

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAYAÇ KESİLEBİLİRLİĞİNİN TAYİNİ İÇİN DÜŞEY KAYAÇ KESME  
SETİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Maden Yüksek Mühendisi Serdar YAŞAR**

**OCAK 2018**

**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAYAÇ KESİLEBİLİRLİĞİNİN TAYİNİ İÇİN DÜŞEY KAYAÇ KESME SETİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Maden Yüksek Mühendisi Serdar YAŞAR**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**  
**"DOKTOR (MADEN MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 / 12 / 2017**

**Tezin Savunma Tarihi : 11 / 01 / 2018**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ**

**Trabzon 2018**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalında  
Serdar YAŞAR Tarafından Hazırlanan**

**KAYAÇ KESİLEBİLİRLİĞİNİN TAYİNİ İÇİN DÜŞEY KAYAÇ KESME SETİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 26 /12/2017 gün ve 1733 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
DOKTORA TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**


**Başkan : Prof. Dr. Sair KAHRAMAN**

**Üye : Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN**

**Üye : Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ**

**Üye : Prof. Dr. Kerim AYDINER**

**Üye : Doç. Dr. Hakan ERSOY**



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

“Kayaç Kesilebilirliğinin Tayini için Düşey Kayaç Kesme Setinin Geliştirilmesi” isimli bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır. Bu doktora çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından FDK-2015-5382 kodlu Doktora Tez Projesi ile desteklenmiştir, bu desteğinden dolayı BAP Birimi’ne teşekkürlerimi bildiririm. Öncelikle, doktora tezi çalışmalarım süresince bilgisini ve tecrübesini paylaşmaktan kaçınmayan danışmanım Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ’a yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Doktora tezinin izlenmesi aşamasındaki yardımlarından dolayı tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Kerim AYDINER ve Doç. Dr. Hakan ERSOY’a şükranlarımı bildiririm. Ayrıca, tez çalışmama yaptıkları katkılarından dolayı jüri üyelerim Prof. Dr. Sair KAHRAMAN ve Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN’e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışması sırasında geliştirilen kesme setinin tasarımında ve üretimindeki yardımlarından dolayı Ahmet TONBUL ve Seyfullah TONBUL’a teşekkür ederim. Saha çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇAVUŞOĞLU, Arş. Gör. İlker ERKAN, maden mühendisi Nuri SEVİNÇ, maden mühendisi Osman Emin DOĞAN ve maden yüksek mühendisi Ergin KAHRAMAN’a teşekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadar benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, her konuda bana destek olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak da manevi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, kahrımı çeken sevgili eşim Özüm YAŞAR’a sonsuz şükranlarımı sunarım.

*“En iyi planları farelerin ve insanların / Sıkça ters gider...” Robert Burns*

*“Bilgi ile birlikte duyulan şüphe artar.” Goethe*

*“Sözünü ettiğiniz şeyi ölçebiliyorsanız ve bunu rakamlarla anlatabiliyorsanız, onun hakkında bir şeyler biliyorsunuz demektir.” Lord Kelvin*

Serdar YAŞAR

Trabzon 2018

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum “Kayaç Kesilebilirliğinin Tayini için Düşey Kayaç Kesme Setinin Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ’ın 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.  
11 / 01 / 2018.

Serdar YAŞAR

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ .....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XVI
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş ve Amaç .....	1
1.2. Kazı Makineleri .....	4
1.3. Kollu Galeri Açma Makineleri (KGAM) .....	6
1.4. Kazı Makinelerinde Kullanılan Keskiler ve Kazı Prensipleri .....	13
1.5. Kama Tipi (Kazıyıcı) Keskiler İçin Geliştirilen Kaya Kesme Teorileri .....	18
1.5.1. Basit Şekli Kama Keskiler İçin Geliştirilen Kesme Teorileri.....	18
1.5.2. Konik Keskiler İçin Geliştirilen Kesme Teorileri .....	23
1.6. Kollu Galeri Açma Makinelerinde Kazı Performansı.....	26
1.6.1. Ampirik Yöntemlerle Kazı Performansı Tahmini.....	29
1.6.2. Kaya Kesme Deneyleri ile Kazı Performansı Tahmini .....	38
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	50
2.1. Düşey Kayaç Kesme Setinin (DKKS) Tasarımı ve Üretimi .....	52
2.2. Keskilerin İmal Edilmesi.....	56
2.3. Yük Hücresinin Kalibrasyonu .....	59
2.4. Kesme Deneylerinin Standartlaştırılması.....	61
2.5. Kesme Deneylerinde Kullanılan Kaya Numunelerinin Karakterizasyonu.....	65
2.5.1. Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	68
2.6. Basit Kama Tipi Keski ile Kontrollü Kaya Kesme Deneyleri .....	75
2.6.1. Etkileşimsiz Kesme Deneyleri .....	77
2.6.2. Etkileşimli Kesme Deneyleri.....	79

2.7.	Düşey Kayaç Kesme Seti (DKKS) ile Karot Kesme Deneyinin Gerçekleştirilmesi.....	81
2.8.	Disk Keskiler ile Kesme Denemeleri .....	85
2.9.	Konik Keskiler ile Kesme Deneyleri.....	86
2.9.1.	Konik Keskiler ile Etkileşimsiz Kesme Deneyleri.....	87
2.9.2.	Konik Keskiler ile Etkileşimli Kesme Deneyleri .....	89
2.10.	Arazi Çalışmaları.....	91
2.10.1.	Örnek Uygulama Sahası 1: Yeraltı Linyit İşletmesi .....	91
2.10.2.	Örnek Uygulama Sahası 2: Yeraltı Soğuk Hava Deposu Tüneli .....	93
2.10.3.	Sahadan Alınan Numunelerin Karakterizasyonu .....	93
2.10.4.	Saha Numuneleri Üzerinde Kesme Deneyleri.....	97
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA .....	101
3.1.	Basit Kama Keski ile Kesme Deneylerinin İrdelenmesi .....	102
3.2.	Düşey Kayaç Kesme Setinde (DKKS) Karot Kesme Deneylerinin Yapılması.....	115
3.3.	Düşey Kayaç Kesme Setinde (DKKS) Konik Keskiler ile Tam Boyutlu Kesme Deneylerinin Yapılması.....	119
3.4.	Düşey Kayaç Kesme Setinden (DKKS) Elde Edilen Verilerin Teorik Çalışmalar ile Karşılaştırılması .....	134
3.5.	Arazide Çalışan Kollu Galeri Açma Makinelerinin Kazı Hızlarının Tahmin Edilmesi.....	153
3.6.	Düşey Kayaç Kesme Seti (DKKS) ile İlgili Genel Değerlendirme .....	163
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	172
5.	KAYNAKLAR.....	176
6.	EKLER .....	193

## ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

KAYAÇ KESİLEBİLİRLİĞİNİN TAYİNİ İÇİN DÜŞEY KAYAÇ KESME SETİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ

Serdar YAŞAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ  
2018, 192 Sayfa, 19 Sayfa Ek

Mekanize kazı delme-patlatma yöntemine göre başta yüksek kazı hızı olmak üzere birçok avantaj sunmaktadır. Ancak, bu hızların yakalanabilmesi için kazı makineleri kazılacak formasyona uygun olarak seçilmelidir ve kazı hızları önceden kestirilmelidir. Bu amaç için kullanılan en doğru yöntem kaya kesme deneyleridir. Kaya kesme deneylerinin birçok üstünlüklerine rağmen birtakım eksiklikleri bulunmaktadır. Bu eksikliklerin başında çok az sayıda araştırma merkezinde bulunmaları gelmektedir. Bundan dolayı, araştırmacılar farklı tasarımlarda deney düzenekleri geliştirmeye çalışmışlardır. Bu çalışmada, hemen hemen her kaya mekaniği laboratuvarında bulunan hidrolik test makinelerine bir eklenti olarak tamamen taşınabilir, sökülüp/takılabilir ve seri üretime uygun, düşey kayaç kesme seti (DKKS) geliştirilmiştir. DKKS ile kontrolsüz ve kontrollü kaya kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. En çok tekrar üretilen ve kullanılan kaya kesme deneyi olan küçük boyutlu kesme deneyi (karot kesme deneyi), DKKS ile gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Buna ek olarak, konik ve radyal kesimler ile kaya kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm kuvvet değerleri teorik modeller ile karşılaştırılmıştır. Son olarak da iki adet kollu galeri açma makinesinin kazı hızları DKKS ile kestirilmeye çalışılmıştır ve sonuçlar tartışılmıştır. Tüm laboratuvar ve arazi çalışmalarının sonucunda, DKKS ile kaya kesme deneylerinin, rutin bir kaya mekaniği deneyi gibi, başarılı bir biçimde yapılabileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Düşey kayaç kesme seti, Kazı makineleri, Kollu galeri açma makinesi, performans tahmini, Kazı mekaniği, Spesifik enerji, Kesme kuvveti, Kaya kesme deneyleri

PhD. Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT OF VERTICAL ROCK CUTTING RIG FOR ROCK CUTTABILITY  
ASSESSMENT

Serdar YAŞAR

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mining Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ  
2018, 192 Pages, 19 Pages Appendices

Mechanical excavation presents many advantages over drill & blast tunnelling, especially higher excavation rates. However, these machines should be selected suitable to relevant rock formation and cutting rates of these machines should be estimated as well. Rock cutting tests are regarded as the best options for this purpose. Even though these tests have superiorities, they suffer from certain drawbacks such as being available in very limited research centers. Therefore, a number of researchers tried to develop alternative cutting testing arrangements. In this study, a new rock cutting testing equipment, vertical rock cutting rig (VRCR) was developed which is mobile, mountable/demountable and ready for mass production, and VRCR is designed as an attachment to hydraulic press machines which can be found approximately in every rock mechanics laboratory. Controlled and uncontrolled cutting tests were carried out with VRCR. Most used and reproduced testing arrangement, small scale rock cutting test (core cutting test) was realized with VRCR. In addition to this, conical and radial picks were used for cutting tests. All cutting forces obtained from cutting tests were compared with theoretical models. Finally, cutting rates of two roadheaders were predicted with using VRCR. In the light of the results of experimental campaign and field studies, it has been shown that rock cutting tests can be performed in VRCR successfully as a routine rock mechanics test.

**Keywords:** Vertical rock cutting rig, Rock cutting machines, Roadheaders, Performance prediction, Rock cutting mechanics, Specific energy, Cutting force, Rock cutting tests

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Tünel açma metotlarının zemin/kaya koşullarına göre sınıflandırılması (Tatiya, 2005). .....	5
Şekil 1.2.	Şekil 1.2. (a) Tam cepheli tünel açma makinesi (Herrenknecht ve Bappler, 2014) (b) Kollu galeri açma makinesi (Madencilik Türkiye, 2015). .....	6
Şekil 1.3.	C. T. Drake tarafından patenti alınan KGAM'ye benzeyen ilk tasarım (Stack, 1982). .....	7
Şekil 1.4.	(a) KGAM'nin genel kısımları (Chapman vd., 2010) (b) KGAM ile kazı adımları .....	8
Şekil 1.5.	(a) Aksiyel ve (b) tambur tipi KGAM (Fowell, 1993) (c) KGAM'lerde farklı kesme modları (Acaroğlu ve Ergin, 2006). .....	10
Şekil 1.6.	Aksiyel ve tambur tip KGAM için kazı hızlarının tek eksenli basınç dayanımına göre değişimi (Schenck, 1982). .....	12
Şekil 1.7.	(a) Keski tipleri (b) Kama tipi (kazıyıcı) keskinin türleri .....	14
Şekil 1.8.	Konik ve radyal keskinin tasarım değişkenleri .....	14
Şekil 1.9.	Basit şekilli kama keski ile kazı döngüsü, kuvvet oluşumu ve keskiye etkiyen kuvvetler (a) keskinin kayaktan büyük bir parça koparması (b) keskinin kayaktan ufak parçalar sökmesi (c) keskinin kayaktan yine büyük bir parça koparması .....	17
Şekil 1.10.	(a) Evans (1958) teorisinin şematik gösterimi (b) Evans tarafından gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kırılma hattı (c) Evans teorisinin Roxborough (1973) tarafında asimetric kama tipi keskin için geliştirilmesi .....	20
Şekil 1.11.	(a) Nishimatsu (1972) kaya kesme teorisinin şematik gösterimi (b) Kesme sırasında gerilmelerin dağılımı ve kuvvet oluşumu .....	22
Şekil 1.12.	Evans (1984) teorisinde konik keskinin battığı kayada oluşan delikteki gerilmeler .....	24
Şekil 1.13.	Net kazı hızı ile darbeli delici hızı ve spesifik enerji arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Bilgin, 1983). .....	29
Şekil 1.14.	Sandbak (1985) tarafından geliştirilen makine ilerleme hızı ve keski sarfiyatı ile RMR arasındaki ilişkiyi gösteren model (1 feet = 0,3048 m) .....	30
Şekil 1.15.	Farmer ve Garrity (1987) tarafından KGAM'nin performans tahmini için önerilen abak .....	31
Şekil 1.16.	KGAM'nin performans tahmini için Gehring (1989) tarafından önerilen eğriler .....	32
Şekil 1.17.	Tek eksenli basınç dayanımı ile net kazı hızı arasındaki ilişki (Natau vd., 1991). .....	33



Şekil 1.18. Kaya kütlesi ve kaya özelliklerinin göreceli olarak KGAM'nin performansı üzerine etkileri (Thuro ve Plinninger, 1998'den değiştirilerek). .....	35
Şekil 1.19. Günümüzde faal olan tam boyutlu kaya kesme deney setleri (a) İstanbul Teknik Üniversitesi (Tümaç vd., 2012) (b) Colorado School of Mines (URL-2, 2017) (c) Missouri University of Science and Technology (Abu Bakar vd., 2014) (d) Korean Institute of Construction Technology (Cho vd., 2013). .....	39
Şekil 1.20. Keskiler arası mesafenin kesme derinliğine oranı ile spesifik enerjinin değişimi.....	41
Şekil 1.21. Farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen kaya kesme deney düzenekleri (a) Roxborough ve Philips (1974) tarafından geliştirilen küçük boyutlu kesme seti (Bilgin, 1977) (b) Bilgin ve Shahriar (1988) tarafından geliştirilen küçük boyutlu kesme seti (Yaşar vd., 2015) (c) Detorunay vd. (1997) tarafından geliştirilen deney seti (URL-3, 2017) (d) Kang vd. (2016) tarafından geliştirilen küçük lineer kesme seti (e) Feridunoğlu (2009) tarafından geliştirilen taşınabilir kesme seti (Tümaç vd., 2012) (f) Entacher vd. 2014 tarafından geliştirilen ölçekli kaya kesme seti (g) Torino Politeknik'te geliştirilen orta ölçekli lineer kesme seti (Cardu vd., 2017). .....	43
Şekil 1.22. Küçük boyutlu kesme deneyi ve deney şartları (Yaşar vd., 2015; Fowell, 1993). .....	45
Şekil 1.23. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen KGAM net kazı hızının karot kesme deneyi spesifik enerjisi ile değişimi .....	47
Şekil 2.1. Deneysel çalışmaların genel akım şeması (DKKS: Düşey kayaç kesme seti, KGAM: Kollu galeri açma makinesi) .....	51
Şekil 2.2. Şekil 2.2. (a) Hidrolik basınç test makinesi (b) Hidrolik eğilme test makinesi (c) DKKS'nin ilk tasarımı (d) DKKS'nin son tasarımı (e) Servo-kontrollü bir test makinesinin şematik görünümü (Hudson vd., 1972). .....	53
Şekil 2.3. (a) DKKS'nin üretim aşamasındaki görüntüleri (b) DKKS'nin hidrolik eğilme test makinesinin içine montajı (c) DKKS'nin temel parçaları.....	54
Şekil 2.4. (a) Hidrolik eğilme test makinesinin genel bileşenleri ve DKKS (b) DKKS'nin bileşenleri (c) DKKS ile kayaç kesme (Yaşar ve Yılmaz, 2017)...	55
Şekil 2.5. Negatif uç açılı keskinin detaylı olarak görünümü. ....	57
Şekil 2.6. Çalışma kapsamında üretilen tüm keskinler. ....	58
Şekil 2.7. (a) Hidrolik eğilme test makinesindeki yük hücresinden okunan değerlerin kalibrasyon yük hücresi ile doğrulanması (b) Makine ve kalibrasyon yük hücrelerinden okunan kuvvet değerleri. ....	60
Şekil 2.8. Kalibrasyon ve eğilme test makinesinin yük hücrelerinden okunan kuvvet değerleri. ....	60
Şekil 2.9. Bir oniks numunesi üzerinde basit kama tipi keski ile kesme denemeleri. ....	61
Şekil 2.10. Kaya kesme deneyinin genel aşamaları (DKKS: Düşey kayaç kesme seti). ....	62
Şekil 2.11. MS Excel'de oluşturulan veri işleme sayfası.....	64

Şekil 2.12. Kaya kesme sırasında oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi ve kuvvet değerlerinin gösterimi .....	65
Şekil 2.13. (a) Kırmızı andezit numunesinin ince kesit görüntüsü (b) Gri andezit numunesinin ince kesit görüntüsü .....	66
Şekil 2.14. (a) Yeşil tuf numunesinin ince kesit görüntüsü (b) Gri tuf numunesinin ince kesit görüntüsü.....	67
Şekil 2.15. (a) Kahverengi vitrik tuf numunesinin ince kesit görüntüsü (b) Sarı vitrik tuf numunesinin ince kesit görüntüsü .....	68
Şekil 2.16. Blok numunelerden alınan karot numuneleri .....	69
Şekil 2.17. (a) 200 ton kapasiteye sahip hidrolik basınç test makinesi (b) Dolaylı çekme dayanımı deneylerinde kullanılan çene (c) Test makinesinde tek eksenli basınç deneyi .....	71
Şekil 2.18. Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kırılan karot numuneleri .....	72
Şekil 2.19. Dolaylı çekme dayanımı deneyinde kırılan disk numuneleri .....	73
Şekil 2.20. Kontrollü kesme deneylerinde kullanılan küçük blok numuneler.....	75
Şekil 2.21. (a) Basit kama tipi keski ve özellikleri (b) Basit kama tipi keski ile kaya kesme .....	76
Şekil 2.22. (a) Aşınan keskinin bilenmesi (b) Keskinin mikroskop altında incelenmesi (c) Kesme deneyi sırasında kırılmış bir keski.....	77
Şekil 2.23. Basit kama tipi keskinin ile yapılan kesme deneylerinin ve kesilen numunelerinin görüntüleri .....	79
Şekil 2.24. Çeşitli keskinin arası mesafe/kesme derinliği oranında gerçekleştirilen kaya kesme deneylerinin görüntüleri ve etkileşimsiz kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji kesme derinliği grafiği.....	80
Şekil 2.25. Önceki çalışmadan kalan kayaların ince kesit görüntüleri (a) Dolomitik kireçtaşı (b) Granadiorit (c) Fosilli kumtaşı (d) Litik tuf (e) Vitrik tuf (Do: Dolomit; Cal: Kireçtaşı; Qtz: Kuvars; Kfs: Alkali feldspat; Pl: Plajiyoklas; Cpx: Klinopiroksen) (Yaşar vd., 2015). .....	82
Şekil 2.26. (a) Karot kesme deneyinde kullanılan keski ve özellikleri (b) Deney öncesi hazırlık (c) Blok numune üzerinde kesme deneyi (d) Karot numunesi üzerinde kesme deneyi .....	83
Şekil 2.27. (a) V kesitli mini-disk keski (d) Mini-disk keski ile sarı vitrik tuf numunesinin kesilmesi .....	85
Şekil 2.28. (a) Konik keskinin ile etkileşimli kesme deneyleri (b) Konik keskinin ile etkileşimsiz kesme deneyleri (c) Konik keskinin özellikleri (d) Konik keskinin ile kaya kesme deneyi.....	86
Şekil 2.29. Konik keski ile etkileşimsiz modda kesilen kırmızı andezit numunesi (d = 5 mm) .....	87
Şekil 2.30. (a) Etkileşimsiz kesme deneylerinden elde edilen SE-d grafiği (b) Gri tuf numunesi üzerinde yapılan etkileşimli kesme deneyi (d = 9 mm, s = 27 mm). 89	

Şekil 2.31. Arazi çalışmalarının yapıldığı sahaların yer bulduru haritası .....	92
Şekil 2.32. Yeraltı soğuk hava deposunda çalışan KGAM (a) KGAM kesici kafa ve aynanın durumu (b) KGAM toplayıcı ünitesi (c) KGAM'nin kazı sırasındaki görüntüsü (d) KGAM'nin genel görünüşü .....	94
Şekil 2.33. Sahadan temin edilen numunelerin ince kesit görüntüleri (a) Volkanik kumtaşı (b) Kristal tuf .....	95
Şekil 2.34. (a) Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kırılan volkanik kumtaşı numunesi (b) Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kırılan kristal tuf numunesi (c) Dolaylı çekme dayanımı deneyinde kırılan volkanik kumtaşı numunesi (d) Dolaylı çekme dayanımı deneyinde kırılan kristal tuf numunesi .....	96
Şekil 2.35. Sahadan alınan ve kaya kesme deneylerinde kullanılan blok numuneler (a) alçı içine sabitlenmiş volkanik kumtaşı (b) Kristal tuf.....	97
Şekil 2.36. Saha numuneleri üzerinde konik kesimler ile etkileşimli kesme deneyleri (a) Volkanik kumtaşı (b) Kristal tuf.....	99
Şekil 2.37. (a) Kesme deneylerinde kullanılan radyal keski ve özellikleri (b) Arazide çalışan aksiyel tip KGAM (c) Radyal keski ile kesme deneyleri (d) Kristal tuf numunesi üzerinde radyal keski ile kesme deneyleri .....	100
Şekil 3.1. Bulgular ve tartışma kısmı ile ilgili genel akım şeması (KGAM: kollu galeri açma makinesi, DKKS: düşey kayaç kesme seti).....	102
Şekil 3.2. Maksimum ve ortalama kesme kuvvetinin kesme derinliğine bağlı olarak değişimi.....	104
Şekil 3.3. Spesifik enerji ve pasanın kesme derinliği ile değişimi .....	106
Şekil 3.4. (a) Sığ derinliklerde (1 mm ve aşağısı) yapılan kesme deneyinde oluşan tipik bir kuvvet dalgalanması (b) Büyük derinliklerde yapılan kesme deneyinde oluşan tipik bir kuvvet dalgalanması (c) FC'/FC oranının kesme derinliği ile değişimi.....	107
Şekil 3.5. Maksimum kesme kuvvetinin farklı kesme derinliklerine göre tek eksenli basınç dayanımı ile değişimi .....	108
Şekil 3.6. Maksimum kesme kuvvetinin farklı kesme derinliklerine göre dolaylı çekme dayanımı ile değişimi.....	109
Şekil 3.7. Spesifik enerjinin farklı kesme derinliklerine göre tek eksenli basınç dayanımı ile değişimi.....	110
Şekil 3.8. Spesifik enerjinin farklı kesme derinliklerine göre dolaylı çekme dayanımı ile değişimi.....	111
Şekil 3.9. Etkileşimli kesme deneylerindeki spesifik enerjinin s/d oranı ile değişimi ....	112
Şekil 3.10. Etkileşimli kesme deneylerindeki pasanın s/d oranı ile değişimi.....	113
Şekil 3.11. Etkileşimli kesme deneylerindeki FC'/FC oranının s/d oranı ile değişimi ....	114
Şekil 3.12. DKKS'den ve İTÜ'deki kesme setinden elde edilen kesme kuvveti değerleri .....	116
Şekil 3.13. DKKS'den ve İTÜ'deki kesme setinden elde edilen spesifik enerji değerleri .....	117

Şekil 3.14. Maksimum ve ortalama kesme kuvvetinin kesme derinliği ile değişimi .....	120
Şekil 3.15. (a) 1 mm kesme derinliğinde oluşan kuvvet-zaman grafiği (b) 9 mm kesme derinliğinde oluşan kuvvet-zaman grafiği (c) FC'/FC oranının kesme derinliği ile değişimi .....	121
Şekil 3.16. Spesifik enerjinin ve pasanın kesme derinliği ile değişimi .....	122
Şekil 3.17. Maksimum kesme kuvvetinin farklı kesme derinliklerinde tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile değişimi .....	124
Şekil 3.18. Spesifik enerjinin farklı kesme derinliklerinde tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile değişimi .....	126
Şekil 3.19. Etkileşimli kesme deneyinde spesifik enerjinin ve pasanın s/d oranı ile değişimi.....	128
Şekil 3.20. Etkileşimli kesme deneyinde FC'/FC oranının s/d oranı ile değişimi .....	130
Şekil 3.21. Konik kesme deneylerinden elde edilen sonuçların Bacı ve Bilgin (2007) tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması.....	132
Şekil 3.22. Basit kama tipi keskinler ile kesmede elde edilen maksimum kesme kuvveti ile kaya kesme teorileri ile bulunan kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması....	138
Şekil 3.23. Sürtünme açısının maksimum kesme kuvvetine etkisi.....	142
Şekil 3.24. Basit kama tipi keski ile kesme sırasında oluşan yanal kırılma bölgeleri .....	143
Şekil 3.25. Karot kesme deneyinden ve kesme teorilerinden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri .....	144
Şekil 3.26. Konik eskiler ile kesmede elde edilen maksimum kesme kuvveti ile kaya kesme teorileri ile bulunan kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması ( $\psi = 30^\circ$ ) .	150
Şekil 3.27. Konik eskiler ile kesmede elde edilen maksimum kesme kuvveti ile kaya kesme teorileri ile bulunan kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması ( $\psi = 10^\circ$ ) .	151
Şekil 3.28. Sahadan alınan numunelerin üzerinde gerçekleştirilen etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları.....	155
Şekil 3.29. Yeraltı linyit işletmesinde (Arazi 1) çalışan KGAM'nin ölçülen kazı hızı ve performans tahmin modellerinden elde edilen net kazı hızları.....	159
Şekil 3.30. Yeraltı soğuk hava deposu tüneline (Arazi 1) çalışan KGAM'nin ölçülen kazı hızı ve performans tahmin modellerinden elde edilen net kazı hızları ...	160
Şekil 3.31. Traverten numunesinin iki farklı deney düzeneğinde kesilmesi ile elde edilen kuvvet-zaman grafikleri.....	170

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1	Kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) gelişimi açısından önemli olaylar .....	7
Tablo 1.2.	Kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) kullanım alanları (Waldburger, 1992; Koeller vd., 2012; Jang vd., 2016; URL-1, 2017).....	8
Tablo 1.3.	KGAM'nin kesici kafa gücü ve ağırlığına göre sınıflandırılması (Heinöi, 1999).....	9
Tablo 1.4.	Bu çalışma kapsamında incelenen, basit kama ve konik keskiçiler için geliştirilen kaya kesme teorileri.....	18
Tablo 1.5.	Kazı makinelerinin performansını etkileyen parametreler (Bilgin vd., 2014).....	27
Tablo 1.6.	Makine kullanım oranını kullanılan tahkimat tipine göre sınıflandırılması (Kogelmann, 1988).....	28
Tablo 1.7.	Farklı kırılğanlık indeksi değerlerine karşılık gelen $k_1$ değerleri .....	37
Tablo 1.8.	RMCR'yi oluşturan değerlerin puanlaması (Restner ve Gehring, 2002) .....	38
Tablo 1.9.	Bazı kazı makineleri için enerji transfer oranı değerleri (Rostami vd. 1994).....	41
Tablo 1.10.	Masif ya da süreksizlik aralığı geniş olan formasyonlarda çalışan orta ve ağır kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) performansının karot kesme deneyi spesifik enerjisine göre sınıflandırılması (McFeat-Smith ve Fowell, 1979).....	46
Tablo 2.1.	Kuru ve doygun yoğunluk ve görünür porozite deneylerinden elde edilen sonuçlar.....	70
Tablo 2.2.	Tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı deneylerinin sonuçları.....	74
Tablo 2.3.	Basit kama tipi keskiçilerle yapılan etkileşimsiz kesme deneylerinin sonuçları.	78
Tablo 2.4.	Basit kama tipi keskiçilerle yapılan etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları ...	80
Tablo 2.5.	Karot kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar .....	84
Tablo 2.6.	Magmatik kayaların karot kesme deneyinde kesilmesinden elde edilen sonuçlar.....	84
Tablo 2.7.	Konik keskiçilerle yapılan etkileşimsiz kesme deneylerinin sonuçları.....	88
Tablo 2.8.	Konik keskiçilerle yapılan etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları .....	90
Tablo 2.9.	Kullanılan KGAM'nin özellikleri.....	91
Tablo 2.10.	Saha numunelerinin fiziksel özellikleri.....	96
Tablo 2.11.	Saha numunelerinin mekanik özellikleri.....	97
Tablo 2.12.	Saha numuneleri üzerinde gerçekleştirilen karot kesme deneyinin sonuçları.....	98

