünkü delme işleminde makinenin performansı seçilen ekipmanın teknik özelliklerine göre değişmektedir. Delme koşullarına bağlı faktörler; kazı koşulları, delme dizaynı ve operatör tecrübesidir. Jeolojik yapıya bağlı faktörler; delicinin performansını ve uç aşınmasını etkilemektedir. Jeolojik formasyona bağlı başlıca parametreler olarak kaya kütlelerinin ve kaya malzemesinin fiziko-mekanik ve yapısal özellikleri, aşındırıcı mineral içeriği, mineral

bileşimi ve süreksizlikler gibi parametreler gelmektedir. Kayacın süreksizlik yapısı, jeolojik sürece, hidrotermal ayrışması - bozunması ise kaya kütesine bağlı parametrelerdir. Jeolojik formasyona bağlı parametreler arazi yapısıyla ilişkili bir özellik olduğundan değiştirilmesi zor ve kontrol edilemeyen parametrelerdir.



Şekil 1.10. Delinebilirliği etkileyen faktörler (Thuro ve Spaun 1996a; Thuro, 1997a; Kahraman 1999; Thuro vd., 2002; Çapık 2013b).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez çalışması Maçka ve Çaykara (Trabzon) karayolu tünellerinde arazi ve laboratuvar çalışmaları olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmalarında Maçka tüneline kullanılan Sandvik DT820 model ve Çaykara tüneline kullanılan Atlas Copco Rocker Boomer 282 model delici Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri, delik delme hızları, bit aşınma hızları ölçülmüş ve buton aşınma şekilleri incelenmiştir. Laboratuvar çalışmalarında ise Maçka ve Çaykara tünellerinden alınan kaya blokları Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'na getirilerek örnek hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler delinebilirlik, fiziko-mekanik ve aşındırıcılık deneylerine tabi tutulmuştur ve elde edilen veriler analiz edilmiştir. Tez çalışma planı için belirlenen parametreler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Tez çalışma plan ve belirlenen parametreler

Tez Çalışması	
Arazi Çalışmaları	Laboratuvar Çalışmaları
<u>Delici Makina</u> <ul style="list-style-type: none">• Spesifik enerji• Delme hızı	<u>Fiziko-Mekanik deneyler</u> <ul style="list-style-type: none">• Birim hacim ağırlık (Doğal, doymuş ve kuru)• Su emme (Ağırlıkça ve hacimce)• Porozite• Boşluk oranı• Tek eksenli basınç dayanımı• Brazilian çekme dayanımı• Nokta yükü dayanım idenksi• Schmidt çekici geri sıçrama sayısı• Ultrasonik hız
<u>Delici Bitler</u> <ul style="list-style-type: none">• Bit aşınma hızı• Buton aşınımı	<u>Delinebilirlik Deneyleri</u> <ul style="list-style-type: none">• Kırılma deneyi• Sievers deneyi• Delme oranı indeksi• Delme hızı• Spesifik enerji
	<u>Aşındırıcılık Deneyi</u> <ul style="list-style-type: none">• Cerchar aşınma indeksi (HRC40 ve HRC 55)
	<u>Jeolojik incelemeler</u> <ul style="list-style-type: none">• Mineralojik-petrografik analiz

2.1. Çalışma Alanları

Çalışma Maçka ve Çaykara karayolu tünellerinde gerçekleştirilmiştir. Maçka tüneli Trabzon-Gümüşhane karayolunun 34+336,00 ile 35+0366,00 kilometreleri arasında 1.030 m uzunluğunda kazısı devam eden bir karayolu tünelidir. Çaykara tüneli ise Of-Çaykara karayolunun 13+759,54 ile 24+727,572 km'leri arasında 1.060 m uzunluğunda kazısı devam eden bir karayolu tünelidir. Maçka ve Çaykara tünellerine ait yer bulduru haritaları Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Maçka karayolu tüneline ait yer bulduru haritası



Şekil 2.2. Çaykara karayolu tüneline ait yer bulduru haritəsi

2.2. Çalışma Alanının Genel Jeolojisi

2.2.1. Maçka Tüneli ve Çevresinin Genel Jeolojisi

Maçka Tüneli ve çevresinde Çatak formasyonuna ait bilimler yüzeylenmektedir. Maçka İlçesi'nin 3 km kadar güneybatısında yer alan Çatak Köyü civarında verdiği formasyona Güven, (1993) tarafından Çatak Formasyonu adı verilmiştir.

Çatak Formasyonu, siyah renkli şeyl, gri renkli, yer yer çörtlü kireçtaşı düzeyleri ile ardalanan bazalt-andezit ve piroklastitlerinden oluşmaktadır. Altta koyu yeşil, yeşil renkli, bazaltik, andezit- bazalt, yeşil-yeşilimsi gri renkli, orta, orta-ince tabakalı piroklastitler ile ardalanan çoğunlukla epiklastik kayalardan oluşan kumtaşı, silttaşı düzeyleri ile başlayan birim, koyu gri, çoğunlukla siyah renkli, ince tabakalı, yer yer laminalı silttaşı, şeyl ardalanması ile devam etmektedir. Koyu renkli silttaşı-şeyl tabakaları, üste doğru ince

tabakalı, gri, açık gri, yeşilimsi gri renkli kilitaşı ve killi kireçtaşı ara tabakaları içermektedir (Uğuz, 2011).

2.2.2. Çaykara Tüneli ve Çevresinin Genel Jeolojisi

Çaykara Tüneli ve çevresinde Kızılkaya formasyonuna ait bilimler yüzeylenmektedir. Çatak formasyonu üzerine uyumlu olarak gelen Kızılkaya formasyonu başlıca riyolit, riyodasit, dasit ve bunların piroklastitlerinden oluşmaktadır. Tip kesit yeri Giresun güneyindeki Kızılkaya mevki civarında izlenmekte olup, Güven (1993) tarafından Kızılkaya formasyonu olarak adlandırılmıştır. Alt asidik seviye olarak da bilinen Kızılkaya formasyonu alt seviyelerinde riyolit ve dasit üste doğru bunların piroklastitleri (özellikle riyolitik ve dasitik breşler), en üst seviyelerinde ise soğuma sütunu şeklinde mor dasitler ve bunların piroklastitleri ile devam etmektedir. Kızılkaya formasyonunda Çayırbağ formasyonuna göre riyolitik kayalar dasitik kayalara nazaran daha fazladır. Kızılkaya formasyonun çalışma sahasındaki kalınlığı yaklaşık 300 m kadardır. Kızılkaya formasyonu kırmızı renkli karbonatlar içermesinden dolayı derin deniz ortamını işaret etmektedir. Çalışma alanı çevresine ait stratigrafik kolon kesit Şekil 2.3'te verilmiştir.

ÜST SİSTEM		SİSTEM		SERİ	KAT	FORMASYON	SİMGE	KAYA TÜRÜ	AÇIKLAMALAR
SENOZOYİK	NEO-JEN	KUV.	ALÜVYON				Qal		Kum, kil, çakıl
		KUV-PLİO-PLİO-MIYO.		HAMİDİYE		Pih			HAMİDİYE FORMASYONU Çakıltaşı, kum, kil
			BEŞİRLİ		Tbe			BEŞİRLİ FORMASYONU Konglomera, kumtaşı, kilitaşı, bazalt aglomera	
	PALEOJEN	EOSEN		KABAKÖY		Tk		KABAKÖY FORMASYONU Andezit-bazalt lav ve piroklastları (Kumtaşı, kumlu kireçtaşı, marn.)	
MEZOZOYİK	KRETASE	PALEOSEN					mKba		BAKIRKÖY FORMASYONU Kumlu-killi kireçtaşı, killi kireçtaşı, tuf
		KAMPAİYEN-MAASTRIHTİYEN			BAKIRKÖY		mKba		Ballica üyesi (Kumtaşı, killi kçt., marn ve tuf)
			ÇAYIRBAĞ		mKcy			ÇAYIRBAĞ FORMASYONU Riyolit-riyodasitik lav ve piroklastları	
			ÇAĞLAYAN		mKça			Çağlayantepe üyesi (Kireçtaşı, killi kçt., marn)	
			ÜST KRETASE						ÇAĞLAYAN FORMASYONU Bazalt-andezit lav ve piroklastları
			TURONİYEN-KONİYASİYEN						Ayvadere üyesi (Kireçtaşı, killi kçt., tuf)
			SANTONİYEN		KIZILKAYA		mKk		KIZILKAYA FORMASYONU Riyodasit-dasitik lav ve piroklastları
					ÇATAK		mKç		Küçükdere üyesi (Kireçtaşı, killi kçt.)
									ÇATAK FORMASYONU Bazalt-andezit lav ve piroklastları
									Kk1 Kaçkar Granitoyidi 1
JURA	LIYAS	G. JURA							BERDİGA FORMASYONU Çörtlü kireçtaşı, kumlu kireçtaşı, resifal kçt.
		E. JURA							HAMURKESEN FORMASYONU Bazalt-andezit lav ve piroklastları (Konglomera, kırmızı renkli kumtaşı, killi kireçtaşı, marn.)
			HAMURKESEN				Jkb		
PALEOZOYİK								METAMORFİK TEMEL Gnays, mikaşist, klorit şist	

Şekil 2.3. Çalışma alanı ve çevresine ait genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit (Güven, 1993).

Proje güzergahının bu kesiminde tünelin giriş portalleri ve yakın çevresinde gözlenen jeolojik tanımlamalar jeoloji yaş ilişkisine göre; Solaklı Deresi yatağı boyunca birikmiş olan güncel çökeller, yamaç molozu, Türoniyen- Kampaniyen yaşlı yer yer tuf, aglomera ve breş seviyeleri gösteren, çoğunlukla riyodasitik ve dasitik lav ve piroklastlarından oluşan Kızılkaya Formasyonu şeklindedir.

2.3. Arazi Çalışmaları

2.3.1. Tünellerde Kullanılan Delici Jumbo Makinaları

Tünel çalışmalarında patlatma deliğini delmek için delici Jumbo makinaları kullanılmıştır. Maçka tüneline Sandvik DT820, Çaykara tüneline ise Atlas Copco Rocket Boomer 282 Jumbo makinaları kullanılmıştır (Şekil 2.4). Makinaların teknik özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Tünellerde delme işlem için kullanılan makinalar a) Sandvik DT820 ve b) Atlas Copco Rocket Boomer 282

Tablo 2.2. Tünellerde kullanılan delici jumbo makinalarının teknik özellikleri (URL 1 ve 2, 2016).

Makina Özellikleri	Delik delme makinaları	
	Sandvik DT820	Atlas Copco 282
Bom sayısı	2	2
Bom tipi	Teleskobik tipi TFX serisi Rod tipi TRR1 serisi	Teleskobik bom BMHT 2800 serisi Hidrolik uzatmalı matlap BSH 110 serisi
Delici tabanca	2xHLX5 20 kW	COP1638HD+(16kW) COP+1838HD+(18kW)
Makine ağırlığı	26250kg	17500 kg
Uzunluk	14900mm	11830 mm, BMH 2343 beslemeler ile
Genişlik	1900mm	1990 mm
Kaplama alanı	8-49m ²	8-45m ²
Toplam yükseklik	3195mm	3000mm(makine 2300mm)
Güç değeri	20 kW	58kW, 2300 devir/dakika
Tork	400 Nm	270Nm
Toplam kurulu güç	135kW	125kW

2.3.2. Delici Jumbo Makinaların Spesifik Enerji Değerleri

Maçka ve Çaykara karayolu tünellerinde kullanılan çift bomlu Jumbo makinalarının delgi işlemi sırasında harcadığı enerji değerleri hesaplanmıştır. Ancak bu makinaların sahip olduğu anlık verileri kaydedecek bir veri toplama ünitesi bulunmadığında makinaların anlık çektiği akım değerlerinin okunabilmesi için bir pensampermetreden yararlanılmıştır. Akım değerlerinin kayıt edildiği pensampermetre Şekil 2.5’de verilmiştir. Makinanın delgi sırasında çektiği akım değerleri güç iletim kablosu üzerinden pensampermetre hafızasına kaydedilmiştir. Bu veriler yardımıyla Jumbo makineleri için spesifik enerji değerleri hesaplanmıştır. Ölçümler tünellerin üst yarı kazısından alınmıştır.



Şekil 2.5. Jumbo makinalarının spesifik enerji değerlerini hesaplamak için akım ölçümleri alımı

Farmer ve Garrity (1987), Poole (1987), Özdoğan (2003) ve Bilim (2007), tarafından kazıcı makinaların harcadığı güç, net kazı hızı ve spesifik enerji değerlerin hesaplanması için önerilen aşağıdaki eşitlikler kullanılarak spesifik enerjiler hesaplanmıştır. Yerinde ve laboratuvarında ölçülen spesifik enerji sonuçları Tablo 2.3’de verilmiştir.

$$P = \frac{V \cdot I}{1000} \quad (2.1)$$

$$NKH = \frac{V}{t} \quad (2.2)$$

$$SE = \frac{P}{NKH} \quad (2.3)$$

Burada

P : Güç, kW

V : Volt, V

I : Akım, A

NKH : Net kazı hızı, m³/h

v : Kazılan malzeme, m³

t : Kazı süresi, h

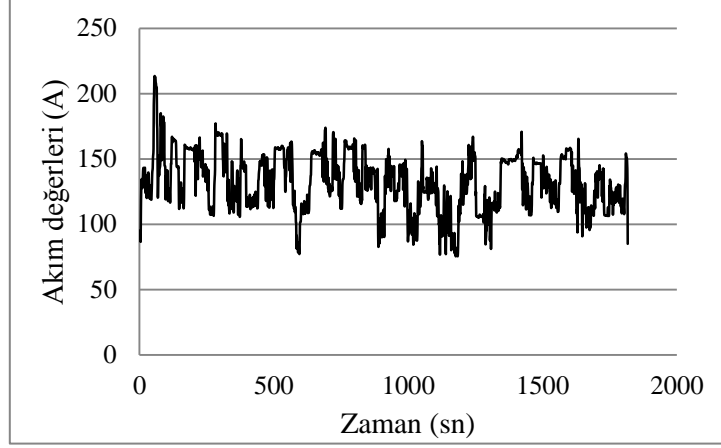
SE : Spesifik enerji. kJ/m³

Maçka ve Çaykara tünellerinde kullanılan Jumbo makinalarının pensampermetre yardımıyla alınan akım zaman değerleri Şekil 2.6-2.7’de verilmiştir. Şekil 2.8-2.9’da laboratuvar ortamında Sievers minyatür delme testi üzerinde kayaların delisi sırasında ölçülen akım zaman grafiği verilmiştir.

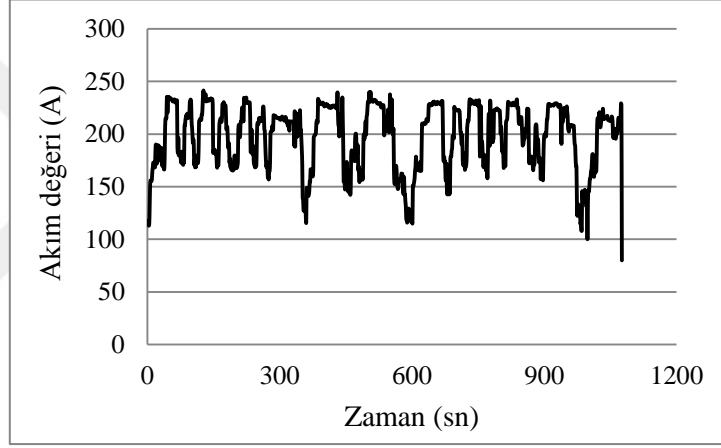
Tablo 2.3. Yerinde ve laboratuvarında ölçülen spesifik enerji değerleri

Numune no	Yerinde ölçülen Spesifik enerji kJ/m ³	Lab. ölçülen Spesifik enerji kJ/m ³
Ç1	0,079	70,90
Ç2	0,073	27,54
Ç3	0,078	54,03
Ç4	0,072	25,10
Ç5	0,064	13,12
M1	0,064	4,87
M2	0,090	23,72
M3	0,098	69,29
M4	0,080	13,29
M5	0,075	8,16
M6	0,102	156,38

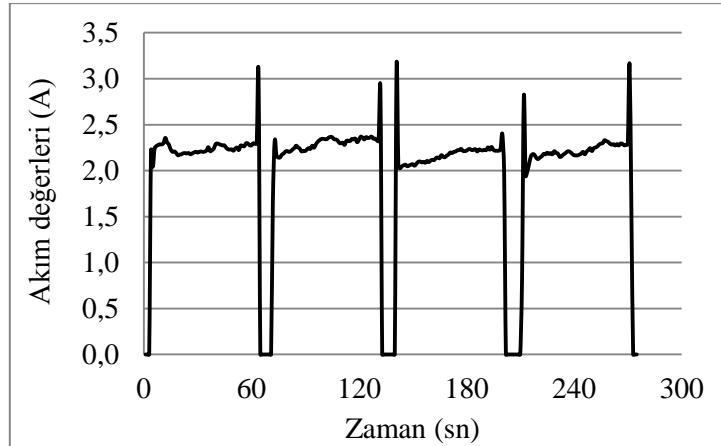
Ç: Çaykara tüneli, M: Maçka tüneli



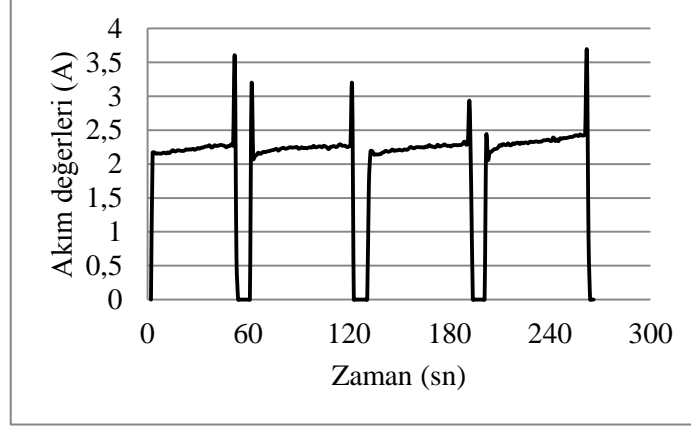
Şekil 2.6. Maçka tüneline kullanılan Sandvik DT820 Jumbo makinasına ait akım zaman grafiği (M1 nolu örnek)



Şekil 2.7. Çaykara tüneline kullanılan Atlas Copco Rocket Boomer 282 Jumbo makinasına ait akım zaman grafiği (Ç2 nolu örnek)



Şekil 2.8. Sievers' minyatür delme aletine ait akım zaman grafiği (M4 nolu örnek)



Şekil 2.9. Sievers minyatür delme testi akım zaman grafiği (Ç5 nolu örnek)

2.3.3. Delici Jumbo Makinaların Delik Delme Hızı

Delik delme işleminde yarı balistik butonlu bitler kullanılmıştır. Ölçümler çift bomlu Sandvik DT820 ve Atlas Copco Rocket Boomer 282 üzerinde alınmıştır. Jumbo makinalarının her bir bomuna bir bit takılmıştır. Yarı balistik butonlu bitlerin net delme hızlarını belirlemek için deliğin delme süresi dijital kronometre ile kaydedilmiştir. Spesifik enerji ölçümlerinin alındığı makinalarda kullanılan bitlerin net delme hızları belirlendiğinden özellikle delik delme işleminde operatör etkisini minimuma indirmek için delme süresince kızaklara uygulanan darbe ve baskı kuvvetlerinin belli değerde tutulmasına dikkat edilmiştir. Jumbo makinalarına ait delik delme hızları Tablo 2.4'de verilmiştir.

Delme hızı;

$$DH = \frac{x}{t} \quad (2.4)$$

Burada;

DH : Delme hızı, m/dak.

x : Delme miktarı, m,

t : Delme süresi, dak,

Tablo 2.4. Yerinde ve laboratuvarında ölçülen delme hızları

Numune no	Yerinde ölçülen delme hızı (m/dak)	Lab. ölçülen delme hızı (mm/dak)
Ç1	2,45	0,58
Ç2	2,65	1,46
Ç3	2,48	0,75
Ç4	2,65	1,56
Ç5	2,79	3,04
M1	2,34	9,01
M2	2,06	1,69
M3	1,99	0,57
M4	2,21	2,97
M5	2,23	5,01
M6	1,93	0,25

Ç: Çaykara tüneli, M: Maçka tüneli

2.4. Laboratuvar Çalışmaları

2.4.1. Tünellerde Örnek Alım Noktaları

Çalışma kapsamında laboratuvar deneylerin gerçekleştirilmesi amacıyla Maçka ve Çaykara tünellerinden belli zaman aralıklarında kaya blokları derlenmiştir (Tablo 2.5). Alınan kayaç blokları Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarına getirilerek örnek hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

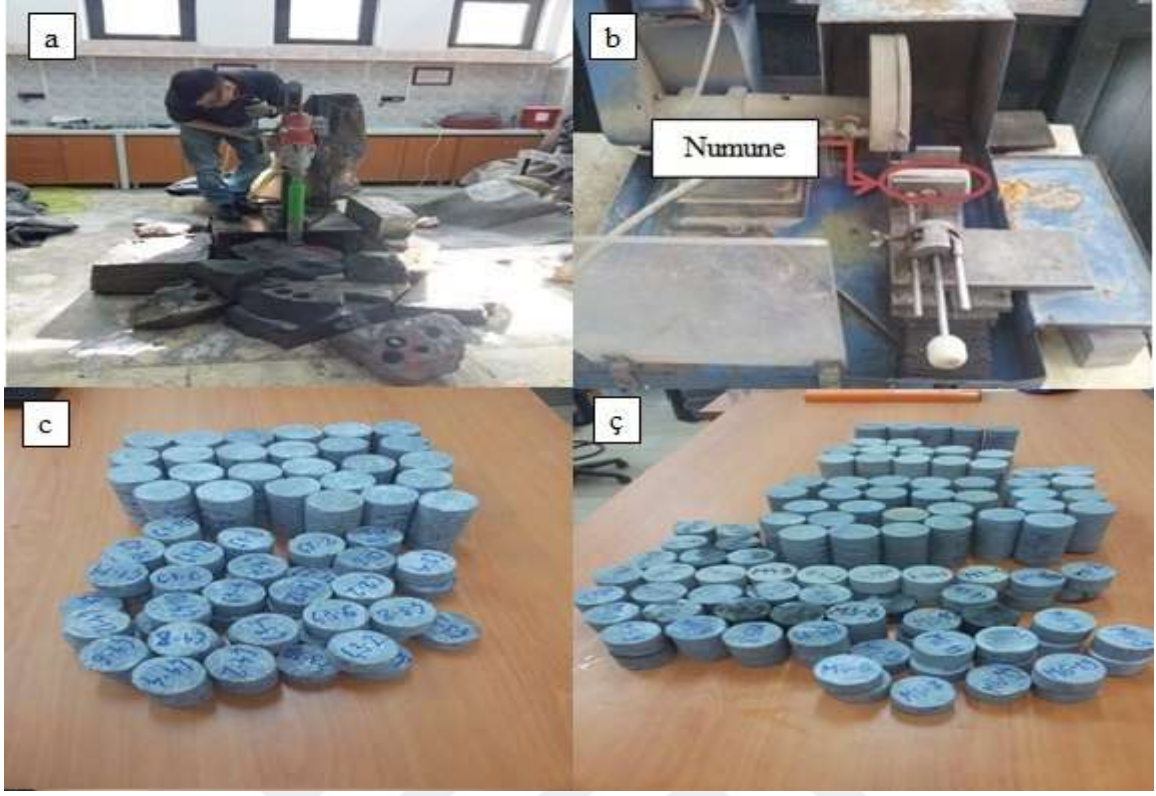
Tablo 2.5. Maçka ve Çaykara tünellerinde numune alım noktaları

Tünel	Örnek No	Tarih	Tünel Km	Kayaç adı
Maçka	Maçka-1	09.02.2016	34+525.10	Altere Bazalt
	Maçka-2	16.02.2016	34+552.90	Altere Bazalt
	Maçka-3	23.02.2016	34+586.90	Altere Bazalt
	Maçka-4	02.03.2016	34+625.90	Altere litik kristal bazaltik tuf
	Maçka-5	17.03.2016	34+681.40	Altere litik kristal bazaltik tuf
	Maçka-6	24.03.2016	34+708.20	Altere litik kristal bazaltik tuf
Çaykara	Çaykara-1	22.03.2016	16+565,10	Altere Dasit
	Çaykara-2	30.03.2016	16+589,20	Altere Dasit
	Çaykara-3	06.04.2016	16+625,60	Altere Dasit
	Çaykara-4	14.04.2016	16+655,60	Altere Dasit
	Çaykara-5	04.06.2016	16+805,20	Altere Dasit

2.4.2. Örnek Hazırlama İşlemi

Maçka ve Çaykara tünellerinden alınan kaya bloklardan karot alma makinesiyle silindirik numuneler alınmıştır. Karot alınma işleminde NX (54,7mm) çaplı karotiyer kullanılmıştır. Karot alma işleminden sonra laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere ASTM ve ISRM tarafından önerilen yönteme göre örnek boyları düzenlenmiştir.