Tablo 2.13. Saha numuneleri üzerinde gerçekleştirilen konik keski ile etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları.....	99
Tablo 2.14. Kristal tuf üzerinde gerçekleştirilen radyal keski ile etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları.....	100
Tablo 3.1. Bağımlı rnekleme t testinin sonuçları.....	118
Tablo 3.2. Karot kesme ve konik keski ile gerçekleştirilen etkileşimli kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji değerleri .....	131
Tablo 3.3. Basit kama tipi keskiiler için elde edilen deneysel ve teorik FC' değerleri ....	136
Tablo 3.4. Konik kesme deneylerinden ve teorik modellerden elde edilen FC' değerleri ( $\psi=30^\circ$ ) .....	149
Tablo 3.5. Saha numunelerinin kesme deneylerinden elde edilen sonuçların zeti .....	154
Tablo 3.6. Arazide alışan KGAM için gerçekleştirilen performans tahminin sonuçları.....	156
Tablo 3.7. Performans tahmini modelleri için gerekli olan girdi parametreleri .....	157
Tablo 3.8. Performans tahmini modellerinden elde edilen net kazı hızı değerleri .....	158

## SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Numunenin Kesit Alanı
CI	: Koni Delici Değeri
CSM	: Colorado School of Mines
d	: Kesme Derinliği
D	: Numune apı
$D_{batma}$	: Kesici kafanın kaya içerisine batma miktarı
DKKS	: Düşey Kayaç Kesme Seti
E	: Elastisite Modülü
F	: Kırılma Kuvveti
FC	: Kesme Kuvveti
FC'	: Maksimum Kesme Kuvveti
FN	: Normal Kuvvet
FS	: Yanal Kuvvet
ISRM	: Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
k	: Kayacın İçsel Sürtünme Açısı
$k_0$	: Enerji Transfer Oranı
$k_1$	: Kayaç Kırılmalığı için Düzeltme Katsayısı
$k_2$	: Kaya Kütlesi Süreksizlik Özellikleri için Düzeltme Katsayısı
$k_p$	: Plastisite İndeksi
KGAM	: Kollu Galer i Açma Makinesi
M	: Kuru Ağırlık
$M_d$	: Doygun Ağırlık
n	: Gerilme Dağılım Faktörü
$N_c$	: Kaya ile temastaki toplam keski miktarı
NKH	: Net Kazı Hızı
p	: Görünür Porozite
P	: Makinenin Kesme Gücü
Q	: Pasa Miktarı
R	: Kesici kafa yarıçapı

$R_{avg}$	: Aktif kesme alanının yarıçapı
RMR	: Kaya Kütlesi Puanı
RQD	: Kaya Kalite Değeri
RMCI	: Kaya Kütlesi Kazılabilirlik İndeksi
RMCR	: Kaya Kütlesi Kazılabilirlik Puanı
RMBI	: Kaya Kütlesi Kırılgenlık İndeksi
RPI	: Kollu Galeri Açma Makinesi İlerleme İndeksi
RPM	: Kesici kafa devir hızı
$R_{BB}$	: Blok Boyutu Puanı
$R_{\sigma c}$	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı Puanı
$R_{SD}$	: Süreksizlik Durumu Puanı
$R_Y$	: Süreksizlik Yönelimi Puanı
$R^2$	: Determinasyon Katsayısı
s	: Kesimler Arası Mesafe
SE	: Spesifik Enerji
$SE_{opt}$	: Optimum Spesifik Enerji
t	: Numune Kalınlığı
T	: Tork
$T_{itme}$	: İtme gücü
TAM	: Tam Cepheli Tünel Açma Makinesi
V	: Örnek Hacmi
$V_b$	: Boşlukların Hacmi
w	: Keski Genişliği
W	: Makine Ağırlılığı
$W_j$	: Yıkım Enerjisi
x	: Kayaca ya da Kesme Koşuluna Bağlı Değişken
y	: Kayaca ya da Kesme Koşuluna Bağlı Değişken
$\theta$	: Yarım Uç Açısı (koni ya da simetrik kama)
$\xi$	: Eğiklik Açısı
$\alpha$	: Kesme Açısı
$\beta$	: Temizleme Açısı
$\gamma$	: Dalma Açısı
$\sigma_c$	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı



$\sigma_t$	: Direkt Çekme Dayanımı
$\sigma_{bt}$	: Dolaylı Çekme Dayanımı
$\sigma_s$	: Kesme Dayanımı
$\sigma_n$	: Normal Gerilme
$\phi$	: Kaya Kesmedeki Sürtünme Açısı
$\psi$	: Kaya ve Keski Arasındaki Sürtünme Açısı
$\rho_{su}$	: Suyun Yoğunluğu
$\rho_{kuru}$	: Kuru Yoğunluk
$\rho_{doymun}$	: Doymun Yoğunluk



## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş ve Amaç

Artan nüfus, rekabet, hammadde ihtiyacı ve küreselleşme madencilikte daha hızlı ve daha verimli üretim yöntemlerine yönelmeyi kaçınılmaz hale getirmektedir. Bununla birlikte şehirleşme, yapılaşma ve nüfusun artması, karayolu, demiryolu, kanalizasyon, baraj tünellerine vb. olan ihtiyacı önemli oranlarda arttırmaktadır. Örneğin, ülkemizde 2035 yılına kadar 1000 km'den fazla karayolu tünelinin yapılması ve bu tünel projelerinin maliyetinin 30 Milyar Türk Lirası olması beklenmektedir (Şirin, 2016).

Tünel ve yeraltı maden açıklıklarının kazılmasında kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler; klasik kazı olarak da adlandırılan delme-patlatma yöntemi ve nispeten daha yeni bir yöntem olan mekanize kazıdır. Mekanize kazı, delme-patlatma yöntemine alternatif olabilecek tek ekonomik kazı yöntemi olarak değerlendirilebilir. Bundan dolayı, mekanize kazı ve mekanize kazıya yardımcı yöntemler de (mikro dalga enerjisi, su jeti vb.) günümüzde popüler araştırma konularıdır (Sifferlinger vd., 2017). Ayrıca bazı koşullar altında, örnek olarak yoğun şehirleşmenin olduğu bölgelerde açılacak olan tünellerde ve nükleer atık depolama tesislerinin açılmasında, kullanılacak tek seçenektir (Bauer, 2004; Fowell, 1993) ve uygun koşullar altında delme ve patlatma yöntemine nazaran birçok üstünlük sağlamaktadır. Bu üstünlükler şu şekilde sıralanabilir (Bilgin vd., 2014):

- Güvenli ve daha çevreci bir yöntem olması,
- Minimum yer sarsıntısı oluşturması,
- Daha düzenli bir pasa boyutu sağlaması,
- Seçimli madencilik/kazı imkânı sunması,
- Uygun koşullar altında yüksek kazı/üretim hızlarına ulaşılabilmesine imkân sağlaması,
- Döngüsel ya da periyodik değil sürekli kazı/üretim yöntemi olması,
- Delme-patlatma yönteminde sıklıkla rastlanılan aşırı sökülmeyle minimize edilmesi,

gösterilebilir. Bu üstünlüklerine rağmen, mekanize kazının birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak; yüksek ilk yatırım maliyeti, çalışma koşullarındaki değişikliklere uyum sağlamada zorluk ve çok sert ve aşındırıcı formasyonları kazamamaları

gösterilebilir (Bilgin vd., 2014). Bundan dolayı tünel, galeri, desandri vb. yeraltı açıklıklarının kazılmasındaki yöntem dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Kazılacak formasyona uygun olarak seçilmeyen yöntem ya da kazı makinesi, çok büyük maddi kayıplara ve projelerin durma noktasına gelmesine sebep olmaktadır. Bu durumlara ülkemizdeki bazı maden ve tünel projelerinden örnekler gösterilebilir (Balcı, 2004; Akkaş, 2010). Bu tür durumlarla karşılaşmamak için, proje başlamadan önce kazılacak formasyonun mekanize kazıya uygunluğunun araştırılması gerekmektedir. Bir mekanize kazı sisteminin uygulanmasının fizibilitesinin ve maliyetinin göz önüne alındığı durumlarda sorulması gereken üç soru bulunmaktadır (Breeds ve Conway, 1992):

1. Kazı makinesi, ilgili kaya formasyonunu kazabilir mi?
2. Eğer kazabilirse, ne kadar hızlı kazabilir?
3. Bu performansı yakalamanın maliyeti nedir?

Kesilebilirliğin tam olarak bir tanımı bulunmamaktadır (Roxborough ve Sen, 1986). Ancak genel olarak ilk iki sorunun cevabının araştırılması işi olarak tanımlanabilir. Kesilebilirliğin, kazı hızının, kesici kafa dizaynının vb. araştırılmasında kullanılan çeşitli metotlar bulunmaktadır. Bu metotlar; kaya kesme deneyleri, ampirik yöntemler, teorik yöntemler ve diğer yöntemlerdir (nümerik modeller, yerinde kesme deneyleri vb.) (Rostami ve Özdemir, 1996). Bu yöntemler içinde en iyi seçeneğin kaya kesme deneyleri olduğu iddia edilmektedir (Rostami vd., 1996; Bilgin vd., 2014). Kaya kesme deneyleri, tam boyutlu kesme deneyleri ve küçük boyutlu kesme deneyleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kaya kesme deneyleri, sahadaki makine (keski) ve kayaç etkileşimini laboratuvar ortamında başarılı bir şekilde simüle etmektedirler. Ancak, kaya kesme deneyleri gerçekleştirilmesi zor olan deneylerdir ve çok sınırlı sayıda araştırma merkezinde bulunmaktadır. Bundan dolayı, araştırmacılar alternatif yöntemlere yönelmektedirler. Bu yöntemlere örnek olarak, tam boyutlu kesme deneylerine alternatif olarak geliştirilen küçük boyutlu kesme deneyleri (Roxborough ve Philips, 1974; Detournay vd., 1997; Stavropoulou, 2006; Bilgin vd., 2010; Entacher vd., 2014) ve bir takım kaya dayanım özelliklerine dayanan görgül (ampirik) yöntemler (Bilgin vd., 2006) sıralanabilir. Üretilen kaya kesme deneyleri genellikle, tam boyutlu kesme deneyleri gibi, üretilmesi zor ve sabit kesme deney düzenekleridir. Ayrıca herhangi bir kaya dayanım parametresinin (tek eksenli basınç dayanımı vb.) kaya kesme mekaniğini temsil etme imkânı bulunmamaktadır (Fowell vd., 1994). Bundan dolayı:

- Galeri/tünel açma makinelerinin kazı hızlarının tahmininde kullanılacak,
- Temel keski-kayaç etkileşimini simüle edebilecek,

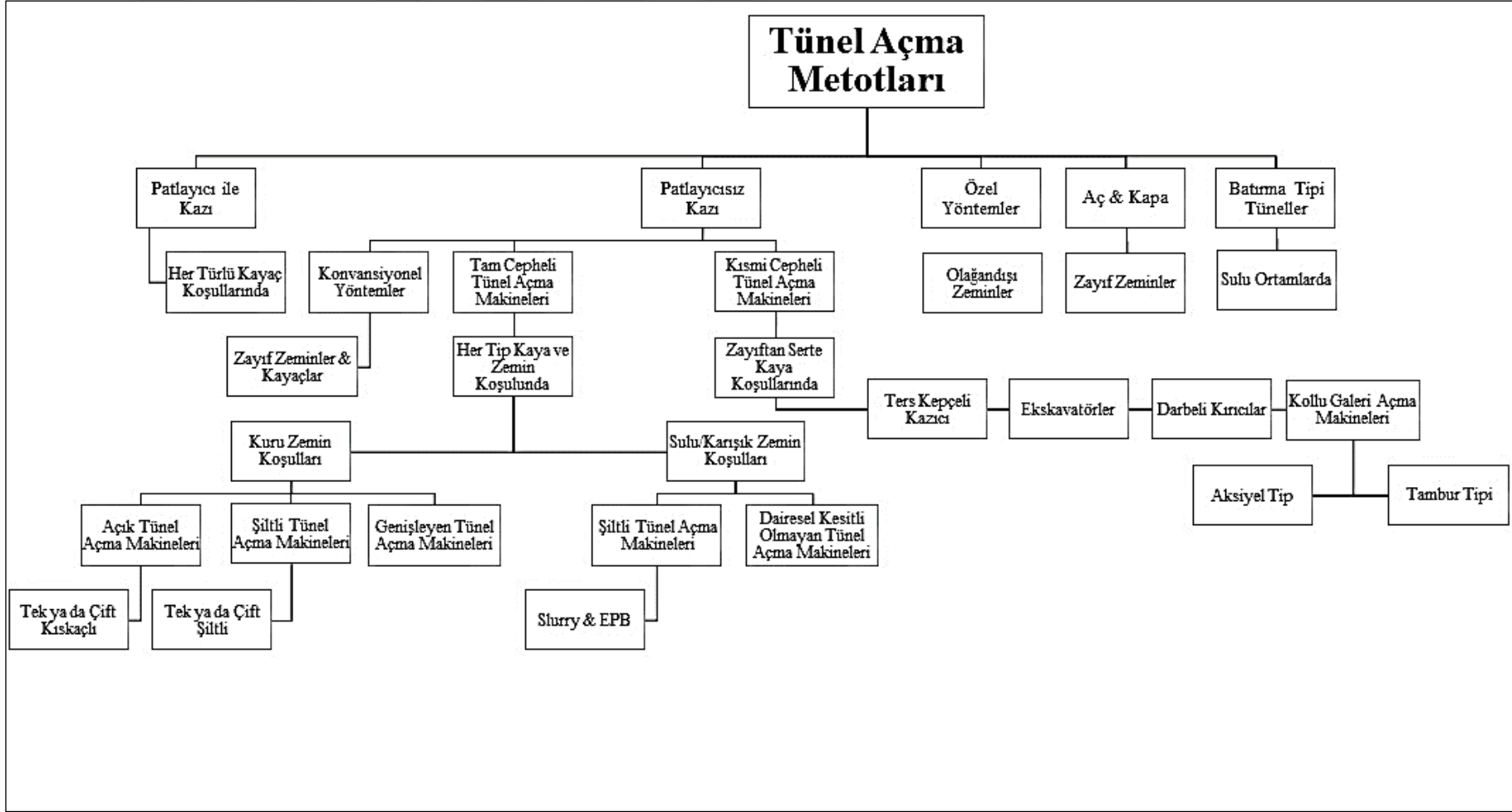
- Farklı tipte keskilere gelen kesme kuvvetinin bulunabileceği,
- Kesme kuvvetinin yardımı ile kazı verimliliğinin en önemli göstergesi olan spesifik enerjinin bulunabileceği,
- Kaya kesme deneyini, rutin bir kaya mekaniği deneyi haline getirebilecek,
- Halihazırda bulunan kesme deneylerine alternatif olabilecek, sahip oldukları birtakım eksiklikleri giderebilecek,
- Taşınabilir, seri üretime uygun ve hemen hemen her kaya mekaniği laboratuvarında bulunan hidrolik test makinelerine bir eklenti olarak çalışabilecek bir kaya kesme deney setinin üretilmesi,

amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, hemen hemen her kaya mekaniği laboratuvarında bulunan hidrolik eğilme test makinelerinin içine monte edilebilecek şekilde bir kaya kesme seti, düşey kayaç kesme seti (DKKS) üretilmiştir. Kesme setinin üretilmesinin ardından deneyde kullanılan yük hücresi, harici bir yük hücresi kullanılarak kalibre edilmiştir. Yük hücresinden okunan kuvvet değerlerinin doğrulanmasının ardından rastgele seçilen kaya numuneleri üzerinde kontrolsüz kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaya kesme deneylerinin başarılı bir şekilde yapılabilirliğinin kontrol edilmesinin ardından, beş farklı magmatik kayaç numunesi üzerinde basit şekilli kama tipi keski kullanılarak, değişken kesme derinliklerinde, kontrollü kesme deneyleri yapılmıştır. Kama tipi keskilerin dışında farklı tipteki kesici uçlar (radyal, konik ve mini-disk) kullanılarak kaya kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, altı farklı kayaç üzerinde küçük boyutlu kesme deneyi McFeat-Smith Fowell (1979) tarafından önerilen yöntem kullanılarak DKKS’de gerçekleştirilmiştir. Kollu galeri açma makinelerinin performans tahmini için konik uçlu keskilere tam boyutlu kesme deneyi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Konik keskilere yapılan kesme deneylerinin geçerliliğinin kontrolü için Balcı ve Bilgin (2007) tarafından elde edilen sonuçlar ile bu çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca laboratuvarında elde edilen kuvvet değerleri ile kaya kesme teorileri yardımı ile elde edilen kesme kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır. Laboratuvar çalışmalarına ilave olarak, kollu galeri açma makinelerinin çalıştığı iki farklı araziden numune alınarak laboratuvar kesme deneyleri yardımı ile sahadaki kazı hızlarının tahmin edilmesine çalışılmıştır. Tahmin edilen kazı hızları diğer performans tahmin yöntemlerinden elde edilen değerler ve gerçek kazı hızları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, kaya kesme deneylerinin rutin bir kaya mekaniği deneyi gibi gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.

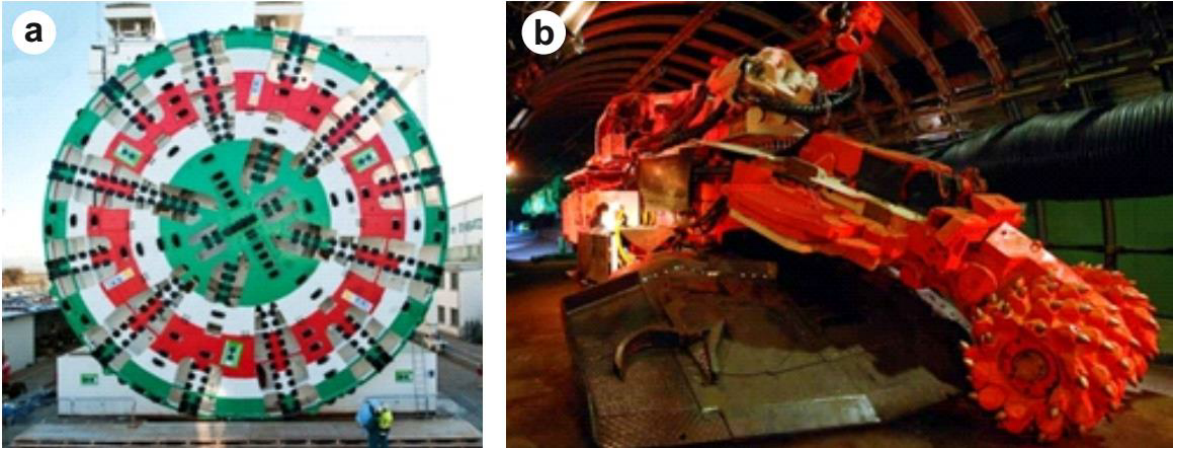
## 1.2. Kazı Makineleri

Madencilik ve kazı, insanoğlunun ilk uğraşlarından biridir. Kazı tekniklerindeki en büyük gelişmeler; ateş ve su yardımı ile kayaların çatlatılması (Agricola, 1556); kayaların parçalanması için 1627 yılında Slovakya’da bir yeraltı madeninde ilk kez patlayıcı kullanımı (Gregory, 2001); delme patlatma yönteminin keşfi (Gregory, 2001); mekanize kazı fikrinin 18. yüzyılda Michael Menzies tarafından ilk kez ortaya atılması (Walker, 1902); ilk tünel kalkanının (şild) Marc Brunel tarafından 1818 yılında üretilmesi (Stack, 1982); ilk başarılı kömür kesme makinesi “Iron Man”ın 1861 yılında üretilmesi (Walker, 1902); 1851 yılında Charles Wilson tarafından ilk tünel açma makinesinin üretilmesi (Maidl vd., 2008); ilk sürekli kazıcının (continuous miner) 1948 yılında imal edilmesi (Stack, 1982); İlk kollu galeri açma makinesinin (roadheader) Macar maden mühendisi Dr. Z. Ajtay tarafından üretilmesi (Stack, 1982); İlk modern tam cepheli tünel açma makinesinin James S. Robbins tarafından 1950’li yıllarda üretilmesi olarak sayılabilir (Maidl vd., 2008). Bu gelişmelere ek olarak madencilik ve tünelticilik faaliyetlerinde geçmişten günümüze geliştirilen ve kullanılan makinelerin detayları çeşitli kaynaklarda da görülebilir (Stack 1982 ve 1995) ve günümüzde başvurulan tünel açma metotlarının zemin/kaya koşullarına göre sınıflandırılması ise Şekil 1.1’de görülmektedir. Bu şekilden görülebileceği gibi delme & patlatma yöntemi hemen hemen her kaya koşulunda kullanılabilir. Aynı şekilde tam cepheli tünel açma makinelerinin zayıftan çok sert kaya koşullarına kadar değişen koşullarında kullanılabileceği görülmektedir. Kollu galeri açma makineleri ise zayıf zeminlerden sert kayaç koşullarına kadar değişen ortamlarda kullanılabilir. Çeşitli tünel/yeraltı boşluklarının açılmasında kullanılan bu yöntemlerin zemin/kaya koşullarına göre bu şekilde kabaca sınıflandırılabilir. Ancak bu koşullar arasındaki geçişin rasyonel sınırlarla çizilmesi gerekmektedir. Örneğin birçok referansta kollu galeri açma makinelerinin 100-120 MPa’ya kadar tek eksenli basınç dayanımına sahip masif kaya formasyonlarında başarılı bir şekilde kazı yapılabileceği belirtilmektedir (Atkinson, 1992; Heiniö, 1999; Maidl vd. 2008; Bilgin vd. 2014). Ancak, tek eksenli basınç dayanımının kesme koşullarını temsil etmediği ve farklı koşullardan (numune boyutu, numune şekli, yükleme hızı vb.) etkilendiği için birçok çalışmada da tek eksenli basınç dayanımının makine seçiminde ve performans tahmininde yanıltıcı bilgiler verebileceği belirtilmektedir (Fowell, 1993; Fowell vd., 1994). Ayrıca bazı uygulamalarda 206 MPa tek eksenli basınç dayanımındaki kayaların kollu galeri açma makinesi (KGAM) ile başarılı bir şekilde kazıldığı bildirilmiştir (Tregelles ve Morris, 1983).



Şekil 1.1. Tünel açma metotlarının zemin/kaya koşullarına göre sınıflandırılması (Tatiya, 2005).

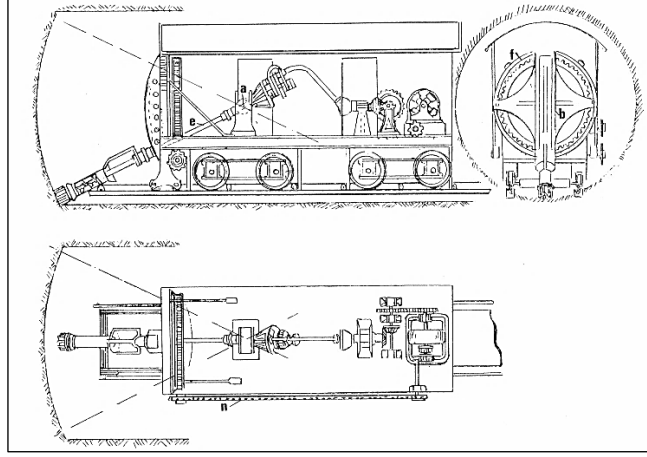
Madencilik ve tünelticilik kazıları için üretilen çok çeşitli makineler olmasına rağmen en çok kullanılan iki makine, KGAM ve tam cepheli tünel açma makineleridir (TAM) (Hurt and MacAndrew, 1985; Whittaker ve Frith, 1990). Şekil 1.2’de bir tam cepheli tünel açma makinesi ve bir kollu galeri açma makinesi görülmektedir. Tam cepheli tünel açma makineleri çalışma kapsamında olmadığı için, bu makineler hakkında daha fazla detay bilgi verilmeyecektir. Çalışma kapsamında kollu galeri açma makinelerinin performans tahmininde kullanılan bir deney seti geliştirildiği için bundan sonraki kısımlarda kollu galeri açma makineleri ile ilgili bilgilere yer verilecektir.



Şekil 1.2. (a) Tam cepheli tünel açma makinesi (Herrenknecht ve Bappler, 2014) (b) Kollu galeri açma makinesi (Madencilik Türkiye, 2015).

### 1.3. Kollu Galeri Açma Makineleri (KGAM)

Kollu galeri açma makineleri (KGAM) daha önce de değinildiği gibi mekanize kazı yöntemlerinde en çok başvurulan kazı makinelerinden biridir. KGAM’nin ilki 1947 yılında Dr. Z. Ajtay tarafından üretilmesine rağmen, KGAM’ye benzer ilk makinenin patenti 1903 yılında C. T. Drake tarafından alınmıştır ve orijinal çizimi Şekil 1.3’te verilmiştir (Stack, 1982). Bu makinenin üretime geçirilip geçirilmediği ile ilgili bir bilgi mevcut değildir ve günümüzde kullanılan modern KGAM’lerin ilkinin Macaristan kömür işletmelerinde kullanılmak üzere maden mühendisi Dr. Z. Ajtay tarafından tasarlanarak imal ettirildiği bilinmektedir.



Şekil 1.3. C. T. Drake tarafından patenti alınan KGAM'ye benzeyen ilk tasarım (Stack, 1982).

KGAM'lerin tarihsel gelişimi açısından önemli olaylar Tablo 1.1'de özetlenmiştir. Yeraltı kömür işletmelerinde kullanılmak üzere 1950'lerin sonunda farklı tipteki KGAM üretilmeye başlandı. Bu dönemde Sovyetler Birliği'nde KGAM'de gerçekleşen gelişmeler, PK3 KGAM'nin Birleşik Krallığa girmesinin önünü açtı (Whittaker ve Frith, 1990). Bu makine üzerinde yapılan çalışmalar ve araştırmalar, İngiltere'de bir KGAM sanayisinin kurulmasına yol açtı. Diğer taraftan, KGAM Amerika'ya ilk kez 1969 yılında girdi ve 1977 yılında üretilmeye başlandı (Schenck, 1974; Shahriar, 1988). Tünelcilik alanında ise KGAM 1960'lı yıllarda kabul görmeye başladı ve 1970'lerin sonunda dünya çapında kullanılmaya başlandı (Tatiya, 2013). KGAM, ülkemizde ise ilk defa 1974 yılında Tunçbilek Bölgesi'nde kullanılmaya başlamıştır (Karakoç, 1980).

Tablo 1.1. Kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) gelişimi açısından önemli olaylar

Tarih	Olay
1903	C. T. Drake tarafından alınan KGAM'ye benzer ilk patent
1947	Dr. Z. Ajtay tarafından ilk KGAM'nin üretilmesi
1955-60	Farklı tipte KGAM'lerin üretilmesi
1955-60	KGAM'lerin Birleşik Krallık'a girmesi
1969	İlk KGAM'nin Amerika'ya girmesi
1977	Amerika'da ilk KGAM'nin üretilmesi
1974	Ülkemizde ilk defa KGAM'lerin Tunçbilek Bölgesi'nde kullanılması

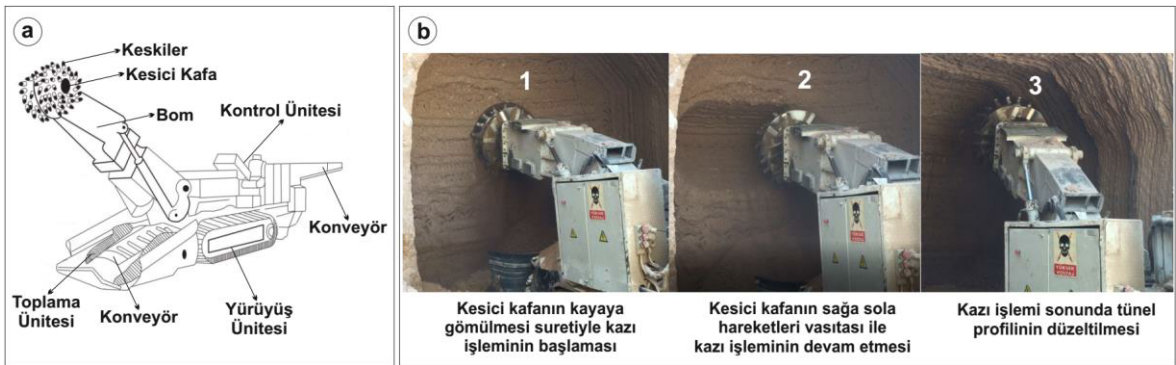


Bu gelişmelerin ardından birçok ülkede, birçok üretici tarafından KGAM üretilmeye ve çeşitli amaçlar için kullanılmaya başlandı. KGAM'nin ve KGAM aparatları ile çalışan ekskavatörlerin genel kullanım alanları Tablo 1.2'deki gibi sıralanabilir. KGAM bir noktada durarak kazı yapan makinelerdir. İlerleme sırasında, KGAM kazı yapmasının yanı sıra, kazılan malzemenin toplanması ve toplanan malzemenin çeşitli üniteler sayesinde makinenin arkasına taşınması işlemlerini de yürütmektedir. KGAM'nin temel kısımları ve kazı adımları Şekil 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.2. Kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) kullanım alanları (Waldburger, 1992; Koeller vd., 2012; Jang vd., 2016; URL-1, 2017).