Boyutlandırma işlemi için karot kesme makinesiyle karot örneklerinin standartlarda istenilen boy/çap oranlarında hazırlanmış ve örneklerin alt ve üst yüzey düzeltilmiştir. Şekil 2.10'da karot alma işlemi, karot düzeltme makinası ve tünellerde alınan karot numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 2.10. a) Karot alma işlemi b) karot düzeltme işlemi c) Çaykara Tüneli numuneleri ç) Maçka Tüneli numuneleri

2.5. Laboratuvarında Gerçekleştirilen Deneyler

2.5.1. Kayaçların Fiziksel Özellikleri

DeneySEL çalışmalarında gerçekleştirilen fiziksel özellikler aşağıda verilmiştir.

1. Birim hacim ağırlık
 - Doğal birim hacim ağırlık
 - Doygun birim hacim ağırlık
 - Kuru birim hacim ağırlık
2. Su emme
 - Ağırlıkça su emme
 - Hacimce su emme
3. Boşluk oranı,
4. Porozite

2.5.1.1. Yoğunluk ve Birim Hacim Ağırlık

Yoğunluk ve birim hacim ağırlık deneyleri ISRM (2007) tarafından yöntemlere göre yapılmıştır. Her bir kaya numunesi için en az üç örnek kullanılmıştır. Dijital kumpasla 0,1 mm duraylılıkla ölçülüp her bir örnek için bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Doğal birim hacim ağırlık tayin için örnekler 0,01 gr hassasiyette tartılarak kütleleri belirlenmiştir. Kuru birim hacim ağırlık tayini için örnekleri $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ayarlanmış fırında değişmez kütleye gelinceye kadar en az 24 saat etüvde kurutulduktan sonra soğumaları için bekletilmiş ve terazide tartılarak örneklerin kuru kütleleri belirlenmiştir. Daha sonra doygun birim hacim ağırlıklarını belirlemek için örnekler su dolu bir kabın içinde en az 24 saat bekletilmiş ve çıkarıldıktan sonra yüzeyi kurutulup tekrar tartılmıştır. Arşimet terazisi ile su içinde yapılacak tartım sırasında su emerek sonuçları etkilemeyecek derecede doygun hale getirilen deney numuneleri sudan çıkarılarak Arşimet terazisinde su içinde 0,01 gr hassasiyetle tartılmıştır. Aşağıda verilen bağıntılar yardımıyla birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Kayaç örneklerine ait deney sonuçları Tablo 2.6-2.8'de verilmiştir.

$$d = \frac{M}{V}, \text{ gr/cm}^3 \quad (2.5)$$

$$\gamma_n = d \times 9,81, \text{ kN/m}^3 \quad (2.6)$$

$$\gamma_d = \frac{M_d}{M_d - M_{ds}} \times 9,81, \text{ kN/m}^3 \quad (2.7)$$

$$\gamma_k = \frac{M_k}{M_{dh} - M_{ds}} \times 9,81, \text{ kN/m}^3 \quad (2.8)$$

Buradan;

d : Yoğunluk, g/cm^3

M : Örneğin kütlesi, gr

V : Örneğin hacmi, cm^3

γ_n : Doğal birim hacim ağırlık, kN/m^3

γ_d : Doygun birim hacim ağırlık, kN/m^3

M_d : Doygun haldeki deney numunesinin kütlesi, gr

M_{ds} : Doygun haldeki deney numunesinin su içindeki kütlesi, gr

γ_k : Kuru birim hacim ağırlığı, kN/m^3

- M_k : Değişmez kütleye kadar kurutulmuş deney numunesinin kütlesi, gr
 M_{dh} : Doygun haldeki deney numunesinin havadaki kütlesi, gr
 M_{ds} : Doygun haldeki deney numunesinin su içindeki kütlesi, gr

Tablo 2.6 Doğal birim hacim ağırlık değerleri

Numune no	En yüksek değer (kN/m ³)	En düşük Değer (kN/m ³)	\bar{X} (kN/m ³)	Sd	CV
Ç1	25,6	25,4	25,5	0,1	0,3
Ç2	25,4	24,9	25,1	0,2	0,9
Ç3	25,6	25,5	25,5	0,1	0,3
Ç4	24,7	24,5	24,6	0,1	0,3
Ç5	24,2	23,9	24,0	0,1	0,6
M1	27,0	26,8	27,0	0,1	0,4
M2	27,6	27,3	27,6	0,2	0,7
M3	27,7	27,5	27,7	0,1	0,4
M4	27,6	26,3	27,6	0,7	2,5
M5	27,4	27,3	27,4	0,1	0,2
M6	27,7	27,5	27,7	0,1	0,4

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; CV: Varyasyon katsayısı

Tablo 2.7. Kuru birim hacim ağırlık değerleri

Numune no	En yüksek Değer (kN/m ³)	En düşük Değer (kN/m ³)	\bar{X} (kN/m ³)	Sd	CV
Ç1	25,4	25,3	25,3	0,0	0,1
Ç2	25,2	24,6	24,9	0,3	1,2
Ç3	25,4	25,3	25,3	0,1	0,2
Ç4	24,5	24,4	24,4	0,1	0,3
Ç5	24,0	23,7	23,8	0,1	0,6
M1	26,9	26,6	26,9	0,1	0,5
M2	27,7	27,2	27,7	0,3	1,0
M3	27,6	27,4	27,6	0,1	0,4
M4	27,5	27,0	27,5	0,3	1,0
M5	27,2	26,9	27,2	0,2	0,6
M6	27,7	27,5	27,7	0,1	0,4

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; CV: Varyasyon katsayısı

Tablo 2.8. Doygun birim hacim ağırlık değerleri

Numune no	En yüksek Değer (kN/m ³)	En düşük Değer (kN/m ³)	\bar{X} (kN/m ³)	Sd	CV
Ç1	25,5	25,4	25,5	0,0	0,1
Ç2	25,4	25,0	25,2	0,2	0,9
Ç3	25,5	25,5	25,5	0,0	0,1
Ç4	24,7	24,6	24,7	0,1	0,3
Ç5	24,3	23,9	24,1	0,1	0,6
M1	27,1	26,9	27,1	0,1	0,4
M2	27,8	27,3	27,8	0,3	1,0
M3	27,6	27,5	27,6	0,1	0,3
M4	27,7	27,1	27,7	0,3	1,1
M5	27,4	27,2	27,4	0,1	0,5
M6	27,8	27,5	27,8	0,1	0,5

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; CV: Varyasyon katsayısı

2.5.1.2. Su Emme Oranı

Su emme oranı belirlemek için kayaç numuneleri su dolu bir kabın içinde en az 24 saat bekletilmiş ve çıkartıldıktan sonra yumuşak bir havlu ile yüzeyi silindikten sonra doymun kütleli 0,01 g hassasiyetli tartıda tartılarak belirlenmiştir. Su emme oranı için ez az üçer adet (silindirik) örnek kullanılmıştır. Deney örnekleri bu ölçme işlemleri sonuna değışmez kütleyle gelene kadar etüvde kurutulup, desikatörde laboratuvar sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra 0,01 g hassasiyet ile tartılıp kütleli bulunmuştur. Tartılan numuneler aşğıdaki formüllerdeki değerlerin yerine konulmasıyla numuneye ait ağılıkça ve kütlece su emme oranları hesaplanmıştır. Şekil 2.11’de kayaçların fiziksel özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen aşamaları gösterilmiştir. Ağılıkça su emme ve hacimce su emme deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 2.9-2.10’da verilmiştir.

$$S_k = \frac{M_d - M_k}{M_k} \times 100 \quad (2.9)$$

$$S_h = \frac{M_d - M_k}{M_d - M_{ds}} \times 100 \quad (2.10)$$

Buradan;

S_k : Örneğin kütlece su emme oranı, %

S_h : Örneğin hacimce su emme oranı, %

- M_d : Örneğin doygun haldeki kütlesi, gr
 M_k : Değişmez kütleye kadar kurutulmuş örneğin kütlesi, gr
 M_{ds} : Doygun haldeki örneğin su içindeki kütlesi, gr



Şekil 2.11. Kayaçların fiziksel özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen aşamalar, a) suya doyurma b) doygun haldeki numuneler, c) Arşimet terazisiyle numune tartımı, ç) fırında kurutma

Tablo 2.9. Hacimce su emme oranı sonuçları

Numune no	En yüksek Değer (%)	En düşük Değer (%)	\bar{X} (%)	Sd	CV
Ç1	1,68	0,92	1,34	0,324	24,17
Ç2	2,73	1,99	2,24	0,351	15,71
Ç3	1,86	1,14	1,53	0,366	23,99
Ç4	2,64	2,48	2,53	0,089	3,52
Ç5	2,93	2,33	2,66	0,251	9,44
M1	3,24	2,56	2,85	0,354	12,45
M2	1,68	0,94	1,19	0,423	35,54
M3	1,29	0,43	0,82	0,441	53,93
M4	1,82	1,26	1,61	0,305	18,89
M5	2,34	1,92	2,19	0,236	10,77
M6	0,99	0,50	0,67	0,272	40,43

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; N: CV: Varyasyon katsayısı

Tablo 2.10. Ağırlıkça su emme oranı sonuçları

Numune no	En yüksek Değer (%)	En düşük Değer (%)	\bar{X} (%)	Sd	CV
Ç1	0,65	0,36	0,52	0,126	24,24
Ç2	1,07	0,79	0,88	0,132	15,05
Ç3	0,72	0,44	0,59	0,143	24,21
Ç4	1,06	0,99	1,02	0,038	3,74
Ç5	1,21	0,96	1,10	0,103	9,39
M1	1,19	0,94	1,04	0,134	12,83
M2	0,60	0,34	0,43	0,148	34,64
M3	0,46	0,15	0,29	0,158	54,18
M4	0,65	0,46	0,58	0,105	18,08
M5	0,85	0,69	0,79	0,088	11,12
M6	0,35	0,18	0,24	0,097	40,39

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; CV: Varyasyon katsayısı

2.5.1.3. Görünür Porozite Tayini

Tünellerden alınan kaya numunelerinden ez az üçer örnek, görünür porozite tayininde kullanılmıştır. Görünür porozite; değişmez kütleye kadar kurutulmuş kayaç numunesinin absorbe edebildiği su miktarına karşılık gelen hacminin boşlukları dahil hacmine (tüm hacim) oranı olarak tanımlanır. Numunenin hacimce su emme oranı, aynı zamanda numunenin görünen porozite olup, aşağıdaki formüle hesaplanır. Görünür porozite ve boşluk oranı değerleri sırasıyla Tablo 2.11 ve Tablo 2.12’de verilmiştir.

$$n = \frac{V_b}{V_t} \times 100 \quad (2.11)$$

n : Numunenin porozitesi, %

V_b : Boşluk hacmi, cm^3

V_t : Numunenin toplam hacmi, cm^3

Tablo 2.11. Görünür porozite değerleri

Numune no	En yüksek Değer (%)	En düşük Değer (%)	\bar{X} (%)	Sd	CV
Ç1	1,68	0,92	1,34	0,324	24,17
Ç2	2,73	1,99	2,24	0,351	15,71
Ç3	1,86	1,14	1,53	0,366	23,99
Ç4	2,64	2,48	2,53	0,089	3,52
Ç5	2,93	2,33	2,66	0,251	9,44
M1	3,24	2,56	2,85	0,354	12,45
M2	1,68	0,94	1,19	0,423	35,54
M3	1,29	0,43	0,82	0,441	53,93
M4	1,82	1,26	1,61	0,305	18,89
M5	2,34	1,92	2,19	0,236	10,77
M6	0,99	0,50	0,67	0,272	40,43

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; CV: Varyasyon katsayısı

Tablo 2.12. Boşluk oranı değerleri

Numune no	En yüksek Değer (%)	En düşük Değer (%)	\bar{X} (%)	Sd	CV
Ç1	1,71	0,93	1,36	0,332	24,46
Ç2	2,81	2,03	2,29	0,368	16,11
Ç3	1,90	1,15	1,55	0,377	24,33
Ç4	2,71	2,54	2,60	0,094	3,62
Ç5	3,02	2,38	2,73	0,264	9,68
M1	3,35	2,63	2,93	0,376	12,83
M2	1,71	0,94	1,21	0,434	36,02
M3	1,31	0,43	0,83	0,449	54,35
M4	1,85	1,28	1,64	0,315	19,16
M5	2,39	1,95	2,24	0,246	11,00
M6	1,00	0,50	0,68	0,276	40,74

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; CV: Varyasyon katsayısı

2.5.2. Kayaçların Mekanik Özellikleri

Maçka ve Çaykara Tünellerinden alınan kayaç örnekleri üzerinde gerçekleştirilen mekanik deneyler aşağıda verilmiştir.

1. Tek eksenli basınç deneyi,
2. Dolaylı çekme deneyi (Brazilian yöntemi),
3. Nokta yükleme deneyi,
4. Schmidt çekiçleri (Silver ve klasik),
5. Ultrasonik dalga hızı deneyi,

2.5.2.1. Tek Eksenli Basınç Deneyi

Kayaların en önemli mühendislik özelliklerinden olan tek eksenli basınç deneyi için Maçka ve Çaykara tünellerinden alınan kayaçlardan standartlara uygun karot örnekleri hazırlanmış ve deney ASTM (2010) göre yapılmıştır. Deneylerde kullanılan örnek çapları 54mm (NX tip) ve boy/çap oranı 2.0-2.5 olacak şekilde numunler hazırlanmıştır. Deney için her bir kayaç için en az 4 adet numuneler hazırlanmıştır. Yükleme hızı olarak 0.5-1.0 MPa/sn olarak alınmıştır. Deneyde her bir kayaç için en az 4 adet numune hazırlanmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı deneyin yapılışı Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Deere ve Miller (1966), göre kayaçların tek eksenli basınç dayanım değerlerine göre sınıflandırılması Tablo 2.13’de verilmiştir. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Tablo 2.14’te verilmiştir.



Şekil 2.12. Tek eksenli basınç dayanımı deneyinin yapılışı

Tablo 2.13. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması (Deere ve Miller, 1966).

Sınıf	Basınç dayanımı (MPa)
Çok yüksek	>220
Yüksek	110-220
Orta	55-110
Düşük	27,5-55
Çok düşük	<27,5

Tablo 2.14. Tek Eksenli Basınç dayanım (σ_c) değerleri ve kaya sınıfları

Numune no	En yüksek Değer (MPa)	En düşük Değer (MPa)	\bar{X} (MPa)	Sd	CV	Kaya Sınıfı
Ç1	95,1	77,9	87,2	9,0	10,3	Orta
Ç2	75,3	58,8	69,3	7,8	11,2	Orta
Ç3	85,3	75,1	81,6	4,7	5,7	Orta
Ç4	70,7	63,0	67,3	3,8	5,6	Orta
Ç5	70,7	48,0	60,3	14,1	23,4	Orta
M1	55,1	47,0	55,1	3,8	6,9	Orta
M2	85,6	79,3	85,6	2,8	3,3	Orta
M3	109,3	79,8	109,3	13,2	12,1	Orta
M4	77,5	54,5	77,5	9,7	12,5	Orta
M5	60,5	57,0	60,5	1,7	2,7	Orta
M6	115,8	98,0	115,8	9,0	7,8	Yüksek

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; CV: Varyasyon katsayısı

2.5.2.2. Dolaylı Çekme Deneyi (Brazilian Yöntemi)

Bu yöntemle, silindirik kayaç örneklerinin uçlarından sabitlenerek çekilmesi şeklinde uygulanan doğrudan çekme deneylerindeki gibi, genellikle biraz daha yüksek çekilme dayanımları elde edilmektedir. Bununla birlikte, örneklerin deneye hazırlanması ve deneyin yapılması açısından daha pratik olması nedeniyle, dolaylı çekme yöntemi daha yaygın şekilde kullanılmaktadır. Deney yöntemi olarak, ISRM (2007)'nin önerdiği yöntem esas alınmıştır. Şekil 2.13'de Numune yerleştirilmesi ve kırılan numune gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Numune yerleştirilmesi ve kırılan numune

Dolaylı çekme dayanımı için, hazırlanan silindir şeklinde boy/çap oranı 0,5 olan NX tipi kayaç örneklerin her bir kazı aynasında en az 10 adet numune hazırlanmıştır. Yükleme hızı 0,2 kN/sn olacak şekilde seçilmiştir. Bulunan yenilme yükünden (F) aşağıdaki formül yardımıyla dolaylı çekme dayanımı hesaplanmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen çekme dayanımı verileri Tablo 2.15’de verilmiştir.

$$\sigma_t = \frac{0,636F}{D.t} \quad (2.12)$$

Burada;

- σ_t : Dolaylı çekme dayanımı, MPa,
 F : Yenilme yükü, kN,
 D : Örnek çapı, mm,
 T : Örnek kalınlığı, mm’dir

Tablo 2.15. Çekme Dayanımı (σ_t) deney değerleri

Numune no	En yüksek Değer (MPa)	En düşük Değer (MPa)	\bar{X} (MPa)	Sd	CV
Ç1	10,6	8,0	9,53	0,98	10,3
Ç2	9,1	6,7	8,10	0,91	11,2
Ç3	10,7	7,8	9,86	1,20	12,2
Ç4	8,8	5,8	7,66	1,31	17,0
Ç5	8,0	6,1	6,85	0,80	11,7
M1	8,0	4,7	8,01	1,39	17,3
M2	10,9	9,1	10,87	0,79	7,3
M3	14,8	9,5	14,81	1,79	12,1
M4	9,1	7,5	9,10	0,74	8,2
M5	8,9	6,6	8,87	0,93	10,5
M6	14,9	12,7	14,94	0,99	6,6

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; CV: Varyasyon katsayısı

2.5.2.3. Nokta Yükleme Deneyi

Nokta yükü dayanım indeksi tek eksenli basınç ve çekilme dayanımı gibi diğer dayanım parametrelerinin dolaylı olarak belirlenmesinde ve kaya kütle sınıflama

sistemlerinde kayaç dayanım parametresi olarak kullanılır (Ulusay vd., 2001). Yapılan çalışmada nokta yükü dayanım deneyi ISRM (2007)'ye göre yapılmıştır. Deneylerde kullanılan örnek çapları 54 mm (NX tip), boy/çapı oran ise 1/2 olarak alınmıştır. Nokta yükü deneyi aleti ve deney sonrası kırılmış kayaç örnekleri Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.14. Nokta yükleme deneyi aleti ve deney sonrası kırılmış kayaç örnekleri

Nokta yükü dayanım indeksinin hesaplanması için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Tablo 2.16'da kayaçların nokta yükü dayanım indeksine göre sınıflandırılması verilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 2.17'de verilmiştir.

$$I_s = \frac{F}{D_e^2} \quad (2.13)$$

$$D_e^2 = \frac{4.A}{\pi} \quad (2.14)$$

$$I_{s(50)} = F_1 \cdot I_s \quad (2.15)$$

$$F_1 = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0.45} \quad (2.16)$$

Buradan;

F :Yenilme yükü, kN

A :Konik başlıkların temas noktalarından geçen örneğin kesit alanı, mm²

I_s :Düzeltilmemiş nokta yükü dayanım indeksi, MPa,

F₁ :Düzeltilme faktörü , (0-1)

D_e :Esdeğer çap, mm

I_{s(50)} :Düzeltilmiş nokta yükü dayanım indeksi, MPa'dır

Tablo 2.16. Nokta yükü dayanım indeksine göre kayaçların sınıflandırılması (Bieniawski, 1975).

Sınıf	Nokta Yükü Dayanım İndeks (MPa)
Çok yüksek dayanım	>7,845
Yüksek dayanım	7,845-3,923
Orta dayanım	3,923-1,961
Düşük dayanım	1,961-0,981
Çok düşük dayanım	<0,981

Tablo 2.17. Nokta yük dayanım indeksi ($I_{s(50)}$) değerleri ve sınıfları

Numune no	En yüksek Değer (MPa)	En düşük Değer (MPa)	\bar{X} (MPa)	Sd	CV	Kaya Sınıfı
Ç1	3,71	3,40	3,55	0,12	3,4	Orta dayanım
Ç2	2,74	1,30	2,06	0,52	25,1	Orta dayanım
Ç3	3,90	3,71	3,81	0,07	1,9	Orta dayanım
Ç4	2,08	1,39	1,83	0,26	14,3	Düşük dayanım
Ç5	1,47	1,19	1,33	0,10	7,9	Düşük dayanım
M1	1,59	1,20	1,59	0,16	10,2	Düşük dayanım
M2	4,09	3,30	4,09	0,35	8,6	Orta dayanım
M3	4,93	4,52	4,93	0,15	3,1	Yüksek dayanım
M4	2,67	1,77	2,67	0,44	16,6	Orta dayanım
M5	2,13	1,60	2,13	0,23	11,0	Orta dayanım
M6	4,83	4,75	4,83	0,03	0,5	Yüksek dayanım

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; CV: Varyasyon katsayısı

2.5.2.4. Schmidt Çekici Deneyi

Schmidt çekici deneyi, kayaçların geri sıçrama sertliğinin tayini ve dolaylı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının saptanması amacıyla yapılır. Deney yöntemi olarak ISRM (2007)'nin önerdiği yöntem uygulanmıştır.

Çalışmada iki farklı Schmidt çekiçi kullanılmıştır. Birincisi L tipi klasik Schmidt çekiçi, burada okunun değer R (rebound value) değeridir. R değeri yerçekiminden etkilendiği için vuruş açısının değerlendirme aşamasında önemi vardır. İkincisi L tipi dijital Silver Schmidt çekiçi, burada okunan değer Q (rebound value) değeridir. Q değeri yerçekiminden etkilenmemektedir. Şekil 2.15'de Klasik ve Silver Schmidt çekiçleri verilmiştir.



Şekil 2.15. Klasik ve Silver Schmidt çekicileri

Schmidt çekici deneyleri yapılırken hem klasik hem de Silver Schmidt çekici kullanılmıştır. Deneyler NX karot örnekleri üzerinde yapılmış ve V şekili numune beşiği kullanılmıştır. Klasik Schmidt ve dijital Silver Schmidt çekici geri sıçrama sonuçları Tablo 2.18 ve 2.19’de verilmiştir

Tablo 2.18. Klasik Schmidt çekici (R) geri sıçrama değerleri

Numune no	En yüksek Değer	En düşük Değer	\bar{X}	Sd	CV
Ç1	46	40	43	1,70	4,0
Ç2	47	38	40	1,63	4,1
Ç3	45	37	42	3,34	8,0
Ç4	44	36	41	2,69	6,6
Ç5	41	36	39	1,49	3,8
M1	39	36	37	1,16	3,1
M2	48	40	43	2,50	5,8
M3	48	42	45	2,59	5,8
M4	41	38	39	1,17	3,0
M5	41	38	40	1,03	2,6
M6	52	45	48	2,47	5,1

\bar{X} : Ortalama değer; Sd: Standart sapma; CV: Varyasyon katsayısı

Tablo 2.19. Silver Schmidt çekici (Q) geri sıçrama değerleri

Numune no	En yüksek Değer	En düşük Değer	\bar{X}	Sd	CV
Ç1	69	55	60	4,59	7,6
Ç2	65	50	54	4,58	8,4
Ç3	65	55	58	2,72	4,7
Ç4	56	52	54	1,43	2,7
Ç5	62	47	52	5,28	10,2
M1	54	50	52	1,42	2,7
M2	62	58	60	1,79	3,0
M3	68	60	65	2,72	4,2
M4	62	55	58	2,32	4,0
M5	59	51	55	3,03	5,5
M6	70	65	67	1,52	2,3

\bar{X} : Ortalama değeri Sd: Standart sapma CV: Varyasyon katsayısı

2.5.2.5. Ultrasonik P-dalga Hızı deneyi

Ultrasonik hız deneyi için her iki yüzeyi düzeltilmiş kayaç numunesine jel sürülerek ultrasonik deney aletinin metalden yapılmış alıcı-verici kafaları arasında yerleştirilip P dalganın örnekten geçiş süresi mikrosaniye cinsinden ölçülmüştür. Şekil 2.16'da ultrasonik deneyinin yapılışı gösterilmiştir.

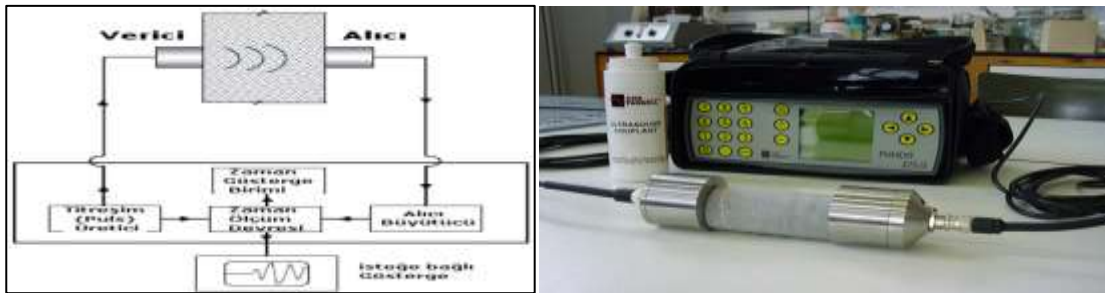
$$V_p = L/t, \text{ m/sn.} \quad (2.12)$$

Burada,

V_p : P dalga hızı, m/sn

L : Numunenin boyu, m

t : Sinyalin örnek içindeki geçiş süresi, sn



Şekil 2.16. Titreşim hızı test devresinin şematik diyagramı ve ultrasonik hız deneyinin yapılışı

Ultrasonik hız deneyi ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemle göre yapılarak numunenin içerisinde geçen P-dalga hızı geçiş süresi belirlenmiştir. Tablo 2.20’de Ultrasonik hızı sınıflandırılması verilmiştir. Ultrasonik P dalga hızı değerleri ve sınıfları Tablo 2.21’de verilmiştir.

Tablo 2.20. Ultrasonik hız sınıflandırılması (Anon, 1979)

Sınıf	Ultrasonik hız, (m/sn)	Tanımlama
1	<2500	Çok düşük hız
2	2500-3500	Düşük hız
3	3500-4000	Orta hız
4	4000-5000	Yüksek hız
5	>5000	Çok yüksek hız

Tablo 2.21. P dalga hızı değerleri ve sınıfları

Numune no	En yüksek Değer (m/sn)	En düşük Değer (m/sn)	\bar{X} (m/sn)	Sd	CV	Kaya sınıfı
Ç1	4940	4655	4809	120	2,50	Yüksek hız
Ç2	4601	4292	4461	111	2,50	Yüksek hız
Ç3	4767	4607	4663	58	1,24	Yüksek hız
Ç4	4515	4113	4337	174	4,01	Yüksek hız
Ç5	4450	4195	4331	98	2,25	Yüksek hız
M1	4347	3887	4347	197	4,52	Yüksek hız
M2	5170	4631	5170	170	3,28	Çok yüksek hız
M3	5395	4826	5395	195	3,61	Çok yüksek hız
M4	4828	4300	4828	189	3,92	Yüksek hız
M5	4637	4162	4637	212	4,58	Yüksek hız
M6	5727	5052	5727	282	4,93	Çok yüksek hız

\bar{X} : Ortalama değer, Sd: Standart sapma, CV: Varyasyon katsayısı

2.5.3. Aşınma Deneyleri

2.5.3.1. Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (CAI) Deneyi

Kayaçların aşındırıcılık özelliğinin belirlenmesi için Cerchar aşındırıcılık indeksi deneyi kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında, Rockwell sertliği 54-56 ve 40-42 olan iki farklı sertlikte uç kullanılmıştır. Cerchar aşınma indeksi deney aleti ve deneyde kullanılan kayaç örnekleri Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Kayaç örnekleri üzerindeki çizme işlemi, her defasında yeni bir uçla gerçekleştirilmiştir. Uçlarda oluşan aşınma değeri Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı’nda Leica marka bioküler mikroskop altında 40x büyütme altında incelenmiştir (Şekil 2.18). Aşınma sonrası uçların mikroskop altında bir görünüşü Şekil 2.19’da gösterilmiştir. Uçtaki her 1/10 mm’lik körelme 1 Cerchar’a değerine eşit olmaktadır. Cerchar (1986), Thuro ve Plinninger (1998) göre Cerchar aşındırıcılık indeksi sınıflandırması Tablo 2.22’de verilmiştir. Cerchar aşındırıcılık indeksini belirlemek için HRC 40-42 ve HRC 54-56 uçlarla yapılan ölçüm sonuçları sırasıyla Tablo 2.23 ve Tablo 2.24’de verilmiştir.



Şekil 2.17. Cerchar aşındırıcılık aleti ve deneyde kullanılan kayaç örnekleri



Şekil 2.18. Cerchar aşındırıcılık deneyinde kullanılan uçlar ve mikroskop altında okunması



Şekil 2.19. Aşınma sonrası uçların mikroskop altında bir görünüşü

Tablo 2.22. Cerchar aşındırıcılık sınıflandırması

CAI sınıfı	CAI
Çok az aşındırıcı	< 0.5
Hafif aşındırıcı	0.5 – 1.0
Aşındırıcı	1.0 – 2.0
Çok aşındırıcı	2.0 – 4.0
Oldukça fazla aşındırıcı	> 4.0

Tablo 2.23. Cerchar aşındırıcılık indeksinin HRC 40-42 uçlara göre belirlenmiş değerleri

Numune no	En yüksek Değer	En düşük Değer	\bar{X}	Sd	CV
Ç1	3,14	3,14	3,11	0,02	0,8
Ç2	3,36	2,47	2,85	0,41	14,4
Ç3	3,26	3,05	3,16	0,08	2,5
Ç4	2,95	2,57	2,86	0,14	5,0
Ç5	2,82	2,78	2,80	0,02	0,6
M1	2,45	2,38	2,41	0,03	1,3
M2	3,14	2,89	3,02	0,10	3,5
M3	3,40	3,24	3,31	0,06	1,9
M4	3,12	2,63	2,93	0,21	7,2
M5	3,02	2,25	2,76	0,31	11,2
M6	3,53	3,38	3,44	0,07	2,0

\bar{X} : Ortalama değer, Sd: Standart sapma, CV: Varyasyon katsayısı

Tablo 2.24. Cerchar aşındırıcılık indeksinin HRC 54-56 uçlara göre değerleri ve sınıfları

Numune no	En yüksek Değer	En düşük Değer	\bar{X}	Sd	CV	CAI sınıfı
Ç1	2,32	2,32	2,19	0,12	5,4	Çok aşındırıcı
Ç2	2,47	1,58	1,92	0,42	22,1	Aşındırıcı
Ç3	2,28	1,85	2,10	0,18	8,6	Çok aşındırıcı
Ç4	1,78	1,50	1,61	0,12	7,4	Aşındırıcı
Ç5	1,96	1,10	1,58	0,36	22,6	Aşındırıcı
M1	2,52	0,65	1,36	0,90	66,4	Aşındırıcı
M2	1,98	1,78	1,89	0,08	4,3	Aşındırıcı
M3	3,68	1,58	2,09	0,79	38,1	Çok aşındırıcı
M4	2,12	1,58	1,84	0,24	12,9	Aşındırıcı
M5	1,54	1,48	1,51	0,02	1,4	Aşındırıcı
M6	2,51	2,30	2,39	0,09	3,6	Çok aşındırıcı

\bar{X} : Ortalama değer, Sd: Standart sapma, CV: Varyasyon katsayısı

2.5.4. Delinebilirlik Deneyler

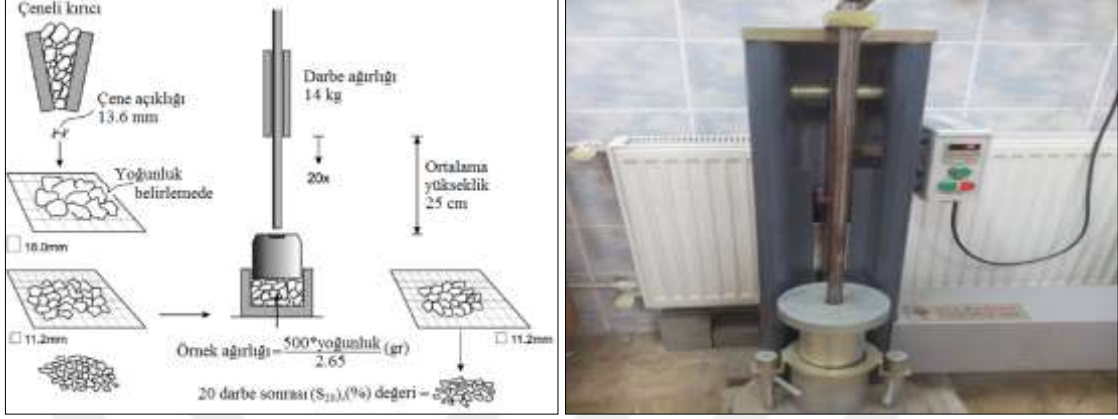
Delinebilirlik deneylerinden Delme Oranı İndeksi (DRI) değerleri belirlenmiştir. Bu deneydeki amaç kayacın yüzey sertliğini ve delmeye karşı olan direncini bulmaktır. Delme oranı indeksini belirlemek için iki deney yapılmıştır.

1. Kırılma deneyi (brittleness test), S_{20}
2. Sievers minyatür delme deneyi (Sievers miniature drill-test value), SJ

2.5.4.1. Kırılma Deneyi

Kırılma deneyi darbe sonucu kayacın kırılmaya karşı gösterdiği direncin dolaylı ölçülmesini belirleyen bir deney yöntemidir (Yaralı ve Kahraman, 2011). Bu deney için Maçka ve Çaykara tünellerinde alınan kayaç örnekleri öncelikle çeneli kırıcıdan 13,6mm açıklığından geçirilerek kırılıp daha sonra 16 mm ve 11,2 mm eleklerden elinmiştir. 16 mm ile 11,2 mm arasında kalan malzemedan $2,65 \text{ g/cm}^3$ eşdeğer yoğunluk için 500 g örnek hazırlanmış ve havan içine konulmuştur. Havanın konulan malzeme üzerine 25 cm yükseklikten 14 kg ağırlığındaki çekiç havan içindeki malzemeye 20 defa düşürülmüş ve kırılan malzeme 11.2 mm'lik elekten elenmiştir. -11.2 mm'lik malzeme miktarı deneyin başında havan içine konulan malzemeye ağırlıkça oranlanmıştır. Yüzde olarak bulunan değer kayacın kırılma değerine eşittir (Dahl, 2003). Şekil 2.20'de kırılma deneyi

düzeneği ve numune hazırlama işlemi gösterilmiştir. Kırılmalık sınıflaması Tablo 2.25 ve kırılmalık deney sonuçları ise Tablo 2.26'da verilmiştir.



Şekil 2.20. Kırılmalık deneyinin yapılışı, a) deney düzeneği, b) deney aleti

Tablo 2.25. Kırılmalık (S_{20}) sınıflaması (Dahl 2003).

Sınıf	S_{20} Değeri
Oldukça düşük	<30
Çok düşük	31-34
Düşük	35-41
Orta	42-50
Yüksek	51-59
Çok yüksek	52-67
Oldukça yüksek	>67

Tablo 2.26. Kırılgenlik deneyinden (S_{20}) elde edilen değerler ve sınıfları

Numune no	En yüksek Değer (%)	En düşük Değer (%)	\bar{X} (%)	Sd	CV	S_{20} sınıfı
Ç1	41	37	39	2,2	5,53	Düşük
Ç2	48	44	46	1,7	3,60	Orta
Ç3	43	41	42	0,8	1,79	Orta
Ç4	52	51	52	0,3	0,65	Çok yüksek
Ç5	53	52	52	0,5	1,01	Çok yüksek
M1	43	41	42	0,8	1,95	Orta
M2	39	37	38	0,7	1,96	Düşük
M3	37	35	36	0,9	2,58	Düşük
M4	42	39	41	1,4	3,34	Düşük
M5	45	43	44	1,2	2,80	Orta
M6	34	33	34	0,4	1,05	Çok düşük

\bar{X} : Ortalama değer, Sd: Standart sapma, CV: Varyasyon katsayısı

2.5.4.2. Sievers Minyatür Delme Deneyi

Kayacın yüzey sertliğinin veya delmeye karşı direncin bir ölçüsü olarak tanımlanan bu deney yöntemi, 1950'li yıllarda H. Sievers tarafından geliştirilmiş olup birçok çalışmada kayaçların delinebilirlik özelliklerinin değerlendirilmesinde dikkate alınan bir deney yöntemidir. Şekil 2.21'de bu deney yönteminin genel hatları gösterilmektedir. Sievers minyatür delme deneyi, 200 dev/dak içinde kayaç da açılan delik boyunun mm cinsinden ölçüsünü vermektedir. Bu deney için Maçka ve Çaykara tünellerinde alınan kayaç örnekleri uygun boyutlarında hazırlandıktan sonra delme aletinde yerine yerleştirilerek 20 kg'lık ağırlık altına sıkıştırılmıştır. Bu işlem sırasında matkabın ucu ile kayacın yüzey teması dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Deney bittiği zaman açılan delik boyları bir elektronik mikrometre veya kumpas ile ölçülerek elde edilen değerlerin ortalaması hesaplanır. Ortalama delik boyları 10 ile çarpılarak Sievers minyatür delme değeri bulunur. Tablo 2.27'de Dahl, (2003) göre Sievers minyatür delme deneyi sınıflaması verilmiştir. SJ deneylerinde kullanılan kayaç örnekleri ve uçlar Şekil 2.22'de gösterilmektedir. Tablo 2.28 Sievers minyatür delme deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 2.21. Sievers minyatür delme düzeneği ve delme deneyi aleti



Şekil 2.22. SJ deneylerinde kullanılan uçlar ve deneyde kullanılan kayaç örnekleri

Tablo 2.27. Sievers minyatür delme (SJ) değerlerinin sınıflaması (Dahl, 2003).

Sınıf	SJ Değeri
Oldukça düşük	<2
Çok düşük	2-3
Düşük	4-6
Orta	7-18
Yüksek	19-55
Çok yüksek	56-86
Oldukça yüksek	>86

Tablo 2.28. Sievers minyatür delme değerleri ve sınıfları

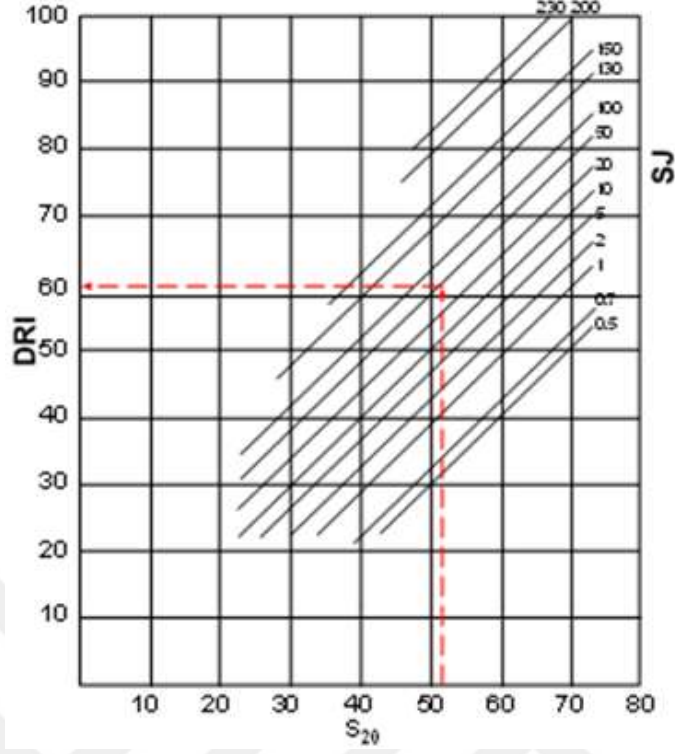
Numune no	En Yüksek Değer	En Düşük Değer	\bar{X}	Sd	CV	SJ sınıfı
Ç1	8	5	5,80	1,5	25,34	Düşük
Ç2	18	11	14,55	3,6	24,47	Orta
Ç3	9	6	7,48	1,4	18,96	Orta
Ç4	17	13	15,58	2,1	13,31	Orta
Ç5	32	29	30,43	1,4	4,55	Yüksek
M1	116	30	90,05	40,1	44,52	Oldukça düşük
M2	18	16	16,85	0,8	4,95	Orta
M3	8	4	5,65	1,9	34,46	Düşük
M4	36	25	29,65	5,2	17,66	Yüksek
M5	55	44	50,13	4,8	9,66	Yüksek
M6	3,0	2,0	2,50	0,4	16,33	Çok düşük

\bar{X} : Ortalama değer, Sd: Standart sapma, CV: Varyasyon katsayısı

2.5.4.3. Delme Oran İndeks Tayini

Delme oran indeks darbeleri delicilerin delme oranını tahmin etmek için geliştirilmiştir. 1950'lerde geliştirilen DRI, 1972'den günümüze kadar tünel açmada uygulanmıştır. DRI yerinde yapılan ölçümlerle doğrudan delme oranını belirleyen bir gösterge değildir. Göreceli bir ölçü olmasının yanında aynı zamanda maksimum kaya dayanımı belirlemede kullanılan bir parametredir.

Delme oranı indeksi Şekil 2.23'de verilen grafik yardımıyla bulunur. Grafiğin altındaki kırılma S_{20} değeri ile Sievers minyatür delme değeri karşılaştırılarak DRI değeri bulunur. Tablo 2.29'da Dahl (2003) göre delme oranı indeksinin sınıflandırılması verilmiştir. Kayaçların delme oranı indeks sonuçları Tablo 2.30'de verilmiştir.



Şekil 2.23. Delme oranı indeksi (DRI) değerlerinin değerlendirilmesi için kullanılan diyagram (Dahl, 2003).

Tablo 2.29. Delme oranı indeksinin sınıflandırılması (Dahl, 2003)

Sınıf	DRI değeri
Oldukça düşük	≤ 25
Çok düşük	25-32
Düşük	33-42
Orta	43-57
Yüksek	58-69
Çok yüksek	70-82
Oldukça yüksek	≥ 82

Tablo 2.30. Kayaçların delme oranı indeksi değerleri ve sınıfları

Numune no	S ₂₀ (%)	SJ (mm)	DRI (%)	Sınıf
Ç1	39,1	5,8	38	Düşük
Ç2	46,0	14,6	48	Orta
Ç3	42,2	7,5	41	Düşük
Ç4	51,8	15,6	53	Orta
Ç5	52,3	30,4	58	Yüksek
M1	42,0	90,1	52	Orta
M2	38,1	16,9	40	Düşük
M3	35,7	5,7	32	Çok düşük
M4	40,7	29,7	48	Orta
M5	43,6	50,1	51	Orta
M6	33,7	2,5	28	Çok düşük

S₂₀: Kırılgenlik deneyi, SJ: Sievers minyatür deneyi, DRI: Delme oranı indeksi

2.5.5. Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

Maçka ve Çaykara tünellerinde alınan kayaç örneklerinin mineralojik ve petrografik özelliklerini belirlemek için Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümünde kayaç örneklerinden ince kesitler hazırlanmış ve mikroskop altında incelemesi yapılmıştır (Tablo 2.31).

Tablo 2.31. Maçka ve Çaykara tünellerinden alınan örneklerin tanımlanması

Tünel adı	Kayaç no	Kayaç Adı	Kayaç Dokusu
Maçka	M1	Altere Bazalt	Mikrolitik porfirik doku, hyalomikrolitik porfirik doku
	M2	Altere Bazalt	Mikrolitik porfirik doku, hyalomikrolitik porfirik doku
	M3	Altere Bazalt	Mikrolitik porfirik doku, hyalomikrolitik porfirik doku
	M4	Altere litik kristal bazaltik tuf	
	M5	Altere litik kristal bazaltik tuf	
	M6	Altere litik kristal bazaltik tuf	

Tablo 2.31'in devamı

	Ç1	Altere Dasit	Mikrogranüporfirik doku
	Ç2	Altere Dasit	Mikrogranüporfirik doku
Çaykara	Ç3	Altere Dasit	Mikrogranüporfirik doku
	Ç4	Altere Dasit	Mikrogranüporfirik doku
	Ç5	Altere Dasit	Mikrogranüporfirik doku

M1, M2 ve M3 nolu kayaç örnekleri altere bazalt olup mikrolitik porfirik doku ve hyalo-mikrolitik porfirik dokuludur. Başlıca mineralleri plajiyoklas, klinopiroksen ve opak mineralleri oluşturmaktadır. Sekil 2.24'de kayaçların mikroskop altındaki ince kesit fotoğrafları verilmiştir.

Plajiyoklas: Kayaç içerisinde genellikle özşekilli ve yarı özşekilli fenokristaller ve daha az oranda ise mikrofeno-kristaller halinde gözlenmektedirler. Ayrıca, hamur içerisinde mikrolitler halinde gözlenmektedirler. Epidotlaşma ve karbonatlaşma oldukça yaygındır.

Klinopiroksen: Genellikle yarı özşekilli mikrofeno-kristaller halinde gözlenmektedir. Oldukça çatlaklı ve kırıklı olarak gözlenmiş olup, kloritleşmişlerdir.

Opak Mineral: Oldukça küçük yuvarlağımsı ve köşeli taneler halinde gözlenmektedirler.

Ayrışma: Ayrışma ürünü olarak epidotlaşma, kloritleşme ve karbonatlaşma gözlenmektedir.

M4, M5 ve M6 nolu kayaç örnekleri altere litik kristal bazaltik tüf olup, kayaç dokusu belirgin değildir. İçerdiği başlıca bileşenler olarak kristal/kristal parçaları, kayaç parçalarından oluşmaktadır. Şekil 2.25'de kayaçların mikroskop altındaki ince kesit görünümleri gösterilmiştir.

Kristal/kristal parçaları: Genelde özşekilsiz plajiyoklas ve klinopiroksenlerden oluşmaktadır.

Kayaç parçaları: Bazaltik kayaç parçalarından oluşmaktadır.

Ç1, Ç2, Ç3, Ç4 ve Ç5 nolu örnekler altere dasit olup, mikrogranüporfirik dokuludur. İçerdiği başlıca mineraller kuvars, plajiyoklas, biyotit ve opak mineralleridir. Sekil 2.26'da kayaçların mikroskop altındaki ince kesitlerinin fotoğrafları gösterilmiştir.

Kuvars: Nadiren özşekilsiz, yuvarlağımsı ve çatlaklı fenokristal olarak, daha çok eş boyutlu mikrotaneler halinde hamurda gözlenirler. Hamurda devitrifikasyon ürünü olarak

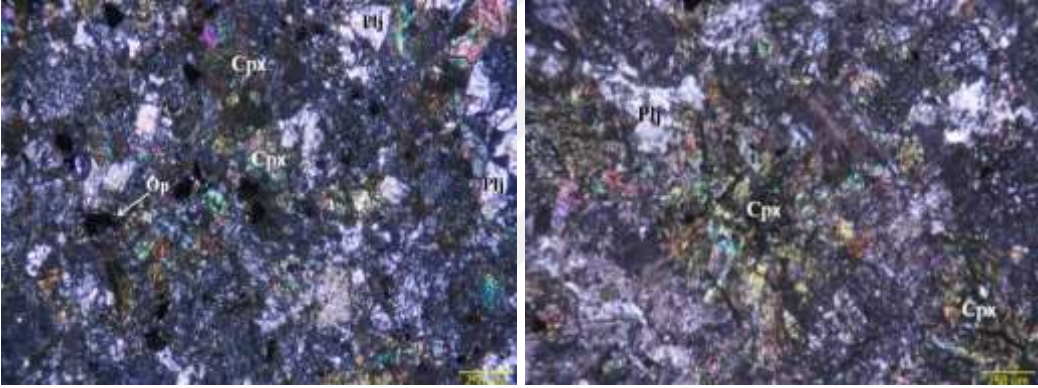
ikincil kuvarslar gözlenmektedir. İri fenokristal olarak gözlenen kuvarslar ise kenarlarından itibaren yenme-kemirilme dokusu göstermektedir.

Plajiyoklas: Kayaç içerisinde çoğunlukla özşekilsiz mikrofenokristaller ve hamurda ise mikrolitler halinde gözlenmektedirler. Serizitleşme ve karbonatlaşma oldukça yaygındır.

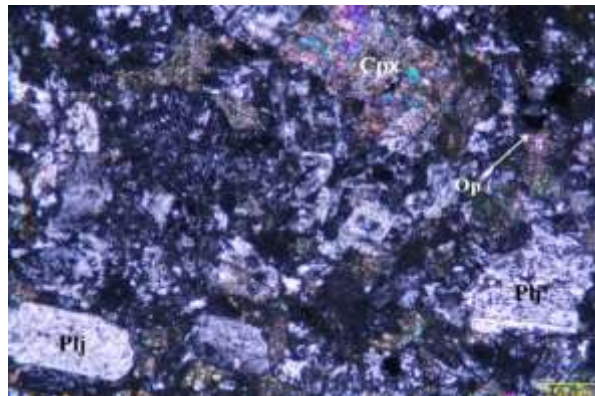
Biyotit: Çoğunlukla çok ince ve küçük latalar halinde gözlenmekte olup, tamamen kloritleşmiş ve opaklaşmışlardır.

Opak mineral: Genellikle çok nadir olarak hamurda yuvarlağımsı küçük taneler halinde gözlenmektedirler.

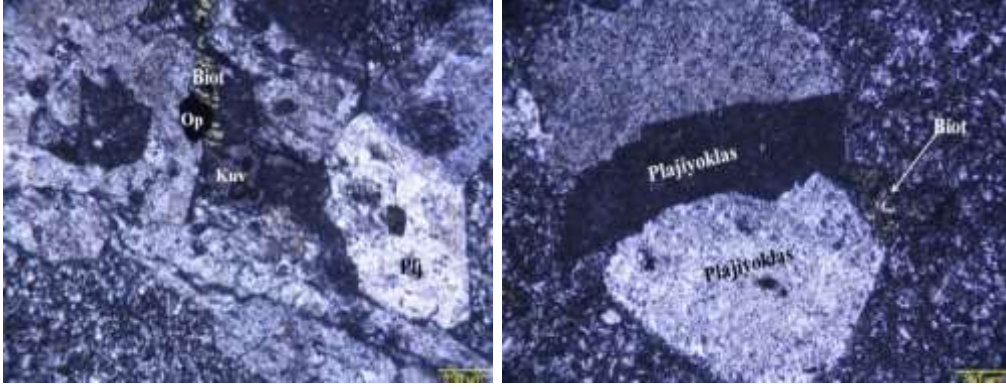
Ayrışma: Ayrışma ürünü olarak serizitleşme, silisleşme, kloritleşme ve karbonatlaşma gözlenmektedir.