#### Kollu galeri açma makinelerinin kullanım alanları

- Maden üretimi
- Madenlerde ulaşım amaçlı kazılar
- Tünel açma işleri
- Tünel genişletme/rehabilitasyon
- Bina yıkımı/beton geri dönüşümü
- Taşocakları
- Hendek kazıları
- Su altı kazıları
- Kuyu açma



Şekil 1.4. (a) KGAM'nin genel kısımları (Chapman vd., 2010) (b) KGAM ile kazı adımları

Makine, kesici kafanın üstünde bulunan kesikler yardımı ile formasyon kazmaktadır. Makinenin altında bulunan toplama üniteleri yardımı ile kazılan malzeme kazı aynasından uzaklaştırılmaktadır. Son olarak da toplanan malzeme, taşıma üniteleri yardımı ile makine

arkasına bulunan ikincil bir taşıma ünitesine aktarılmaktadır. Şekil 1.4'te ayrıca, KGAM'nin kazı adımları gösterilmiştir. Makinenin kesici kafası öncelikle kazı aynasına bastırılarak ilerleme sağlanmaktadır (1). Ardından, kesici kafa yatay ve düşey yönde hareket ettirilerek aynanın kazısı tamamlanmaktadır (2). Son olarak da tünel ya da galeri açıklığının profili, eğer gerekiyorsa, düzgün hale getirilmektedir (3). Bu işlemlerin içinde makine için en zorlu olanı ilk adım olan aynaya batma işlemidir. Bunun sebebi ise kesici kafa için herhangi serbest yüzey olmadığı için tüm kesimler kaya ile etkileşim içinde olmasıdır. Ayrıca saha çalışmaları, makinenin 1. adımda harcadığı enerjinin, 2. adımda harcadığı enerjiden yaklaşık üç kat fazla olduğunu göstermektedir (Fowell ve McFeat Smith, 1976). Bu adımların dışında KGAM'lerde üç adet kesme modu bulunmaktadır. Bunlar kapalı kesme (arcing), aşağı yönlü kesme (lowering) ve yukarı yönlü kesmedir (lifting) (Acaroğlu ve Ergin, 2006). Ancak tezin kapsamında bu konu ile ilgili bir değerlendirme yapılmadığı için bu konuda daha fazla detaya girilmeyecektir, yalnızca Şekil 1.5 (c)'de bu modlar görsel olarak verilmiştir.

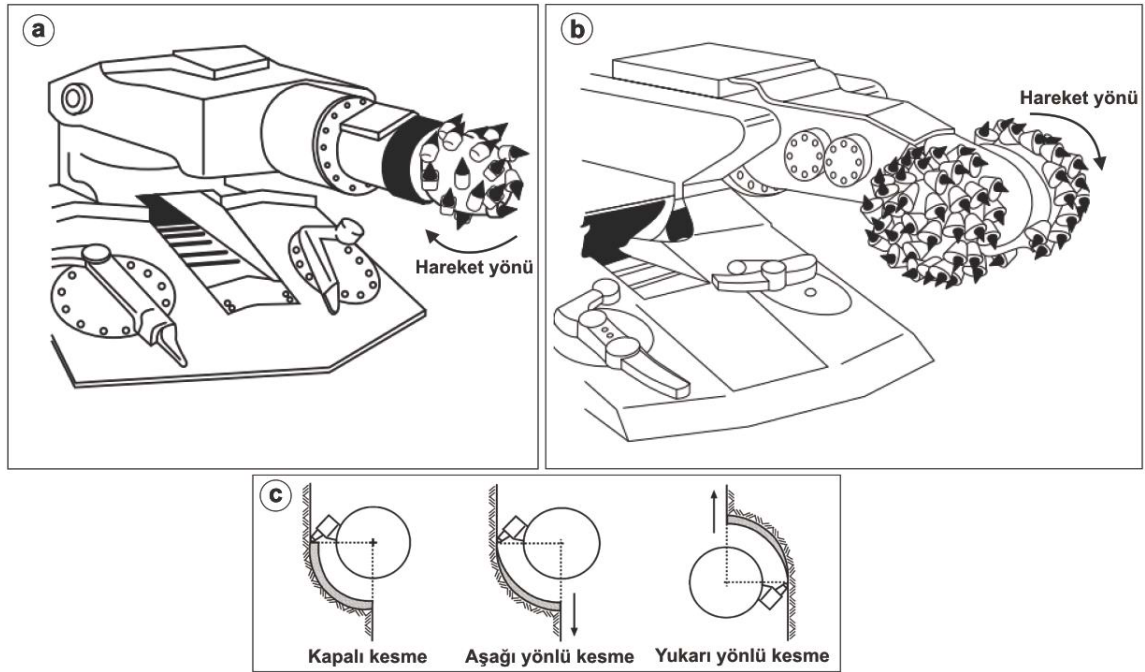
Kazı devam ederken gerçekleşen bir diğer işlem ise toplama ve taşımadır. Kazı aynasından sökülen pasa makinenin önüne dökülmektedir ve toplama ünitesi yardımı ile aynadan dökülen malzeme konveyöre aktarılmaktadır. KGAM toplayıcı ünitelerine göre sınıflandırılabilir ancak çalışmanın konusu olmadığından dolayı daha fazla detay bilgi verilmeyecektir. Bu toplama ünitelerinin detaylarına çeşitli kaynaklardan ulaşılabilir (Kogelmann, 1988; Heinöi, 1999).

KGAM çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir. Bu kriterlerden biri toplayıcı ünitelerdir. Diğer kriterler ise kesici kafa gücü, ağırlık ve kesici kafa tipidir. Ağırlık ve kesici kafa gücüne göre KGAM'nin sınıflandırılması Tablo 1.3'te verilmiştir.

Tablo 1.3. KGAM'nin kesici kafa gücü ve ağırlığına göre sınıflandırılması (Heinöi, 1999).

Ağırlık sınıfı	Ağırlık aralığı	Kesici kafa gücü	Normal kesme aralığı		Bomun uzatıldığı durumdaki kesme aralığı	
	(ton)	(kW)	Kesit (m <sup>2</sup> )	Maksimum basınç dayanımı (MPa)	Kesit (m <sup>2</sup> )	Maksimum basınç dayanımı (MPa)
Hafif	8-40	50-170	≈ 25	60-80	≈ 40	20-40
Orta	40-70	160-230	≈ 30	80-100	≈ 60	40-60
Ağır	70-100	250-300	≈ 40	100-120	≈ 70	50-70
Çok Ağır	> 100	350-400	≈ 45	120-140	≈ 80	80-110

Kollu galeri açma makinelerinde (KGAM) iki adet motor bulunmaktadır. Motorun bir tanesi kesici kafanın tahrik edilmesinde diğer motor ise geri kalan tüm parçaların idaresinde kullanılmaktadır. Bundan dolayı, KGAM güçlerine göre sınıflandırıldığında bundan yalnızca kesici kafa gücü anlaşılmaktadır ve performans tahmini hesaplamalarında da yalnızca bu güç kullanılmaktadır. KGAM için diğer bir sınıflama kriteri, kesici kafa tipleridir. KGAM’de iki tip kesici kafa bulunabilmektedir. Bunlar; aksiyel ve tambur tipi kesici kafalardır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. (a)Aksiyel ve (b) tambur tipi KGAM (Fowell, 1993) (c) KGAM’lerde farklı kesme modları (Acaroğlu ve Ergin, 2006)

Tambur tip makinelerin aksiyel tip makinelere nazaran birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Aksiyel tip KGAM’ler aşındırıcı olmayan, 60-80 MPa basınç dayanımına sahip masif formasyonları başarılı bir şekilde kazabilmektedirler. Ayrıca süreksizliklerin yardımı ile bu değerler 80-100 MPa’a kadar çıkabilmektedir. Tambur tipi KGAM’ler ise aşındırıcı olmayan ya da orta aşındırıcılıktaki 100-120 MPa’a kadar basınç dayanımı olan masif formasyonları kazabilmektedirler. Süreksizliklerin yardım ettiği koşullarda ise bu değer 160-180 MPa’a kadar çıkabilmektedir (Bilgin vd., 2014). Tambur tipi makineler, değişken kaya koşullarına daha kolay uyum sağlayabilirler hem sert hem de yumuşak kaya koşullarında başarılı bir şekilde kazı yapabilirler (Kogelmann, 1989). Dayanımı yüksek olan

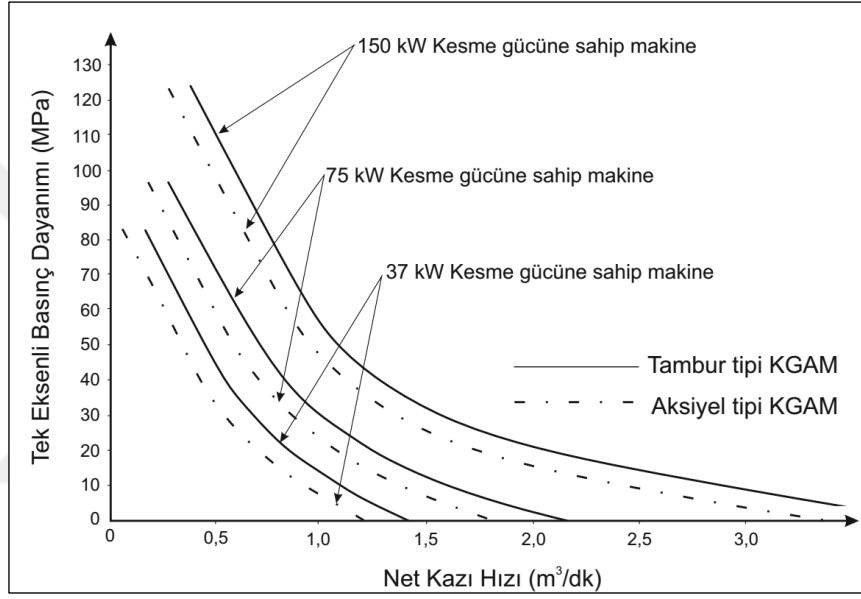
kaya ortamlarında daha küçük çaplı kesici kafaların kullanılması daha uygun görülmektedir. Bunun sebebi, maksimum kurulu gücün minimum sayıdaki keskiye iletilmesi sayesinde keski başına düşen kuvvetin arttırılması ve bu suretle daha sert kayaçların kazılabilmesidir. Ancak bu durum da keskiilerin mekanik dayanımları ile sınırlıdır. Aksiyel tip kafalar genellikle 70 cm çapta, tambur tip kafalar ise genellikle 140 cm çapta üretilmektedirler (Bilgin vd., 2014).

Aksiyel ve tambur tipi kesici kafalar aynı makine şartları altında aynı miktarda kesme kuvveti üretirler, ancak yatay bom kuvvetleri aksiyel tip kafalarda tambur tipi kafalara göre daha fazladır. Tambur tipi kafalarda ise kafaya etkiyen bileşke kuvvetin ana elamanı kafaya düşey yönde etkimektedir (Acaroğlu vd., 2006). Aksiyel tip KGAM ile kazıda, bom tepki kuvvetleri kesici kafaya yanal yönde etkidiğinden dolayı makine kazı sırasında sağa sola yatma eğilimindedir. Bu da makinenin daha az dengeli olmasına neden olmaktadır. Bu durumu aşmak için makine tünel duvarlarına krikolar vasıtası ile sabitlenmektedir. Ancak, geniş çaplı tünellerde bu sabitleme işlemi mümkün olmadığı için aksiyel tip makineler geniş çaplı tünellerde kullanılamamaktadır. Tambur tipi makinelerde ise bom tepki kuvvetleri makineye düşey olarak etkimektedir ve bu kuvvetler bizzat makinenin kendi ağırlığı tarafından karşılanmaktadır ki bu da tambur tipi makineleri daha dengeli makineler yapmaktadır (Kogelmann ve Schenck, 1982). Bundan dolayı, aynı kapasitedeki tambur tipi makine aksiyel tip makineden %20-30 daha hafif olabilmektedir (Kogelmann, 1982; Gehring, 1989).

Aksiyel tip KGAM'nin kesici kafasının hareket yönü yanal olduğu için aynadan sökülen pasa keskiilerin hareketi ile tünel duvarına doğru atılmaktadır. Bazı durumlarda kazılan malzemenin yan duvarların dibinde toplanmasından dolayı malzemenin toplanıp taşınması için ayrı bir efor sarf edilmesi gerekmektedir. Ancak tambur tipi makinelerde kazılan malzeme kafanın hareketi sayesinde direkt olarak makinenin önüne dökülmekte ve toplayıcı sistem tarafından taşıma bandına rahatlıkla alınabilmektedir (Kogelmann ve Schenck, 1982). Genel kazı performansı açısından, tüm bu parametreler değerlendirildiğinde tambur tipi KGAM'nin performansının aksiyel tip makinelere oranla çok daha iyi olduğu söylenebilir ve Şekil 1.6'da bu durum açıkça görülmektedir.

Aksiyel tip makinelerin performans kaygısının olmadığı durumlarda kullanılması daha avantajlı gözükmemektedir (Gehring, 1989). Belirtilen üstünlüklerinin yanında, tambur tipi makinelerin aksiyel tip makinelere göre birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, tambur tipi kesici kafaların keski dizilimleri daha karmaşıktır ve tasarlanması daha

zahmetlidir, aksiyel tip kesici kafaların ise keski dizilimleri daha basittir. Aksiyel tip makinelerde keski sarfiyatı daha düşük gözlemlenmektedir. Ayrıca operatör kabiliyetine bağlı olsa da tambur tipi makineler ile kazıda mutlaka 5-10 cm arası bir aşırı sökülme gerçekleşmektedir ki bu değer aksiyel tip makinelerde yok denecek kadar azdır. Aşırı sökülme tünel profilini bozmaktadır ve tahkimat maliyetlerini arttırmaktadır. Bununla beraber, aksiyel tip kesici kafaların çapı daha küçük olduğu için seçimli kazıya daha uygundurlar.



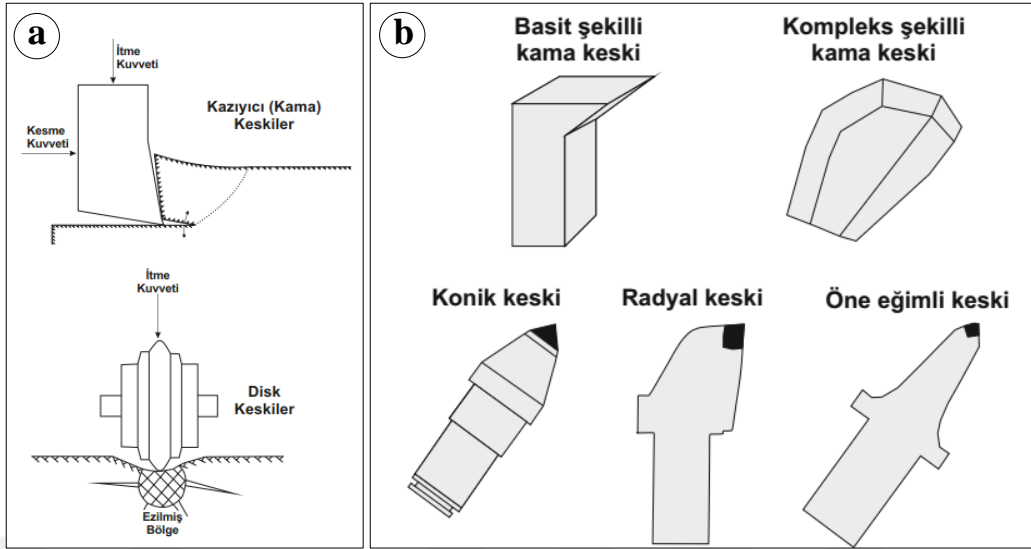
Şekil 1.6. Aksiyel ve tambur tip KGAM için kazı hızlarının tek eksenli basınç dayanımına göre değişimi (Schenck, 1982).

Aksiyel ve tambur tipi makinelerin kendi içinde birbirlerine olan üstünlüklerine ilave olarak KGAM'nin tam cepheli tünel açma makineleri üzerinde de birtakım üstünlükleri bulunmaktadır. Öncelikle, KGAM'nin maliyeti bir tam cepheli tünel açma makinesinin maliyetinin çok küçük bir kısmına denk gelmektedir. İki yöntem arasında uygun koşullar arasında seçim yapılacaksa, özellikle de 1600 m'den kısa tüneller için, KGAM daha çok tercih edilmektedir. Yeni sipariş edilen bir KGAM'nin teslim süresi tam cepheli bir tünel açma makinesininkinden çok daha azdır. Bir tam cepheli tünel açma makinesi her zaman dairesel kesitli tünel açabilirken, KGAM istenilen her kesitte tünel açabilir. KGAM her tip projeye uyum sağlayabilecek şekilde kolaylıkla tekrar revize edilebilir ve başka projelerde kullanılabilir (Kwietnewski vd., 2011). Ayrıca, KGAM kiralama usulü kullanıma çok daha uygundur.

Bu üstünlüklere karşın, KGAM'nin tam cepheli tünel açma makinelerine göre birtakım eksiklikleri bulunmaktadır. Örneğin çok uzun tünellerde bu makinelerin kullanımı ekonomikliğini yitirmektedir ve bir tam cepheli tünel açma makinesinin ulaştığı kazı hızlarına ulaşması mümkün değildir. Dayanımı yüksek, masif ve aşındırıcı formasyonlarda ise kullanımı, yüksek keski sarfiyatlarından dolayı imkânsız hale gelmektedir ki bu tip formasyonlarda tam cepheli tünel açma makineleri disk keskilerle donatıldığı için rahatlıkla kazı yapabilmektedirler. Öyle ki 0,5 keski/m<sup>3</sup>'ün üzerinde keski sarfiyatının olduğu kaya ortamlarında KGAM ile kazı ekonomik olmamaktadır. Keski sarfiyatının 0,2 keski/m<sup>3</sup>'ün altında olduğu koşullarda KGAM ile kazı ekonomik olarak değerlendirilebilir (Bilgin vd., 2014).

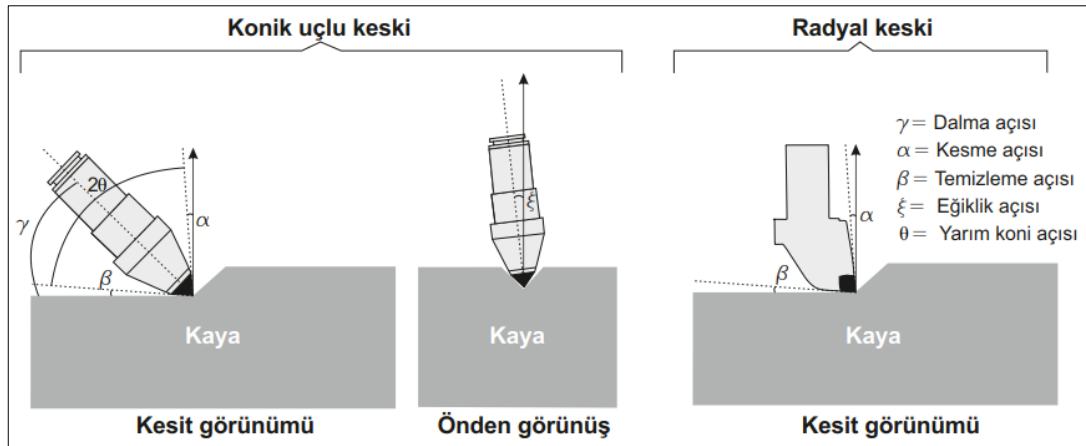
#### **1.4. Kazı Makinelerinde Kullanılan Keskiler ve Kazı Prensipleri**

Kazı makinelerinin en önemli ortak özelliği kayacı, kesici kafalarında bulunan keski vasıtası ile kesip parçalamalarıdır. Bu keski iki ana grupta toplanabilir. Bunlar; kazıyıcı keski ya da kama tipi keski (drag picks) ve dönen keski (roller bits) (Şekil 1.7a). Kama tipi keski genellikle kısmi cepheli tünel açma makinelerinde, dönen keski ise genellikle tam cepheli tünel açma makinelerinde kullanılmaktadır. Kama tipi keski beş ana başlıkta toplanabilir. Bunlar; basit kama şekilli keski, kompleks şekilli kama keski, radyal keski, öne eğimli keski ve konik uçlu keski (Şekil 1.7b). Basit kama tipi keskinin günümüzde kazı makinelerinin üzerinde pratik olarak kullanımı bulunmamaktadır. Kazı makinelerinin ilk piyasaya sürüldüğü yıllarda bu ve buna benzer tipteki keskinin kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca geometrik olarak tanımlanmaları kolay olduğu için teorik çalışmalar bu tip keski üzerinde yoğunlaşmıştır ve keski kuvvetlerinin bulunabilmesi için geliştirilen matematiksel modellerde bu tip keski üzerine geliştirilmiştir (Evans, 1958; Nishimatsu, 1972). Ancak şekillerinden kaynaklı olarak yapısal hasara uğramaları kolay olduğu için kullanılmaya devam edilmemiştirler. Bunun yerine birtakım modifikasyonlar geçirerek kompleks şekilli kama tipi keski halini almışlardır. Bu keski, tam cepheli tünel açma makinelerinde tek başına ya da disk keskiyle birlikte kullanılmaktadırlar. Ayrıca basit şekilli kama tipi keski, radyal ve öne eğimli keskiye evrilmiştir ve kısmi cepheli kazı makinelerinde (KGAM, sürekli kazıcılar, kömür sabanları, kesici yükleyiciler, potkabaç makineleri, vs.) bu keski sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 1.7. (a) Keski tipleri (b) Kama tipi (kazıyıcı) keskinin türleri

Kollu galeri açma makinelerinde (KGAM) günümüzde sıklıkla kullanılan iki tip keski bulunmaktadır: radyal keskinler ve konik uçlu keskinler. Konik uçlu keskinler ilk kez 1970'lerde üretilmiş ve 1972 yılında Amerika'da KGAM'de kullanılmaya başlanmıştır (Heinöi, 1999). Bu tarihe kadar radyal keskinler KGAM'lerde kullanılmaktaydı ve bu tarihten sonra da uzun süre konik uçlu keskinler Amerika'da, radyal keskinler ise Avrupa'da kullanılmaya devam etti (Sundae ve Myren, 1987). Günümüzde ise KGAM'nin çoğunluğunda konik uçlu keskinler kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında KGAM'de kullanılan konik uçlu keskinler ile radyal keskinlerden bahsedilecektir. Konik ve radyal keskinlerin tasarım parametreleri Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Konik ve radyal keskinlerin tasarım değişkenleri

Radyal keskinler genellikle 40-60 MPa tek eksenli basınç dayanımına kadar olan kayaçları kazabilirler. Daha keskin uçları olduğu için ve genişliklerinden dolayı konik uçlu keskinlerden daha geniş bir alanı taradıkları için, konik keskinlerden daha verimlidirler. Konik keskinlere oranla kesme işleminde daha düşük FC ve FN gerektirirler (Sundae ve Myren, 1987). Ancak radyal keskinler aşınmaya daha yatkındırlar ve ufak bir aşınmada keskin kuvvetleri büyük oranda artar ve üstünlükleri ortadan kalkar (Hurt ve MacAndrew, 1985; Bilgin vd., 2014). Ayrıca, bu keskinlerle oluşan toz miktarı diğer keskinlere oranla daha fazladır (Roepke vd., 1976). Teorik olarak, temizleme açısının 5-6° arasında olması gerektiği belirtilmektedir. Yetersiz temizleme açısı, kaya yüzeyi ile olan sürtünmeyi ve temas yüzeyini arttıracak ve bu da keskiye etkileyen kuvvetlerin artmasına sebep olacaktır (Sundae ve Myren, 1987; Detournay ve Defourny, 1992; Anderson ve Rostami, 1998). Radyal keskinlerde pozitif kesme açısı, kesme işlemini çok kolaylaştırmaktadır ancak keskiyi daha zayıf ve savunmasız bir hale getirmektedir. 0° kesme açısı ise pratikte en çok kullanılan açıdır ve çok farklı kaya koşulluna uygundur. Negatif kesme açısı ise keskinin sürekli kayaya baskı yapmasını sağlamaktadır ve böylece uç kırılmalarının önüne geçilebilmektedir. Negatif kesme açılı keskinler küçük temizleme açısına, pozitif kesme açılı keskinler ise büyük temizleme açalarına ihtiyaç duyarlar. Sınırlı sayıda KGAM'de kullanılmalarına karşın, kullanımlarına en uygun makine uzun ayak kesici yükleyicileridir (Anderson ve Rostami, 1998).

Diğer yandan, konik keskinler 100-120 MPa tek eksenli basınç dayanımına kadar olan kayaçları kesebilmektedirler. Yapısal şekilleri, daha düzgün bir aşınma karakteristiğine sahip olmalarına ve radyal keskinlerden daha uzun ömürlü olmalarına sebep olmaktadır. Bundan dolayı, radyal keskinlere göre çok daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle de dayanımı yüksek olan kaya ortamlarında kullanılmaktadırlar (Bilgin vd., 2014). Konik keskinlerde dalma açısı genellikle 40-55° arasında seçilmektedir. Zayıf kayaçlar için 40°, dayanımı yüksek kayaçlarda ise 55° olacak şekilde seçilmektedir (Hurt, 1980). Ancak keskiye gelen eğilme momentleri ve yapısal dayanımı göz önüne alındığında, yapısal dayanım açısından keski için en güvenli dalma açısının 46° olduğu belirtilmiştir (Li vd., 2015). Dalma açısı, konik keskinler açısından çok büyük öneme sahiptirler. Keskinler için en uygun dalma açısı, bileşke kuvvet ile aynı doğrultudaki açıdır. Bu sayede keskiye gelen eğilme momentleri ve keskindeki gerilmeler minimum hale gelmektedir (Andersson ve Rostami, 1998). Dalma açısı, keskin kuvvetleri açısından incelendiğinde ise en düşük kesme kuvvetinin 50°'de elde edildiği görülmüştür (Hurt, 1980; Choi vd., 2014). Ancak, Hurt (1980) çalışmasında 48-55° arasındaki dalma açılarında çok anlamlı farklılıklar

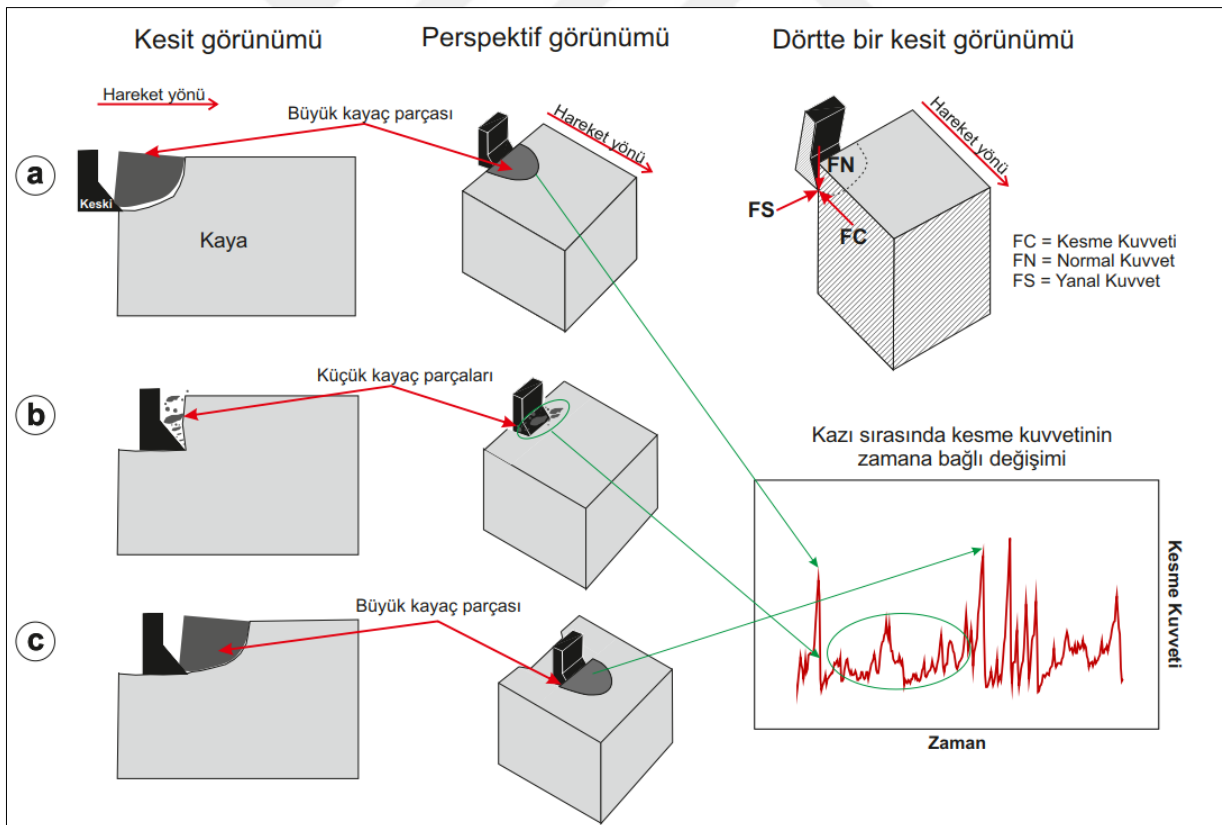


gözlemlenmediğini ifade etmiştir. Konik keskinler için diğer bir önemli parametre ise keskinin eğiklik açısıdır. Eğiklik açısı, öncelikle keskinin kendi yuvasında dönmesine imkân sağlamaktadır ve ayrıca kesici kafanın kayaya batabilmesini sağlamaktadır (Hurt, 1980). Keskinin kendi yuvasında dönebilmesi, konik keskinlere daha uzun kullanım ömrü sağlamaktadır ancak bu durum, konik keskinlerin kendi kendilerini bileme özelliği olarak yorumlanmamalıdır. Keskinin kendi yuvasında dönebilmesi ise ancak belirli bir yatım açısının verilmesi ile mümkün olmaktadır (Kim, 2010). Radyal keskinler, düşük keski kuvvetleri açısından avantaj sağlasa da kullanılacak keski seçilirken yalnızca dikkate alınacak kriter bu olmamalıdır. Ayrıca, keskinin kullanım ömrü ve kırılmaya olan dayanımı da göz önüne alınmalıdır (Hurt ve Laidlaw, 1979).