Şekil 2.24 Maçka tünelineki altere bazalt ince kesit örneklerinin çift nikol görüntüsü ve içerdiği mineraller. (Plajiyoklas (Plj), Opak mineral (Op), Klinopiroksen (Cpx))



Şekil 2.25 Maçka tünelineki altere litik kristal bazaltik tüfe ince kesit örneklerinin çift nikol görüntüsü ve içerdiği mineraller: (Plajiyoklas (Plj), Opak mineral (Op), Klinopiroksen (Cpx))



Şekil 2.26 Çaykara tünelineindeki altere dasite ince kesit örneklerinin çift nikol görüntüsü ve içerdiği mineraller: (Plajiyoklas (Plj), Opak mineral (Op), Klinopiroksen (Cpx), Biotit (Biot))



3. DENEY VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışma Maçka ve Çaykara karayolu tünellerinden yapılmış olup, arazi ve laboratuvar olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmalarında delici Jumbo makinalarının delme sırasındaki spesifik enerji değerleri, delik delme hızları, bit aşınma hızları hesaplanmış ve buton aşınma şekilleri incelenmiştir. Laboratuvar çalışmalarında ise delinebilirlik, aşındırıcılık, fiziko-mekanik ve Sievers minyatür delme aletine ait spesifik enerji değeri ve delik delme hızları hesaplanmıştır. Elde edilen verileri istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve aşağıdaki başlıklar altında verilmiştir.

Arazi çalışmaları;

1. Jumbo makinasının delik delme hızı,
2. Jumbo makinasının spesifik enerji değerleri,
3. Bit aşınma hızı,
4. Buton aşınma şekli,

Laboratuvar çalışmaları;

1. Sievers minyatür testi ile delme hızı,
2. Sievers minyatür testi spesifik enerji değerleri,
3. Cerchar aşındırıcılık indeksi, (HRC40-42 ve HRC54-56)

3.1. Arazi Çalışmaları

3.1.1. Jumbo Makinasının Delik Delme Hızının Değerlendirilmesi

Maçka tüneline kullanılan Atlas Copco Rocket Boomer 282 ve Çaykara tüneline kullanılan Sandvik DT820 Jumbo makinalarının delik delme hızları ile diğer deney sonuçları arasında Korelasyon analizleri kurularak istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve sonuçları Tablo 3.1’de verilmiştir. Jumbo makinalarının darbe, baskı ve rotasyon değerleri sabit tutularak tünel kazı aynalarında delik delme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1. Jumbo makinalarının delik delme hızları ile indeks, fiziksel ve mekanik parametreler arasındaki ilişkiler

Makina	Model	Korelasyon tipi	Korelasyon katsayısı (R ²)	Eşitlik no
Atlas Copco Roket Boomer 282	$DH = -0.0123\sigma_c + 3.5036$	Doğrusal	0.972	(3.1)
	$DH = -0.106\sigma_t + 3.4942$	Doğrusal	0.958	(3.2)
	$DH = -0,1213I_{s(50)} + 2,9091$	Doğrusal	0,942	(3.3)
	$DH = -0.0006V_p + 5.3465$	Doğrusal	0.861	(3.4)
	$DH = -0.0845R + 6.0601$	Doğrusal	0.881	(3.5)
	$DH = -0.0374Q + 4.6839$	Doğrusal	0.954	(3.6)
	$DH = 0.2221n + 2.1467$	Doğrusal	0.924	(3.7)
	$DH = -0,4882DBH + 15,46$	Doğrusal	0,826	(3.8)
	$DH = 0,0163DRI + 1,8302$	Doğrusal	0.956	(3.9)
	$DH = 0.1355SJDH + 2.4039$	Doğrusal	0.922	(3.10)
	$DH = -0.7902CAI_{40} + 4.939$	Doğrusal	0.886	(3.11)
	$DH = -0.4511CAI_{55} + 3.4509$	Doğrusal	0.838	(3.12)
Sandvik DT820	$DH = -0.0074\sigma_c + 2.6932$	Doğrusal	0.984	(3.13)
	$DH = -0.0554\sigma + 2.6628$	Doğrusal	0.969	(3.14)
	$DH = -0,1032I_{s(50)} + 2,4503$	Doğrusal	0,970	(3.15)
	$DH = -0.0003V_p + 3.7751$	Doğrusal	0.980	(3.16)
	$DH = -0.039R + 3.7669$	Doğrusal	0.966	(3.17)
	$DH = -0.0259Q + 3.6693$	Doğrusal	0.967	(3.18)
	$DH = 0.1821n + 1.8437$	Doğrusal	0.939	(3.19)
	$DH = -0,2013DBHA + 7,6274$	Doğrusal	0,871	(3.20)
	$DH = 0,0144DRI + 1,5162$	Doğrusal	0,980	(3.21)
	$DH = 0,0443SJDH + 1,983$	Doğrusal	0,869	(3.22)
	$DH = -0.4101CAI_{40} + 3.3474$	Doğrusal	0.944	(3.23)
	$DH = -0,3985CAI_{55} + 2,8618$	Doğrusal	0.907	(3.24)

DH: Delme hızı, σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, σ_t : Çekme dayanımı, $I_{s(50)}$: Nokta yükü dayanım indeksi, V_p : P dalga hızı, R: Klasik Schmidt çekici, Q: Silver Schmidt çekici, DBHA: Doğal birim hacim ağırlık, CAI: Cerchar aşındırıcılık indeksi, DRI: Delme oranı indeksi

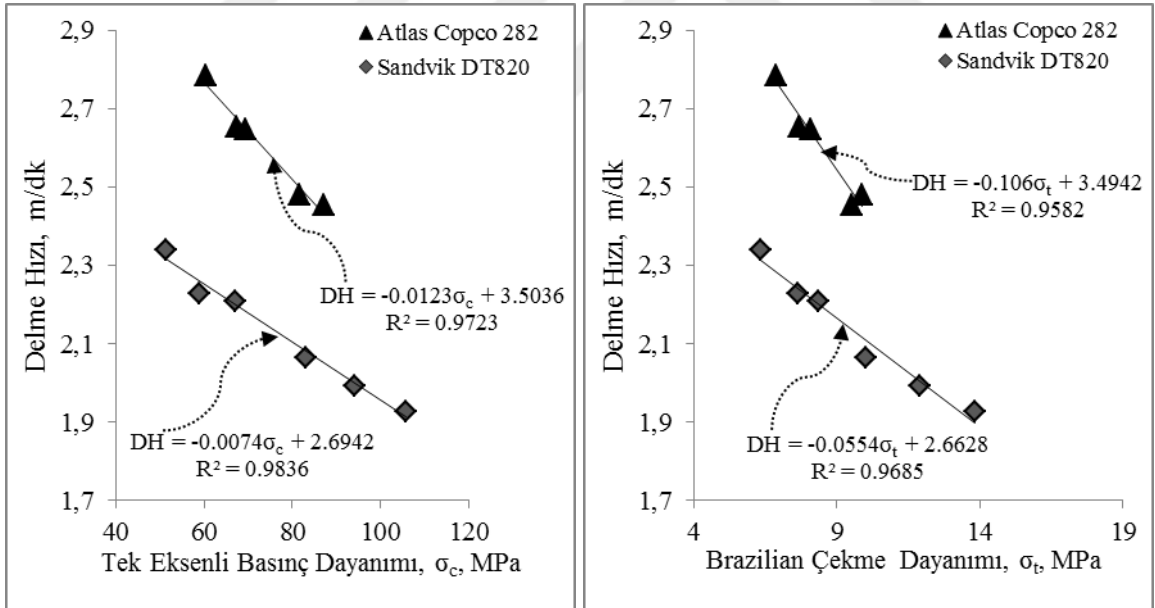
Jumbo makinalarının delik delme hızları ile kayaların fiziko-mekanik özelliklerinden tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükü dayanımı indeksi, Brazilian çekme dayanımı, ultrasonik hız, Schmidt çekici (Klasik ve Silver), görünür porozite ve doğal birim hacim ağırlık sonuçları arasında kuvvetli ilişkiler elde edilmiştir (Şekil 3.1-3.4). Tünel kazı aynalarında kayacın dayanımı, sertliği ve birim hacim ağırlık değeri arttıkça delik delme hızı lineer olarak azaldığı görülmüştür. Ayrıca, ultrasonik hız değeri arttıkça

delik delme hızının düştüğü görülmüştür. Benzer şekilde görünür porozite değeri ile delme hızı arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur.

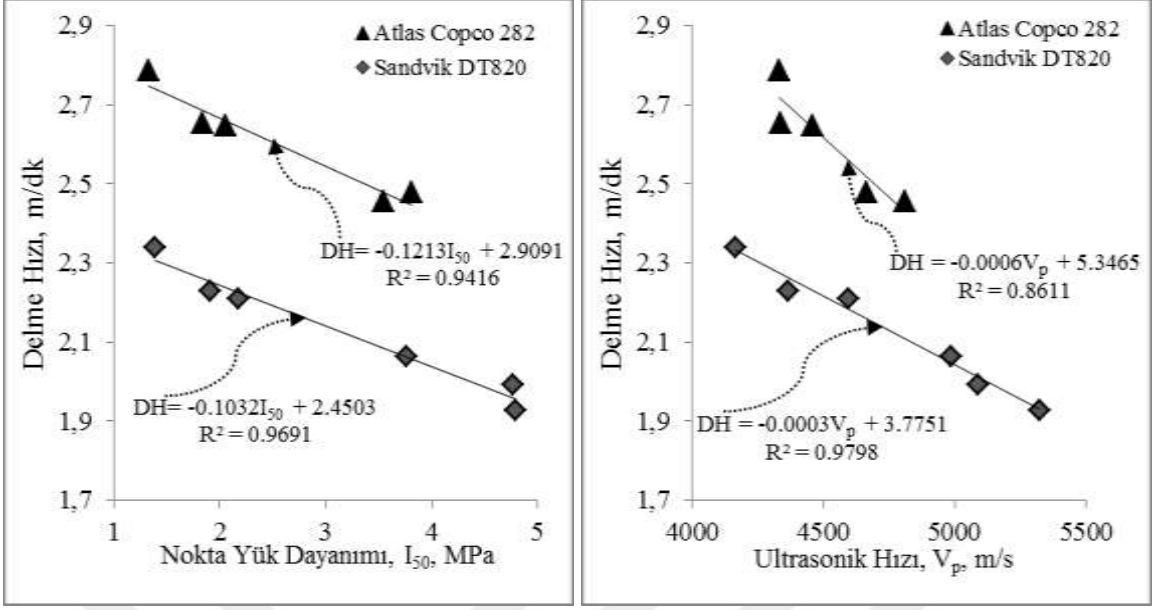
Kayaçların dayanım özellikleri ile Atlas Copco 282 ve Sandvik DT820 Jumbo makinaların delik delme hızları karşılaştırıldığında, en iyi ilişki tek eksenli basınç dayanımdan, sırasıyla $R^2 = 0,97$ ve $R^2 = 0,98$ olan lineer ilişkilerden elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, literatürde yapılan çalışmalar ile uyumluluk göstermektedir (Birinci ve Akçın, 1990; Thuro ve Spuan, 1996; Thuro, 1997; Bilgin ve Kahraman, 2003; Akün ve Karpuz, 2005; Bilgin vd., 2005; Yaşar vd., 2011; Hoseinie, 2014). Demirdağ vd. (2014) tarafında yapılan çalışmada delme hızı ile ultrasonik hız arasında azalan bir ilişkinin olduğunu belirtmiştir. Benzer ilişkinin Farrokh vd. (2012) tarafında kayaç dayanımı ile TBM'lerin ilerleme hızı arasında olduğunu belirlemiştir.

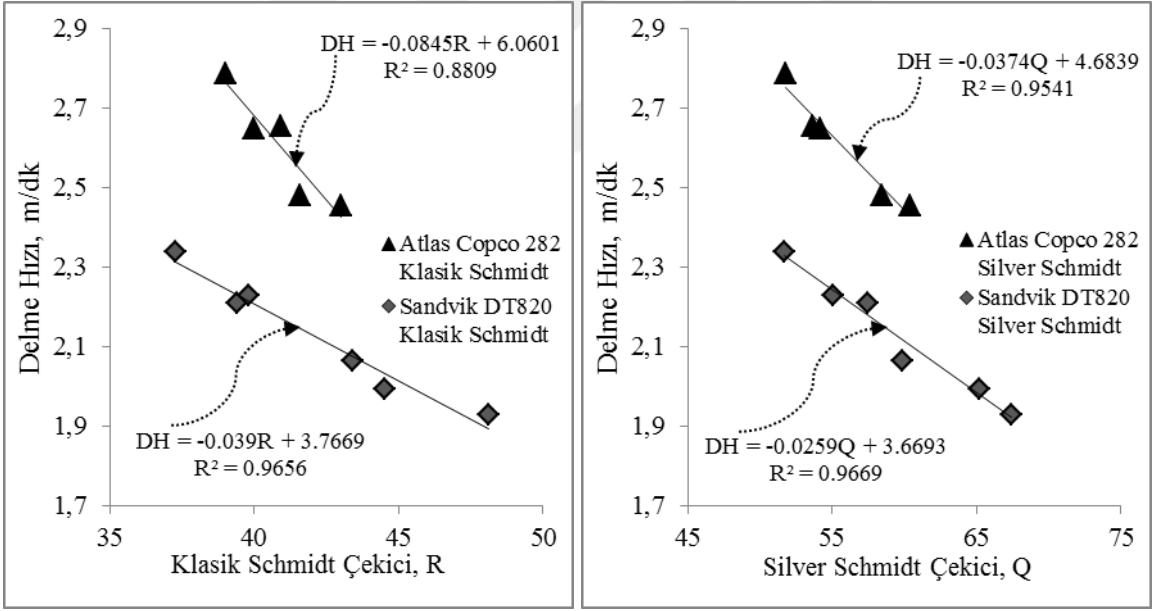
Literatürde, kayaçların fiziksel özelliklerinden birim hacim ağırlık ve porozite değerlerinin delme hızının üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır (Thuro vd., 2002; Kahraman vd., 2003; Hoseinie vd., 2014; Demirdağ vd., 2014).



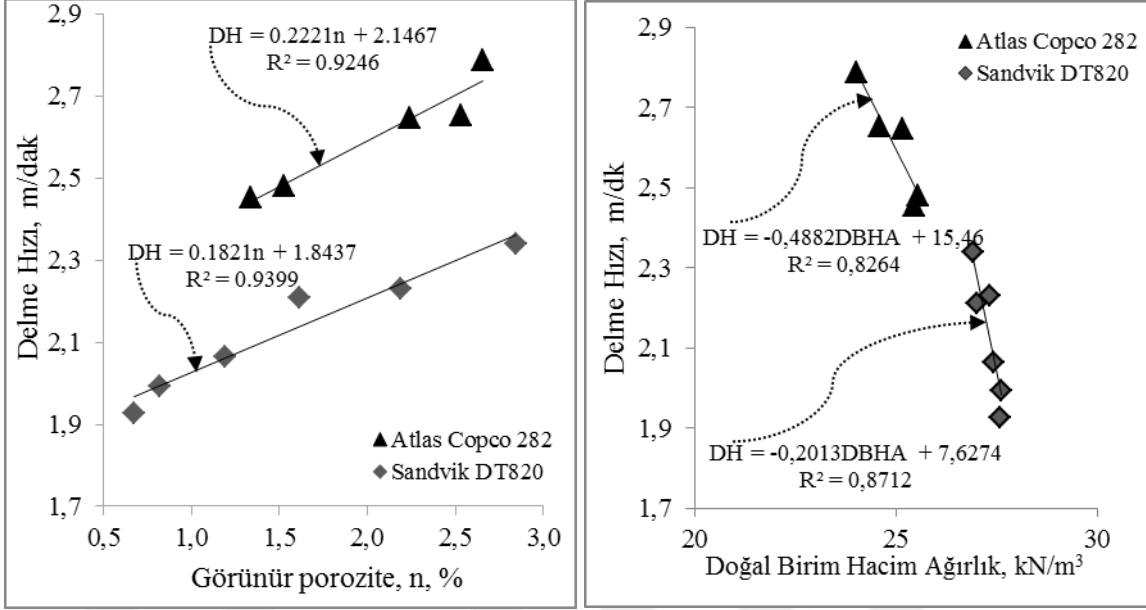
Şekil 3.1. Jumbo makinalarının delme hızları ile tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 3.2. Jumbo makinalarının delme hızları ile nokta yükü dayanım indeksi ve ultrasonik hızı arasındaki ilişki



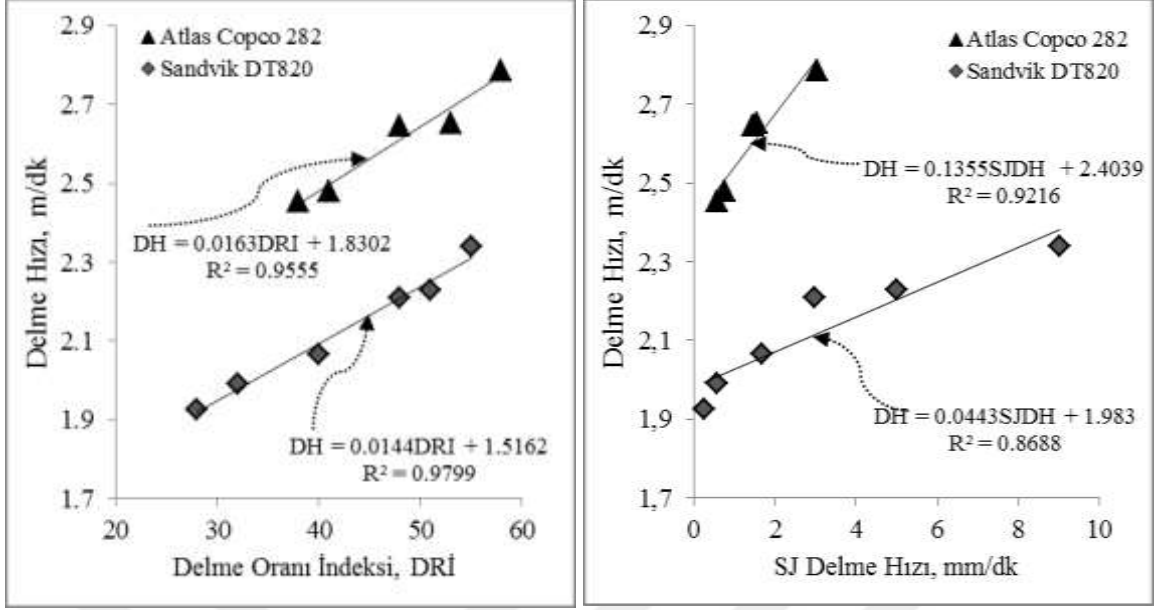
Şekil 3.3. Jumbo makinalarının delme hızları ile klasik Schmidt çekici ve Silver Schmidt çekici arasındaki ilişki



Şekil 3.4. Jumbo makinalarının delme hızları ile görünür porozite ve doğal birim ağırlık arasındaki ilişki

Jumbo makinalarının delik delme hızları ile sievers minyatür delme testi ve delme oranı indeksi arasındaki ilişki Şekil 3.5’de verilmiştir. Laboratuvarda gerçekleştirilen delik delme hızı ile arazide ölçülen delik delme hızları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.5 incelendiğinde Sievers minyatür delme aletiyle gerçekleştirilen delme deneyinde delme hızı arttıkça Jumbo makinalarında ölçülen delik delme hızının da lineer olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca, Şekil 3.5’te görüldüğü gibi delme oranı indeksi arttıkça jumbo makinasının delik delme hızı artmaktadır. Bu değer kayaçların DRI sınıflandırması ile kıyasladığında DRI sınıflandırılması arttıkça kayaçlarda delik delme hızının da yükseldiği görülmüştür.

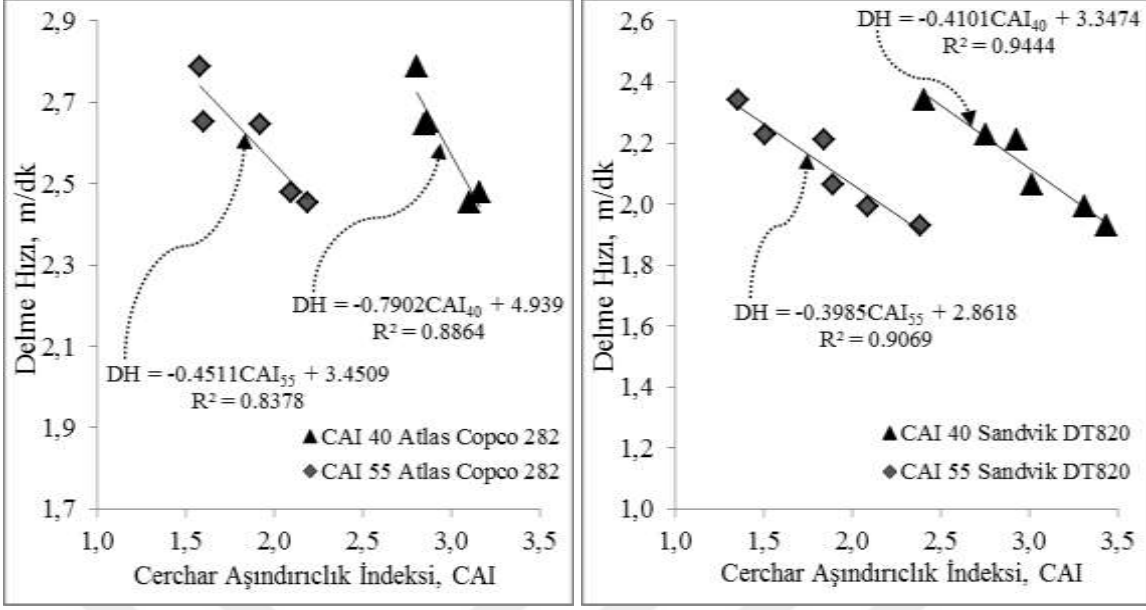
Bu çalışma sonuçları literatürde yapılan çalışmalara paralellik göstermektedir. Olsen ve Blendheim (1970) darbeli delicilerin delme hızı ile delme oranı indeksi arasında güçlü ilişki olduğunu belirlemiştir.



Şekil 3.5. Jumbo makinalarının delme hızları ile delme oran indeksi ve sievers minyatur testi delme hızı arasındaki ilişkisi

Jumbo makinalarının delik delme hızları ile Cerchar aşındırıcılık indeksi arasındaki ilişki Şekil 3.6’da verilmiştir. Bu çalışmada, iki farklı sertlikte (HRC 40 ve HRC 55) uçlar kullanılmıştır. HRC 40 ve HRC 55 sertlik değerinde uçlarla ölçülen Cerchar aşındırıcılık değerlerinin artmasıyla Jumbo makinasının delik delme hızlarının düştüğü görülmüştür. Bu durumda kayaçların aşındırıcılık değeri arttıkça delik delme hızlarının lineer bir şekilde düştüğünü göstermektedir. Yani kayaç içinde bulunan aşındırıcı mineral içeriği arttıkça kayaçların delinebilirlik özelliği zorlaşmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde delik delme hızı ile kayaç aşındırıcılığı arasında ilişki olduğu belirlenmiştir (Kahraman vd., 2003; Hoseinie vd., 2014; Demirdag vd., 2014).



Şekil 3.6. Jumbo makinalarının delme hızları ile Cerchar aşındırıcılık indeksi arasındaki ilişki

3.1.2. Jumbo Makinalarının Spesifik Enerji Değerlerinin Değerlendirilmesi

Maçka ve Çaykara tünellerinde kullanılan Atlas Copco Rocket Boomer 282 ve Sandvik DT820 delici Jumbo makinalarının delik delme sırasında harcadığı spesifik enerji değerleri ile çalışma kapsamında gerçekleştirilen diğer deney sonuçları, korelasyon analizleri kurularak istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve elde edilen modeller Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri ile indeks, fiziksel ve mekanik parametreler arasındaki ilişkiler

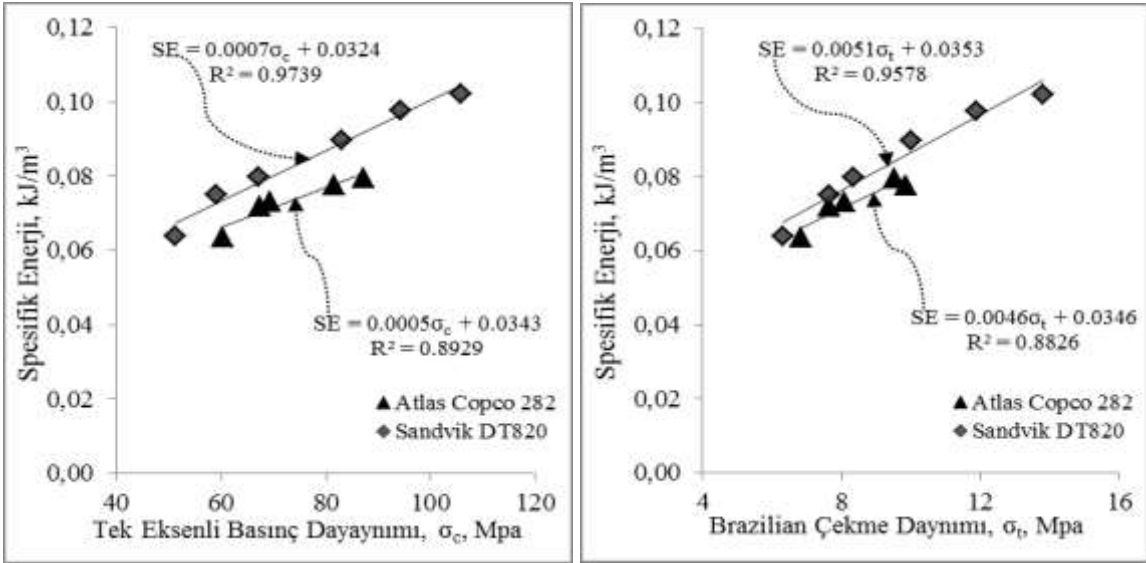
Makina	Model	Korelasyon tipi	Korelasyon katsayısı (R ²)	Eşitlik no
Atlas Copco Rocket Boomer 282	$SE = 0,0005\sigma_c + 0,0343$	Doğrusal	0,893	(3.25)
	$SE = 0,0046\sigma_t + 0,0346$	Doğrusal	0,883	(3.26)
	$SE = 0,0051I_{s(50)} + 0,0603$	Doğrusal	0,820	(3.27)
	$SE = 0,1168\ln(V_p) - 0,9099$	Logaritmik	0,758	(3.28)
	$SE = 0,0016Q - 0,0156$	Doğrusal	0,855	(3.29)
	$SE = 0,0037R - 0,0781$	Doğrusal	0,831	(3.30)
	$SE = -0,0094n + 0,0924$	Doğrusal	0,814	(3.31)
	$SE = 0,0094DBHA - 0,1607$	Doğrusal	0,930	(3.32)
	$SE = -0,0007DRI + 0,1074$	Doğrusal	0,926	(3.33)
	$SE = 0,0321CAI_{40} - 0,0217$	Doğrusal	0,720	(3.34)
	$SE = 0,0199CAI_{55} + 0,0358$	Doğrusal	0,803	(3.35)
	$SE = -0,114\ln(JDH) + 0,182$	Logaritmik	0,942	(3.36)
$SE = 0,0091\ln(LSE) + 0,0415$	Logaritmik	0,962	(3.37)	
Sandvik DT820	$SE = 0,0007\sigma_c + 0,0324$	Doğrusal	0,974	(3.38)
	$SE = 0,0051\sigma_t + 0,0353$	Doğrusal	0,958	(3.39)
	$SE = 0,0095I_{s(50)} + 0,055$	Doğrusal	0,953	(3.40)
	$SE = 0,1512\ln(V_p) - 1,195$	Logaritmik	0,979	(3.41)
	$SE = 0,0024Q - 0,0589$	Doğrusal	0,978	(3.42)
	$SE = 0,0035R - 0,0643$	Doğrusal	0,931	(3.43)
	$SE = -0,0172n + 0,1113$	Doğrusal	0,975	(3.44)
	$SE = 0,0441DBHA - 1,1202$	Doğrusal	0,789	(3.45)
	$SE = -0,0013DRI + 0,1408$	Doğrusal	0,969	(3.46)
	$SE = 0,0386CAI_{40} - 0,0302$	Doğrusal	0,978	(3.47)
	$SE = 0,0374CAI_{55} + 0,0158$	Doğrusal	0,931	(3.48)
	$SE = -0,195\ln(JDH) + 0,2313$	Logaritmik	0,986	(3.49)
$SE = 0,0108\ln(LSE) + 0,0509$	Logaritmik	0,950	(3.50)	

SE: Spesifik enerji, σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, σ_t : Çekme dayanımı, $I_{s(50)}$: Nokta yükü dayanım indeksi, V_p : P dalga hızı, R: Klasik Schmidt çekici, Q: Silver Schmidt çekici, DBHA: Doğal birim hacim ağırlık, n: Görünür porozite CAI: Cerchar aşındırıcılık indeksi, DRI: Delme oranı indeksi, JDH: Jumbo delme hızı, LSE: Laboratuvar spesifik enerji

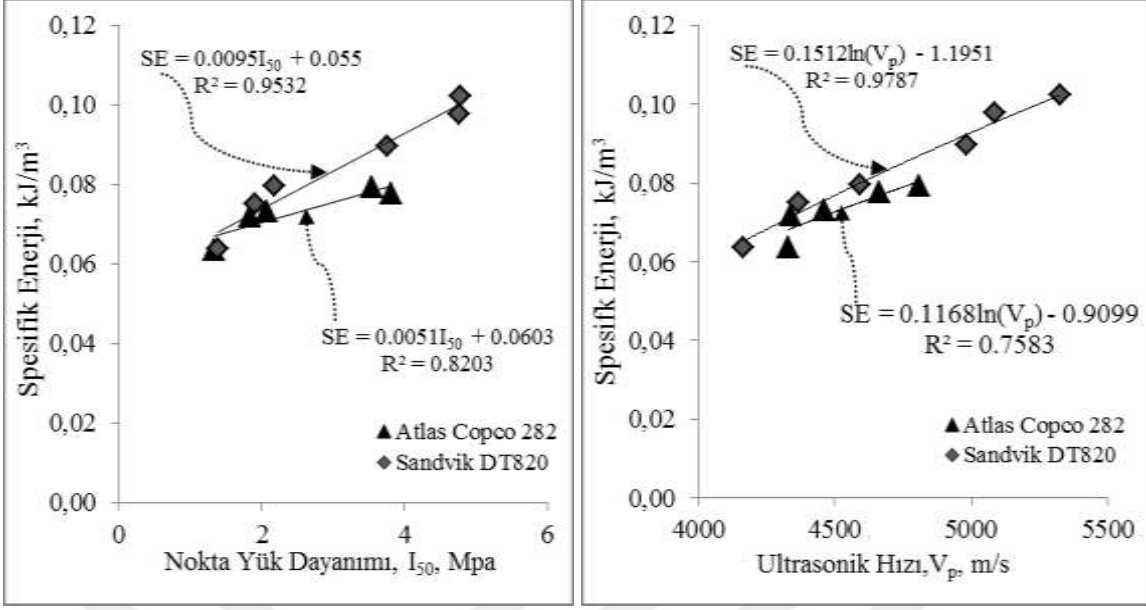
Delici Jumbo makinaları ait spesifik enerji değerleri ile laboratuvarında gerçekleşen fiziko-mekanik deneyler arasındaki ilişkiler Şekil 3.7-3.10'da gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde kayaların fiziko-mekanik özellikleri ile spesifik delme enerjileri arasında

kuvvetli ilişkiler olduğu görülmektedir. Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri ile kayaçların dayanım parametreleri arasındaki ilişkiler karşılaştırıldığında en iyi ilişki tek eksenli basınç dayanımdan elde edilmiştir. Bu ilişkide Atlas Copco 282 ve Sandvik DT820 makineleri ile sırasıyla $R^2 = 0,97$ ve $R^2 = 0,89$ olan lineer ilişkiler elde edilmiştir. Kayaçların dayanım özelliği arttıkça Jumbo makinalarının delik delmek için harcadığı enerji miktarları da artmaktadır.

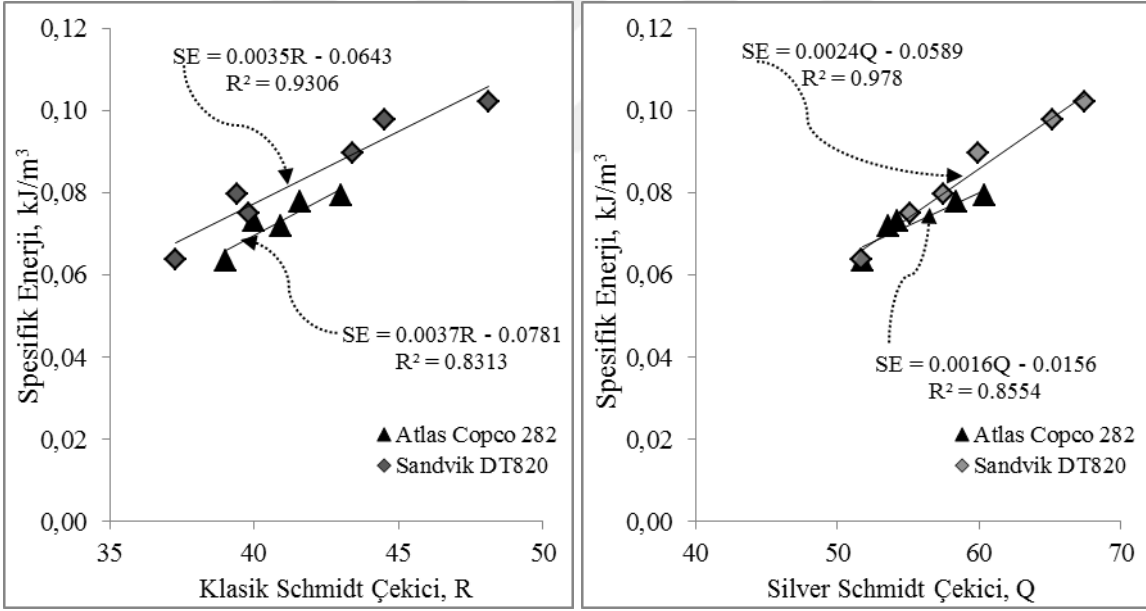
Literatür araştırmalarına bakıldığında kayaçların spesifik enerji değerleri ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde, yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile paralellik gösterdiği saptanmıştır. Sengun ve Altindag (2013), farklı doğal taşlar üzerinde yaptıkları çalışmada spesifik enerji ile kayaç dayanımı arasında ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Ahmadi vd., (2012) dayanımı yüksek olan kayaçların spesifik enerji değerlerinin yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca literatürde yapılan benzer çalışmalarda da spesifik enerji değeri ile kayaçların dayanım parametreleri arasında ilişki olduğu görülmektedir (Reddish ve Yaşar, 1996; Çopur vd., 2001; Balcı vd., 2004; Tiryaki ve Dikmen, 2006; Yaşar vd., 2011). McFeat-Smith ve Fowell (1979) galeri açma makinalarında spesifik enerji değerinin artmasıyla makinanın ilerleme hızının düştüğünü göstermişlerdir. Ayrıca, kayaçların fiziksel özelliklerinde porozite ile spesifik enerji arasındaki ilişki literatür çalışmaları ile benzerlik göstermektedir (Tiryaki ve Dikmen 2006; Sengun ve Altindag 2013).



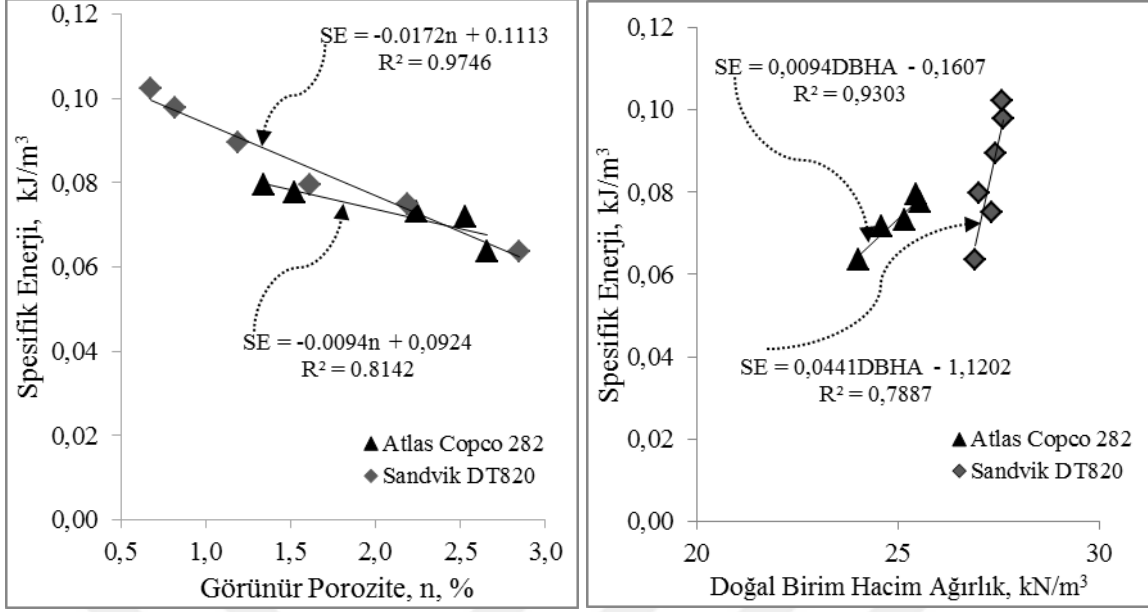
Şekil 3.7. Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri ile tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 3.8. Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri ile nokta yük dayanımı ve ultrasonik hızı arasındaki ilişki



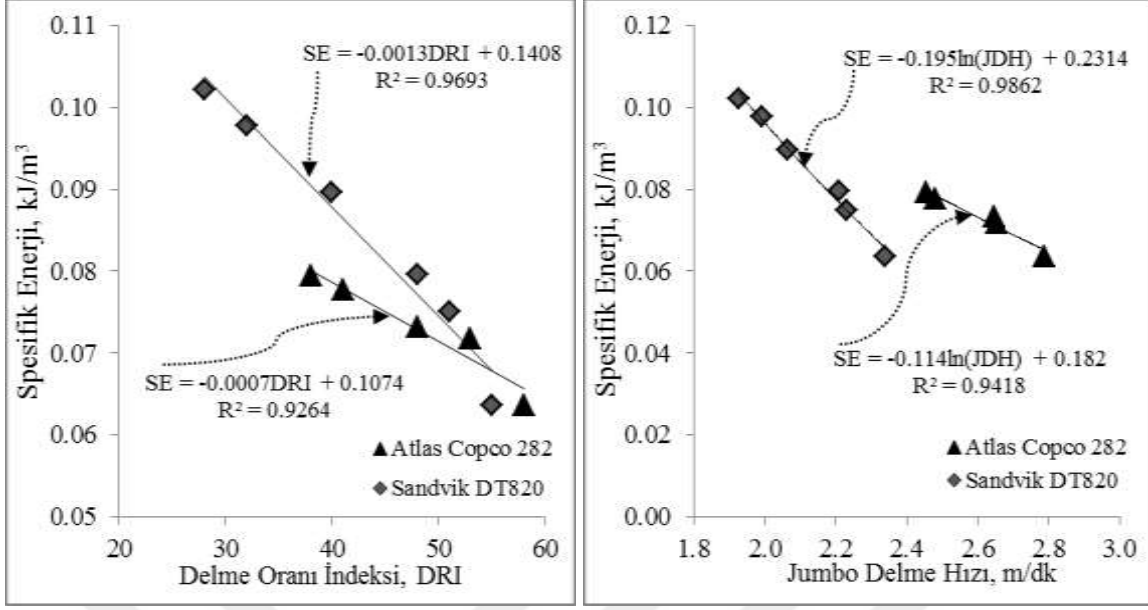
Şekil 3.9. Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri ile klasik Schmidt çekici ve Silver Schmidt çekici arasındaki ilişki



Şekil 3.10. Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri ile görünür porozite ve doğal birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

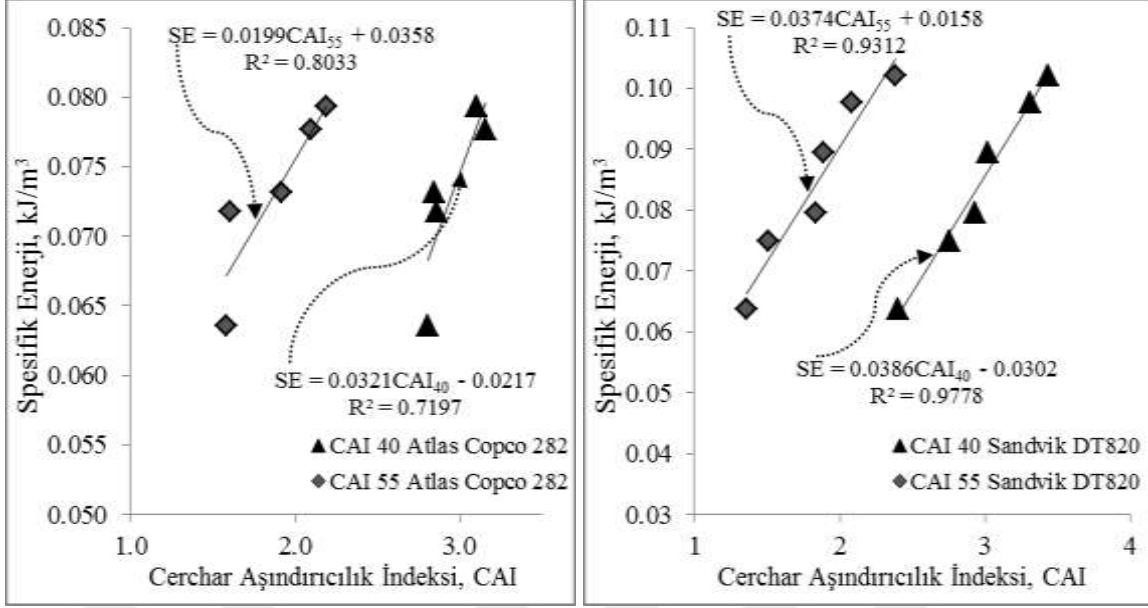
Spesifik enerji değerleri ile delik delme hızları ve delme oranı indeksi arasında çok kuvvetli ilişkiler elde edilmiştir (Şekil 3.11). Şekil 3.11 incelendiğinde makinaların spesifik enerji değerleri artıkça delik delme hızlarının düştüğü görülmektedir. Benzer şekilde delme oran indeksi artıkça kayacı delmek için harcanan spesifik enerji değerinin de azaldığı görülmektedir. Bir başka ifadeyle delinebilirliği kolay olan kayalarda daha az enerji harcanarak delme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Literatürde yapılan benzer çalışmalara bakıldığında spesifik enerji değeri ile penetrasyon hızı arasındaki ilişkiler ile paralellik göstermektedir (Akün ve Karpuz, 2005; Yaşar vd., 2011; Li ve Itakurab, 2012). Benzer şekilde, Fowell ve Johnson (1982) yaptıkları çalışmalarında spesifik enerji değeri ile net kazı hızı arasında güçlü bir bağıntılar olduğu göstermişlerdir.



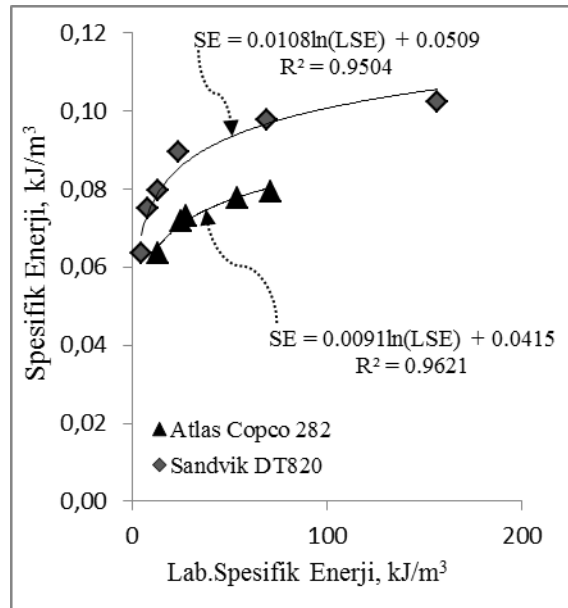
Şekil 3.11. Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri ile delme oranı indeksi ve Jumbo makinalarının delme hızı arasındaki ilişki

Spesifik enerji değerleri ile farklı uç sertliklere sahip Cerchar aşındırıcılık indeksi değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 3.12’de verilmiştir. Şekil 3.12 incelendiğinde Cerchar aşındırıcılık değeri arttıkça kayacı delmek için harcanan spesifik enerji değerinin de arttığı ve spesifik enerji değeri ile Cerchar aşındırıcılık indeksi arasında güçlü lineer ilişki olduğu görülmektedir. Reddish ve Yaşar (1996) yaptıkları çalışmada kayacı delmek için harcanan spesifik enerji değeri kayacın dayanımı, aşındırıcı ve sert minerallerin bileşimi, kayacın bağlayıcı malzemesi ve mineral dokusu ile ilişkili olduğunu saptamıştır.



Şekil 3.12. Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri ile Cerchar aşındırıcılık indeksi arasındaki ilişki

Yerinde ölçülen spesifik enerji değerleri ile laboratuvarda Sievers minyatür delme aleti üzerinde ölçülen spesifik enerji karşılaştırıldığında kuvveti logaritmik bir ilişki elde edilmiştir (Şekil 3.13). Yerinde yapılan çalışmalarda ölçülen spesifik enerji değerleri ile laboratuvarda ölçülen spesifik enerji değerleri arasında ilişki olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.13. Jumbo makinalarının spesifik enerji ile laboratuvar spesifik enerji arasındaki ilişkisi

3.1.3. Bit Aşınma Hızının Değerlendirilmesi

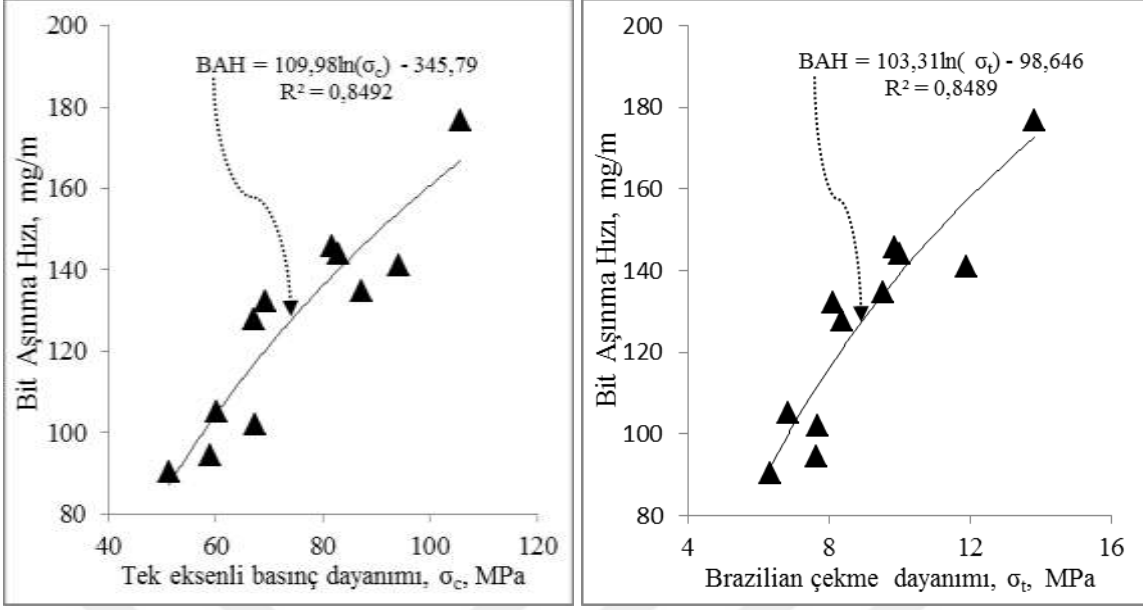
Maçka ve Çaykara tünellerinde kazı delgisi sırasında Atlas Copco firmasına ait, yarı balistik butonlu bitler kullanılmıştır. Her delgi işleminden sonra bit ağırlık ölçümleri yapılmış ve meydana gelen ağırlık kaybı bit aşınma hızı (BAH) olarak kaydedilmiştir. Bit aşınma hızı laboratuvarında gerçekleştirilen deney sonuçları ile Korelasyon analizleri kurularak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bit aşınma hızı tahmini için geliştirilen modeller Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Bit aşınma hızı tahmini ile indeks, fiziksel ve mekanik parametreler arasındaki ilişkiler