Kama tipi keskinlerin, keski türünden bağımsız olarak, kazı mekanizmaları hemen hemen aynıdır. Şekil 1.9’da bir basit şekilli kama keski ile kayacın kesme işleminin adımları, kazı sırasında keskiye etkiyen kuvvetler ve kesme kuvvetinin zaman bağlı değişimi görülmektedir. Kazı sırasında keskiye etkiyen bileşke kuvvetin üç bileşeni vardır. Bunlar, kesme kuvveti (FC), normal kuvvet (FN) ve yanal kuvvettir (FS). Bu kuvvet bileşenlerinden en önemlisi, özellikle de kısmi cepheli tünel açma makinelerinde, FC’dir. Bunun nedeni bu tip makinelerde keskinin hareketine dik yönde gelen kuvvetin çok büyük değerlere ulaşmamasıdır (Hood ve Roxborough, 1992; Andersson ve Rostami, 1998). Ayrıca, dinamiğin temel prensiplerine göre işi yapan kuvvet bileşeni hareketin yönündeki kuvvet bileşenidir, bu da FC’dir. Normal kuvvet, tam cepheli tünel açma makinelerinde toplam itme kapasitesinin bulunmasında kullanıldığı için çok büyük öneme sahiptir. Ayrıca disk keskinler ile kayacın kesme işleminin başarıya ulaşmasını sağlayan, keskiyi kayaca batıracak olan normal kuvvettir.

Kazı başladığında, keski kayaca bir miktar batarak önünde büyük bir kayacın parçasını koparmaktadır (a). Bu parçayı koparıırken kesme kuvveti şekilde görüldüğü gibi bir pik yapmaktadır. Bu pik kuvvet o kayacı koparmak için gerekli olan maksimum kuvveti temsil etmektedir. Ardından keski kayacın yüzeyinde hareket etmeye devam ederken, küçük kayacın parçaları koparılmakta bu da şekilde görüldüğü gibi irili ufaklı kuvvet piklerine sebep olmaktadır (b). Küçük parçaların koparılmasının ardından, keski tekrar büyük bir parçayı koparmak üzere kayaca batar ve büyük bir parçayı daha koparır ve bir büyük kuvvet piki daha oluşturur (c). İlerleyen bölümlerde bahsedilecek olan ve geçmişte araştırmacılar tarafından önerilen kesme teorileri de bu büyük parçaların koparılması için gereken kesme kuvvetinin belirlenmesine dayanmaktadır. Keskiye gelen maksimum kuvvetin bulunması sureti ile

mekanik bir dayanımı olan keskinin ve makinenin kayacı kazıp kazamayacağına karar verilmektedir. Şekil 1.9'da verilen kazı döngüsünün gösterimi, sahada ve laboratuvarda gözlemlenen kazı olayının fiziksel gözlemlere dayanan basitleştirilmiş bir halidir. Keski kayaca batarken bir miktar ezilmiş zon oluşmakta, bu zonun oluşması için de enerji harcanmaktadır (Ranman, 1985; Verhoef vd., 1996; Bao vd., 2011) ve keski kuvvetleri bu ezilmiş zondaki parçacıklar vasıtası ile kayaca iletilmektedir (Verhoef, 1996). Ayrıca, oluşan büyük parçaların boyları, kesme teorilerinde de idealleştirilmiş olarak gösterilmektedir. Ranman (1985) gerçekleştirdiği kesme deneylerinin sonucunda kopan kayaç parçalarının boyutlarının çok değişkenlik gösterdiğini belirtmiştir. Bundan dolayı, idealleştirilmiş bir kopan parça modeli gerçek durumu her zaman yansıtmayabilir. Şekilde görülen keski sivri yani pozitif kesme açılı bir keskidir. Ayrıca, negatif açılı bir keskinde de durum farklı olmayacaktır. Keski kayaca batmak yerine önündeki kayaç parçasını iterek büyük parçayı koparacaktır.



Şekil 1.9. Basit şekilli kama keski ile kazı döngüsü, kuvvet oluşumu ve keskiye etkiyen kuvvetler (a) keskinin kayaktan büyük bir parça koparması (b) keskinin kayaktan ufak parçalar sökmesi (c) keskinin kayaktan yine büyük bir parça koparması

### 1.5. Kama Tipi (Kazıyıcı) Keskiler için Geliştirilen Kaya Kesme Teorileri

Kama tipi el aletleri insanoğlunun ilkel çağlardan beri kullandığı araç-gereçlerdendir. İlk kazı makineleri de bu tip keski ile donatılmıştı. Yarım asırdan uzun süredir araştırmacılar temel kaya-keski etkileşimini teorik açıdan incelemişlerdir. Önerilen matematiksel formüller kesici uçların tasarımlarının geliştirilebilmesinde kullanılmaktadır. Basit şekilli kama tipi keski ile ilgili teorik gelişmeler konik keski'den daha erken başlamıştır. Bunun öncelikli sebebi, basit şekilli kama tipi keski'nin çok daha önce kullanılması ve konik keski'nin, basit kama tipi keski'den onlarca yıl sonra kullanıma alınmasıdır. Diğer bir sebep ise, basit şekilli kama tipi keski ile kesme probleminin açıklanmasının, basit şekilli kama tipi kesme işinin iki boyutlu bir problem olarak incelenebilmesi sayesinde konik keski'den nispeten daha kolay olmasıdır. İlerleyen kısımda öncelikle basit kama tipi keski için geliştirilen matematiksel modellerden ve ardından konik keski için geliştirilen modellerden bahsedilecektir. Değınilecek olan kesme teorileri özet olarak Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.4. Bu çalışma kapsamında incelenen, basit kama ve konik keski için geliştirilen kaya kesme teorileri

Basit Kama Tipi Keski	Konik Keski
• Evans (1958)	• Evans (1984)
• Nishimatsu (1972)	• Roxborough ve Liu (1995)
	• Gökten (1997)
	• Gökten ve Güneş (2005)

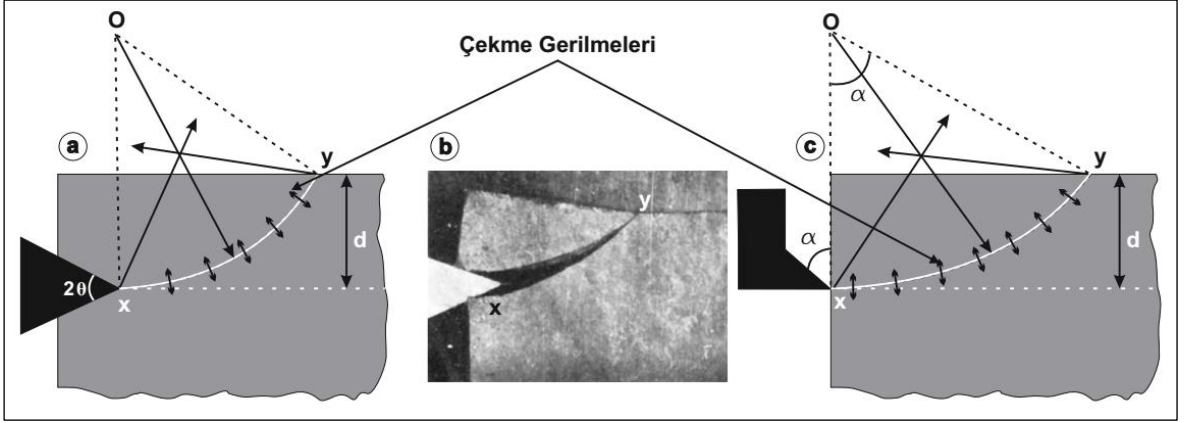
#### 1.5.1. Basit Şekilli Kama Keski için Geliştirilen Kesme Teorileri

Bir malzemenin herhangi bir kesici uç etkisi altına kesilmesi olayı 150 yıldan uzun süredir incelenmektedir. Metal kesme problemlerinin incelenmesi 1860'lı yıllara dayanmaktadır (Boston, 1945). Birçok araştırmacı metallerin basit şekilli kamaya benzer kesicilerle kesilmesi problemini incelemiştir ancak Merchant'ın (1944) metal kesme teorisi, keskiye gelen kuvvetin bulunabilmesi imkanını sağladığından dolayı kaya kesme teorilerine bir anlamda ön ayak olmuştur. Merchant, metal kesme işlemindeki parça (chip) oluşumunu

inceleyerek, parçanın denge konumuna göre teorisini geliştirmiştir. Keski genişliği kesme derinliğine nazaran çok büyük olduğundan dolayı keskinin kayaca batması bir düzlem germe (plane strain) problemi olarak kabul edilmiştir ve problem iki boyutta incelenmiştir. Merchant, teorisini iki temel varsayım üzerine kurmuştur. Birincisi malzemenin Coloumb yenilme kriterine uyduğunu kabul etmiştir. İkinci olarak da düzlem germenin sabit olduğu ve yenilme kriterinin sağlandığı varsayılmıştır (Merchant, 1944).

Potts ve Shuttleworth (1959), Merchant'ın metal kesme teorisini modifiye ederek kömür kesme işlemine uyarlamışlardır. Kopan parçanın yenilme anındaki denge durumunun bir düzlem boyunca ilerlediği ve iki kuvvet takımının etkisinin altında olduğu söylenebilir. İlk kuvvet takımı keskinin etkisinden dolayı oluşmaktadır, diğer kuvvet takımı ise kayacın kendinden kaynaklanmaktadır ve bu kuvvetler kendi içinde dengededir. Bu uyarlamada da gerilme durumu düzlemsel olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde, bu teoride yenilmenin keskinin ucundan başlayarak bir düzlem boyunca devam ettiği varsayılmaktadır (Whittaker vd., 1992). Potts ve Shuttleworth (1959) uyarlamasını Merchant'ın metal kesme teorisinden ayıran en önemli özellik, metal kesme işlemindeki parçanın kazı boyunca sürekli olarak oluşturulmasıdır. Kayaç kesme işleminde parça ya da pasa oluşumu bundan çok uzaktır. Kesilen kayaç parçası büyük ya da küçük parçalar halinde yerinden sökülmektedir (Bkz. Şekil 1.9). Metal kesmede ise kesilen metal parçası kesme işlemi devam edene kadar yekpare olarak elde edilmektedir. Potts-Shuttleworth'ün teorisinde ise diğer kaya kesme teorilerinde olduğu gibi hesap edilen kesme kuvveti koparılabilecek en büyük parçanın koparılması için gereken kuvvetin hesabıdır.

İlk kaya kesme teorisi Evans'ın (1958) kömür kesme teorisidir ve bu teorinin basitleştirilmiş şematik gösterimi Şekil 1.10'da görülmektedir. Evans, çeşitli kömürler üzerinde simetrik kama keskinler ile gerçekleştirdiği kesme deneyleri sonucunda teorisini ortaya atmıştır. Kesme deneylerinin sonucunda, keskinin kayaya batması sonucu keski ucundan başlayarak serbest kaya yüzeyine doğru hareket eden bir kırılma hattı (xy) gözlemlenmiştir. Bu kırılma ara yüzeyinde çekme gerilmelerinin oluştuğunu ve kesilen numunenin çekme dayanımının aşıldığında bu kırılma yüzeyinin (xy) serbest kalarak kömür parçasının koptuğunu iddia etmiştir.



Şekil 1.10. (a) Evans (1958) teorisinin şematik gösterimi (b) Evans tarafından gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kırılma hattı (c) Evans teorisinin Roxborough (1973) tarafında asimetrik kama tipi keski için geliştirilmesi

Keski genişliğinin kesme derinliğinden çok daha fazla olması nedeniyle, Evans düzlem germe halinin geçerli olduğunu ve problemin iki boyutta incelenebileceğini, yani gerilmelerin kalınlık boyunca sabit olduğunu, belirtmiştir. Bu problem bir denge problemi gibi ele alınmıştır ve bir mesnetteki gerilmeler problemine benzetilerek çözülmüştür. İlk planda sürtünme sıfır kabul edilerek, kırılma anındaki kuvvetlerin momenti alınarak kesme kuvvetinin bulunabilmesi için şu eşitlik önerilmiştir:

$$FC' = \frac{2 \sigma_t d w \sin \theta}{1 - \sin \theta} \quad (1.1)$$

Burada;

FC' = Maksimum kesme kuvveti, N,

$\sigma_t$  = Kayacın direkt çekme dayanımı, MPa,

d = Kesme derinliği, mm,

w = Keski genişliği, mm,

$\theta$  = Yarım uç açısı, °'dir.

Geliştirilen bu model, pratikte kullanımı olmayan simetrik keski için değildir. Bundan dolayı, teorisinin pratikte de uygulanabilmesi için Roxborough (1973), basit kama tipi keski olarak adlandırılan asimetrik kama keski için Şekil 1.10'da görülen şematik biçimde teoriyi güncelleştirir ve eşitliği şu şekilde tekrar düzenlemiştir:

$$FC' = \frac{2 \sigma_t d w \sin \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} - \alpha)}{1 - \sin \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} - \alpha)} \quad (1.2)$$

Burada;

- $FC'$  = Maksimum kesme kuvveti, N,  
 $\sigma_t$  = Kayacın direkt çekme dayanımı, MPa,  
 $d$  = Kesme derinliği, mm,  
 $w$  = Keski genişliği, mm,  
 $\alpha$  = Kesme açısı, °'dir.

Evans, farklı kömür numuneleri üzerindeki kaya kesme deneylerinden elde ettiği çekme dayanımı değerleri ile direkt çekme deneyinden elde edilen çekme dayanımı değerlerini karşılaştırmıştır ve kesme deneyinden elde edilen çekme dayanımı değerinin gerçek değer olarak beşte biri olduğunu saptamıştır. Bunun üstesinden gelmek için de çekme gerilmelerinin Şekil 1.10'daki (xy) hattı boyunca eşit şekilde dağılmadığını, (x) noktasındaki gerilmenin kayacın çekme dayanımına eşit olurken (y) noktasında sıfıra düştüğünü iddia etmiştir ve Nishimatsu (1972) tarafından da kullanılan gerilme dağılım faktörünü 1.1 no'lu eşitliğe eklemiştir. Ancak n'nin nasıl bulunacağı hakkında bir bilgi vermemiş sadece rastgele değerler atamıştır. Örneğin, n değerini 8 olarak kabul ettiğinde kesme deneylerinden elde ettiği çekme dayanımı değerleri ile çekme dayanımı deneyinden elde ettiği değerlerin aynı olduğunu belirtmiştir. Bu eşitlik şu şekildedir:

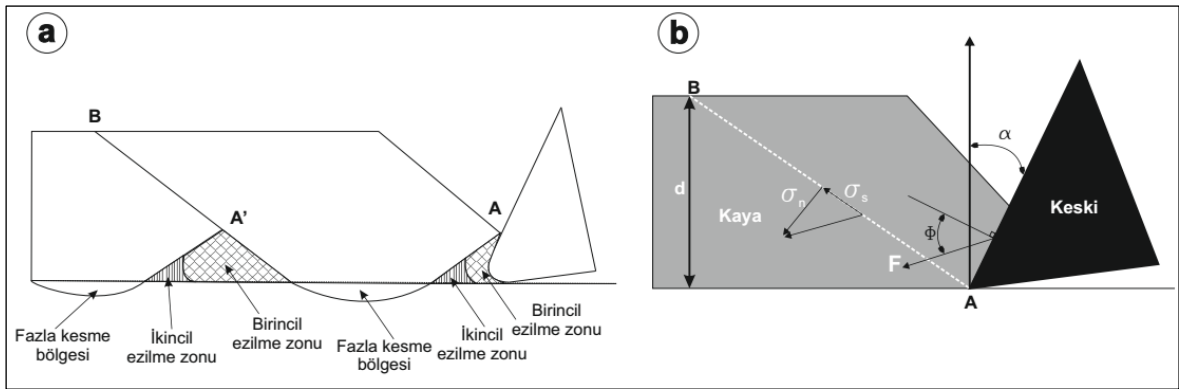
$$FC' = \frac{2}{n+2} \frac{2 \sigma_t d w \sin \theta}{1 - \sin \theta} \quad (1.3)$$

Burada;

- $FC'$  = Maksimum kesme kuvveti, N,  
 $\sigma_t$  = Kayacın direkt çekme dayanımı, MPa,  
 $d$  = Kesme derinliği, mm,  
 $w$  = Keski genişliği, mm,  
 $\theta$  = Yarım uç açısı, °,  
 $n$  = Gerilme dağılım faktörüdür.

Ayrıca Evans körelmiş uçlu simetrik kama tipi kesmeler için kesme kuvvetinin bulunabilmesi için de eşitliğini güncellemiştir (Evans, 1965). Diğer yandan, Nishimatsu (1972) Mohr-Coulomb kırılma prensibini göz önüne alarak, Merchant'ın metal kesme teorisine benzer bir teori ileri sürmüştür. Bu teoriye göre kesme sırasında kayaktan kopan parçaların oluşumunda kayacın kesme dayanımı etkilidir. Ayrıca Nishimatsu, kesme işleminde oluşan pasaların her zaman Evans'ın teorisinde olduğu gibi dairesel değil düz de olabildiğini gözlemlemiştir. Nishimatsu teorisini tanımlarken kaya kesme işleminde birincil ve ikincil ezilme zonlarından ve fazla kırılmadan bahsederek kaya kesmeyi tanımlamıştır

(Şekil 1.11). Nishimatsu'ya göre, kaya kesmenin basitleştirilmiş şematik gösterimi ve basitleştirilmiş gösterim üzerinde gerilmelerin dağılımı ve kuvvet oluşumu Şekil 1.11'de verilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, kesme işlemi sırasında keski önünde bulunan kaya parçasını iterek (AB) hattı boyunca kesme gerilmeleri ( $\sigma_s$ ) oluşturmaktadır. Buna ilave olarak keskinin kendi hareketinden doğan bir de kesme hattına dik etkiyen normal gerilmeler ( $\sigma_n$ ) görülmektedir. Bu da problemin Mohr-Coulomb yenilme kriteri yardımı ile çözülmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1.11. (a) Nishimatsu (1972) kaya kesme teorisinin şematik gösterimi (b) Kesme sırasında gerilmelerin dağılımı ve kuvvet oluşumu

Nishimatsu, (AB) kesme hattı boyunca gerilmelerin sabit olmadığını ve A noktasında maksimum, B noktasında ise minimum olduğunu ileri sürmüştür. Bu ön kabulde birlikte gerilme dağılım faktörünü ( $n$ ) tanımlamıştır. Gerilme dağılım faktörünün, kayaç özelliklerinin değil, yalnızca kesme açısının ( $\alpha$ ) bir fonksiyonu olduğunu ileri sürmüştür ve kesme kuvvetinin bulunabilmesi için aşağıdaki eşitlikleri önermiştir. Ayrıca, sürtünme açısının bulunabilmesi için de kendi kullandığı numuneler için iki adet eşitlik önermiştir.

$$FC' = \frac{2}{n+1} \frac{\sigma_s d w \cos(k) \cos(\phi - \alpha)}{1 - \sin(k - \alpha + \phi)} \quad (1.4)$$

$$n = 11,3 - 0,18\alpha \quad (1.5)$$

$$\phi = 25,4 + 0,66\alpha \text{ (Beton için)} \quad (1.6)$$

$$\phi = 22,9 + 0,32\alpha \text{ (Aoishi tufü için)} \quad (1.7)$$

Burada;

$FC'$  = Maksimum kesme kuvveti, N,

$\sigma_s$  = Kayacın kesme dayanımı, MPa,

- d = Kesme derinliği, mm,  
w = Keski genişliği, mm,  
k = Kayacın içsel sürtünme açısı, °,  
n = Gerilme dağılım faktörü,  
 $\alpha$  = Kesme açısı, °,  
 $\phi$  = Kaya kesmedeki sürtünme açısı, °'dir.

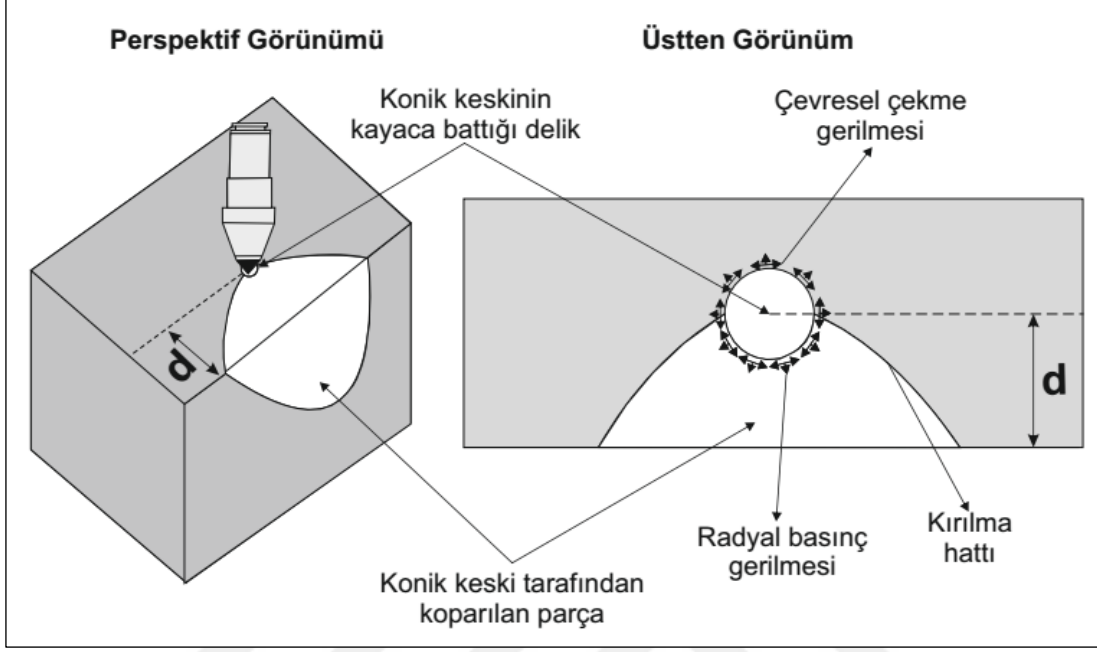
Deliac (1993) kaya kesmede oluşan büyük kaya parçalarını analiz ederek, iki farklı kaya kesme modu olduğunu ileri sürmüştür. Birinci mod (mod A) tipik bir kesme yenilmesidir ve Nishimatsu'nun teorisi ile benzeşmektedir. Bu modda kayacın kesilmekten çok öğütüldüğü ve yumuşak kayalarda, körelmiş keskinlerde ve çok sık kesmelerde bu durumla karşılaşıldığını belirtmiştir. Mod B denilen ikinci modda ise Evans'ın çekme teorisine benzer bir kırılma şeklinin olduğunu öne sürmüştür ve bu modun derin kesmelerde, kırılğan kayalarda, yüksek kesme açılı keskinlerde ve körelmemiş keskinlerde elde edildiğini belirtmiştir. Ayrıca iki modu da etkileyen parametreleri de birbirinden ayırmış ve ikisi içinde farklı eşitlikler önermiştir. Diğer yandan, Bilgin vd. (2012) tam cepheli tünel açma makinelerinde kullanılan Şekil 1.7'de görülen kompleks şekilli kama keskinler için Eşitlik 1.2'yi güncellemiş ve yeni bir eşitlik önermiştir. Çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen teorik/deneysel çalışmalara ek olarak, birtakım araştırmacılar kaya kesme olayını nümerik yöntemler vasıtası ile incelemişlerdir. Bu yöntemle yapılan çalışmalar, Menezes vd. (2014) tarafından detaylı olarak derlenerek sunulmuştur.

### 1.5.2. Konik Keskinler için Geliştirilen Kesme Teorileri

Koni şekilli bir cismin elastik bir katı cisme batması konusu ilk kez Hertz tarafından incelenmiştir (Chen, 2003). Konik keskinler kaya kesme işinde kullanılmaya başladıktan sonra ise kayalar üzerinde bu problemi ilk kez Lundberg (1974) incelemiştir. Lundberg'e göre konik uçlar kayaca batarken oluşan radyal çatlaklar çekme gerilmesinin yenilmesi sonucu oluşmaktadır. Konik uçlar ile ilgili ilk kesme teorisi ise Evans (1984) tarafından önerilmiştir. Şekil 1.12'de görüldüğü gibi konik uçlu keski kayaca battığında bir delik oluşturmakta ve bu deliğın etrafında radyal basınç gerilmeleri oluşmaktadır. Bu basınç gerilmelerine çevresel çekme gerilmeleri eşlik etmektedir. Çevresel ve radyal gerilmeler ile çekme çatlakları oluşmakta ve kaya-delik ara yüzeyi açılmaktadır. Ayrıca, kesme işleminde



V kesitli oyukların oluştuğu da diğer bir bulgudur. Kırılma anında oluşan kuvvetlerin denge durumuna göre kesme kuvvetini formüle etmiştir.



Şekil 1.12. Evans (1984) teorisinde konik keskinin battığı kayada oluşan delikteki gerilmeler

$$FC' = \frac{16 \pi d^2 \sigma_t^2}{\sigma_c \cos^2(\theta)} \quad (1.8)$$

Burada;

$FC'$  = Maksimum kesme kuvveti, N,

$\sigma_t$  = Kayacın direkt çekme dayanımı, MPa,

$\sigma_c$  = Kayacın tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

$d$  = Kesme derinliği, mm,

$\theta$  = Yarım uç açısı, °'dir.

Evans'ın bu teorisinde keski kaya arasındaki sürtünme ihmal edilmektedir. Bundan dolayı Roxborough ve Liu (1995) bu eşitliği sürtünmeyi de dahil edecek şekilde aşağıdaki gibi yeniden düzenlemiştir.

$$FC' = \frac{16 \pi d^2 \sigma_c \sigma_t^2}{\left[ 2\sigma_t + \frac{\sigma_c \cos(\theta)}{1 + \frac{\tan(\psi)}{\tan(\theta)}} \right]^2} \quad (1.9)$$

Burada;

- $FC'$  = Maksimum kesme kuvveti, N,  
 $\sigma_t$  = Kayacın direkt çekme dayanımı, MPa,  
 $\sigma_c$  = Kayacın tek eksenli basınç dayanımı, MPa,  
 $d$  = Kesme derinliği, mm,  
 $\theta$  = Yarım uç açısı, °,  
 $\psi$  = Kaya ve keski arasındaki sürtünme açısı, °'dir.

Evans'ın teorisindeki diğer bir eksiklik ise kayacın tek eksenli basınç dayanımı parametresinin ( $\sigma_c$ ) kesme kuvvetinin bulunduğu eşitlikte paydada bulunmasıdır ve ayrıca koni açısının ( $\theta$ ) sıfır olması durumunda kesme kuvvetinin sıfır olmamasıdır. Bundan dolayı Gökten (1997) bu eşitliği modifiye ederek tekrar şu şekilde önermiştir:

$$FC' = \frac{4 \pi d^2 \sigma_t \sin^2(\theta + \psi)}{\cos(\theta + \psi)} \quad (1.10)$$

Burada;

- $FC'$  = Maksimum kesme kuvveti, N,  
 $\sigma_t$  = Kayacın direkt çekme dayanımı, MPa,  
 $d$  = Kesme derinliği, mm,  
 $\theta$  = Yarım uç açısı, °,  
 $\psi$  = Kaya ve keski arasındaki sürtünme açısı, °'dir.

Evans bu teoriyi kayaca direkt olarak hücum eden bir konik uçlu keski için geliştirmiştir. Yani bir anlamda, bir uç batırma deneyi gibi varsaymıştır. Ancak, gerçek saha koşullarında konik keski kesici kafalara belirli bir dalma açısı ile yerleştirilirler ve kayaca dik olarak değil açılı olarak hücum ederler (Şekil 1.8). Bundan dolayı, Gökten ve Güneş (2005) geçmiş çalışmalardaki deneysel verileri inceleyerek bu eşitliği pratik kesme koşullarına uygun olarak tekrar güncellemişlerdir ve bu eşitliği şu şekilde önermişlerdir:

$$FC' = \frac{12 \pi d^2 \sigma_t \sin^2[\frac{1}{2}(90 - \alpha) + \psi]}{\cos[\frac{1}{2}(90 - \alpha) + \psi]} \quad (1.11)$$

- $FC'$  = Maksimum kesme kuvveti, N,  
 $\sigma_t$  = Kayacın direkt çekme dayanımı, MPa,  
 $d$  = Kesme derinliği, mm,  
 $\alpha$  = Kesme açısı, °,  
 $\psi$  = Kaya ve keski arasındaki sürtünme açısı, °'dir.

Teorik modeller, gerekli pik kuvveti ya da gerekli enerjiyi analiz ederek, bunları temel kayaç özellikleri ile (kesme, çekme dayanımı ve içsel sürtünme açısı) ilişkilendirmek üzere geliştirilmişlerdir. Geliştirilen tüm modellerin, makine dizaynı ya da performansı ile ilgili pratik problemlerin çözümünde sahip olduğu birtakım eksiklikler bulunmaktadır. Bu zayıflıklar, uygulanan kuvvetin sonucunda oluşan gerilme durumunun ve çatlak ilerleme mekanizmasının tam olarak anlaşılabilmesinden kaynaklanmaktadır. Buna ilave olarak, malzeme genelde homojen olarak düşünülmektedir ve hali hazırda içinde bulunan süreksizlikler ihmal edilmektedir. En basit tek keski ile kaya kesmede bile keski civarındaki kayada üç eksenli gerilme durumu mevcuttur. Keski ile kayacın temas yüzeyinde bir ezilmiş zon bulunmaktadır ve bu zonun özellikleri ana kayanın özelliklerinde farklılık göstermektedir. Teorik modeller genelde basitleştirilmiş iki boyutlu gerilme dağılımını göz önüne alırlar ve bu ezilmiş zonun ve ezilmiş zonun uygulanan kuvveti kayaya aktarmadaki önemini ihmal ederler. Buna ilaveten, sahada birden çok keski aynı anda simultane olarak kazı yapmaktadır. Bu da üç eksenli gerilme durumunu daha ileri bir karmaşıklığa taşımaktadır ki teorik modellerde bu da ihmal edilmektedir. Kollu galeri açma makinesi (KGAM) kazısında, teorik modellerin zorluğu, çok farklı sayıda keski geometrisinin olması, kesme derinliği ve kesme modu (batma, sağa sola kazı (Şekil 1.4)) vb. parametrelerden kaynaklanmaktadır. KGAM kazı performansının teorik olarak modellenemesinin zorluğundan kaynaklı olarak, bu konuya yaklaşım genelde ampirik (Breeds ve Conway, 1992) ve deneyseldir.

### **1.6. Kollu Galeri Açma Makinelerinde Kazı Performansı**

KGAM de dahil olmak üzere, kazı makinelerinin ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir. Bundan dolayı, kazı yapacakları formasyona uygun olarak seçilmelidirler. Ayrıca, bu makinelerin kazı hızları teknik ve ekonomik açıdan projelerin başarılarını etkilemektedir. Bir tünel ya da galeri açma projesinde projenin ne zaman biteceği, bir maden işletmesinde üretimde çalışan bir makinenin ise ne kadar hızda üretim yapacağını önceden kestirilmesi gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı, makinenin kazı performansı çok büyük önem kazanmaktadır. Kazı makinelerinin performansı denildiğinde üç parametre göz önüne alınmaktadır. Bunlar, net kazı hızı (NKH), keski tüketim miktarı (KTM) ve makine kullanım oranıdır (MKO). Makinelerin performansını etkileyen parametreleri ise üç ana başlıkta

toplayabiliriz: Makine ile ilgili parametreler, jeolojik-jeoteknik parametreler ve işletimsel ve teknik parametreler. Bu parametreler detaylı olarak Tablo 1.5’de verilmiştir.

Tablo 1.5. Kazı makinelerinin performansını etkileyen parametreler (Bilgin vd., 2014).

<b>Makine ile ilgili parametreler</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Makine tipi</li> <li>• Makine ağırlığı ve ölçüleri</li> <li>• İtme gücü ve tork kapasitesi</li> <li>• Kesici kafa tipi</li> <li>• Kesici kafa gücü, devri ve keski dizilimi</li> <li>• Kesici tipi ve ölçüleri, keskinin metalürjik özellikleri</li> </ul>
<b>Jeolojik-jeoteknik parametreler</b>	<b>Kaya kütleli özellikleri</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaya kalite göstergesi (RQD)</li> <li>• Tabakalanma ve fay zonları</li> <li>• Süreksizlik takımları (yönelim, aralık, dolgu vs.)</li> <li>• Hidrojeoloji (su geliri)</li> <li>• Zor zemin koşulları (sıkışan ve şişen zeminler)</li> </ul>
	<b>Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kazılabilirlik (Keski kuvvetleri, spesifik enerji, optimum kesme geometrisi)</li> <li>• Kayaç dayanım parametreleri (tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü vs.)</li> <li>• Dokusal ve aşındırıcılık özellikleri (sert mineral yüzdesi, tane boyutu, mikro çatlaklar, tane kenetlenmesi vs.)</li> <li>• Diğer parametreler (kırılganlık, nem içeriği, şişme kapasitesi vs.)</li> </ul>
<b>İşletme ve teknik parametreler</b>	<b>Teknik parametreler</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Açıklık şekli ve ölçüleri</li> <li>• Galeri/tünel eğimi</li> </ul>
	<b>İşletme parametreleri</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tahkimat tipi</li> <li>• Pasa taşınması</li> <li>• Yardımcı üniteler</li> <li>• Zemin şartlandırma</li> <li>• İş kalitesi</li> </ul>

Net kazı hızı, makinenin kazı yaptığı süre içinde toplam kazdığı kaya hacmidir ve  $m^3$ /saat birimi ile sunulur. Net kazı hızı, makine ile ilgili, jeolojik-jeoteknik ve işletme ve teknik parametrelerin bir fonksiyonudur. Keski tüketim miktarı ise, makinenin kazdığı toplam kaya hacmi başına sarf ettiği kesici uç miktarıdır ve birimi keski/ $m^3$ ’tür. Keski tüketim miktarı makine ile ilgili ve jeolojik parametrelerin bir fonksiyonudur (Bilgin vd.,

2014). Net kazı hızı iri ölçekli değişkenlerden (kayaç dayanımı, tokluk, süreksizlik vs.) etkilenirken, keski sarfiyatı mikroskobik değişkenlerden (kuvars içeriği) etkilenmektedir (Thuro ve Plinninger, 1999). Diğer yandan, makine kullanım oranı, makinenin yalnızca kazı yaparken geçirdiği sürenin toplam süreye olan oranıdır ve işletme ve teknik parametrelerden etkilenmektedir. Makine kullanım oranını etkileyen en önemli parametrelerden biri kullanılan tahkimat tipidir. Tünel/galeri açma işinde kullanılan tahkimat tipine göre makine kullanım oranının sınıflandırılması Tablo 1.6’da verilmiştir. Kullanılan tahkimata harcanan süre arttıkça kazıya ayrılan süre azalmaktadır. Kogelmann (1988) veri tabanında bulunan KGAM projelerini inceleyerek Tablo 1.6’yı oluşturmuştur.

Tablo 1.6. Makine kullanım oranını kullanılan tahkimat tipine göre sınıflandırılması (Kogelmann, 1988).

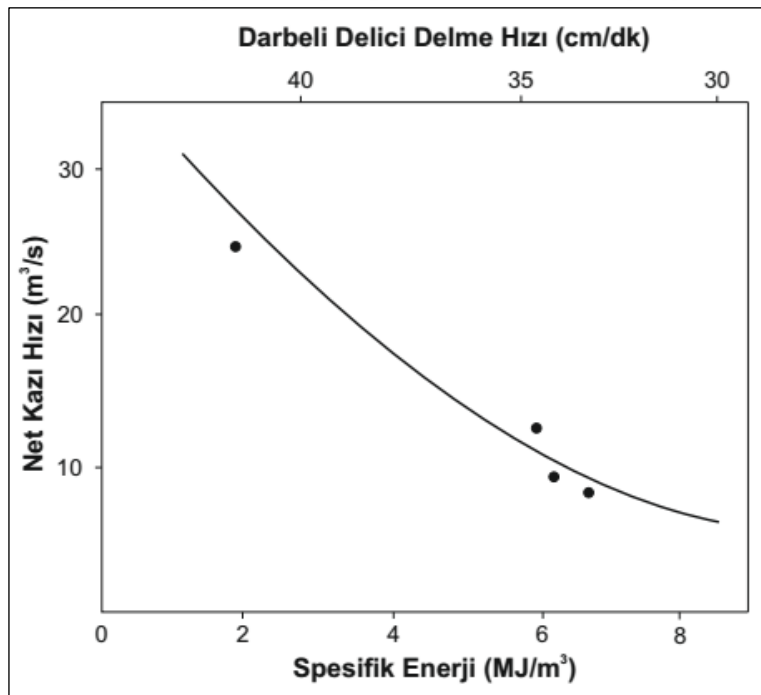
<b>Kullanılan tahkimat tipi</b>	<b>Makine kullanım oranı (%)</b>
Tahkimatsız	60-80
Yalnızca kaya saplama	40-50
Püskürtme beton	40-50
Püskürtme beton + kaya saplama	30-35
Çelik hasır	30-35
Beton kaplamalı çelik hasır	20-25

Kazı makinelerinin performansının incelenmesinde en önemli parametre net kazı hızıdır. Bu çalışmada da performans konusu, net kazı hızı özelinde incelenmiştir. Net kazı hızının bulunmasında başvurulan çeşitli yöntemler bulunmaktadır (teorik, ampirik, yerinde kesme denemeleri vs.). Ancak, yukarıda da değinildiği gibi önerilen teorik modeller sahadaki kesme koşullarını tamamen kapsamamaktadır ve yerinde kesme denemeleri çok maliyetli çalışmalardır. Bundan dolayı çoğunlukla ampirik modellere yer verilmektedir (Breeds ve Conway, 1992). Ampirik modeller denildiğinde kaya kesme deneyleri de bu modellere katılmaktadır. Ancak, bu çalışmada sıklıkla başvurulan performans tahmin modelleri ampirik ve deneysel yöntemler olarak iki gruba ayrılarak incelenecektir.

### 1.6.1. Ampirik (Görgül) Yöntemlerle Kazı Performansı Tahmini

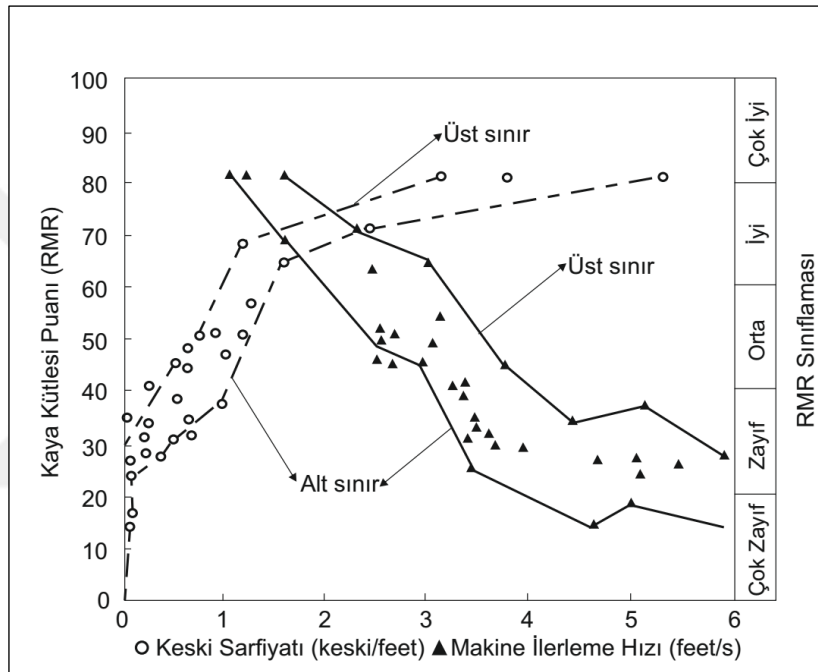
Ampirik yöntemler, kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) sahadaki net kazı hızları ile kayaçların mekanik özellikleri, kaya kütlesi özellikleri ve makinelerin kesme gücü arasındaki korelasyonlara dayanmaktadır. Ampirik yöntemler, performans tahmininde sıklıkla kullanılmaktadırlar ancak bu modellerin tahmin kabiliyetleri elde edilen verilerin kalitesi, verilerin çokluğu ve dikkate alınan parametre sayısı ile doğrudan orantılıdır. Bundan dolayı performans kestiriminde kullanırken bu hususların dikkate alınması gerekmektedir.

Bu kapsamda çeşitli araştırmacılar KGAM'nin performans tahmininde kullanılması için birtakım modeller önermişlerdir. Bilgin (1983) KGAM'nin performans tahmini için yerinde delinebilirlik verilerini kullanmıştır. Delinebilirlik çalışmaları, Zonguldak Kozlu yeraltı işletmesinde çalışan pnömatik darbeli deliciler yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Aynı bölgeden alınan kayaç numuneleri küçük boyutlu kesme deneyine de tabi tutularak spesifik enerji değerleri bulunmuştur ve bu parametreler arasındaki ilişki Şekil 1.13'te verilmiştir. Şekilden açıkça görülebileceği gibi spesifik enerji değeri arttıkça ve darbeli delici delme hızı azaldıkça, KGAM'nin net kazı hızı azalmaktadır.



Şekil 1.13. Net kazı hızı ile darbeli delici hızı ve spesifik enerji arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Bilgin, 1983).

Aleman (1983) KGAM'nin performans tahmini için tek eksenli basınç dayanımı, aşındırıcılık, kaya kütlesi özellikleri ve makine özelliklerini kullanarak bir model geliştirmiştir. Sandbak (1985) San Manuel Madeni'nde çalışan KGAM ile ilgili veri toplayarak saha kazı hızı ve keski tüketimi verilerini kaya kütlesi puanı (RMR) ile ilişkilendirmiştir ve KGAM kazı hızlarının düşük RMR'ye sahip formasyonlarda yüksek, RMR'si yüksek formasyonlarda düşük olduğunu belirtmiştir ve Şekil 1.14'teki grafiği önermiştir.



Şekil 1.14. Sandbak (1985) tarafından geliştirilen makine ilerleme hızı ve keski sarfiyatı ile RMR arasındaki ilişkiyi gösteren model (1 feet = 0,3048 m)

Farmer ve Garrity (1987) KGAM'nin performans tahmini için tek eksenli basınç dayanımı ve elastisite modülü yardımı ile bulunan kırılma tokluğu parametresini kullanmıştır ve bunun için bir abak önermiştir ve bu abak Şekil 1.15'te verilmiştir. Farmer ve Garrity (1987) makinenin kesme gücünün ancak çok küçük bir kısmının makine tarafından kesme işleminde kullanılabileceğini ileri sürmüştür ve grafikte de buna uygun olarak 4 farklı makine için oluşturdukları eğrileri grafikte sunmuşlardır. Örnek olarak, grafikte 2 kW olarak belirtilen makinenin normaldeki kesme gücü 200 kW gibi bir değerdir.

Farmer ve Garrity (1987) tarafından kullanılan kırılma tokluğunun formülü aşağıda verilmiştir.

$$\frac{k_o P}{NKH} = \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (1.12)$$

Burada;

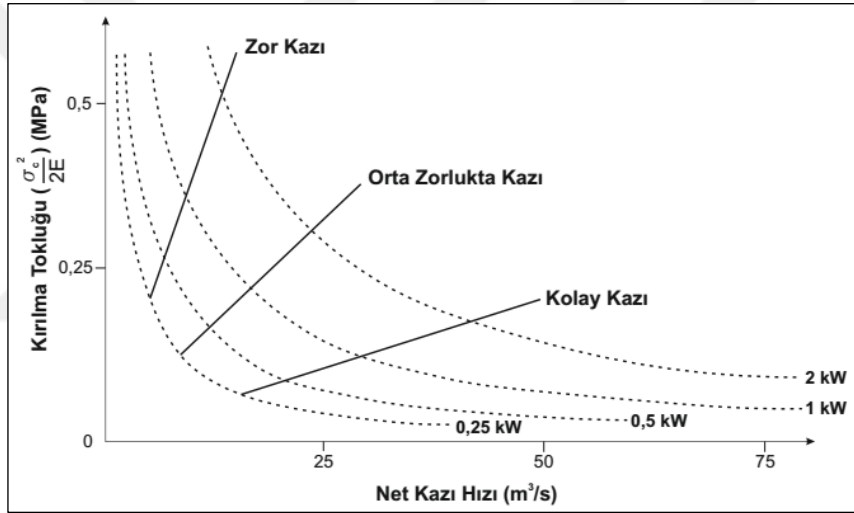
$k_o$  = Enerji transfer oranı,

$P$  = Kesici kafa gücü, kW,

$NKH$  = Net kazı hızı,  $m^3/s$ ,

$\sigma_c$  = Tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

$E$  = Elastisite modülü, GPA'dır.



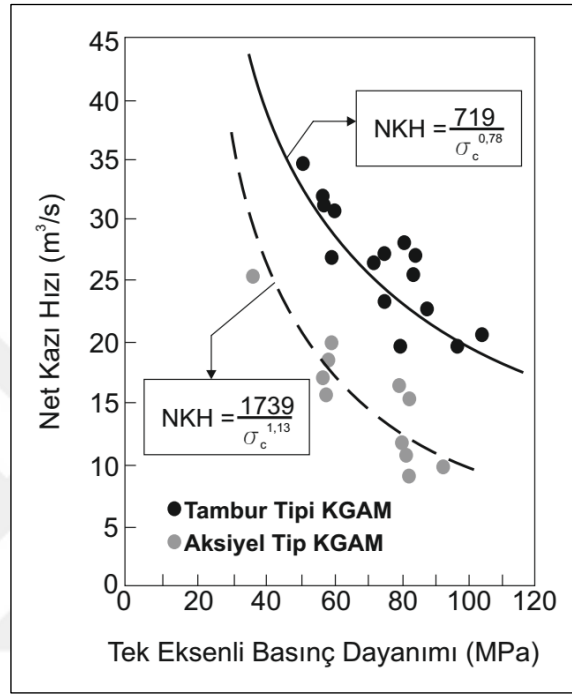
Şekil 1.15. Farmer ve Garrity (1987) tarafından KGAM'nin performans tahmini için önerilen abak

Schneider (1988) kireçtaşı, jips, şeyl ve kumtaşlarından oluşan kayaçları gruplandırmıştır ve her kayaç grubu için tek eksenli basınç dayanımı ile KGAM'nin kazı hızlarının bulunabilmesi için farklı eğriler önermiştir. Ayrıca, kumtaşı, şeyl ve jips için teorik spesifik enerji değerleri ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişkileri gösteren bir grafik önermiştir. Her dört kayaç tipi içinde tek eksenli basınç dayanımının artması ile birlikte net kazı hızının azaldığı belirtilmiştir.

Gehring (1989) 250 kW kesme gücüne sahip aksiyel bir KGAM ile 230 kW kesme gücüne sahip tambur tipi KGAM'nin Almanya'da bulunan Saar Kömür Bölgesi'nde çalışması sırasındaki performanslarını incelemiştir ve bu KGAM'nin net kazı hızlarının



kayaçların tek eksenli basınç dayanımına göre değişimini gösteren grafik Şekil 1.16’da verilmiştir. Ayrıca, KGAM’nin tek eksenli basınç dayanımına bağlı olarak performansının kestirilmesi için aşağıdaki eşitlikler grafikler sayesinde elde edilmiştir. Bu grafiğe göre net kazı hızının tek eksenli basınç dayanımının artması ile azaldığı görülmektedir.



Şekil 1.16. KGAM’nin performans tahmini için Gehring (1989) tarafından önerilen eğriler

$$NKH = \frac{719}{\sigma_c^{0.78}} \quad (\text{Tambur tipi KGAM için}) \quad (1.13)$$

$$NKH = \frac{1739}{\sigma_c^{1.13}} \quad (\text{Aksiyel tip KGAM için}) \quad (1.14)$$

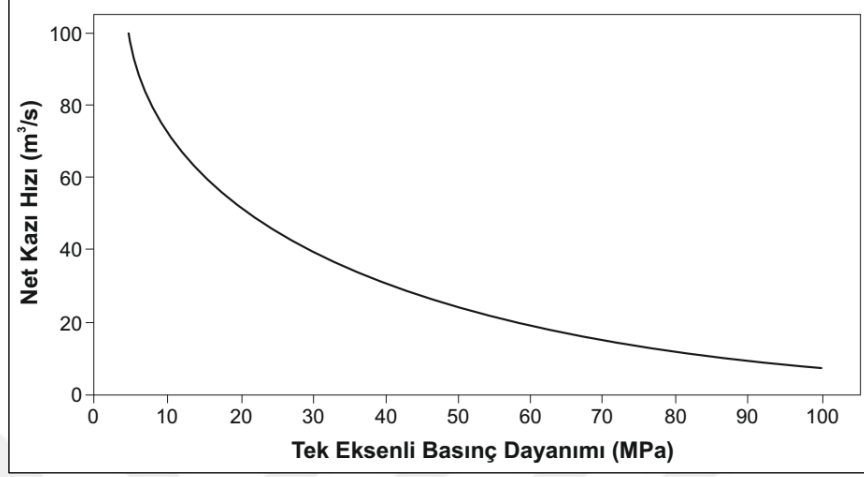
Burada;

$NKH$  = Net kazı hızı, m<sup>3</sup>/s,

$\sigma_c$  = Tek eksenli basınç dayanımı, MPa’dır.

Şekil 1.16’dan da görülebileceği gibi benzer kesme gücüne sahip olan tambur tipi makine tüm kaya dayanımlarındaki formasyonlarda aksiyel tip makineden daha yüksek performans göstermiştir. Natau vd. (1991) Westfalia marka KGAM’nin performans tahmini için tek eksenli basınç dayanımını kullanarak Şekil 1.17’deki grafiği önermiştir. KGAM’nin

net kazı hızının tek eksenli basınç dayanımının artması ile azaldığı grafikten açıkça görülmektedir.



Şekil 1.17. Tek eksenli basınç dayanımı ile net kazı hızı arasındaki ilişki (Natau vd., 1991).

Matsui ve Shimada (1993) KGAM performans tahmini için kaya darbe dayanımı deneyini (RIHN) ve kaya kalite değerini (RQD) kullanmıştır. Kaya darbe dayanım deneyinin temel prensibi, karot numunelerinin üzerine belirli bir yükseklikten belirli bir ağırlıkta çelik bir silindirin düşürülerek parçalanmasına ve bu değer yardımı ile kayaların darbe dayanımının belirlenmesine dayanmaktadır.

Bilgin vd. (1996) Haliç kanalizasyon tünellerinde farklı formasyonlarda çalışan aksiyel tip kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) performanslarını incelemiştir. Kaya, kaya kütlesi ve makine özelliklerini kullanarak genel performans tahmini modelini geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu model şu şekildedir:

$$RMCI = \sigma_c (RQD/100)^{2/3} \quad (1.15)$$

$$NKH = 0.28 P (0.974)^{RMCI} \quad (1.16)$$

Burada;

NKH = Net kazı hızı, m<sup>3</sup>/s,

$\sigma_c$  = Tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

P = Kesici kafa gücü, HP,

RMCI = Kaya kütlesi kazılabilirlik indeksi, MPa

RQD = Kaya kalite değeri, %'dir.

Çopur vd. (1997) tambur tipi KGAM'nin süreksizlik içermeyen evaporitik formasyonlardaki performanslarını inceleyerek modellerini geliştirmişlerdir. Bu çalışmada makine ağırlığı, kesme gücü ve kayacın tek eksenli basınç dayanımı performans modeline katıldığında sonuçların daha gerçeğe yakın çıktığı belirtilmiştir. Net kazı hızının bulunabilmesi için önerilen eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$RPI = \frac{P W}{\sigma_c} \quad (1.17)$$

$$NKH = 27.511 e^{0.0023RPI} \quad (1.18)$$

Burada;

NKH = Net kazı hızı, m<sup>3</sup>/s,

$\sigma_c$  = Tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

P = Kesici kafa gücü, kW,

W = Makine ağırlığı, ton,

RPI = KGAM ilerleme indeksi, kW.ton/MPa'dır.

Thuro ve Plinninger (1999) 132 kW kesme gücüne sahip aksiyel tip bir KGAM'nin kazı performansı ile kazdığı formasyonun tek eksenli basınç dayanımını ilişkilendirmiştir. 26 farklı kayaç formasyonundan elde edilen model Eşitlik 1.19'da verilmiştir. Ayrıca, Thuro ve Plinninger (1999) tek eksenli basınç dayanımı değerlerindeki saçınımdan dolayı ve tek eksenli basınç dayanımı kaya kırılmasını tam olarak temsil edemediği için, bunun yerine yıkım enerjisi diye bir parametre tanımlamıştır ve bu parametre yardımı ile bir performans tahmini modeli daha geliştirmiştir (Eşitlik 1.20). Yıkım enerjisi ( $W_j$ ), bir tek eksenli kırılma deneyinde gerilme-deformasyon eğrisi altında kalan alanı temsil etmektedir.

$$NKH = 75.7 - 14.3 \ln(\sigma_c) \quad (1.19)$$

$$NKH = 107,6 - 19,5 \ln(W_j) \quad (1.20)$$

Burada;

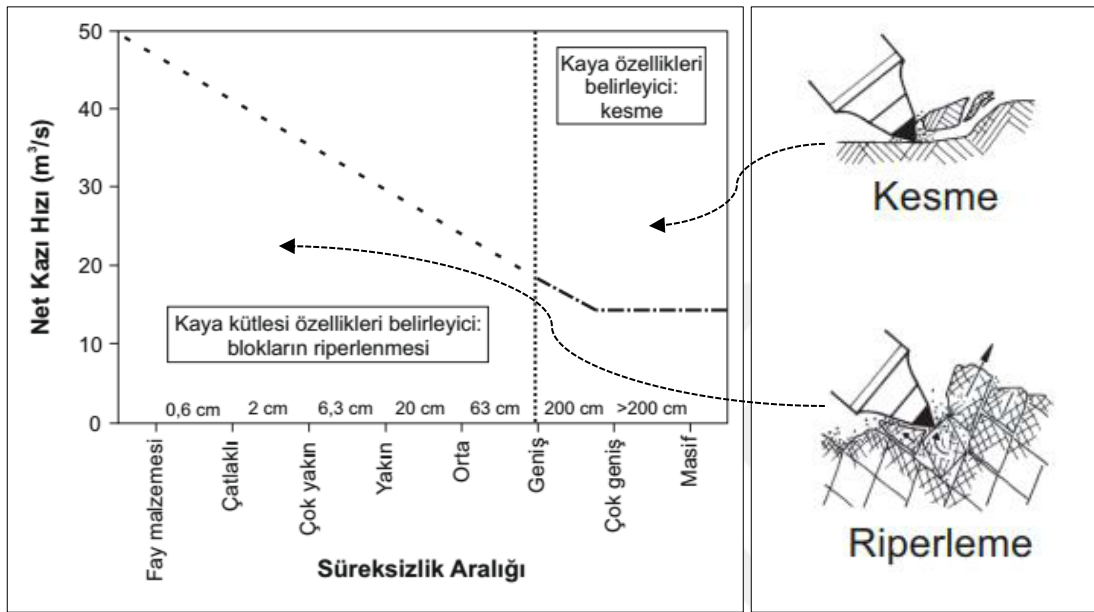
NKH = Net kazı hızı, m<sup>3</sup>/s,

$\sigma_c$  = Tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

$W_j$  = Yıkım enerjisi, kJ/m<sup>3</sup>tür.

Buna ilave olarak, Thuro ve Plinninger (1998) KGAM'nin Zeulenroda Tüneli'ndeki masif ve eklemlili kaya kütlelerindeki performanslarını incelemiştir. Bu çalışma kazı makinelerinin, özellikle de kısmi cephe tünel/galeri açma makinelerinin, performans tahminine yönelik olarak önemli bulgular içermektedir. Öyle ki, performans tahmini

yapılırken mutlaka kaya kütlelerinin durumu da göz önüne alınmalıdır ve kaya kütleleri parametreleri tahmin modellerine dahil edilmelidir. Thuro ve Plinninger (1998) tarafından önerilen Şekil 1.18’de bir KGAM’nin kazı hızının kaya kütleindeki süreksizlik aralığına bağlı olarak değişimi görülmektedir.



Şekil 1.18. Kaya kütleleri ve kaya özelliklerinin göreceli olarak KGAM'nin performansı üzerine etkileri (Thuro ve Plinninger, 1998'den değiştirilerek).

Buradan açıkça görülmektedir ki sahada kazı yaparken makine iki modda kazı yapmaktadır. Bunlar, riperleme ve kesmedir. Süreksizlik aralığının 63 cm'den düşük olduğu durumlarda makine riperleme yani ana kayadan parçaları sökme şeklinde kazı yapmaktadır ve bu alanda kayanın mekanik özellikleri belirleyici değildir. Ancak, süreksizlik aralığı 63 cm'nin üzerinde olduğunda kaya kütle özelliklerinin etkisi yok olmakta ve kayanın özellikleri belirleyici olmaktadır.