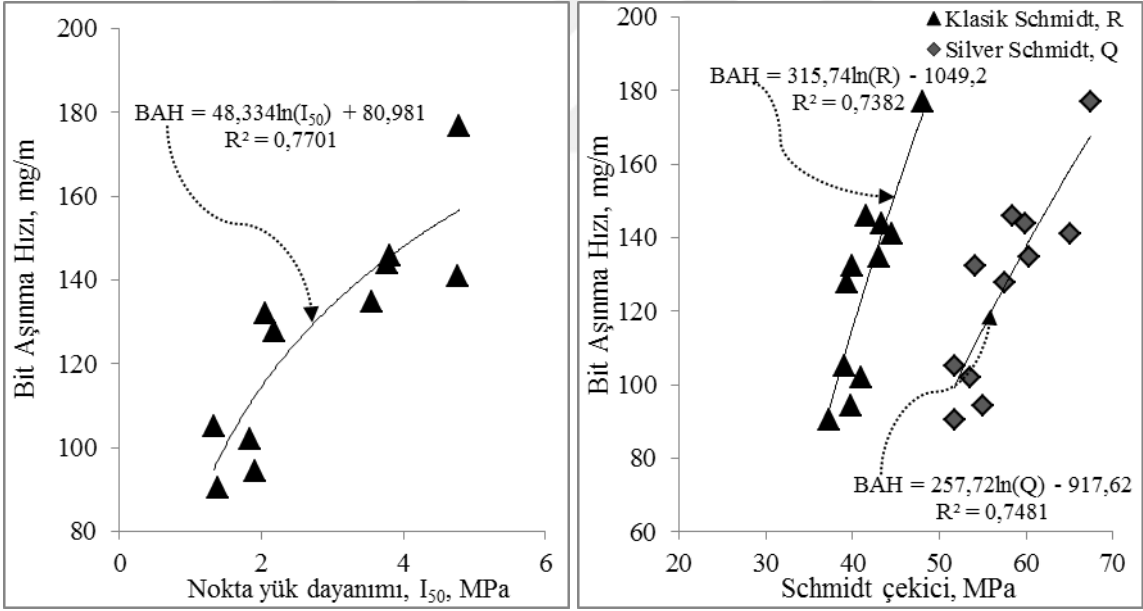
Model	Korelasyon tipi	Korelasyon katsayısı (R ²)	Eşitlik no
$BAH = 109.98\ln(\sigma_c) - 345.79$	Logaritmik	0.849	(3.51)
$BAH = 103.31\ln(\sigma_t) - 98.646$	Logaritmik	0.849	(3.52)
$BAH = 48.334\ln(I_{s(50)}) + 80.981$	Logaritmik	0.770	(3.53)
$BAH = 315.74\ln(Q) - 1049.2$	Logaritmik	0.738	(3.54)
$BAH = 257.72\ln(R) - 917.62$	Logaritmik	0.748	(3.55)
$BAH = -31.032n + 182.12$	Doğrusal	0.784	(3.56)
$BAH = -2.4307DRI + 235.48$	Doğrusal	0.799	(3.57)
$BAH = 6243.7S_{20}^{-1.049}$	Üs	0.479	(3.58)
$BAH = 309.67\ln(V_p) - 2487.3$	Logaritmik	0.836	(3.59)

BAH: Bit aşınma hızı, σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, σ_t : Çekme dayanımı, $I_{s(50)}$: Nokta yükü dayanım indeksi, Q: Silver Schmidt çekici, R: Klasik Schmidt çekici, n: Görünür porozite, DRI: Delme oranı indeksi, S_{20} : Kırılma hızı deneyi V_p : P dalga hızı

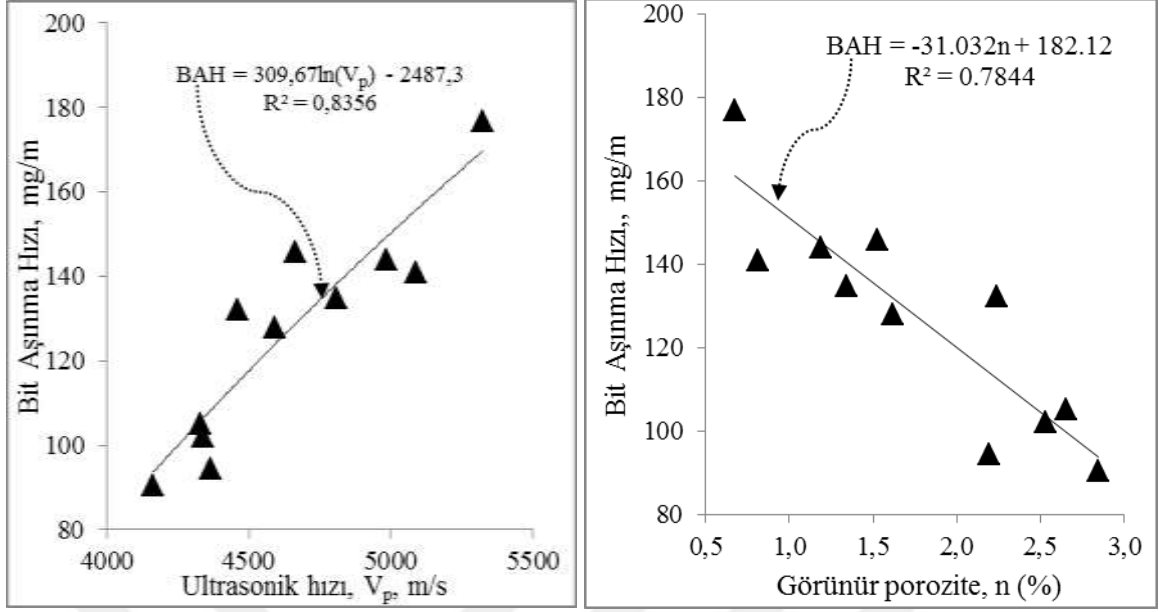
Bit aşınma hızı ile kayaçların fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişki Şekil 3.14-3.16’de verilmiştir. Kayaçlarda dayanımın artmasıyla, bitler üzerindeki aşınma hızının arttığı görülmektedir. Dayanımı yüksek olan kayaçlarda delme işlemi sırasında hem bit gövdesi üzerinde hem de buton üzerindeki aşınma miktarı yüksek olmaktadır. Ayrıca, bit aşınma hızı ile ultrasonik hız ve görünür porozite arasındaki ilişki Şekil 3.16’da verilmiştir. Bit aşınma hızı ile ultrasonik sismik hız arasında doğru orantı, görünür porozite ile arasında ters orantı olduğu görülmektedir.



Şekil 3.14. Bit aşınma hızı ile tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişkisi



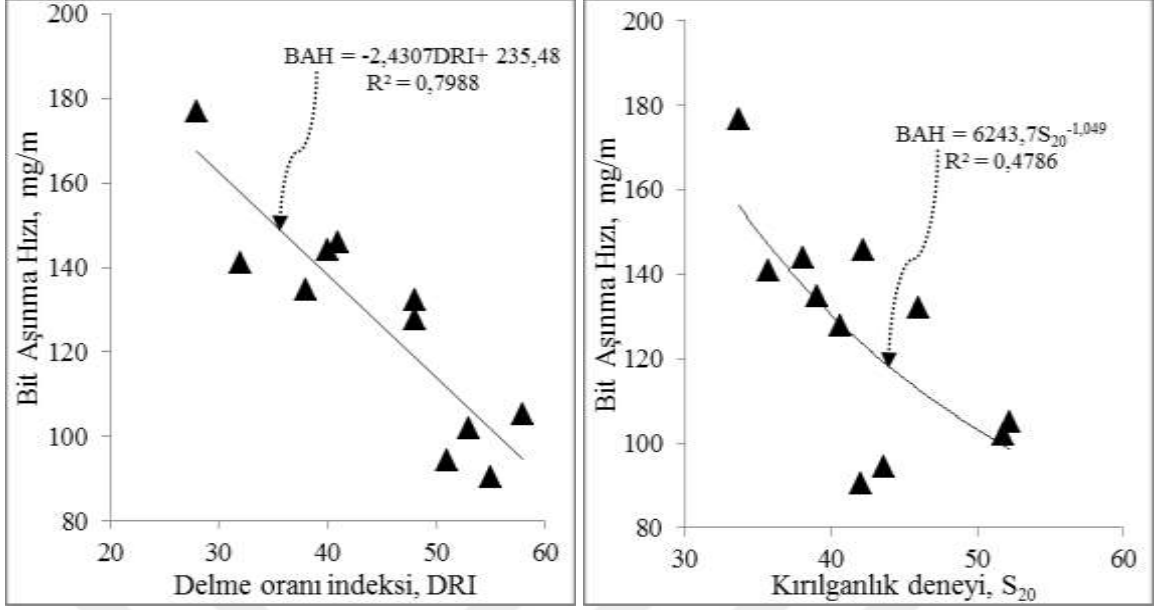
Şekil 3.15. Bit aşınma hızı ile nokta yük dayanımı ve Schmidt çekici arasındaki ilişkisi



Şekil 3.16. Bit aşınma hızı ile ultrasonik hızı ve görünür porozite arasındaki ilişki

Bit aşınma hızı ile delme oranı indeksi ve kırılgenlik deneyi arasındaki ilişki Şekil 3.17’de verilmiştir. Bit aşınma hızı ile delme oranı indeksi arasında yüksek bir ilişki elde edilmiştir. Şekil incelendiğinde delme oranı indeksi yüksek olan yani delinebilirliği kolay olan kayaç delgisinde bit üzerindeki aşınma oranının da az olduğu görülmüştür. Benzer şekilde kırılgenliği yüksek olan kayaçların da delme sırasında bit üzerindeki aşınma oranlarının az olduğu görülmektedir.

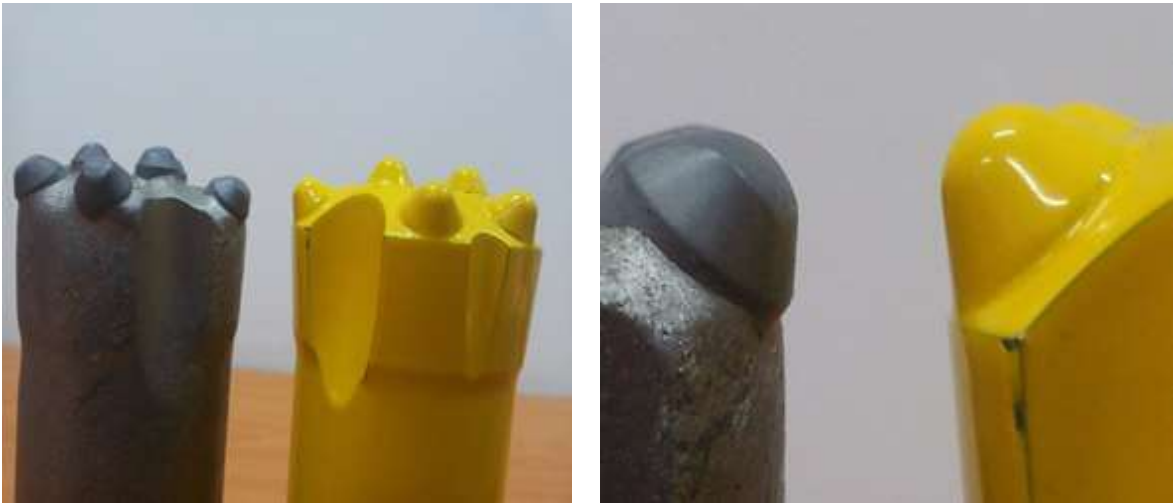
Bu sonuçlar Fowell vd. (1992) tarafında yapılan keski aşınımı ile kayacın basınç dayanımı, çekme dayanımı, spesifik enerji değeri ve aşındırıcı mineral içeriği arasında ilişki ile paralellik göstermektedir. Benzer şekilde deneylerde elde edilen sonuçlar kayaç dayanımı, aşındırıcı mineral içeriği ve jeolojik özelliklerin keski tüketimi üzerine yapılan çalışmalar ile örtüşmektedir (Gehring 1997; Thuro ve Spaun 1996; Plinninger vd., 2002; Ocak vd., 2008; Madan 2008).



Şekil 3.17. Bit aşınma hızı ile delme oranı indeksi ve kırılmalık deneyi arasındaki ilişkisi

3.1.4. Buton Aşınımı Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Maçka ve Çaykara tünellerinde delik delme işleminde kullanılan Jumbo makinaları üzerinde Atlas Copco firmasına ait yarı balistik butonlu bitlerin ayna delgisi sonrasında mikroskop altında buton aşınma şekilleri incelenmiştir. Tek eksenli basınç dayanım sınıflandırılmasına göre kayaların dayanım yüksek olan kayalarda buton aşınmasının daha fazla olduğu ölçülmüştür (Şekil 3.18-3.21). Dayanımı düşük aşındırıcılığı az olan kayalarda buton aşınma genişliğinin daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 3.18. Atlas Copco'nun yarı balistik butonlu bitlerinin aşınımı



Şekil 3.19. Yarı balistik butonlu bitlerde buton ve gövde aşınımı



Şekil 3.20. Yarı balistik butonlu bitlerde buton alt çapının aşınımı



Şekil 3.21. Yarı balistik butonlu bitlerde buton ucu aşınımı

3.2. Laboratuvar Çalışmaları

3.2.1 Sievers Minyatür Testi ile Delme Hızının Değerlendirilmesi

Maçka ve Çaykara tünellerinden alınan kayaç örnekleri üzerinde gerçekleştirilen Sievers minyatür delme aleti deneyinden elde edilen delme hızı (DH) değerleri kayaçların fiziko-mekanik, delinebilirlik ve aşındırıcılık özellikleri ile olan ilişkileri istatistiksel olarak incelenmiştir. Sievers minyatür delme aletiyle kayaçlar üzerinde ölçülen delme hızları ile ilgili istatistiksel modeller ve korelasyon katsayıları Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Sievers minyatür delme aleti delme hızı tahmini ile indeks, fiziksel ve mekanik parametreler arasındaki ilişkiler

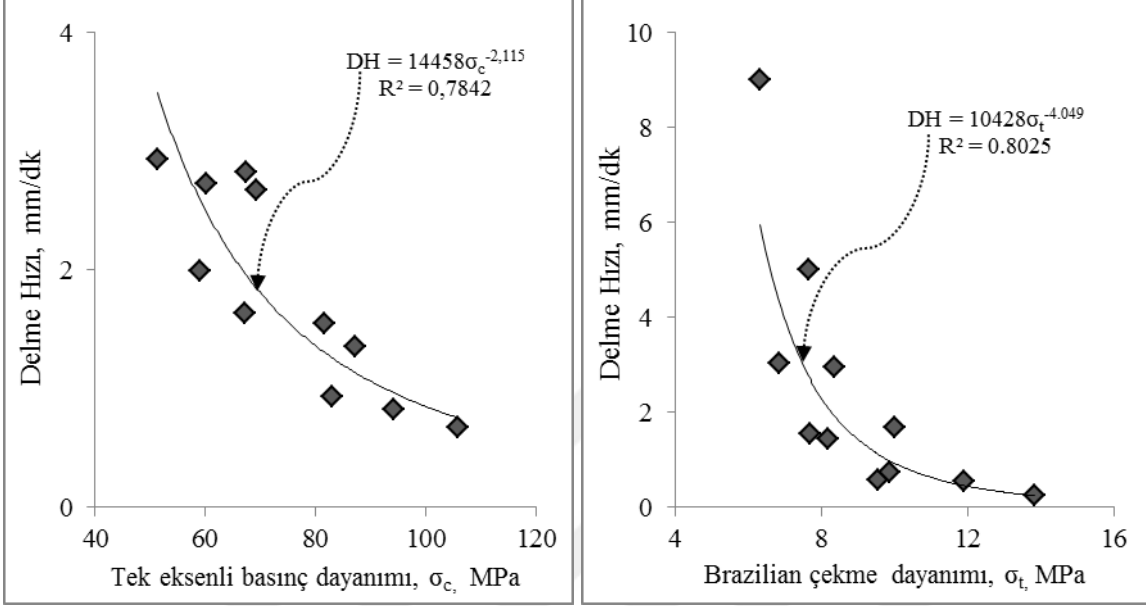
Model	Korelasyon tipi	Korelasyon katsayısı (R ²)	Eşitlik no
$DH = 14458\sigma_c^{-2,1156}$	Üs	0,784	(3.60)
$DH = 10428\sigma_t^{-3,039}$	Üs	0.803	(3.61)
$DH = 9.1104I_{s(50)}^{-1,896}$	Üs	0.731	(3.62)
$DH = 650.155,146e^{-0,312R}$	Üs	0,803	(3.63)
$DH = 27.287,912e^{-0,170Q}$	Üs	0,693	(3.64)
$DH = 0.6389n1.7848$	Üs	0.662	(3.65)
$DH = 115103e^{-0,002V_p}$	Üs	0,700	(3.66)
$DH = 0,0005DRI^{-2,1252}$	Üs	0,879	(3.67)
$DH = 50192e^{-3,509CAI_{40}}$	Üstel	0.887	(3.68)
$DH = 503.5e^{-3,123CAI_{55}}$	Üstel	0.892	(3.69)

DH: Delme hızı, σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, σ_t : Çekme dayanımı, $I_{s(50)}$: Nokta yükü dayanım indeksi, R: Klasik Schmidt çekici, Q: Silver Schmidt çekici, n: Görünür porozite, V_p : P dalgı hızı, DRI: Delme oranı indeksi, CAI: Cerchar aşındırıcılık indeksi

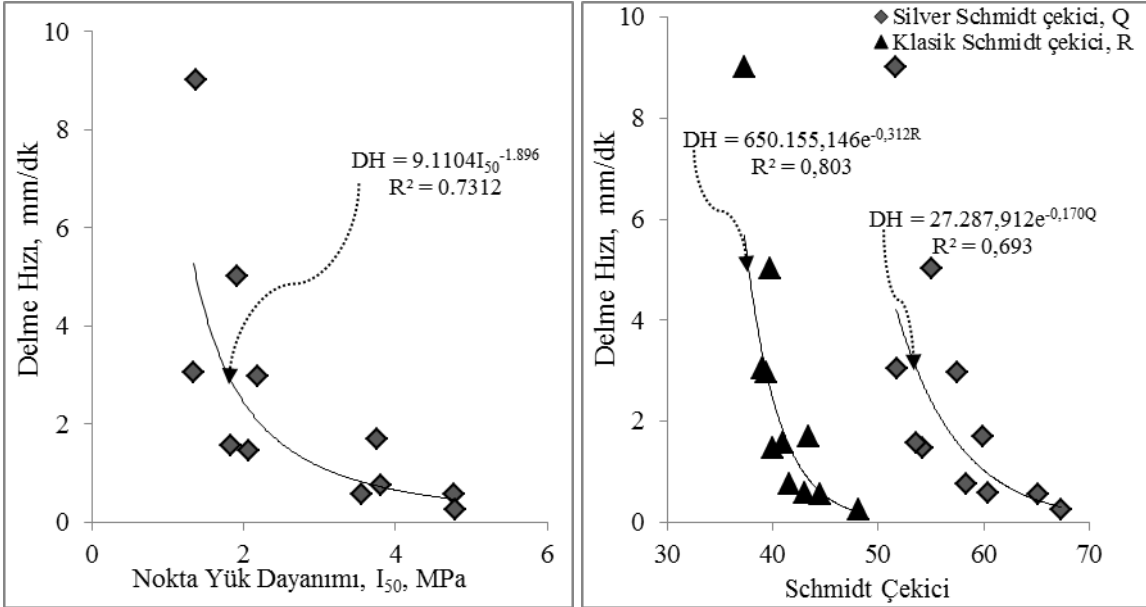
Sievers minyatür delme aletiyle gerçekleştirilen deneyde elde edilen delme hızı sonuçları ile kayaçların fiziko-mekanik özellikleri, delme oranı indeksi ve Cerchar aşındırıcılık indeksi değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 3.22-3.25’de gösterilmiştir.

Şekiller incelendiğinde, delme hızı değerleri ile kayaçların mekanik özellikleri arasındaki güçlü ilişkiler olduğu görülmektedir. Dolayısıyla kayacın basınç, çekme ve sertlik değerleri arttıkça sievers minyatür delme hızı değerinin azaldığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile paralellik sağlamaktadır. Robbins (1992), Bilim (2011) ve Ahmadi vd. (2012) tarafında yapılan çalışmada dayanımın artmasıyla kayaçların penetrasyon hızlarının düştüğünü saptamışlardır. Delme hızı ile delme oranı ilişkileri incelendiğinde DRI değeri yükseldikçe yani kayacın delinebilirliği kolaylaştıkça delme hızı artmaktadır.

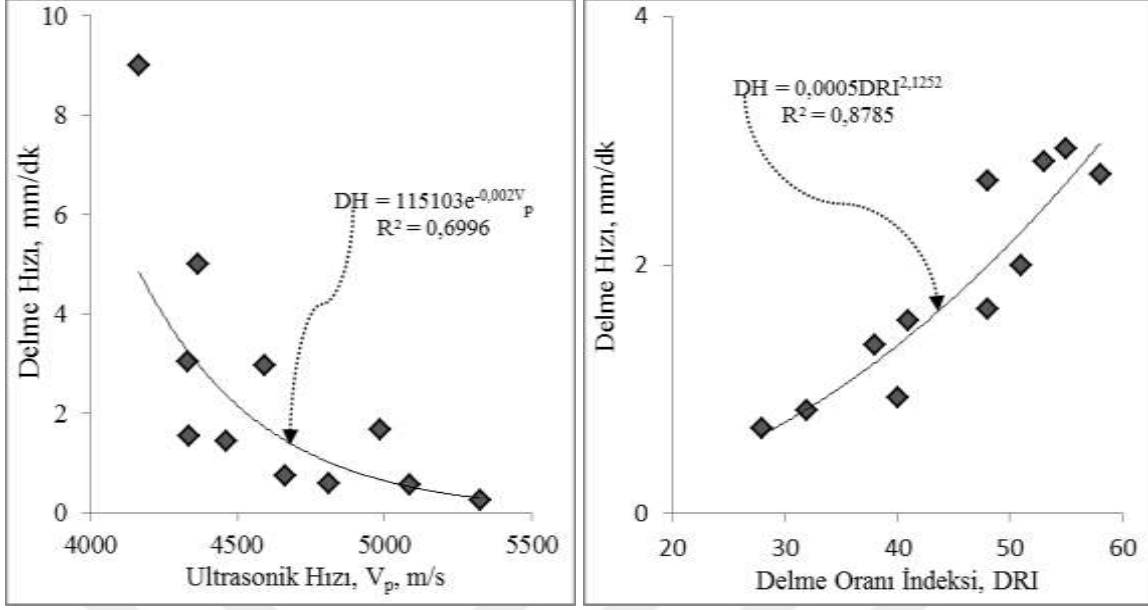
Sievers minyatür testi delme hızı ile Cerchar aşındırıcılık indeksi arasındaki ilişki incelendiğinde Cerchar aşındırıcılık sınıflandırılmasına göre aşındırıcılık özelliği artıkcaya kayaların delme hızlarının düştüğü görülmektedir (Şekil 3.25).



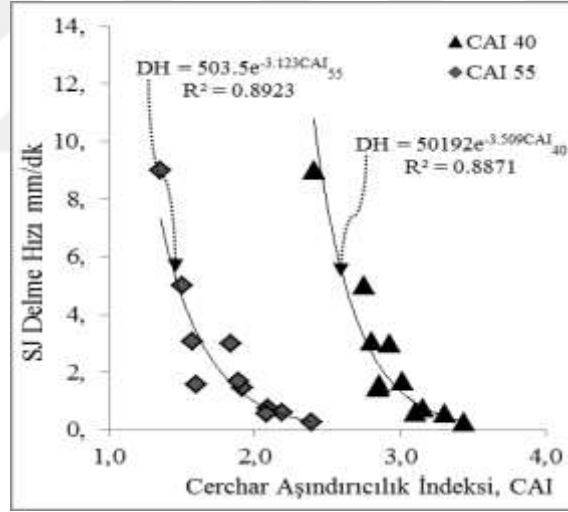
Şekil 3.22. Sievers minyatür testi delme hızı ile kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 3.23. Sievers minyatür testi delme hızı ile kayaçların nokta yük dayanımı ve Schmidt çekici arasındaki ilişki



Şekil 3.24. Sievers minyatür testi delme hızı ile ultrasonik hızı ve delme oran indeksi arasındaki ilişki



Şekil 3.25. Sievers minyatür testi delme hızı ile Cerchar aşındırıcılık indeksi arasındaki ilişki

3.2.2 Sievers Minyatür Delme Testine ait Spesifik Enerji Değerlerinin Değerlendirilmesi

Laboratuvarında gerçekleşen sievers minyatür delme aleti üzerinde spesifik enerji değerleri ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar diğer deney sonuçları ile korelasyon analizleri kurularak istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve elde edilen modeller ve korelasyon katsayıları Tablo 3.5'de gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Sievers minyatür delme aleti üzerinde ölçülen spesifik enerji değerleri ile indeks, fiziksel ve mekanik parametreler arasındaki ilişkiler

Model	Korelasyon tipi	Korelasyon katsayısı (R ²)	Eşitlik no
$SE = 39.94SJ^{-0.981}$	Üs	0.999	(3.70)
$SE = 0,3053e^{0,0595\sigma_c}$	Üs	0,902	(3.71)
$SE = 0.0046\sigma_t^{3.9705}$	Üs	0.800	(3.72)
$SE = 3.8016e^{0.6824I_{s(50)}}$	Üstel	0.741	(3.73)
$SE = 13.277R - 509.19$	Doğrusal	0.820	(3.74)
$SE = 7.3004Q - 379.1$	Doğrusal	0.725	(3.75)
$SE = -76.05\ln(n) + 79.143$	Logaritmik	0.679	(3.76)
$SE = 0,0004e^{0,0024V_p}$	Üs	0,698	(3.77)
$SE = -170.6\ln(DRI) + 686.88$	Logaritmik	0.791	(3.78)
$SE = 0.001e^{3.4278CAI_{40}}$	Üstel	0.878	(3.79)
$SE = 0.088e^{3.0716CAI_{55}}$	Üstel	0.895	(3.80)

SE: Spesifik enerji, σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, σ_t : Çekme dayanımı, $I_{s(50)}$: Nokta yükü dayanım indeksi, R: Klasik Schmidt çekici, Q: Silver Schmidt çekici, n: Görünür porozite, V_p : P dalga hızı, DRI: Delme oranı indeksi, CAI: Cerchar aşındırıcılık indeksi,

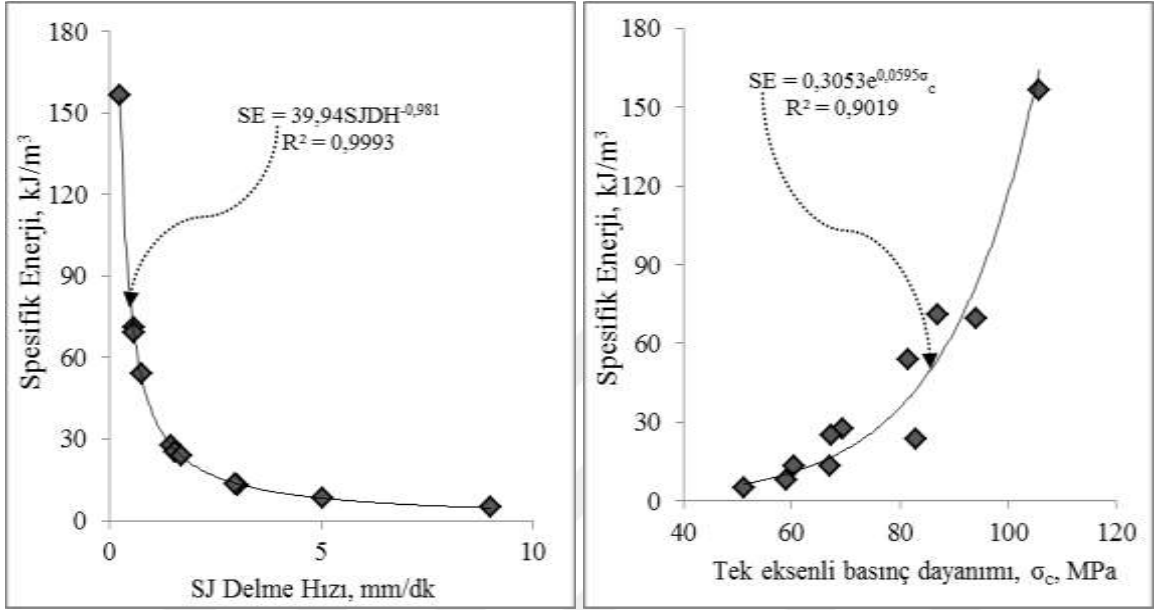
Sievers minyatür testi üzerinde ölçülen spesifik enerji değerleri ile diğer deney sonuçları arasında gerçekleştirilen ilişkiler sırasıyla Şekil 3.26-3.30'da gösterilmiştir.