Ocak vd. (2007) RQD'si 55 olan formasyonlardaki kayaların tek eksenli basınç dayanımlarını KGAM'nin kazı hızları ile ilişkilendirmişlerdir. Ebrahimabadi vd. (2012) yeraltı kömür ocaklarında bulunan 41 farklı bölgeden numune ve veri toplamışlardır. Topladıkları veriler yardımı ile kaya kütle kırılgenlik indeksini (RMBI) tanımlamışlardır ve net kazı hızının bulunabilmesi için aşağıdaki eşitlikleri önemışlerdir.

$$\text{RMBI} = e^{\frac{\sigma_c}{\sigma_t}} (\text{RQD}/100)^3 \quad (1.21)$$

$$\text{NKH} = 35.22 e^{-0.54 \log \text{RMBI}} \quad (1.22)$$

Burada;

NKH = Net kazı hızı, m<sup>3</sup>/s,

$\sigma_c$  = Tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

$\sigma_t$  = Tek eksenli çekme dayanımı, MPa,

RMBI = Kaya kütlesi kırılgenlik indeksi,

RQD = Kaya kalite değeri, %'dir.

Restner ve Plinninger (2015) kaya malzemesinin tokluğunu/kırılgenliğini, kaya kütlesinin özelliklerini, arazi gerilmelerini, makine kesme gücünü ve tek eksenli basınç dayanımını dikkate alarak evrensel bir performans tahmini modeli önermişlerdir. KGAM'nin net kazı hızının bulunabilmesi için önerdikleri model şu şekildedir:

$$\text{NKH} = k_1 k_2 k_3 \frac{7}{\sigma_c} P \quad (1.23)$$

Burada;

NKH = Net kazı hızı, m<sup>3</sup>/s,

$\sigma_c$  = Tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

P = Makinenin kesme gücü, kW,

$k_1$  = Kayaç kırılgenliği için düzeltme katsayısı,

$k_2$  = Kaya kütlesi süreksizlik özellikleri için düzeltme katsayısı,

$k_3$  = Arazi gerilmeleri için düzeltme katsayısıdır.

Kayaç kırılgenliği için önerilen düzeltme katsayısı ( $k_1$ ) spesifik enerji düzeltmesi gibi kabul edilebilir. Aynı dayanıma sahip kayalardan daha kırılgen olanının kesilmesi daha kolay olacağı ön kabulü ile böyle bir düzeltme faktörüne ihtiyaç duyulmuştur.  $k_1$  faktörü tek eksenli basınç dayanımının ( $\sigma_c$ ) dolaylı çekme dayanımına ( $\sigma_{bt}$ ) oranı, yani kırılgenlik indeksi ile bulunmaktadır ve farklı kırılgenlik indeksi değerlerine karşılık gelen  $k_1$  değerleri Tablo 1.7'de verilmiştir.

$k_2$  düzeltme faktörü, kaya kütlesi kazılabilirlik puanı (RMCR) ile belirlenebilmektedir. RMCR ilk olarak Restner ve Gehring (2002) tarafından önerilmiştir ve kayacın tek eksenli basınç dayanımı, blok boyutu, süreksizlik durumu ve süreksizlik takımlarının yönelimi ile belirlenebilmektedir. Bu parametrelere ait puanlama Tablo 1.8'de verilmiştir. Ayrıca,  $k_2$  ve RMCR'nin hesaplanabilmesi için önerilen eşitliklerde aşağıda verilmiştir.

$$RMCR = R_{\sigma_c} + R_{BB} + R_{SD} + R_Y \quad (1.24)$$

$$k_2 = 45,6 RMCR^{-0,9821} \quad (1.25)$$

Burada;

RMCR = Kaya kütlesi kazılabilirlik puanı,

$k_2$  = Kaya kütlesi süreksizlik durumu için düzeltme faktörü,

$R_{\sigma_c}$  = Tek eksenli basınç dayanımı puanı,

$R_{BB}$  = Blok boyutu puanı,

$R_{SD}$  = Süreksizlik durumu puanı,

$R_Y$  = Süreksizlik yönelimi puanıdır.

Tablo 1.7. Farklı kırılgenlik indeksi değerlerine karşılık gelen  $k_1$  değerleri

Kırılgenlik indeksi ( $\sigma_c / \sigma_{bt}$ )	Sınıflama	$k_1$
$\leq 6$	Çok sünek	0,75
6-8	Sünek	0,85
8-15	Normal	1,00
15-20	Kırılgen	1,10
$> 20$	Çok kırılgen	1,20

$k_3$  parametresi ise arazi gerilmelerinin etkisini hesaba katmak için önerilmektedir. Üç eksenli basınç dayanımı deneyinde yanal gerilme arttığında basınç dayanımı da arttığı gibi arazideki gerilmeler de kayacın kazılmasını zorlaştırmaktadır. Bu modelde Restner ve Plinninger (2015) bu faktörün 1 olarak kabul edilebileceğini belirtmektedirler. Ancak, Bilgin vd. (2000) gerilme altında bulunan tünellerde kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji değerlerinin 1,3 ile çarpılması gerektiğini bildirmişlerdir. Buna rağmen bu model kullanılırken  $k_3$  faktörü 1 olarak kullanılmaktadır.

Abdolreza ve Yakchali (2013), tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, RQD, ve alfa açısı parametrelerini girdi parametresi olarak kullanarak çok değişkenli lineer regresyon yöntemi ile KGAM'nin net kazı hızlarının bulunabilmesi için bir model önermişlerdir. Kahraman ve Kahraman (2016) aynı şekilde, bir yeraltı kömür işletmesinde bulunan KGAM'nin kazı performansını inceleyerek çok değişkenli lineer regresyon yöntemini kullanarak bir eşitlik önermişlerdir. Bu tür modellere ek olarak çeşitli

araştırmacılar yapay sinir ağları gibi çeşitli bilgisayar uygulamalarını kullanarak KGAM'lerin performanslarını tahmin etmeye çalışmışlardır (Avunduk vd., 2014; Salsani vd., 2014; Ebrahimabadi vd., 2015; Seker ve Ocak, 2017, Faradonbeh vd., 2017).

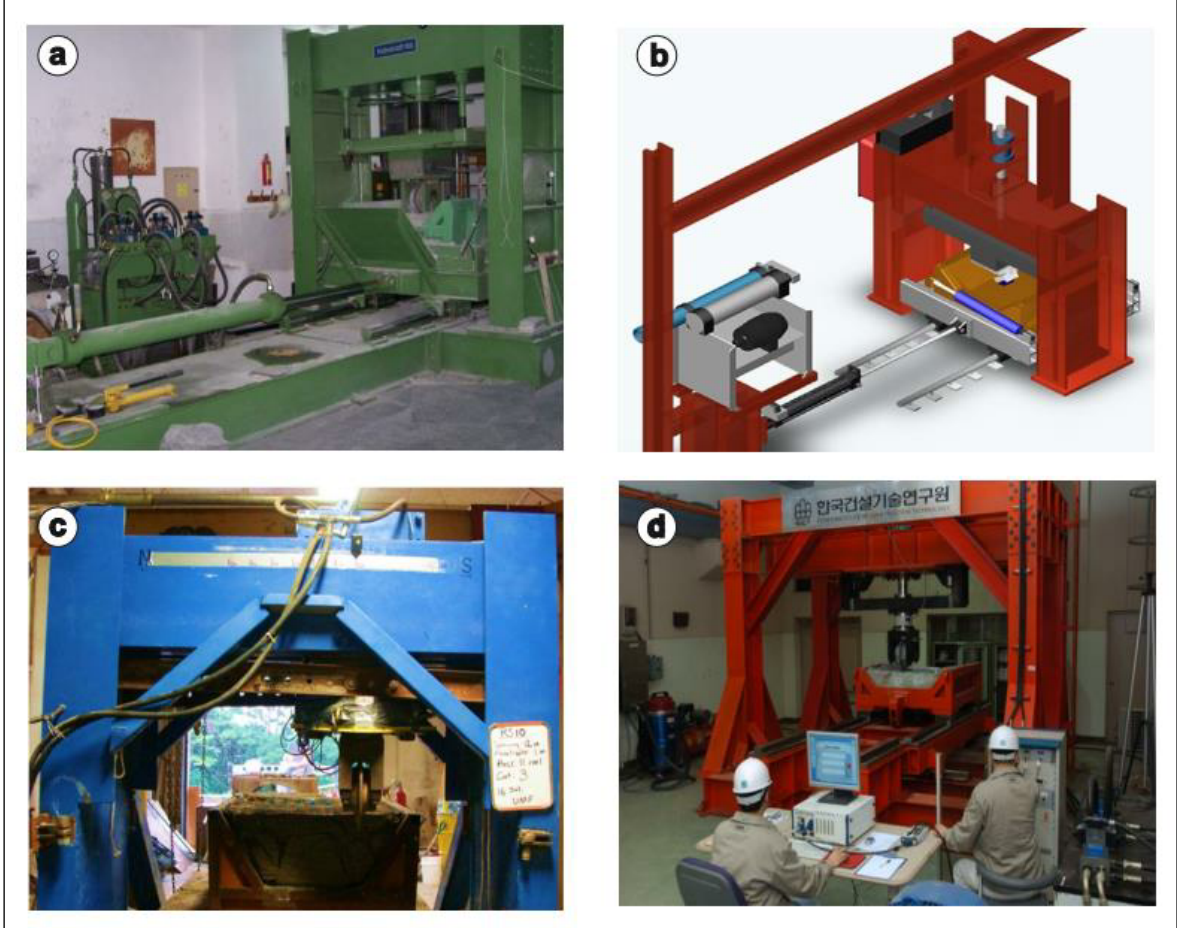
Tablo 1.8. RMCR'yi oluşturan değerlerin puanlaması (Restner ve Gehring, 2002).

Tek eksenli basınç dayanımı için puanlama ( $R_{cc}$ )				Blok boyutu için puanlama ( $R_{BB}$ )	
$\sigma_c$ (MPa)		Puan		Blok hacmi ( $m^3$ )	Puan
1-5		15		>0,6	20
5-25		12		0,3-0,6	16
25-50		7		0,1-0,3	10
50-100		4		0,06-0,1	8
100-200		2		0,03-0,06	5
> 200		1		0,01-0,03	3
Süreksizlik durumu için puanlama ( $R_{SD}$ )				< 0,01	1
Yüzey	Açıklık	Dolgu	Puan	Süreksizliklerin yönelimi için puanlama ( $R_Y$ )	
Pürüzlü	Kapalı	Sert, kuru	30	Yönelim	Puan
Hafif pürüzlü	< 1 mm	Sert, kuru	20	Çok elverişli	-12
Hafif pürüzlü	< 1 mm	Yumuşak, kuru	10	Elverişli	-10
Pürüzsüz	1-5 mm	Yumuşak, nemli	5	Orta	-5
Çok pürüzsüz	>5mm	Yumuşak, ıslak	0	Elverişsiz	-3
				Çok elverişsiz	0

### 1.6.2. Kaya Kesme Deneyleri ile Kazı Performansı Tahmini

İlk kontrollü kaya kesme deneyleri 1950'lerin başında Birleşik Krallık 'ta gerçekleştirilmiştir (Evenden ve Edwards, 1985). Bu tarihten sonra birtakım farklı kaya kesme deneyleri geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Kaya kesme deneyleri, temel keski-kaya etkileşimi, kazıcı makine kafa tasarımı, performans tahmini vb. konuların araştırılmasında başvurulan vazgeçilmez bir metottur. Kaya kesme deneyleri iki ana başlıkta incelenebilir, Tam boyutlu kesme deneyleri ve küçük boyutlu kesme deneyleri. Tam boyutlu kesme deneylerinde, kazı makinelerinin kesici kafalarında kullanılan keski ve büyük kaya blokları kullanılmaktadır ve bu sayede olası boyut etkileri minimize edilerek gerçek kesme koşulları laboratuvarında simule edilebilmektedir. Bu deney setlerinde yaklaşık  $1 m^3$ 'e kadar

hacimdeki kaya örnekleri kesme deneyine tabi tutulabilmektedir. Tam boyutlu kesme deneyleri sınırlı sayıda araştırma merkezinde bulunmaktadır ve örnekleri Şekil 1.19'da verilmiştir.



Şekil 1.19. Günümüzde faal olan tam boyutlu kaya kesme deney setleri (a) İstanbul Teknik Üniversitesi (Tümaç vd., 2012) (b) Colorado School of Mines (URL-2, 2017) (c) Missouri University of Science and Technology (Abu Bakar vd., 2014) (d) Korean Institute of Construction Technology (Cho vd., 2013).

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi kaya kesme sırasında keskiye üç boyutta kuvvet etkimektedir. Keski tipinden bağımsız olarak, hareket yönünde olan kuvvet bileşeni olan kesme kuvveti (FC) yardımı ile kaya kesmenin verimliliğinin en önemli göstergesi olan spesifik enerji bulunabilmektedir.

$$SE = \frac{FC}{Q} \quad (1.26)$$



Burada;

SE = Spesifik enerji, MJ/m<sup>3</sup>,

FC = Ortalama kesme kuvveti, kN,

Q = Birim kazı mesafesinde meydana çıkan pasa miktarı, m<sup>3</sup>/km'dir.

Kesme deneylerinde kaya kesme işlemi iki modda gerçekleştirilmektedir. Bunlar, etkileşimli ve etkileşimsiz kesme modudur. Etkileşimsiz kesme modu, keskinin tek başına diğer kesme oyuklarından etkilenmeyecek şekilde gerçekleştirilmesidir. Etkileşimli kesme modu ise keskinin diğer kesme hatlarıyla etkileşim halinde olarak daha verimli bir kesme yapmasıdır. Kazı makinelerinin üzerindeki keskinler etkileşimli kesme modunda kesme yapmaktadırlar. Keskinler kesici kafalara belirli bir dizilimde yerleştirilmektedir. Bu sayede keskinler birbiri ile etkileşim halinde kesme yaparak kazı işlemini gerçekleştirilmektedir. Şekil 1.20'de keskinlerin birbiri ile olan mesafesinin öneminin kesme verimliliğine etkisi gösterilmiştir. Etkileşimli kesme modunda üç durum bulunmaktadır. (a) durumunda keskinler arası mesafe çok yakın olduğu için fazla öğütme gerçekleşmektedir ve gereksiz enerji sarfiyatı meydana gelmektedir ve verimsiz bir kazı gerçekleşmektedir. Diğer taraftan, (c) durumunda ise keskinler arası mesafe o kadar fazladır ki birbirini izleyen kesme hatları arasında oluşan yanal çekme çatlakları birbirine ulaşmaz ve aradaki parça kopmaz. Sonuç olarak her keskin kendi bulunduğu oyuğu derinleştirir ve verimsiz bir kesme işlemi meydana gelir. Keskinler arası mesafenin bu kadar açılması ile etkileşimsiz kesme moduna geçiş olur. Son olarak (b) durumu makine için optimum kesme durumudur. Keskinler birbirine göre o kadar iyi konumlandırılır ki spesifik enerji en düşük seviyede seyrederek, (b) durumunda oluşan spesifik enerjiye optimum spesifik enerji (SE<sub>opt</sub>) denir.

Tam boyutlu kesme deneylerinden elde edilen optimum spesifik enerji değeri herhangi bir kazı makinesinin performans tahmininde kullanılmaktadır (Rostami vd. 1994). Teorik olarak sahada kazı sırasında oluşan spesifik enerji ile kazı hızı arasında şöyle bir bağıntı bulunmaktadır (McFeat-Smith ve Fowell 1977; Mellor, 1977; Breeds ve Conway, 1992):

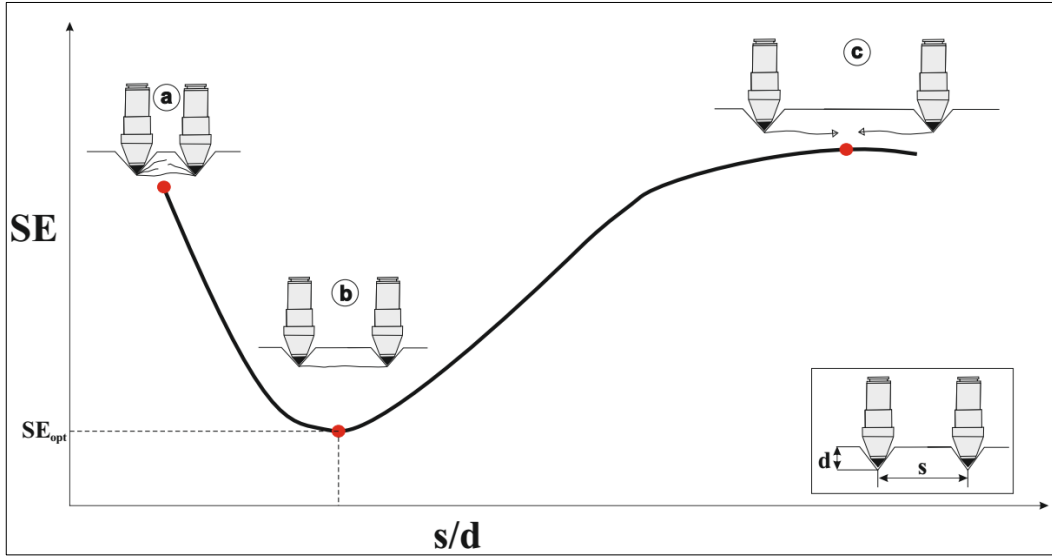
$$NKH = \frac{P}{SE_s} \quad (1.27)$$

Burada;

SE<sub>s</sub> = Saha spesifik enerji, kW/m<sup>3</sup>,

P = Makine kesme gücü, kW,

NKH = Net kazı hızı, m<sup>3</sup>/s'tir.



Şekil 1.20. Keskiler arası mesafenin kesme derinliğine oranı ile spesifik enerjinin değişimi

Etkileşimli kesme modu ile sahadaki spesifik enerji hesaplanabilmektedir. Ancak makine tüm kesme gücünü kazı aynasına aktaramamaktadır. Bundan dolayı, Rostami vd. (1994) enerji transfer oranı diye bir sabit tanımlamıştır ve farklı kazı makineleri için bu sabiti Tablo 1.9’da olduğu gibi vermiştir ve Eşitlik 1.27’yi güncellemiştir.

$$NKH = k_o \frac{P}{SE_{opt}} \quad (1.28)$$

Burada;

$SE_{opt}$  = Tam boyutlu kaya kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji,  $kWs/m^3$ ,

$P$  = Makinenin kesici kafa gücü,  $kW$ ,

$NKH$  = Net kazı hızı,  $m^3/s$ ,

$k_o$  = Enerji transfer oranıdır.

Tablo 1.9. Bazı kazı makineleri için enerji transfer oranı değerleri (Rostami vd. 1994).

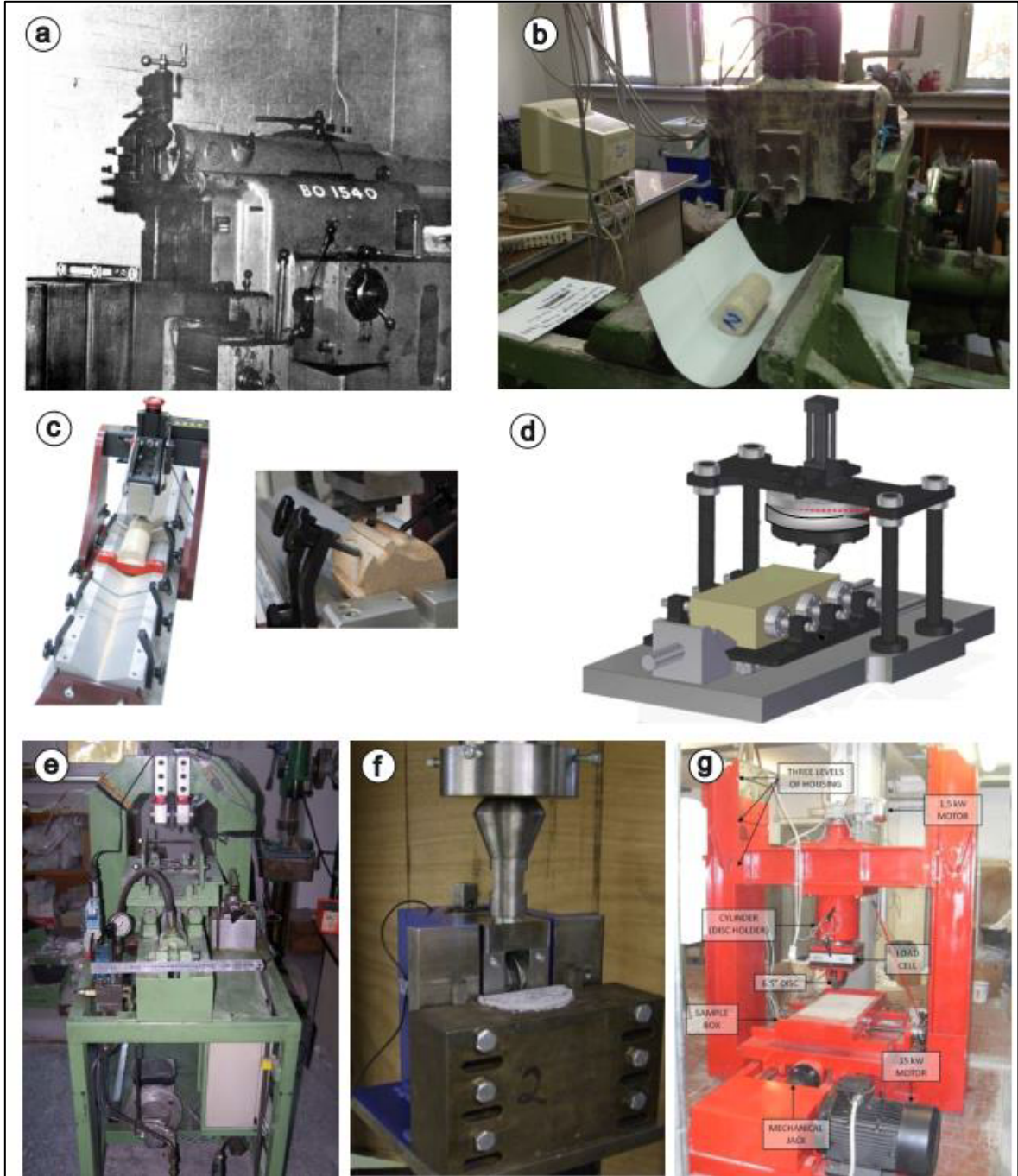
Makine tipi	Enerji transfer oranı ( $k_o$ )
Tam cepheli tünel açma makinesi	0,85-0,90
Kollu galeri açma makinesi	0,45-0,55
Başyukarı açma makinesi	0,60-0,70
Kuyu açma makinesi	0,55-0,70
Sürekli kazıcı	0,70-0,80

Tablo 1.9'dan görülebileceği gibi KGAM için enerji transfer oranı 0,45-0,55 arasında değişmektedir. Ancak, bu aralık tüm KGAM için geçerli olup makine tipine göre bir ayırım göstermemektedir. Ancak, bilindiği üzere aksiyel ve tambur tipi makinelerin birbirine göre verimliliği farklılık göstermektedir. Bu yaklaşımla da enerji transfer oranının aksiyel tipi makine için 0,45, tambur tipi makine için ise 0,55 olarak kabul edilebileceği belirtilmektedir. Ancak, bu kabuller herhangi bir bulguya dayanmamakla beraber yalnızca tecrübeye dayanmaktadır. Bu konuda ilgili tek çalışma göze çarpmaktadır. Bu çalışmada, aksiyel tip KGAM için enerji transfer oranının 0,4 olarak alınması gerektiği belirtilmiştir (Bilgin vd., 2005). Rostami vd. (1994) tarafından önerilen performans tahmini yöntemi yalnızca kazı hızı ile ilgili bilgi vermektedir. Daha detaylı performans analizleri için makinenin tork, itme gücü, kesme gücü vb. parametrelerinin kayacı kazılmasında yeterli olup olmayacağının da araştırılması gerekmektedir. Bu konu ile ilgili Colorado School of Mines (CSM) tarafından geliştirilen çok detaylı bir performans analiz yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemin ayrıntıları Neil vd. (1994) tarafından detaylı bir biçimde aktarılmıştır.

Her ne kadar tam boyutlu kaya kesme deneyleri kazılabilirlik tayininde kullanılan en önemli ve kesin yöntem olsa da (Bilgin vd., 2014), bu tip deney düzenekleri yalnızca sınırlı sayıda araştırma merkezinde bulunmaktadır. Bu araştırma merkezleri Şekil 1.19'da gösterilmiştir. Bunların dışında bazı makine üretici firmaların laboratuvarlarında bu tip ekipmanlara rastlanmaktadır (Kim, 2010). Buna ilave olarak, bu deneylerde çok büyük kaya bloklarına ihtiyaç duyulmaktadır ki çoğu saha koşulunda özellikle de proje başlamadan önce bu büyüklükte kaya bloklarının temin edilmesi imkansızdır. Ayrıca, bu tip deneyler çok karmaşık olduğu için çok fazla tecrübeye sahip, bu konuda yetişmiş personele ihtiyaç duyulmaktadır ve deneyin gerçekleştirilmesi çok uzun zaman almaktadır. Son olarak bu tip ekipmanların üretilmesi ve deneylerin gerçekleştirilmesi çok pahalıdır.

Yukarıda ifade edilen sakıncalardan dolayı araştırmacılar tam boyutlu kesme deneylerine alternatif olabilecek birtakım farklı deney düzeneklerine yönelmişlerdir. Bu tip deneylerde tam boyutlu kesimler yerine küçük boyutlu indeks kesimler ve büyük kaya blokları yerine küçük bloklar ya da değişen boyutlarda karot numuneleri kullanılabilir. Taşınabilir ya da sabit olarak üretilen bu kesme deney düzenekleri Şekil 1.21'de gösterilmiştir.

İlk üretilen küçük boyutlu kesme deney düzeneği, Roxborough ve Philips (1974) tarafından üretilen küçük boyutlu kesme setidir (karot kesme seti). Bu deney düzeneği çeşitli araştırma merkezleri tarafından tekrar üretilerek kullanılmıştır, Şekil 1.21(b)'de gösterilen



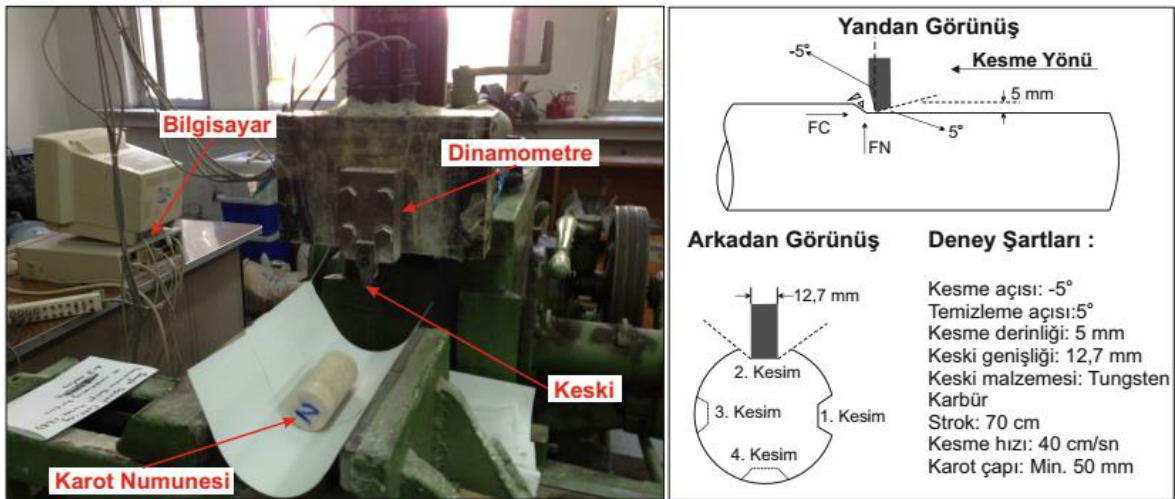
Şekil 1.21. Farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen kaya kesme deney dzenekleri (a) Roxborough ve Philips (1974) tarafından geliştirilen küçük boyutlu kesme seti (Bilgin, 1977) (b) Bilgin ve Shahriar (1988) tarafından geliştirilen küçük boyutlu kesme seti (Yaşar vd., 2015) (c) Detorunay vd. (1997) tarafından geliştirilen deney seti (URL-3, 2017) (d) Kang vd. (2016) tarafından geliştirilen küçük lineer kesme seti (e) Feridunoğlu (2009) tarafından geliştirilen taşınabilir kesme seti (Tma vd., 2012) (f) Entacher vd. 2014 tarafından geliştirilen ölçekli kaya kesme seti (g) Torino Politeknik'te geliştirilen orta ölçekli lineer kesme seti (Cardu vd., 2017).

küçük boyutlu kesme deneyi buna örnektir. Detournay vd. (1997) “Rock Strength Device” olarak adlandırdıkları kaya kesme setini geliştirerek bu deney düzeneğinin patentini almışlardır. Bu kesme seti ile Şekil 1.21(c)’de görüldüğü gibi karot numuneleri negatif kesme açısına sahip bir basit kama tipi keski ile kesilmektedir. Bu deneyden elde edilen veriler günümüze kadar kaya kesme modunun geçişi (sünek ve kırılğan) üzerine yoğunlaşmıştır (Huang vd., 2013; Nicodeme, 1997; Richard, 1999; Richard vd., 1998; Zhou ve Lin, 2013; He, vd., 2017). Ayrıca, karot numunelerinin tek eksenli basınç dayanımları bu deneyden elde edilen spesifik enerji değerleri ile tahmin edilmeye çalışılmıştır (Richard vd., 2012). Bu amaç için toplam 130 farklı kayaç kesme deneyine tabi tutulmuştur. Feridunoğlu (2009) taşınabilir kesme seti olarak tanımladığı (Şekil 1.21 (e)) kaya kesme düzeneğini geliştirmiştir. Bu aparatta öncelikle küçük çaplardaki disk keski kullanılarak kaya kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir ve buradan elde edilen değerler ile aynı laboratuvarda bulunan tam boyutlu kesme deneyinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra, bu deney setinin tasarımı güncellenerek kullanıma devam edilmiştir ve bir TAM performans tahmin modeli geliştirilmiştir (Çomaklı, 2015).

Kang vd. (2016) küçük boyutlu bir lineer kesme deney düzeneği geliştirmiştir. Bu deney düzeneğinde konik uçlu bir keski ve bu keskiye etkiyen kuvvetleri ölçen bir tek boyutlu dinamometre bulunmaktadır. Bu tek boyutlu dinamometre yardımı ile keskiye gelen üç boyuttaki kuvvetler bulunmaya çalışılmaktadır. Entacher vd. (2014) ölçekli kaya kesme seti diye adlandırdıkları taşınabilir kesme aparatını geliştirmişlerdir. Bu aparat hidrolik pres makinelerinin içine bir eklenti olarak geliştirilmiştir. Bu aparatta, yarım karot numuneleri 56 mm çapında bir mini disk keski ile kesilmektedirler. Kesme işlemi sırasında disk keskiye gelen kesme kuvveti hidrolik pres makinesinin yük hücresi tarafından okunmaktadır. Elde edilen kesme kuvveti tasarım değişkeni olarak değil, yalnızca tam cepheli tünel açma makinelerinin performans tahmini için yazarlar tarafından geliştirilen modelde girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Son olarak da tam boyutlu kesme deneylerinin güvenilirliğinin ve küçük boyutlu deneylerin kolaylığının (tam boyutlu keski ve küçük kaya blokları) bir arada toplanabilmesi için Torino Politeknik’te orta ölçekli kaya kesme seti diye adlandırılan bir deney düzeneği geliştirilmiştir, bu deney düzeneği Şekil 1.21 (g)’de görülmektedir (Cardu vd., 2017).

Bunlara ek olarak kimi araştırmacılar laboratuvar ortamında küçük ölçekli kazı makinelerini kullanmışlardır (Roxborough ve Eskikaya 1974; Deliac 1985; Deliac ve Gripp 1983; Dubugnon ve Barendsen 1985; Roepke vd. 1976; Howarth vd. 1986).

Şekil 1.21’de görülen deney düzeneklerinden en çok tekrar üretileni ve kullanılanı Roxborough ve Philips (1974) tarafından geliştirilen küçük boyutlu kesme deneyidir. Bu düzenek ülkemizde de İstanbul Teknik Üniversitesi (Şekil 1.21 (b)), Orta Doğu Teknik Üniversitesi ve Selçuk Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümlerinde bulunmaktadır. Bu deney düzeneği, torna makinesinin modifiye edilerek bir kesme setine dönüştürülmesi ile oluşturulmaktadır. Bu deneyde küçük blok numuneler ve karot numuneleri kullanılabilir ve tam boyutlu kesimler yerine küçük indeks kesimler kullanılmaktadır. İstanbul Teknik Üniversitesinde bulunan küçük boyutlu kesme deney seti ve deney şartları Şekil 1.22’de görülmektedir.



Şekil 1.22. Küçük boyutlu kesme deneyi ve deney şartları (Yaşar vd., 2015; Fowell, 1993).

Küçük boyutlu kesme deneyinden aynı zamanda karot kesme deneyi olarak da bahsedilmektedir. McFeat-Smith ve Fowell (1979) bu deney setini kullanarak standart bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde 76 mm çapındaki karot numunelerinin Şekil 1.22’de görülen şartlar altında kesme işlemine tabi tutulmaktadır. Deney 3-4 kez tekrarlanmaktadır ve elde edilen ortalama kesme kuvveti yardımı ile spesifik enerji değeri hesaplanmaktadır. Bu değer kullanılarak masif kaya formasyonları KGAM ile kazı yönünden sınıflandırılmaktadır ve kazı hızları hesaplanmaktadır. Tablo 1.10’da karot kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji değerleri yardımı ile kayaçların KGAM ile kazı yönünden sınıflandırılması verilmiştir.

Bu tablo ile sınıflandırmaya ilave olarak McFeat-Smith ve Fowell (1979) kazı hızlarının tahmin edilebilmesi için bir abak geliştirmişlerdir. Bu abak masif kayaç

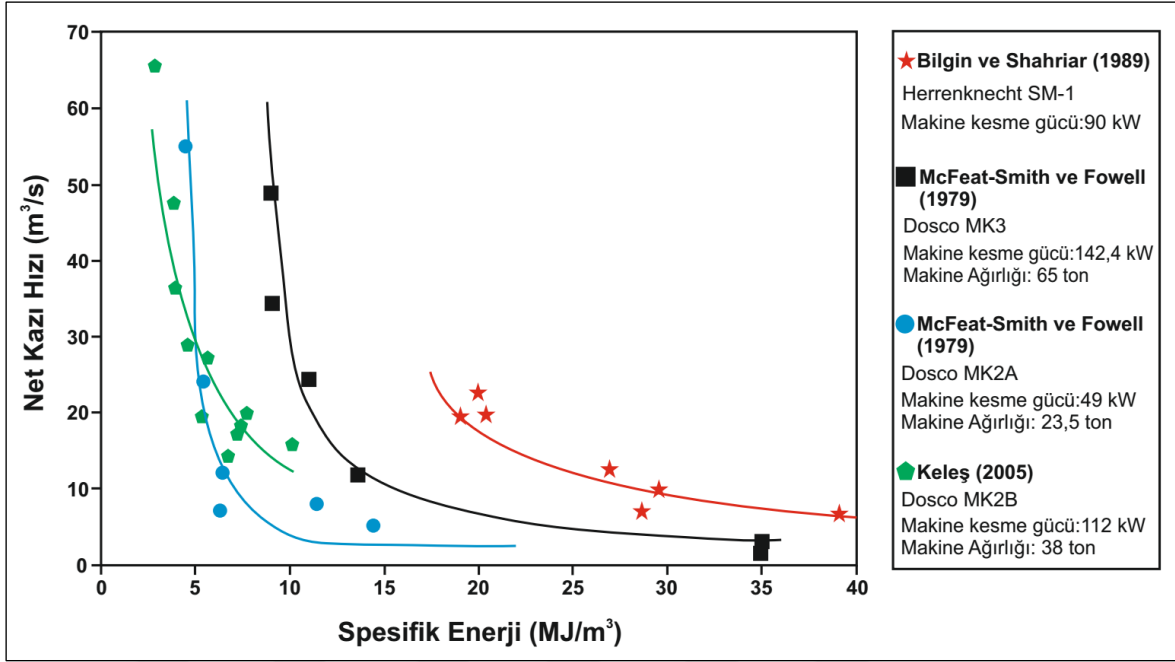
formasyonlarında kesme yapan 2 farklı KGAM için geliştirilmiştir ve benzer özellikteki makineler için faydalı olmuştur. Buna ilave olarak farklı araştırmacılar da farklı tipteki makineler ile buna benzer ilişkiler elde etmişlerdir. Karot kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji değeri ile sahada elde edilen KGAM kesme hızları arasındaki ilişkileri gösteren abak Şekil 1.23'te verilmiştir.

Tablo 1.10. Masif ya da süreksizlik aralığı geniş olan formasyonlarda çalışan orta ve ağır kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) performansının karot kesme deneyi spesifik enerjisine göre sınıflandırılması (McFeat-Smith ve Fowell, 1979).

Spesifik enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Orta ağırlıktaki* KGAM'lerin performansı	Spesifik enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Ağır* KGAM'lerin performansı
20	Makineler bu kayaçları ancak ince bantlar halinde olması halinde kesebilir (0,3m'den az). Önemli oranda titreşimden kaynaklı olarak kısa sürede parça değişimi gerekebilir. Sert kayaç kazısı için makinede modifikasyona ihtiyaç duyulabilir.	32	Makineler bu tip kayaçları ancak ince bantlar haline olmaları şartı ile kazabilir ve keski sarfiyatının yüksek olması beklenmektedir. Makine mutlaka sert kayaç kazısına uygun olarak imal edilmiş olmalıdır.
15	Düşük kesme performansı gözlenir. Kazının delme patlatma ile desteklenmesi gerekebilir. Düzenli olarak aşınmış keskinin değişimi makine performansını artırır ve parça aşınımını azaltır. Düşük kesme hızı ile birlikte konik keskiner daha avantajlı olur.	25	Özellikle masif kazı aynalarında düşük kesme performansı beklenmektedir. Keski sarfiyatı kritiktir ve keskiner durumunun izlenmesi performansı iyileştirmektedir. Makinenin sert kayaç kazısına göre modifiye edilmesi arıza riskini azaltır. Konik keskiner kullanılması kaçınılmazdır.
12	Orta-düşük kesme performansı izlenir. Kırılmış keski uçları az da olsa beklenebilir. Aşındırıcı kayaçlarda keskiner izlenmelidir.	17	Orta kesme performansı bu kategorinin altlarına doğru iyiye dönmektedir. Aşındırıcı kayaçlar kazılırken keskiner durumu düzenli olarak izlenmeli ve değiştirilmelidir. Tutarlı kesme hızları beklenmektedir.
8	Orta-iyi kesme performansı ve makine parçalarının çok az aşınması beklenir. Aşındırıcı kayaçlar kazılırken keskiner durumu takip edilerek aşınanlar değiştirilmelidir. Eğer ayna geometrisi uygunsa radyal keskiner bu tip kayalara daha uygundur.	8	Makineler bu kayaçlara çok uygundur ve çok yüksek kazı hızlarına ulaşılabilir. Bu kategorideki çamurtaşları kesilmek yerine ripelenmektedir ve iyi bir taşıma sistemi ile ilerleme hızları yükselmektedir. Keskiner düzenli olarak izlenmesi faydalı olmaya devam etmektedir.
5	Makineler bu formasyonlara çok uygundur. Çok iyi kesme hızları beklenebilir. Bu aralığa düşen çamurtaşları kesilmek yerine ripelenerek yüksek ilerleme hızlarına ulaşılır. Aşınmış keskiner düzenli olarak izlenmesi faydalı olmaktadır.		

\* Kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) ağırlıklarına göre sınıflandırılması konusunda günümüz ile bu tablonun geliştirildiği dönem arasında farklılıklar bulunmaktadır. O dönem orta ağırlıkta sayılan makineler günümüzde hafif ağırlıktaki makine sınıfına girmektedir. Ayrıca, o dönemde ağır makine sınıfında olan birtakım makineler artık orta ağırlıkta sayılmaktadır. Bundan dolayı, bu sınıflamada makinelerin ağırlık aralıklarının verilmesinden kaçınılmıştır. Bu değerler günümüz makineleri için orta ağırlıktakiler hafif makineler olarak, ağır makineler orta ağırlıktaki makineler olarak değerlendirilebilir.





Şekil 1.23. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen KGAM net kazı hızının karot kesme deneyi spesifik enerjisi ile değişimi

Buna ek olarak, McFeat-Smith ve Fowell (1977) karot kesme deneyi spesifik enerjisinin dolaylı yoldan bulunabilmesi için çok değişkenli lineer regresyon yöntemini kullanarak ampirik bir eşitlik önermiştir. Bu çalışmada 87 farklı kaya üzerinde karot kesme deneyi ve bir takım başka kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çok değişkenli lineer regresyon ile şu eşitlik önerilmiştir:

$$SE = -0,65 + 0,41 CI^2 + 1,81 kp \pm 2,6 \quad (1.29)$$

Burada;

SE = Karot kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji, MJ/m<sup>3</sup>,

CI = Koni delici değeri,

kp = Plastisite indeksidir.

Kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) performans değerlendirmesi dışında karot kesme deneyi (küçük boyutlu kesme deneyi) farklı amaçlar içinde kullanılmıştır. Çeşitli araştırmacılar karot kesme deneyinden elde ettiği spesifik enerji değerini kullanarak döner kepçeli ekskavatörlerin performanslarının tahmin edilmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır (Bölükbaşı vd., 1991; Ceylanoğlu vd., 1994; Koncağül, 1997). Başarır ve Karpuz (2004) ve Başarır vd. (2008) karot kesme spesifik enerjisini kullanarak kömür yan kayaları için bir riperelebilirlik sınıflama sistemi geliştirmişlerdir. Ayrıca Çopur (2010)



ve Çopur vd. (2011) zincirli mermer kesme makinelerinin kesme işlemini karot kesme deneyi ile simüle etmiştir ve bu makinelerin performanslarını karot kesme deneyi ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Buna ek olarak, negatif açılı kama keskilerle yapılan kesme deneyleri, kayaçların dayanım ve elastik özelliklerinin belirlenmesinde (Mitaim vd., 2004; Richard vd., 2012; Fairhurst, 2014) ve döner delici makinelerin delme mekanizmasının incelenmesinde (Adachi vd., 1996; Dagrain vd., 2001; Dagrain vd., 2002; Gerbaud vd., 2006; Detournay vd., 2008; Zhou ve Detournay, 2014) kullanılabilirlerdir.

Diğer yandan küçük boyutlu kesme deneyi Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) tarafından kayaçların kazılabilirliğinin tayininde kullanılacak deneylerden biri olarak kabul edilmiştir (Bamford, 1987). ISRM, 1987 yılında kayaçların delinebilirliği ve kazılabilirliği üzerinde bir çalıştay düzenlemiştir. Bu çalıştayda ise birtakım deneyler ele alınmıştır. Ancak kesme deneyi olarak yalnızca karot kesme deneyinden bu toplantıda bahsedilmiştir. Şu ana kadar ISRM tarafından tanınan ve uygulama standardı bulunan başka bir kaya kesme deneyi bulunmamaktadır. Ayrıca bu toplantıda bir kaya kesme deneyinin sahip olması gereken özellikler şu şekilde sıralanmıştır:

- Sahada kazı yapan makinenin kestiği kayaç spektrumu deneyde kesilebilmelidir. Yani, KGAM 120 MPa'a kadar kayaçları kazdığı varsayılırsa bu amaç için imal edilen bir deneyde 120 MPa'kadar dayanıma sahip olan kayaçlar deneye tabi tutulabilmelidir,
- Deney güvenilir olmalıdır,
- Deneyin yapılışı kolay, hızlı ve ucuz olmalıdır,
- Deney yöntemi farklı araştırmacılar tarafından tekrar üretilebilir olmalıdır.
- Deneyde küçük boyutlarda numuneler kullanılmalıdır.

Tam boyutlu kesme deneyleri gibi, küçük boyutlu kesme deneyinin de birtakım eksiklikleri bulunmaktadır. Öncelikle deneyde tam boyutlu keski yerine küçük boyutlu indeks bir keski kullanılmaktadır. Her ne kadar Bamford (1986) bu keskilerin tam boyutlu keskilerin hareketini bir anlamda taklit ettiğini belirtse de bu durumda elde edilen kesme kuvveti ve spesifik enerji değerlerinin bir tasarım parametresinden çok bir indeks değeri olmasına sebep olmaktadır. Örneğin McFeat-Smith ve Fowell (1979) tarafından önerilen Tablo 1.10 ve Şekil 1.23'te görülen eğriler yalnızca bahsi geçen makineler için geçerlidir ve diğer makineler için Şekil 1.23'te olduğu gibi farklı referans eğriler önerilmesi gerekmektedir ki bu sayede elde edilen spesifik enerji değeri pratik bir kullanıma sahip olabilsin. 1970'lerde çok farklı özellikte KGAM üretilmediği için bu yöntem çok kullanılan

ve çok verimli bir yöntem olarak değerlendirilmekteydi. Ancak günümüzde KGAM çok farklı ağırlıklarda ve kesme gücünde üretildiği için bahsedilen makineler hariç bu yöntem pratik kullanımını yitirmiştir. Bunun üstesinden gelmek için Balcı ve Bilgin (2007) tam boyutlu kesme setinde tam boyutlu konik uçlarla yaptığı deneylerden elde ettiği optimum spesifik enerji değerini küçük boyutlu kesme deneyinde standart kesme koşullarında (Şekil 1.22) elde ettiği spesifik enerji değerleri ile tahmin etmeye çalışmıştır. Bu çalışmada 18 farklı kayaç ve cevher kullanılmıştır ve şu eşitlik önerilmiştir:

$$SE_{opt} = 0,60 SE + 0,68 \quad (R^2=0,83) \quad (1.30)$$

Burada;

$SE_{opt}$  = Tam boyutlu kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji, MJ/m<sup>3</sup>,

SE = Küçük boyutlu kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji, MJ/m<sup>3</sup>'dir.

Bu eşitlik sayesinde karot kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji daha pratik bir kullanıma sahip olarak, KGAM'nin performans tahmininde kullanılabilir bir hal almaktadır. Küçük boyutlu kesme deneyi ile ilgili diğer bir tartışmaya açık konu kullanılan numune boyutudur. Tam boyutlu kesme deneyinde büyük kaya bloklarının kullanılmasından dolayı, sahadaki süreksizliklerin laboratuvar ortamında daha iyi temsil edildiği belirtilmektedir (Bilgin vd., 2014). Ancak, bu konuda henüz yapılmış belirleyici bir çalışma bulunmamaktadır ve numune boyutunun saha durumunu temsil edebilmesi durumu detaylı olarak incelenmelidir. Ayrıca tam boyutlu kesme deneyinde kullanılacak kadar büyük numuneler bulunmadığı durumlarda küçük boyutlu kesme deneyleri daha avantajlı duruma gelmektedir.

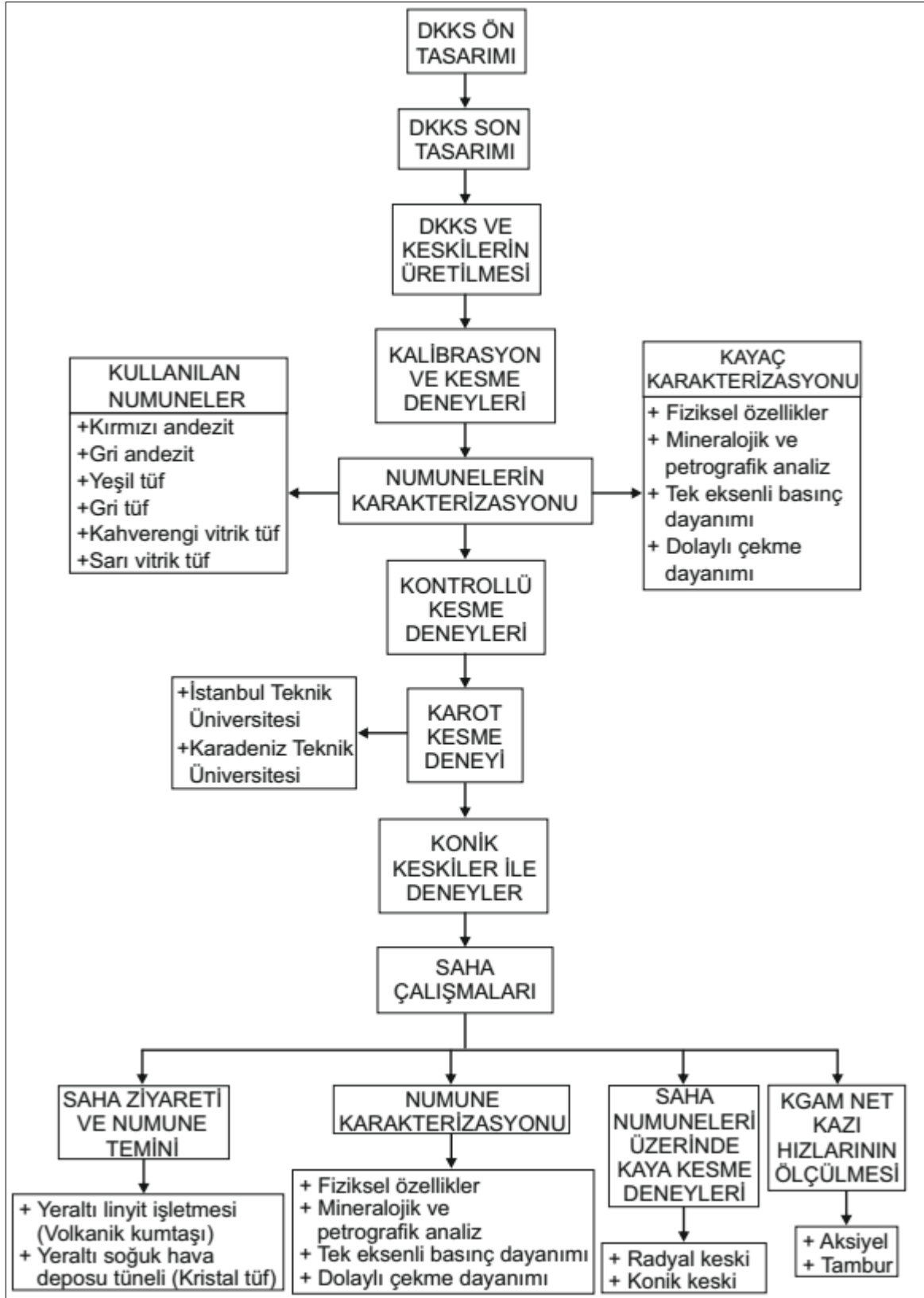
Her ne kadar küçük boyutlu kesme deneyinin avantajlı olduğu konulardan bahsedilse de bu deney düzenekleri de tam boyutlu kesme setleri gibi sınırlı sayıda araştırma merkezinde bulunmaktadır. Ayrıca, sabit bir yapıya sahiptirler ve torna makinelerinin modifikasyonu ile geliştirilmelerinden dolayı tekrar üretilmeleri zordur. Bundan dolayı farklı araştırmacılar kendi tasarladıkları deney düzeneklerini geliştirmektedirler (Şekil 1.21). Ancak bu durum da kesme deneylerindeki standart eksikliğini işaret etmektedir. Öyle ki hiçbir bir kaya kesme deneyinin standardı bulunmamaktadır. Yalnızca, karot kesme deneyinin uygulama yöntemi olarak McFeat-Smith ve Fowell (1979) tarafından yayınlanan bir konferans tebliği kullanılmaktadır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kaya kesme deneyleri, kayaç-keski etkileşimini laboratuvar ortamında en iyi temsil eden yöntemlerdir. Ayrıca, kayaç kesilebilirliğinin en doğru tayin yönteminin kaya kesme deneyleri olduğu belirtilmektedir (Bilgin vd., 2014). Kesici kafa dizaynında da aynı şekilde kaya kesme deneylerine başvurulmaktadır. Tüm bu çalışmaların yapılabileceği tam boyutlu ve küçük boyutlu kesme deneyleri bulunmaktadır. Bu deneylerin sahip oldukları birçok üstünlüklere rağmen, az sayıda araştırma merkezinde bulunmaları ve gerçekleştirilmesi zor olan deneyler olması nedeniyle birtakım araştırmacılar ampirik yöntemlere ve farklı kaya kesme düzeneklerinin tasarlanmasına yönelmektedirler.

Kullanımda olan kaya kesme deneylerindeki eksikliklerin giderilebilmesi motivasyonu ile taşınabilir bir düzenek olarak, düşey kayaç kesme seti (DKKS) tasarlanmıştır. Ön tasarımın ardından, DKKS'nin üretimine geçilebilmesi için tasarıma son hali verilmiştir ve ardından yerel bir üretici ile üretim safhasına geçilmiştir. Üretim aşaması titizlikle takip edilerek DKKS'nin sorunsuz olarak imal edilebilmesine çalışılmıştır. DKKS'nin üretici firma tarafından tesliminin hemen ardından, kaya kesme deneylerinde kullanılacak olan keski de imal ettirilmiştir. Ardından, eğilme presinin yük hücresinden okunan kuvvet değerlerinin doğrulanabilmesi için harici bir yük hücresi kullanılmıştır. Okunan kuvvet değerlerinin doğruluğunun tespitinin ardından, kesme deneyinin bir sistematiğe oturtulabilmesi için rastgele kayaç numuneleri üzerinde kontrolsüz kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Kontrollü kaya kesme deneyleri basit şekilli bir kama tipi keski kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerle, ölçme sisteminin kesme derinliği ya da kayaç dayanımı gibi parametrelere olan hassaslığının ölçülmesi planlanmıştır. Bu amaç için 6 farklı magmatik kayaç üreticilerden temin edilmiştir. Bu kayaçların karakterizasyonu için mekanik ve mineralojik özellikleri belirlenmiştir. Basit kama tipi keski ile kesme deneylerinin başarıya ulaşmasının ardından, karot kesme deneyinin DKKS ile gerçekleştirilebilmesinin test edilebilmesi için daha önceki bir çalışmada (Yaşar, 2013) kullanılan numuneler McFeat-Smith ve Fowell (1979) tarafından önerilen deney şartları altında kesme deneyine tabi tutulmuşlardır. Tez çalışması süresince yürütülen çalışmaların genel akım şeması Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Deneysel çalışmaların genel akım şeması (DKKS: Düşey kayaç kesme seti, KGAM: Kollu galeri açma makinesi).

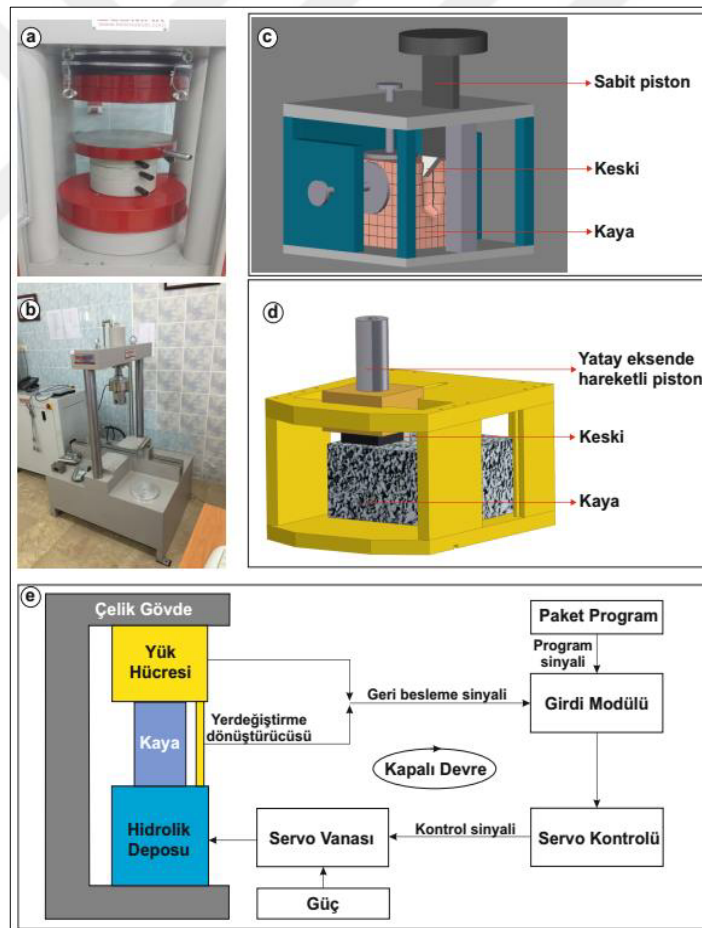
Kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) performans tahmininde kullanılabilmesi için, DKKS ile tam boyutlu kesme deneyinin gerçekleştirilebilmesi için konik kesimler kullanılarak kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışmalarının ardından saha çalışmalarına geçilmiştir ve 2 adet KGAM ile kazı yapılan saha ziyaret edilmiştir. Bu sahalarda KGAM'nin kazı yaptığı aynalardan blok numuneler elde edilmiştir ve bu numunelerin karakterizasyonu yapılmıştır. Ayrıca KGAM'nin, numune alınan aynadaki net kazı hızları ölçülmüştür. Bu sahalardan temin edilen kayaç numuneleri üzerinde radyal ve konik kesimler kullanılarak kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

### **2.1. Düşey Kayaç Kesme Setinin (DKKS) Tasarımı ve Üretimi**

Düşey kayaç kesme seti (DKKS), hemen hemen tüm kaya mekaniği laboratuvarlarında bulunan hidrolik basınç ya da eğilme test makinelerinde, kaya kesme deneylerinin yapılabileceği felsefesi üzerine tasarlanmıştır. Bu düşünce ışığında öncelikle her tip hidrolik test makinesine monte edilebilecek bir aparat şeklinde üretilmesi planlanmıştır ve bu taslak tasarım Şekil 2.2'de verilmiştir. Ancak, bu tip bir aparat ile hidrolik basınç test makinelerinin içinde yalnızca etkileşimsiz kesme deneyleri yapılabileceği için, tasarım geliştirilerek hidrolik eğilme test makinelerinde kullanılacak ve çok daha farklı koşullarda kesme yapılabilecek bir tasarım yapılmıştır. Hidrolik basınç ve eğilme test makineleri ve tasarlanan DKKS'nin ilk ve son tasarımları Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Ayrıca kapalı devre servo sistemin bileşenleri de Şekil 2.2(e)'de verilmiştir. Günümüzde kullanılan hidrolik test makineleri servo-kontrollü, kapalı devre ve geri beslemeli sistemlerdir. Geri besleme sistemi kullanılarak deneysel değişkenler, otomatik, sürekli ve hassas bir biçimde kontrol edilebilmektedir. Deneysel bir durumu temsil eden bir geri besleme sinyali, bir dönüştürücü tarafından oluşturulmaktadır ve bu sinyal bilgisayar programı tarafından yollanan sinyal ile karşılaştırılmaktadır. Bunlar arasında fark varsa, bir hata sinyali yaratılarak düzeltici bir eylem gerçekleştirilmektedir. Kapalı devre sistemlerin genel çalışma prensibi bu şekildedir (Hudson vd., 1972).