Sievers minyatür testi üzerinde hesaplanan spesifik enerji değerleri ile delme hızları arasında güçlü ilişkiler olduğu görülmektedir (Şekil 3.26). Şekil incelendiğinde delme hızı değerleri yüksek olan kayaçların spesifik delme enerjilerin düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar Reddish ve Yaşar (1996) tarafında farklı kayaç ve çimento örnekleri üzerinde spesifik enerji ile penetrasyon hızı arasında geliştirilen ilişki ile benzerlik göstermektedir.

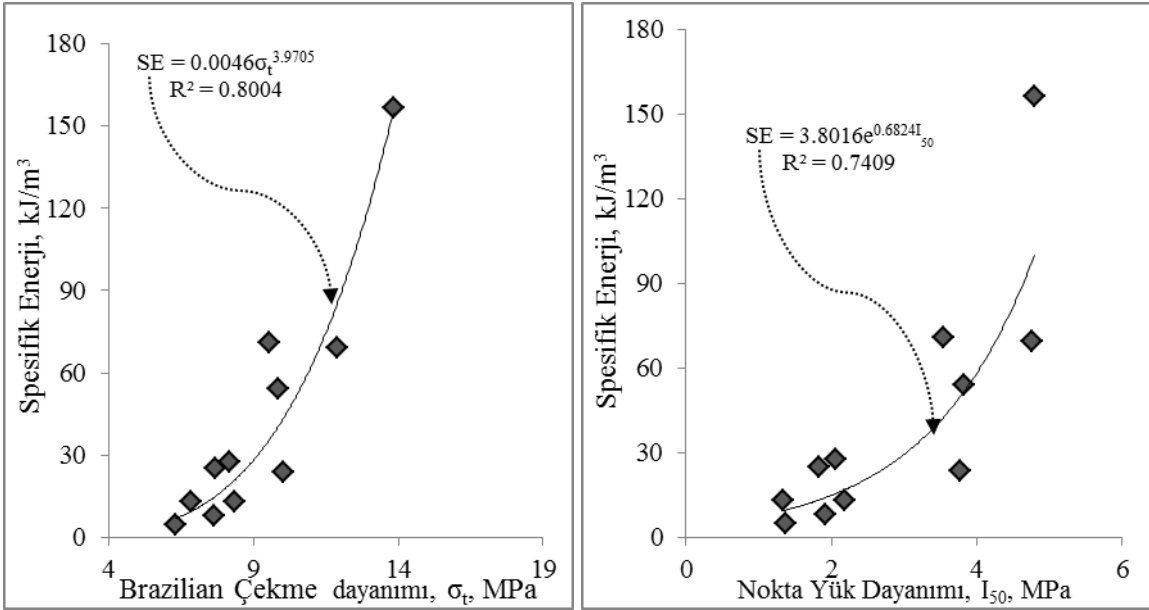
Sievers minyatür delme aletine ait spesifik enerji değerleri ile kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinden tek eksenli basınç dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, nokta yükü dayanımı indeksi, Schmidt çekici geri sıçrama sayısı ve görünür porozite arasında kuvvetli ilişkiler elde edilmiştir. Dayanımı yüksek olan kayaçların spesifik enerji değerlerinin de yüksek olduğu, ancak porozite değerleri yüksek olan kayaçların spesifik enerji değerlerinin düşük olduğu görülmüştür. Aynı zamanda ultrasonik sismik hız değerleri yüksek olan kayaçlarda da spesifik enerji değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

Spesifik enerji değerleri ile delme oranı indeksi arasında azalan bir ilişki mevcuttur. Bu sonuçlar Sengun ve Altindag (2013) tarafında yapılan çalışmaya paralellik göstermektedir.

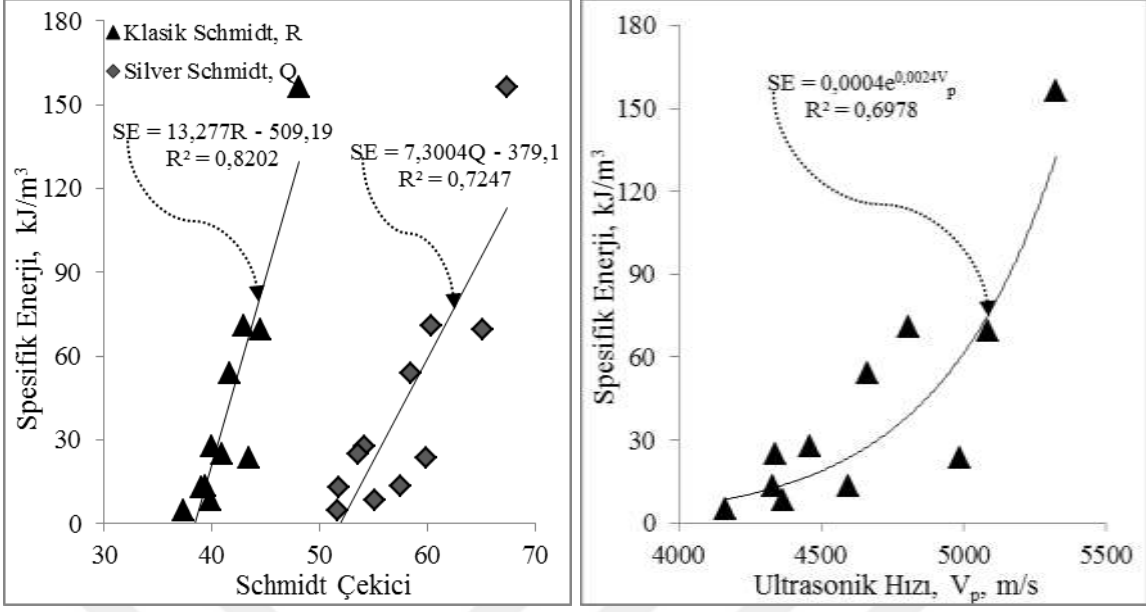
Ayrıca spesifik enerji değerleri ile farklı uç sertliğine sahip uçlar ile yapılan Cerchar aşındırıcılık indeksi arasında güçlü ilişki olduğu Şekil 3.30'da görülmektedir. Spesifik enerji tahminleri için Cerchar aşındırıcılık indeksi uç (HRC 40 ve HRC55) sertlikleri karşılaştırıldığında, sırayla $R^2 = 88$ ve $R^2 = 90$ olan ilişkiler elde edilmiştir.



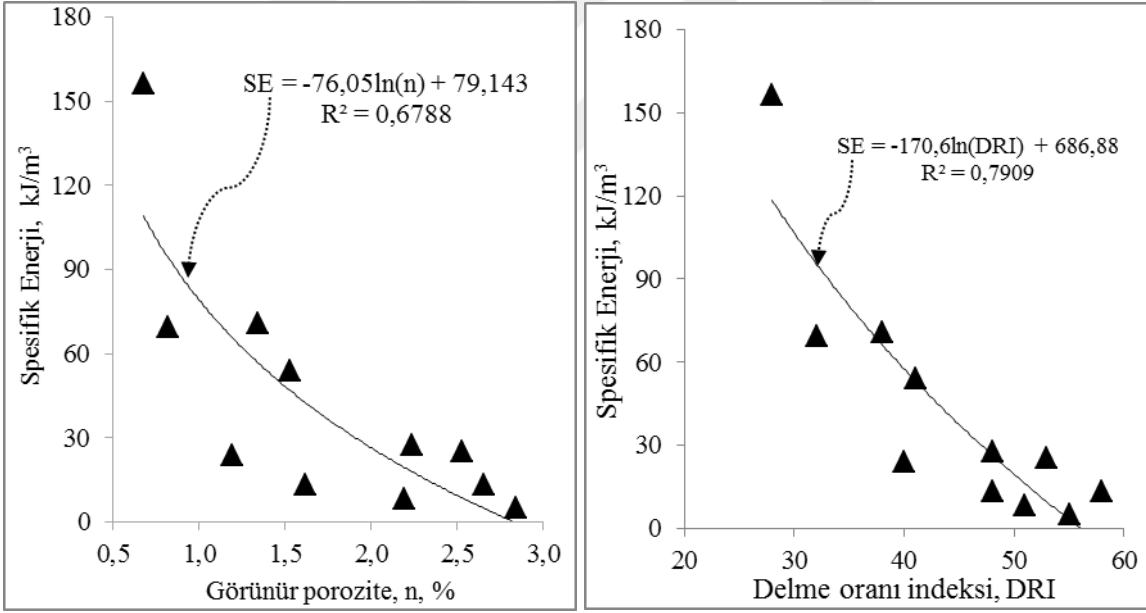
Şekil 3.26. Sievers minyatür testine ait spesifik enerji ile sievers minyatür testi net delme hızı ve tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki



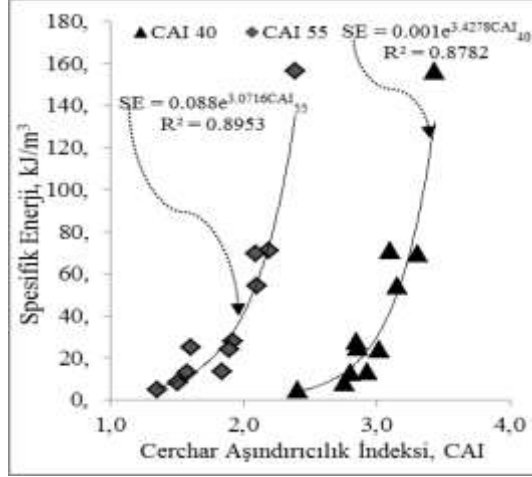
Şekil 3.27. Sievers minyatür testine ait spesifik enerji ile Brazilian çekme dayanımı ve nokta yük dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 3.28. Sievers minyatür testine ait spesifik enerji ile Schmidt çekici ve ultrasonik hızı arasındaki ilişki



Şekil 3.29. Sievers minyatür testine ait spesifik enerji ile görünür porozite ve delme oranı arasındaki ilişki



Şekil 3.30. Sievers minyatür testine ait spesifik enerji değerleri ile CAI ilişkisi

3.2.3 Cerchar Aşındırıcılık İndeksinin Değerlendirilmesi

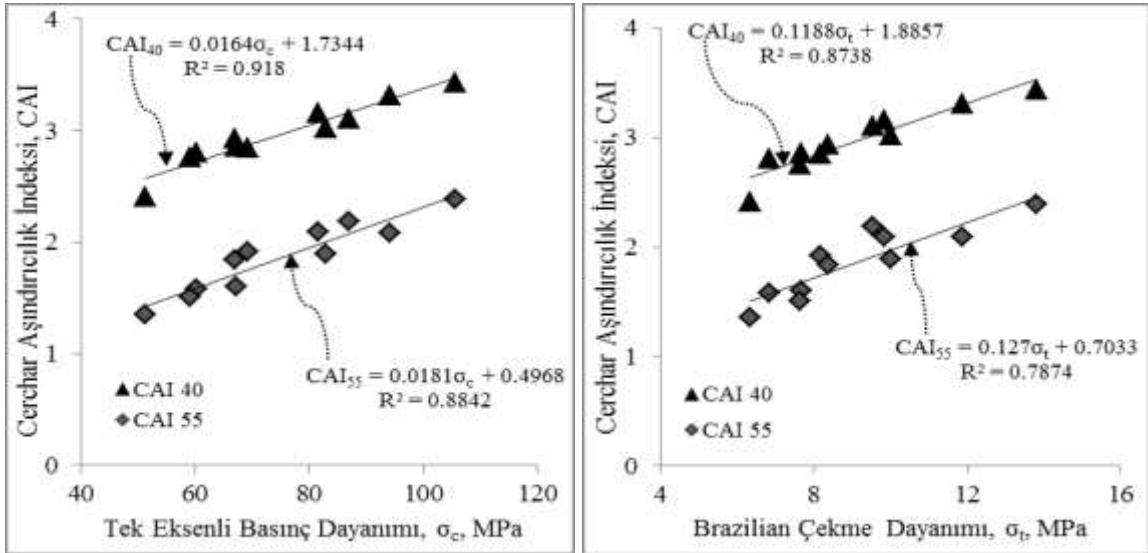
Maçka ve Çaykara tünellerinden alınan kayaç örnekleri üzerinde Cerchar aşındırıcılık indeksi deneyi gerçekleştirilmiştir. CAI deneylerinde HRC40 ve HRC55 sertliğinde iki farklı uç kullanılmıştır. Cerchar aşındırıcılık indeksi ile diğer deney sonuçları ile korelasyon analizleri yapılarak elde edilen ilişkiler Tablo 3.6’de verilmiştir.

Tablo 3.6. Cerchar aşındırıcılık indeksi tahmini ile indeks, fiziksel ve mekanik parametreler arasındaki ilişkiler

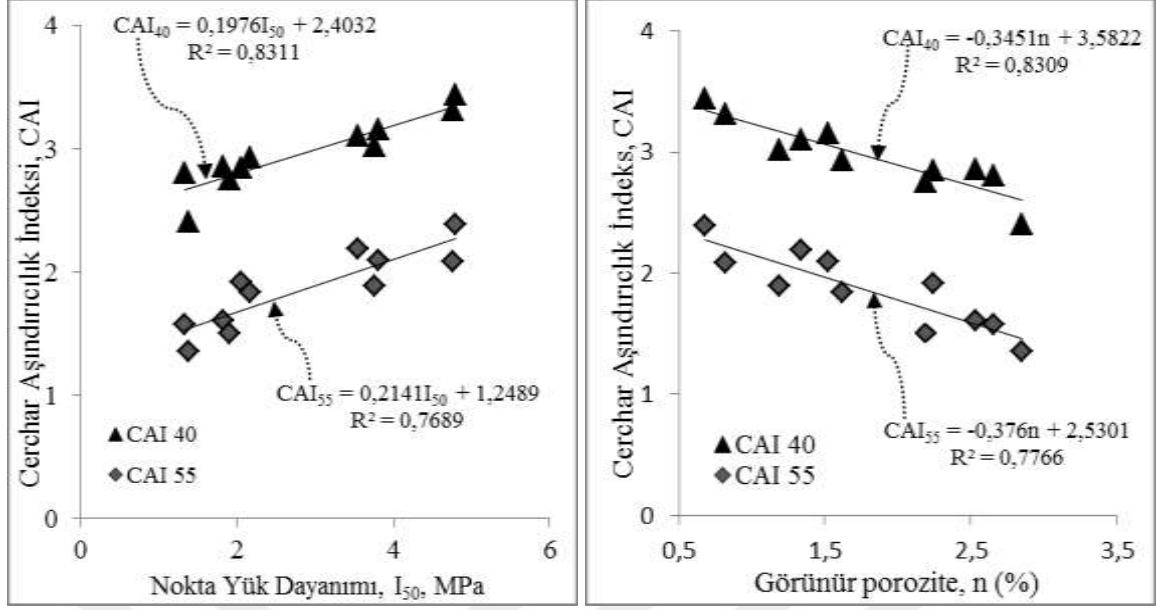
Model	Korelasyon tipi	Korelasyon katsayısı (R ²)	Eşitlik no
$CAI_{40} = 0.0164\sigma_c + 1.7344$	Doğrusal	0.918	(3.81)
$CAI_{55} = 0.0181\sigma_c + 0.4968$	Doğrusal	0.884	(3.82)
$CAI_{40} = 0.1188\sigma_t + 1.8857$	Doğrusal	0.874	(3.83)
$CAI_{55} = 0.127\sigma_t + 0.7033$	Doğrusal	0.787	(3.84)
$CAI_{40} = 0.1976I_{s(50)} + 2.4032$	Doğrusal	0.831	(3.85)
$CAI_{55} = 0.2141\ln(I_{50}) + 1.2489$	Logaritmik	0.769	(3.86)
$CAI_{40} = -0.0265(DRI) + 4.150$	Doğrusal	0.811	(3.87)
$CAI_{55} = -0.0301\ln(DRI) + 3.2047$	Doğrusal	0.825	(3.88)
$CAI_{40} = -0.345n + 3.5822$	Doğrusal	0.831	(3.89)
$CAI_{55} = -0.376n + 2.5301$	Doğrusal	0.777	(3.90)
$CAI_{40} = 3.66\ln(R) - 10.665$	Logaritmik	0.850	(3.91)
$CAI_{55} = 3.836\ln(R) - 12.428$	Logaritmik	0.735	(3.92)
$CAI_{40} = 2.9475\ln(Q) - 8.9775$	Logaritmik	0.838	(3.93)
$CAI_{55} = 3.1648\ln(Q) - 10.965$	Logaritmik	0.761	(3.94)

CAI: Cerchar aşındırıcılık indeksi, σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, σ_t : Çekme dayanımı, $I_{s(50)}$: Nokta yükü dayanım indeksi, DRI: Delme oranı indeksi, n: Görünür porozite, V_p : P dalga hızı, R: Klasik Schmidt çekici, Q: Silver Schmidt çekici,

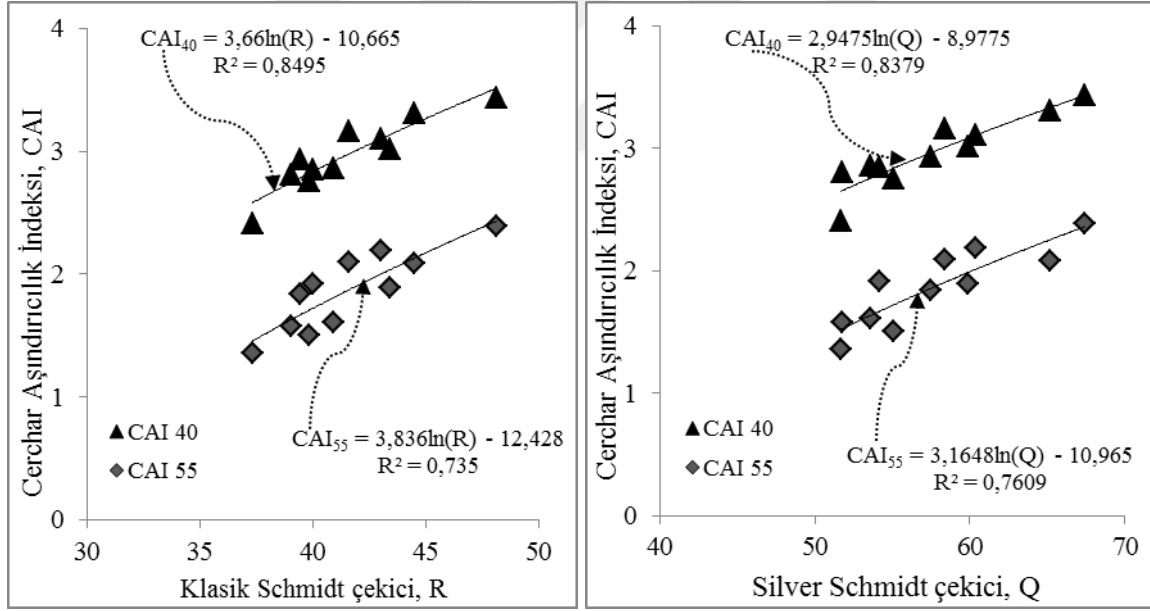
Cerchar aşındırıcılık indeksinde ucun sertlik değeri üzerine birçok çalışma yapılmıştır (West, 1989; Cerchar, 1986; Plinninger vd., 2003; Mikhalakopoulos vd., 2006; Hamzaban vd., 2014; Rostami vd., 2014; Alber vd., 2014). Bu çalışmada klasik Cerchar deney aleti ile HRC 40 ve HRC 55 sertliğindeki uçlar ile ölçümler alınmıştır. Cerchar aşındırıcılık indeksi ile kayaçların fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler Şekil 3.31-3.34'de gösterilmiştir. HRC 40 ve HRC 55 sertliğine sahip uçlar ile gerçekleştirilen Cerchar aşındırıcılık indeksi ile kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükü dayanımı indeksi, Brazilian çekme dayanımı, görünür porozite ve Schmidt çekici geri sıçrama sayısı (Klasik ve Silver) ile güçlü ilişkiler elde edilmiştir. Kayaçların dayanım özellikleri ile HRC 40 ve HRC 55 CAI değerleri arasında en iyi ilişki tek eksenli basınç dayanımında sırasıyla $R^2 = 0.92$ ve $R^2 = 0.88$ olan lineer ilişkide elde edilmiştir. Yapılan ölçümlerde HRC 40 uçların sertlik değerleri HRC 55 uçların sertlik değerlerinde daha yüksek olduğu görülmüştür. Yani uç sertliği arttıkça ortalama CAI değerlerinde azalma olduğu ölçülmüştür. Farklı uç sertliğinde alınan CAI değerleri literatürde yapılan çalışmalar ile paralellik göstermektedir (AL-Amen ve Waller. 1993; Rostami vd., 2005; Kasling ve Thuro. 2010; Mikhalakopoulos vd., 2006; Hamzaban vd., 2014; Rostami vd., 2014). Cerchar (1986), yaptıkları çalışmalarında HRC55 uç sertliğinin değerlendirme esnasında öncelik verilmiştir.



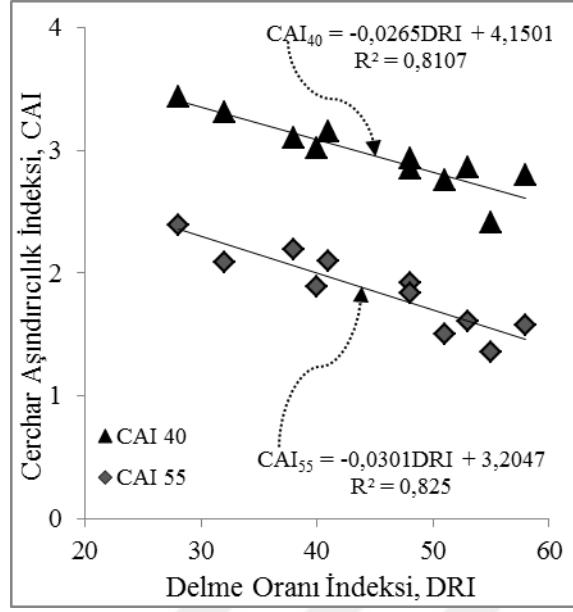
Şekil 3.31. Cerchar aşındırıcılık indeksi ile tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişkisi



Şekil 3.32. Cerchar aşındırıcılık indeksi ile nokta yük dayanımı ve görünür porozite arasındaki ilişkisi



Şekil 3.33. Cerchar aşındırıcılık indeksi ile klasik Schmidt çekici ve silver Schmidt çekici arasındaki ilişkisi



Şekil 3.34. Cerchar aşındırıcılık indeksi ile delme oranı indeksi arasındaki ilişkisi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması arazi ve laboratuvar olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, Maçka ve Çaykara Tünellerinin üst yarı kazı aynalarında Atlas Copco Rocket Boomer 282 ve Sandvik DT820 delici Jumbo makinalarının spesifik enerji değerleri, delik delme hızları, bit aşınma hızları hesaplanmış ve buton aşınma şekilleri incelenmiştir. İkinci aşamada ise, laboratuvar çalışmaları için tünellerden alınan kayaç örnekleri üzerinde kayaçların delinebilirlik, aşındırıcılık, fiziko-mekanik ve Sievers minyatür delme aletine ait spesifik enerji ve delme hızı değerleri hesaplanmıştır. Son olarak, arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen deney sonuçları değerlendirilmiş ve aralarındaki ilişkiler istatistiksel olarak irdelenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Arazi çalışmalarında Jumbo makinalarının delik delme hızları ile kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, ultrasonik hız ve Schmidt çekiçleri (klasik ve Silver) arasında anlamlı ilişkileri elde edilmiştir. Tünel kazı aynalarında kayacın dayanımı arttıkça delik delme hızlarının azaldığı tesbit edilmiştir. Benzer şekilde ultrasonik hız değeri arttıkça delik delme hızının düştüğü saptanmıştır.
- Yerde ölçülen delik delme hızı değerleri ile laboratuvar ölçülen delme hızı değerleri arasında ilişki olduğu saptanmıştır.
- Jumbo makinalarının delik delme hızları ile Cerchar aşındırıcılık indeksi karşılaştırılmıştır. HRC 40 ve HRC 55 sertlik değerine sahip uçlarla ölçülen Cerchar aşındırıcılık değerlerinin artmasıyla delik delme hızlarının düştüğü görülmüştür.
- Yerde ölçülen spesifik enerji değerleri ile laboratuvarda gerçekleşen fiziko-mekanik özellikleri arasında kuvvetli lineer ilişkiler elde edilmiştir. Kayaçların dayanımı arttıkça Jumbo makinasının delik delmek için daha fazla enerji harcadığı belirlenmiştir.
- Yerde ölçülen spesifik enerji değerleri ile laboratuvarda ölçülen delme oranı indeksi arasında kuvvetli ilişkileri elde edilmiştir. Delme oranı indeksi arttıkça spesifik enerji değerinin de azaldığı belirlenmiştir.

- Yerinde ölçülen spesifik enerji değerleri ile Cerchar aşındırıcılık indeksi değerleri karşılaştırmış ve aşındırıcılık değer artıkça kayacı delmek için harcanan spesifik enerji değerinin de arttığı görülmüştür.
- Yerinde ölçülen spesifik enerji değerleri ile laboratuvarında ölçülen spesifik enerji değerleri arasında kuvvetli ilişki olduğu saptanmıştır.
- Bit aşınma hızı ile kayacın mekanik özellikleri arasındaki ilişki belirlenmiş ve kayaç dayanımının artmasıyla bit aşınma hızının arttığı belirlenmiştir. Bu durum kayaçlarda dayanım artıkça hem bit gövdesi hem de buton üzerinde aşınma miktarının arttığı saptanmıştır.
- Bit aşınma hızı ile delme oranı indeksi ve kırılgenlik deneyi arasında kuvvetli ilişki elde edilmiştir. Delme oranı indeksi yüksek olan kayaçlarda bit aşınma oranının az olduğu görülmüştür. Benzer şekilde kırılgenlik değeri yüksek olan kayaçların delme sırasında bit üzerindeki aşınma oranlarının da az olduğu belirlenmiştir.
- Atlas Copco firmasına ait yarı balistik butonlu bitlerin, ayna kazısı sonrasında mikroskop altında buton uç aşınma şekilleri incelenmiştir. Basınç dayanımı, çekme dayanımı, sertliği ve aşındırıcılığı yüksek olan kayaçlarda buton uç aşınma genişliğinin daha fazla olduğu ölçülmüştür.
- Sievers minyatür delme aletiyle elde edilen delme hızı sonuçları ile kayaçların mekanik özellikleri, delme oranı indeksi ve Cerchar aşındırıcılık indeksi değerleri arasında ilişki olduğu saptanmıştır. Yani kayacın basınç, çekme ve sertlik değerleri artıkça kayaçların delme hızı değerinin azaldığı görülmüştür.
- Laboratuvarında ölçülen spesifik enerji değerleri ile delme hızı arasında güçlü ilişkiler olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, spesifik enerji değerleri ile kayaçların fiziko-mekanik özellikleri arasında kuvvetli ilişkiler elde edilmiştir. Dayanımı yüksek olan kayaçlarda spesifik enerji değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Laboratuvarında ölçülen spesifik enerji değerleri ile Cerchar aşındırıcılık indeksi arasında güçlü ilişki olduğu belirlenmiştir.
- Cerchar deney aleti üzerinde HRC 40 ve HRC 55 sertliğinde uçlar ile kayaçların fiziko-mekanik özellikleri arasında anlamlı ilişkiler elde edilmiştir. Kayaç özellikleri ile HRC 40 ve HRC 55 CAI değerleri arasında en iyi ilişki tek eksenli basınç dayanımında sırasıyla $R^2 = 0,92$ ve $R^2 = 0,88$ olan lineer ilişkide elde edilmiştir.

- Yapılan ölçümlerde HRC 40 uçlarının CAI değerlerinin HRC 55 uçlarındaki CAI değerinde daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum uç sertliği arttıkça ortalama CAI değerlerinde azalma olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada bulunan sonuçlar ve yapılan değerlendirmeler literatürdeki çalışmalarla paralellik sağlamaktadır.

Öneriler;

Bu çalışmada Atlas Copco Rocket Boomer 282 ve Sandvik DT820 delici Jumbo makinaları üzerinde ölçümler alınmıştır. Gelecekteki proje çalışmalarında, farklı delici makinalar ile farklı mekanik özelliklerine sahip kayaçlar üzerinde çalışmalar yapılmalıdır. Ayrıca laboratuvar ortamında gerçek bitlerin kullanılabilceği bir düzenek geliştirilmek ve geliştirilen bu düzeneğin güvenilirliği ve daha geniş bir aralıkta sonuç verebilmesi için delici makinelerinin yerindeki performansları ile ilişkilendirilmelidir.

5. KAYNAKLAR

- Ahmadi, M., 2012. Erfan, M.R. Torkamany M.J. ve Sabbaghzadeh, J., 2012. The effect of confining pressure on specific energy in Nd:YAG laser perforating of rock. Optics & Laser Technology, 44, 57–62.
- Akün, M.E. and Karpuz, C., 2005. Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 42, 473–479.
- Alber, M., Yarali, O., Dahl, F., Bruland, A., Kasling, H., Michalakopoulos, TN., Cardu, M., Hagan, PC., Aydin, H. and Ozarslan, A., 2014. ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the Cerchar abrasivity test. Rock Mech Rock Eng 47, 261–266.
- Anon, 1979. Classification of Rock and Soils for Engineering Geological Mapping. Part 1- Rock and Soil Materials. Bull. Int. Ass. Eng. Geo, 19, 364-371.
- Ariođlu, E., Yüksel, A. ve Yılmaz, A. O., 2008. Püskürtme Beton Bilgi Föyleri Çözümlü Örnekler, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, İstanbul.
- ASTM, 2010. Standart Test Method for Compressive Strength and Elasti Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, American Standarts for Testing Materials, D7012-10, United States, 9. s
- Ayış,H., 2010. Tünel Açma Sistemlerinde Çelik Lifli Püskürtme Betonun Uygulanabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi., Fen Bilimleri İnstitüsü, İstanbul,
- Balci, C., Demircin, M.A., Copur, H. and Tuncdemir, H., 2004. Estimation of optimum specific energy based on rock properties for assessment of roadheader performance. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 633–642.
- Bieniawski, ZT., 1975. The Point Load Test in Geotechnical Practice. Eng. Geol., Sept., pp 1-11.
- Bilgin, N. and Kahraman, S., 2003. Drillability Prediction in Rotary Blast Hole Drilling. International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET, pp 177-181.
- Bilgin, N., Dincer, T., Copur, H. and Erdogan, M., 2004. Some geological and geotechnical factors affecting the performance of a roadheader in an inclined tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 19, 629–636.
- Bilgin, N., Tumaç, D., Feridunoglu, C., Karakas, A.R. and Akgul, M., 2005. The performance of a roadheader in high strength rock formations in Küçüksu tunnel, Underground Space Use. In: Proceeding of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress, May, Istanbul, eds. Erdem and Solak, 815–820.

- Bilin, N., 2011. Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties, *Scientific Research and Essays*, 6, 2, 382-387.
- Birinci, A. ve Akçın, N.A., 1990. Asma işletmesi Yeraltı Delik Delme İşlerinde Kullanılan Burguların Performansını Etkileyen Faktörler. Türkiye 7. Kömür Kongresi, Mayıs, Zonguldak Türkiye, Bildiriler Kitabı: 51-64.
- Cerchar, 1986. Centre d'Etudes et Recherches de Charbonnages de France, The Cerchar abrasiveness index, France, 12.
- Çapık., M, Yılmaz, A.O., Yaşar S., ve Çavuşoğlu, İ. 2015. Matkap Aşınmaları ve Eşdeğer Kuvars İçeriği, 24rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey, April, Antalya, Bildiriler Kitabı: 474-481.
- Çapık., M, Yılmaz, A.O., Yaşar S., Yaralı, O. ve Çavuşoğlu, İ., 2013a, Jumbo Delici Makinesinin Çalışma Performansı ve Spesifik Enerji Değerleri, Proceedings of the 3rd International Symposium on Underground Excavation for Transportation, İstanbul, 191-200 s.
- Çapık., M, Yılmaz, A.O., Yaşar S., Yaralı, O. ve Çavuşoğlu, İ., 2013b . Matkap Aşınımı ve Ömrü, Proceedings of the 3rd International Symposium on Underground Excavation for Transportation, İstanbul, 225-232.
- Çopur, H., Tunçdemir, H., Bilgin, N. and Dinçer, T., 2001. Specific energy as a criterion for use of rapid excavation systems in Turkish mines. Trans. Inst. Min. Metal. Sec.110, 149-157.
- Dahl, F., 2003. DRI Standarts, NTNU, Angleggsdrift, Trondheim. 21p.
- Tarhan,F., 1989. Mühendislik Jeolojisi Prensipleri, K.T.Ü. Basımevi, Trabzon.
- Dahl, F., 2003. DRI, BWI, CLI Standards, NTNU- Angleggsdrift, Trondheim, 21-24.
- Deere, D.U. and Miller, R.L., 1966. Engineering Classification and Index Properties of Intact Rock, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, 90-101.
- Demirdag, S., Sengun, N., Ugur, İ., Efe, T., Akbay, D. and Altindag, R., 2014. Variation of vertical and horizontal drilling rates depending on some rock properties in the marble quarries. International Journal of Mining Science and Technology 24, 269–273.
- Emiroğlu, A., 2010. İstanbul (4.Levent-Hacıosman Arası) Metro Tünelindeki Mühendislik Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Farrokh, E., Rostami, J. and Laughton, C. 2012. Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. Tunnelling and Underground Space Technology 30, 110–123.

- Fowell, R.J., Gillani, T. and Altinoluk, S., 1992. Wear Characterization of Rock, EUROCK, Chester, England, 13-18.
- Fowell, R.J. and Johnson, S.T., 1982. Rock classification and assessment for rapid excavation, Proc. of the Symp. on Strata Mech., Newcastle Upon Tyne, 241-244.
- Gehring, K.H., 1997. Classification of drillability, cuttability, boreability and abrasivity in tunnelling. Felsbau 15, 183–191.
- Gül Selman, H., 2014. Tünel Kazısı Sebebiyle Meydanda Gelen Zemin Oturmaları ve Mevcut Yapılara Olan Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hamzaban MT, Memarian, H. and Rostami, J., 2014. Continuous monitoring of pin tip wear and penetration into rock surface using a new Cerchar abrasivity testing device. Rock Mech Rock Eng 47, 689–701
- Hoseinie, S.H., Ataei, M. and Aghababaie, A., 2014. A laboratory study of rock properties affecting the penetration rate of pneumatic top hammer drills. Journal of Mining & Environment, Vol.5, No.1, 25- 34.
- ISRM, 1985. Suggested Method for Determining Point Load Strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 22,2,51-60.
- ISRM, 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM suggested Methods. E.T.Brown (ed), Pergamon Press, 211 s.
- Kahraman, S., 1999. Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis, Int J Rock Mech Min Sci, 36, 981–989.
- Kahraman, S., Bilgin, N. and Feridunoglu C., 2003. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills Int J Rock Mech Min Sci, 40, 711–723.
- Karaman, E., 2008. Sert Kayaçlarda Delinebilirlik Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kasling, H. and Thuro K., 2010. Determining abrasivity of rock and soil in the laboratory. Geologically Active – Williams et al. (eds) Taylor & Francis Group, London, 1973-1980.
- Kolymbas, D., 2005. Tunneling and Tunnel Mechanics, A Rational Approach to Tunnelling, Springer Publications, Innsbruck.
- Li Z. and Itakurab, K., 2012. An analytical drilling model of drag bits for evaluation of rock strength. Soils and Foundations 52(2), 216–227
- Lunardi, P., 2008. Design And Construction of Tunnels, Springer Publications, Milano.

- Madan, M.M., 2008. Underground Excavation with Road header- Case Studies. World Tunnel Congress, India, 1073-1084.
- McFeat-Smith, I. and Fowell R.J., 1979. The Selection and Application of Roadheaders for Rock Tunneling, Proc 4 th Rapid Excavation and Tunneling Conference Atlanta, AIME, Newyork, 261-279.
- Michalakopoulos, T.N., 2006. Anagnostou, V.G., Bassanou, M.E., Panagiotu, G.N., The influence of steel styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value. Technical note. Int Journal of Rock Mech Min Sci 43, 321-327.
- Ocak, İ., Eyigün, Y., Çınar, M. ve Nahya, T., 2007. Kadıköy-Kartal Metro Tünellerinde Kullanılan Roadheader'ın Kazı Performansı ve Keski Tüketiminin Araştırılması, Ulaşımında Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu, İstanbul, 199-206 s.
- Okyay, V., 2015. Yeni Avusturya Tünel Yöntemi, (NATM), tünel teknolojisi dergisi, s, 30-34.
- Özdemir,A., 2011. Çambaşı Regülatörü ve HES (Çaykara/Trabzon) Tünel Güzergahındaki Kayaların Bazı Mühendislik Özellikleri İle Delinebilirlikleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Plinninger, R. J., Kasling, H., Thuro, K. and Spaun, G., 2003. Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, 259-263.
- Plinninger, R.J., Spaun, G. and Thuro, K., 2002. Prediction and Classification of tool wear in Drill and blast tunneling . In Van.Roy & Jermy (editors), Proceedings 9th Int. IAEG Congress, Durban, South Africa, 2226-2236.
- Polat, D., 2010. Natm Yöntemi Kullanılarak Tünel Tasarımı Ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Reddish, D.J. and Yaşar, E., A. 1996. New Portable Rock Strength Index Test Based on Specific Energy of Drilling, Technical Note, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 543-548.
- Robbins, R.J., 1992. Large diameter hard rock boring machines: state of the art and development in view of alpine base tunnels. Felsbau, 10, 2, 56–62.
- Rostami, J., Ghasemi, A., Gharahbagh, E.A., Dogruoz, C. and Dahl, F., 2014.Study of dominant factors affecting Cerchar abrasivity index. Rock Mech Rock Eng, 47, 1905–1919.

- Rostami, J., Ozdemir, L., Bruland, A. and Dahl, F., 2005. Review of Issues Related to Cerchar Abrasivity Testing and Their Implications on Geotechnical Investigations and Cutter Cost Estimates, Rapid Excavation and Tunneling Conference, Seattle, WA,
- Selmer-Olsen, R. and Blendheim, O.T., 1970. On the drillability of rocks by percussive drilling. Proc. 2nd congress of the ISRM, Belgrade.
- Sengun, N. and Altindag, R., 2013. Prediction of specific energy of carbonate rock in industrial stones cutting process, Arab. J. Geosci. 6, 183–1190.
- Şekercioğlu, E., 2007. Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 286.
- Tamrock., 1987. Handbook of underground drilling, Tamrock Drills SF-33310 Tampere, Finland, 327.
- Tarun R. Naik, T.R., Malhotra, V.M., Popovics, J.S., The Ultrasonic Pulse Velocity Method, In: V.M. Malhotra and N.J. Carino, Edited 2004, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Crc Press.
- Thuro, K., Plinninger, R.J. and Spaun, G., 2002. Drilling, Blasting and Cutting- is it possible to quantify geological parameters relating to excavatability?, Engineering Geology for Developing Countries - Proceedings of 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment. Durban, South Africa, 2853-2862.
- Thuro, K. and Phnninger, R.J., 1998. Einführung in die ingeniurgeologie, 7 aufläge lehrstuhl für allgewandte und ingénieur géologie Technische U in versität München, 71-75.
- Thuro, K. and Spaun., G., 1996. Drillability in hard rock drill and blast Tunnelling, Geomechanics, 1-11.
- Thuro, K., 1997a. Drillability prediction- Geological influences in hard rock drill and blast Tunnelling, Geol Rundsch 86, 426-438.
- Thuro, K., 1997b. Prediction of drillability in hard rock tunnelling by drilling and blasting, Balkema, Rotterdam, 103-108.
- Tiryaki, B. and Dikmen A.C., 2006. Effects of Rock Properties on Specific Cutting Energy in Linear Cutting of Sandstones by Picks. Rock Mech. Rock Engng. 39,2, 89–120.
- Uğuz, M.F., 2011. Doğu Karadeniz Bölgesinin Jeolojisi (Bayburt-Gümüşhane- Trabzon), MTA, Ankara.
- Ulusay R, Göçeoğlu C. ve Binal A., 2001. Kaya mekaniği laboratuvar deneyleri, TMMOB jeoloji mühendisleri odası, 161.

Ulusay, R., Gökçeoğlu, C. ve Binal, A., 2001. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleeri, 1. Baskı, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara, 161.

West, G., 1989. Rock abrasiveness testing for tunnelling. Technical note. Int.J.Rock Mech.&Min. Sci. Geomech. 26, 151-160.

Yaşar, E., Ranjith, P.G. and Viete, D.R., 2011. An experimental investigation into the drilling and physico-mechanical properties of a rock-like brittle material. Journal of Petroleum Science and Engineering 76, Ankara, 185–193.

URL, 1. www.atlascopco.com/images/technical%20specification%20boomer%2020282_9851%202500%2001d_web_tcm821-1533190.pdf . 15 Ağustos 2016

URL, 2. [www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/1281/Internet/MANorway/se03605.nsf/Alldocs/Products*5CDrill*rigs*and*rock*drills*5CUnderground*drill*rigs*5CTunneling*jumbos*2ADT8/\\$File/DT820.pdf](http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/1281/Internet/MANorway/se03605.nsf/Alldocs/Products*5CDrill*rigs*and*rock*drills*5CUnderground*drill*rigs*5CTunneling*jumbos*2ADT8/$File/DT820.pdf). 19 Ağustos 2016

EKLER

Ek 1. Kayaçların birim hacim ağırlık deneyi sonuçları

Numune No	Doğal B.H.A (kN/m ³)	Kuru B.H.A (kN/m ³)	Doydun B.H.A (kN/m ³)
M-1	26,90	26,76	27,01
	26,81	26,62	26,94
	27,03	26,87	27,13
Ortalama	26,91	26,75	27,03
M-2	27,34	27,26	27,35
	27,63	27,69	27,77
	27,28	27,19	27,29
Ortalama	27,42	27,38	27,47
M-3	27,71	27,60	27,64
	27,49	27,44	27,51
	27,60	27,41	27,54
Ortalama	27,60	27,48	27,56
M-4	27,63	27,51	27,69
	27,11	26,98	27,10
	26,27	27,29	27,46
Ortalama	27,00	27,26	27,42
M-5	27,35	27,20	27,39
	27,38	27,23	27,39
	27,27	26,94	27,17
Ortalama	27,33	27,12	27,32
M-6	27,53	27,49	27,54
	27,52	27,48	27,53
	27,74	27,66	27,76
Ortalama	27,59	27,55	27,61

Numune No	Doğal B.H.A (kN/m ³)	Kuru B.H.A (kN/m ³)	Doydun B.H.A (kN/m ³)
Ç-1	25,55	25,35	25,50
	25,42	25,38	25,47
	25,39	25,32	25,44
	25,47	25,32	25,48
Ortalama	25,46	25,34	25,47
Ç-2	24,93	24,64	24,96
	24,95	24,67	24,99
	25,36	25,17	25,39
	25,34	25,17	25,35
Ortalama	25,15	24,91	25,17
Ç-3	25,61	25,40	25,51
	25,45	25,28	25,46
	25,54	25,31	25,47
Ortalama	25,53	25,33	25,48
Ç-4	24,56	24,36	24,64
	24,54	24,36	24,62
	24,70	24,48	24,75
Ortalama	24,60	24,40	24,67
Ç-5	24,23	24,00	24,26
	24,00	23,76	24,03
	23,87	23,70	23,93
	24,00	23,75	24,04
Ortalama	24,02	23,80	24,06

Ek 2. Delinebilirlik deney sonuçları

Numune No	Kırılgenlık deney sonuçları
M-1	42,63
	41,11
	42,40
Ortalama	42,05
M-2	38,85
	37,36
	38,08
Ortalama	38,10
M-3	35,68
	36,61
	34,77
Ortalama	35,69
M-4	41,99
	40,71
	39,28
Ortalama	40,66
M-5	42,91
	45,05
	42,94
Ortalama	43,63
M-6	33,44
	34,07
	33,47
Ortalama	33,66
Ç-1	40,02
	36,61
	40,61
Ortalama	39,08
Ç-2	47,61
	46,11
	44,30
Ortalama	46,01
Ç-3	41,38
	42,59
	42,77
Ortalama	42,25
Ç-4	51,73
	52,12
	51,46
Ortalama	51,77
Ç-5	52,23
	51,74
	52,79
Ortalama	52,25

Ek 2'in devamı

Numune No	Sievers Minyatür delme deneyi
M-1	105,3
	108,5
	116,1
	30,3
Ortalama	90,05
M-2	18
	16,7
	16
	16,7
Ortalama	16,85
M-3	4,1
	8
	6,5
	4
Ortalama	5,65
M-4	25,3
	32,5
	35,6
	25,2
Ortalama	29,65
M-5	52,5
	49,6
	43,6
	54,8
Ortalama	50,13
M-6	3
	2
	2,5
	2,5
Ortalama	2,50

Numune No	Sievers Minyatür delme deneyi
Ç-1	5
	5,2
	5
	8
Ortalama	5,80
Ç-2	12,0
	18,0
	17,2
	11,0
Ortalama	14,55
Ç-3	6
	9,2
	8
	6,7
Ortalama	7,48
Ç-4	16
	16,3
	17,4
	12,6
Ortalama	15,58
Ç-5	32,1
	31
	29,1
	29,5
Ortalama	30,43

Ek 3. Jumbo makinaların spesifik enerji sonuçları

Tünel	Ort. Akım (Amper)	Güç (kW)	Kazılan malzeme miktarı (m³)	Net kazı hızı (m³/h)	Spesifik Enerji (kWh/m³)	Spesifik Enerji (kJ/m³)
Ç-1	176	66,88	0,095	0,234	285,74	0,079
Ç-2	175	66,50	0,095	0,252	263,40	0,073
Ç-3	174	66,12	0,095	0,236	279,61	0,078
Ç-4	172	65,36	0,095	0,253	258,31	0,072
Ç-5	160	60,80	0,095	0,266	228,78	0,064
M-1	135	51,30	0,095	0,223	229,94	0,064
M-2	167	63,46	0,095	0,197	322,33	0,090
M-3	176	66,88	0,095	0,190	351,97	0,098
M-4	159	60,42	0,095	0,211	286,65	0,080
M-5	151	57,38	0,095	0,213	269,89	0,075
M-6	178	67,64	0,095	0,184	367,99	0,102

Ek 4. Sievers minyatür delme testi spesifik enerji sonuçları

Numune no	Ort. Akım (Amper)	Güç (kW)	Kazılan malzeme miktarı m ³	Net kazı hızı (m ³ /h)	Spesifik Enerji (kWh/m ³)	Spesifik Enerji (kJ/m ³)
Ç-1	176	66,88	0,095	0,234	285,74	0,079
Ç-2	175	66,50	0,095	0,252	263,40	0,073
Ç-3	174	66,12	0,095	0,236	279,61	0,078
Ç-4	172	65,36	0,095	0,253	258,31	0,072
Ç-5	160	60,80	0,095	0,266	228,78	0,064
M-1	135	51,30	0,095	0,223	229,94	0,064
M-2	167	63,46	0,095	0,197	322,33	0,090
M-3	176	66,88	0,095	0,190	351,97	0,098
M-4	159	60,42	0,095	0,211	286,65	0,080
M-5	151	57,38	0,095	0,213	269,89	0,075
M-6	178	67,64	0,095	0,184	367,99	0,102

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Bayan Sum'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ulan Batur'da tamamladı. 2009 yılında Moğolistan'ın Bilim ve Teknoloji Üniversite Jeoloji Sondajı Mühendisi Bölümüne girdi. 2013 yılında mezun olduktan sonra Türkiye'de Türkçe hazırlık okudu. 2014 yılında K.T.Ü. Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek lisans öğrenimine başladı.