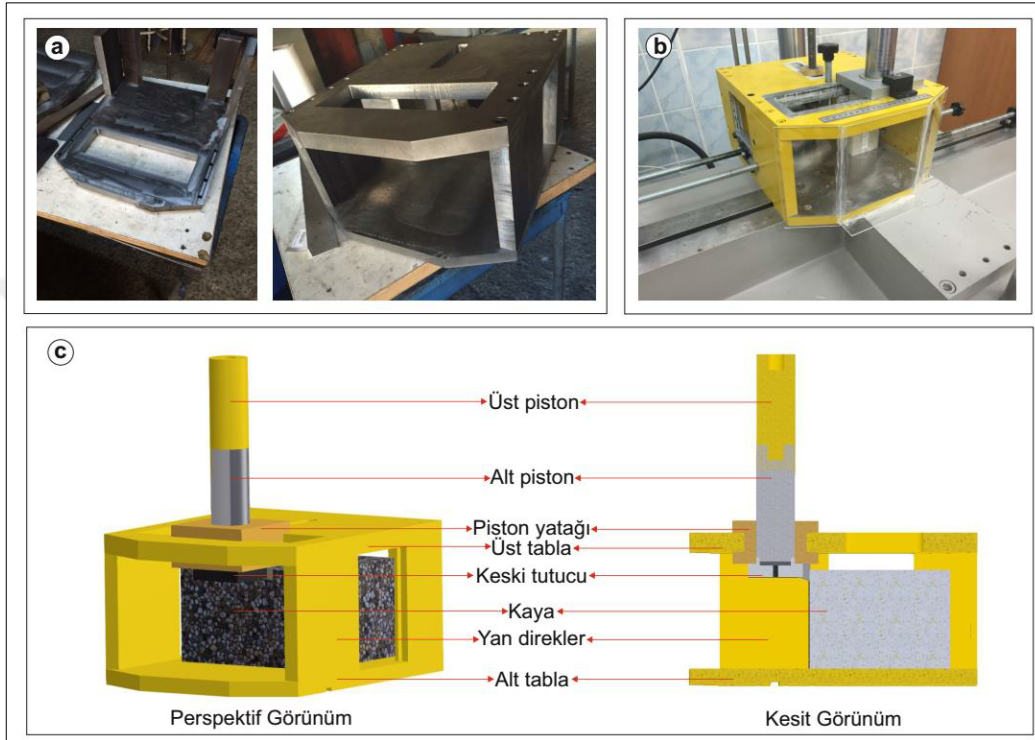
İlk tasarımın üç boyutlu çizimi yazar tarafından bir katı cisim modelleme programında gerçekleştirilmiştir. Ardından, üretim aşamasına geçilmeden önce üretici firma ile fikir alışverişleri yapılarak tasarıma son hali başka bir modelleme programı kullanılarak verilmiştir (Şekil 2.2 (d)). Şekilde ilk dikkat çeken detay, düşey yönde hareket eden DKKS pistonunun ilk tasarımda sabit, son tasarımda ise yatay ekseninde hareket edebiliyor olmasıdır.

Tasarıma bu şekli verildikten sonra, DKKS'nin üretimine geçilmiştir. Yerel bir üretici ile çalışılarak üretim aşamasına başlanmıştır. Bu aşamada DKKS'nin ölçüleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde bulunan 20 ton yük kapasitesine sahip hidrolik eğilme test makinesinin ölçüleri baz alınarak belirlenmiştir. Bu tip hidrolik test makinelerinin strok boyu, yani düşey yönde hareket eden pistonunun maksimum uzunluğu 10 cm civarındadır ve bundan dolayı geliştirilen DKKS'nin düşey pistonu da düşeyde toplamda 10 cm hareket edebilecek şekilde üretilmiştir bundan dolayı da maksimum kesme uzunluğu 10 cm'dir. Hidrolik eğilme test makinesi üretici firma tarafından yüksek miktarlardaki deformasyonlara dayanabilecek, bir rijit cisim gibi hareket edebilecek şekilde üretilmiştir. Hidrolik eğilme test makinesi seri üretimde olup ölçüleri firma tarafından standart olacak şekilde üretilmektedir.



Şekil 2.2. (a) Hidrolik basınç test makinesi (b) Hidrolik eğilme test makinesi (c) DKKS'nin ilk tasarımı (d) DKKS'nin son tasarımı (e) Servo-kontrollü bir test makinesinin şematik görünümü (Hudson vd., 1972).

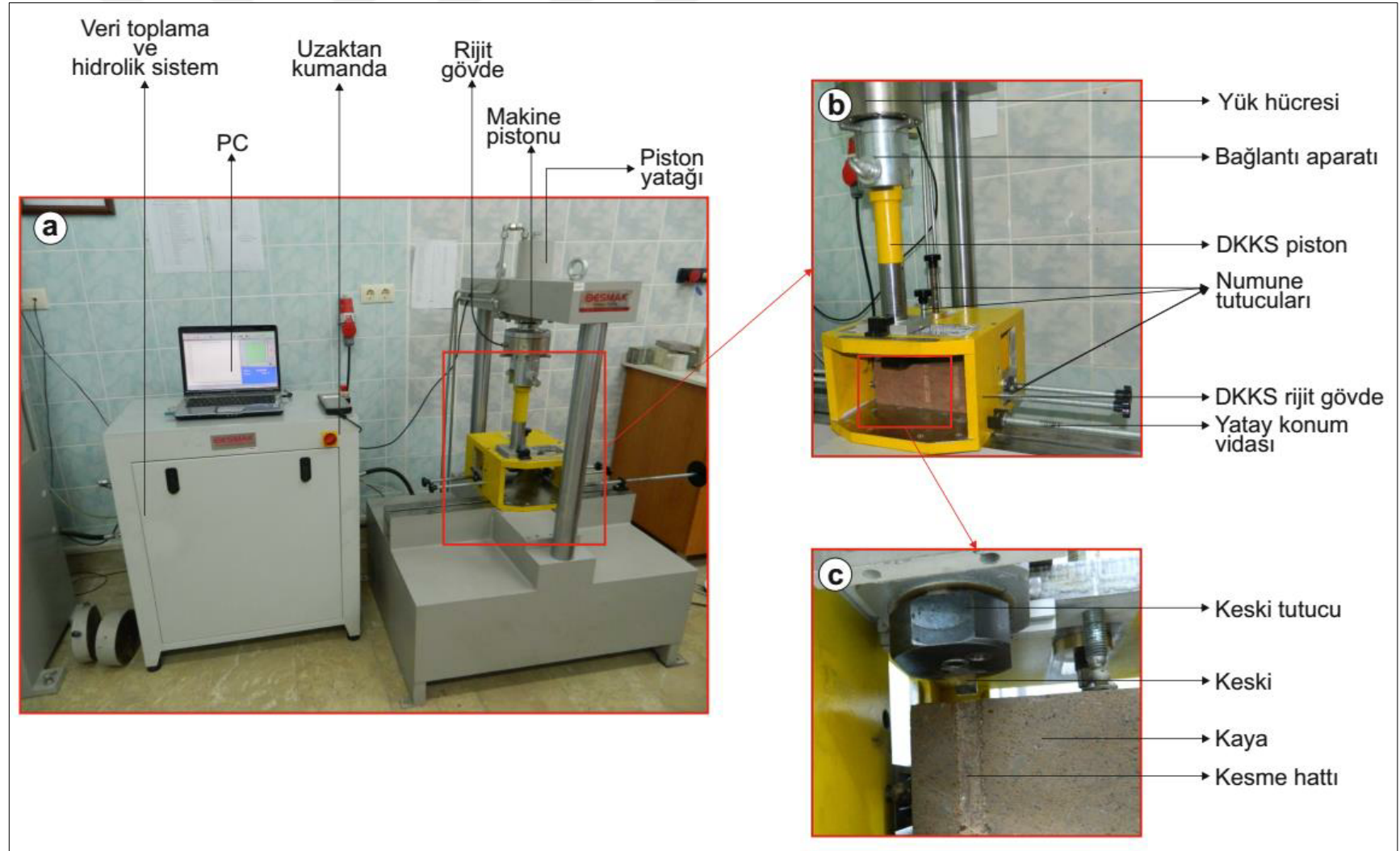
Geliştirilen düşey kayaç kesme seti de (DKKS) aynı şekilde düşey yönde gelebilecek yüksek miktarlardaki yüklere dayanabilmesi için elastisite modülü 200 GPa'dan yüksek olan sanayi çeliğinden imal ettirilmiştir. Tüm gövde ve pistonlar bu çelik ile üretilmiştir. Şekil 2.3'te DKKS'nin üretim aşaması ve genel parçaları görülmektedir.



Şekil 2.3. (a) DKKS'nin üretim aşamasındaki görüntüleri (b) DKKS'nin hidrolik eğilme test makinesinin içine montajı (c) DKKS'nin temel parçaları

Geliştirilen düşey kayaç kesme seti (DKKS) üretimin tamamlanmasının ardından hidrolik eğilme test makinesinin içine monte edilmiştir. Aparat, yan duvarında monte edilmiş halde bulunan yatay konum vidası yardımı ile yatay ekseninde hareket ettirilebilmektedir. Şekil 2.4'te hidrolik eğilme test makinesine monte edilmiş olan DKKS ve sistemin tüm bileşenleri görülmektedir. Öncelikle hidrolik eğilme test makinesine tanıtmak gerekirse, sistem iki ana parçadan oluşmaktadır. Veri işleme biriminin ve hidrolik güç ünitesinin bulunduğu kabin, sistemin en önemli parçasıdır. Bu kabinin içinde servo-elektromekanik motor, hidrolik sistem ve yük hücresindeki kuvvet verilerini algılayarak bilgisayar programına ileten veri işleme sistemi bulunmaktadır. Sistem, hem bilgisayarda hazırda kurulu olan paket program ile hem de ana kabinin üstünde bulunan uzaktan kumanda ile yönetilebilmektedir (Şekil 2.2 (e)).





Şekil 2.4. (a) Hidrolik eğilme test makinesinin genel bileşenleri ve DKKS (b) DKKS'nin bileşenleri (c) DKKS ile kayaç kesme (Yaşar ve Yılmaz, 2017a).



Hidrolik eğilme test makinesinin ikinci parçası, rijit eğilme gövdesidir. Ana gövde; alt gövde, üst kiriş, iki adet kolon, piston yatağı ve ana pistondan oluşmaktadır. Gövdedeki ana pistonun hareketi ise şu şekilde olmaktadır; piston yatağının içinde hâlihazırda bulunan ana piston, yatağın içine yağ pompalanması ile birlikte aşağı yönde hareket etmektedir. Pompalanacak yağın miktarı ve hızı kullanıcı tarafından belirlenen yükleme hızına göre servo sistem tarafından ayarlanmaktadır. Aşağı yönde hareket eden pistonun altında bulunan 20 ton kapasiteye sahip yük hücresi pistona karşı gelen yükleri ölçerek ana kabindeki veri işleme birimine yollamaktadır.

Hidrolik eğilme test makinesine entegre olabilecek şekilde üretilen düşey kayaç kesme setinin (DKKS) temel bileşenleri Şekil 2.4'te görülmektedir. Aparatın pistonu iki parçadan oluşmaktadır. Bunun nedeni diğer preslerin içinde kullanılabilmesi için piston boyunu kısaltmaktır. Gövdenin üst, sağ ve sol yanlarında numunenin sıkıştırılması için üretilmiş sıkıştırma vidaları bulunmaktadır ve bu vidalar sayesinde aparat içine yerleştirilen kaya örneği deney esnasında sabitlenmektedir. Pistonun içinde hareket ettiği numune yatağı olası bozulmaları engellemek için özel bir alaşımdan üretilmiştir.

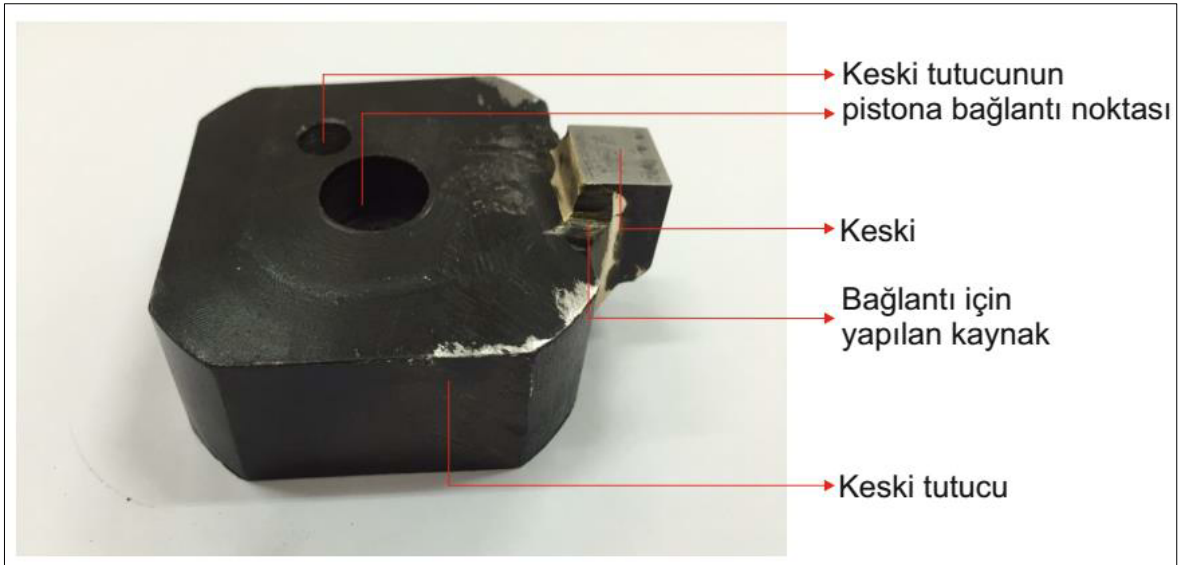
Pistonun alt kısmına, keskinin kaynakla bağlandığı keski tutucu sıkıştırılmaktadır. Üst pistona yağ basıncı ile uygulanan baskı DKKS pistonuna aktarılmaktadır. İki piston arasında bulunan yük hücresi, keskinin kayaç kazısı sırasında maruz kaldığı kesme kuvvetini ölçmektedir. Ölçülen değerler, veri işleme birimi ile bilgisayara aktarılmaktadır. Sistemin veri işleme hızı 50 Hz'dir.

## **2.2. Keskilerin İmal Edilmesi**

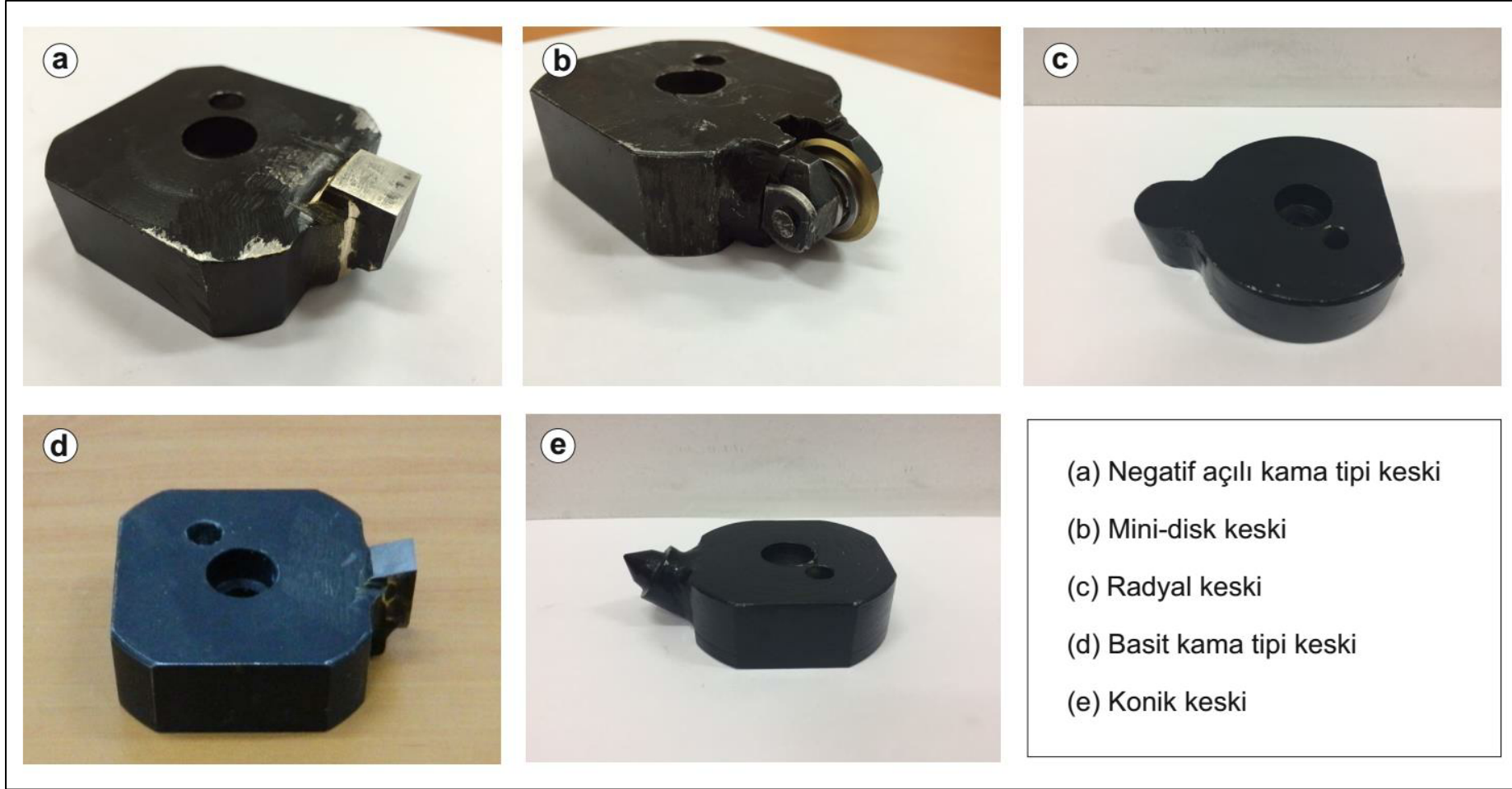
Deneyleerde çeşitli bileşimlerde keskiiler kullanılmıştır. Kontrollü kesme deneylelerinde kullanılan basit kama tipi keskiiler ve karot kesme deneylelerinde kullanılan keskiiler YG8 T21 tipi tungsten karbid uçlardır. Bu uçlar genellikle sondaj makinelerinin kesici kafalarında kullanılmaktadır. Uçların genişlikleri ve uç açıları değişkenlik göstermektedir. Keskiiler, keski tutucuya kaynak ile sabitlenmişlerdir. Bunun nedeni, tungsten karbid malzemenin çok eksenli gerilmeler altında dayanımının artması ve daha az kırılğan bir özelliğe bürünmesidir ki (Gillani ve Butt, 2009) kazı makinelerinin kafalarında bulunan keskiilere tungsten karbid uçlar kaynaklanmak vasıtası ile tutturulmaktadır. Bu tungsten karbid uçların çekme dayanımı 2400 MPa ve Rockwell HRA sertliği ise 88,5'tur (Zhang vd., 2007). Çalışma kapsamındaki diğer keskiilerin de imal edildikleri malzeme tungsten karbidtir. Ancak,

alaşımaları diğer keski ile farklılık gösterebilmektedir. Keski tasarımlarının geometri ile ilgili detay bilgileri ilgili bölümlerde verilecektir.

Keski tasarımlarının geliştirilen DKKS pistonunun alt tabanına monte edilebilecek şekilde üretilmiştir. Şekil 2.5'te bu keski türünden negatif uç açılı kama tipi keski (karot kesme deneyinde kullanılan keski) ayrıntılı bir biçimde gösterilmektedir. Bir keski takımı iki parçadan oluşmaktadır. Bunlar, keski tutucu ve keskidir. Keski tutucular paslanmaz çelik malzemeden üretilerek tüm keski türleri için aynı olacak şekilde üretilmiştir. Ayrıca, korozyona uğramalarının önüne geçmek için de boya katmanıyla kaplanmışlardır. Her keski tipine göre keski tutucunun ağız kısmında açılan boşluğa keski oturtularak keski tutucuya kaynatılmıştır. Daha önce bahsedilen konulardan dolayı, mekanik bir bağlantı yerine kaynak ile bağlantı tercih edilmiştir. Bu sayede hem keski dayanım kazanmıştır hem de kaya kesme işlemi, keskinin olası hareket etmesini önüne geçilerek, kolaylaştırılmıştır. Bağlantı için kullanılan kaynak malzemesinin kalitesi, kaya kesme deneyleri sırasında edinilen tecrübeler ile doğrulanmıştır. Yaklaşık 200 MPa dayanıma sahip olan bir granit numunesinin kesme deneyinde kaynak sağlam kalırken, keski kırılma yapısından dolayı birden fazla parçaya ayrılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca, kollu galeri açma makinelerinde (KGAM) sıklıkla kullanılan konik ve radyal keski ve tam cepheli tünel açma makinelerinde kullanılan disk keskiye benzer mini-disk keski benzer yöntemlerle üretilmiştir. Bu keski Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Negatif uç açılı keskinin detaylı olarak görünümü

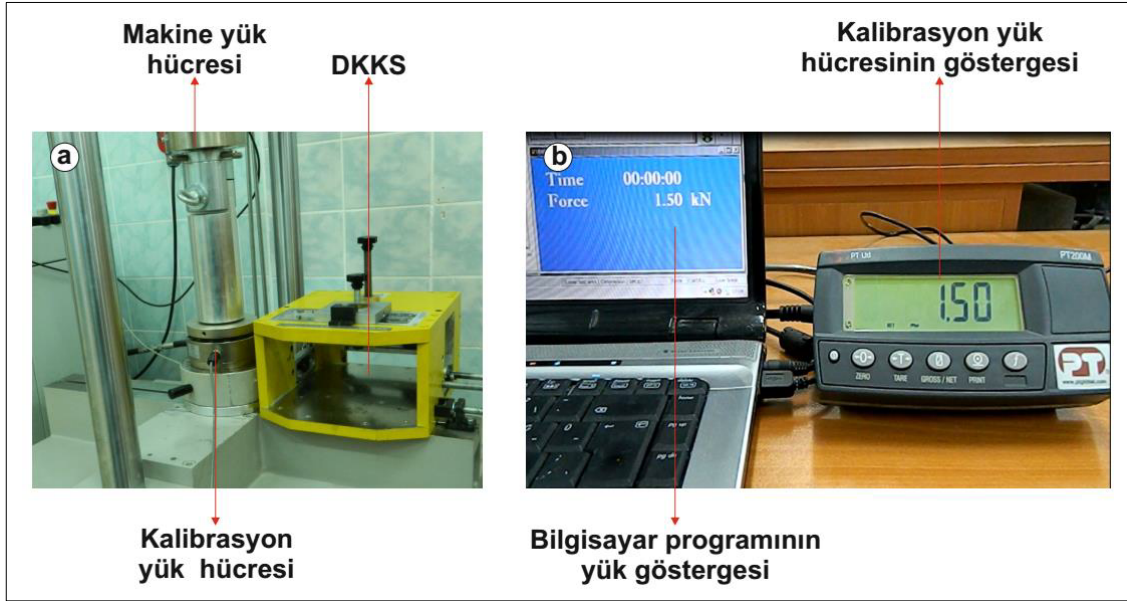


Şekil 2.6. Çalışma kapsamında üretilen tüm keski

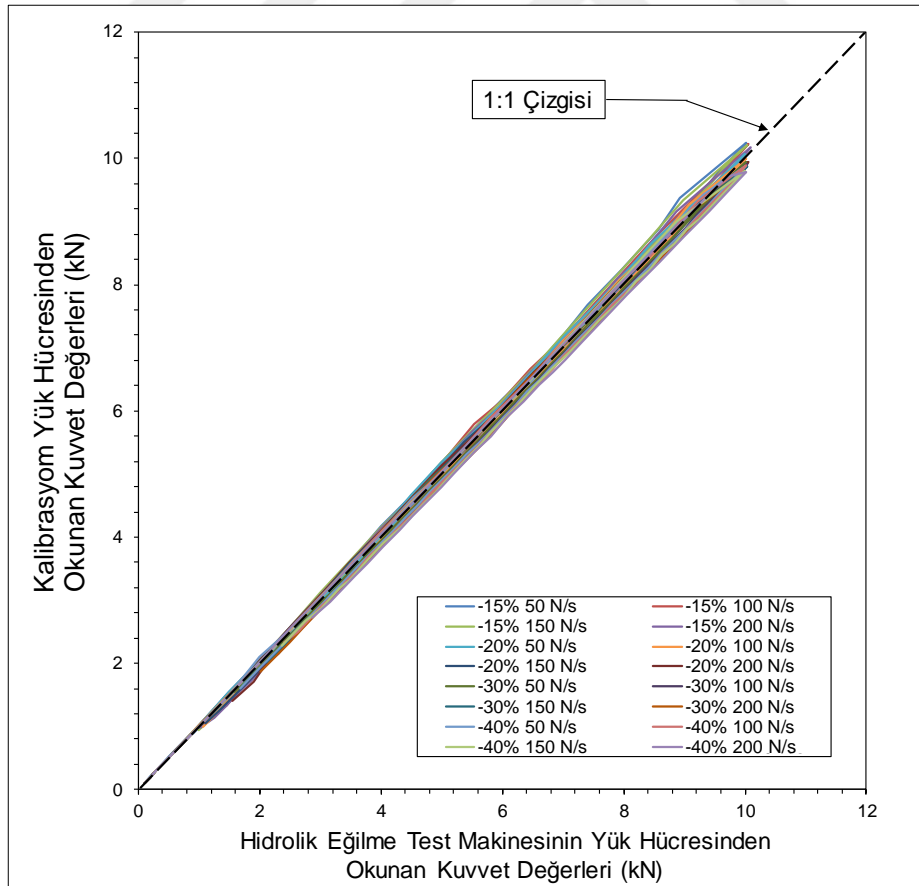
### 2.3. Yük Hücresinin Kalibrasyonu

Kalibrasyon, belirlenmiş koşullar altında, doğruluğu bilinen bir ölçüm standardını veya sistemini kullanarak diğer test ve ölçüm aletinin doğruluğunun ölçülmesi ve sapmaların belirlenmesi ve doküman haline getirilmesi için kullanılan ölçümler dizisidir (URL-4, 2017). Kuvvetlerin bulunmasında kullanılan dinamometreler genellikle elastik bir yay mekanizmasından oluşmaktadır. Bu yay ise zamanla deforme olabilmektedir. Bundan dolayı, belirli aralıklarla dinamometrelerin doğruluğunun belirlenmesi gerekmektedir. Kalibrasyon işlemlerinin amacı, ölçüm yapılan dinamometrenin doğru değerleri gösterdiğinin belirlenmesidir. Bu çalışmada doğruluğu ölçülen ölçüm sistemi, hidrolik eğilme test makinesinin yük hücresidir ve doğruluğu ölçülmeye çalışılan ise bu makineden okunan kuvvet değerleridir. Hidrolik eğilme test makinesinin yük hücresinden okunan değerlerin doğruluğunun kontrol edilebilmesi için harici bir kalibrasyon yük hücresi kullanılmıştır. Şekil 2.7’de kalibrasyon çalışmaları görünmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi yükleme hızı paket program sayesinde değiştirilmektedir. Farklı yükleme hızlarında sistemin güvenilirliğinin tayini için 50N/s, 100N/s, 150N/s ve 200N/s gibi yükleme hızları kullanılarak presteki kuvvet değeri ile harici yük hücresindeki kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, makine yüke girmeden önce karşılayacak bir karşı kuvvet olmadığı için yukarıda bahsedilen yükleme hızları geçerli olmamaktadır. Bundan dolayı, makineye ilk hız olarak valf açıklığı verilebilmektedir. Yükleme hızlarına ek olarak bir de farklı valf açıklıkları değişken olarak kullanılmıştır. Valf açıklıkları %15, %20, %30 ve %40 olarak belirlenmiştir ve toplam 16 kalibrasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2.8’de hidrolik eğilme test makinesinin yük hücresinden ve kalibrasyon yük hücresinden okunan değerler gösterilmektedir. Grafikte göze çarpan ilk nokta yükleme kısmında makineden okunan değerler büyük olmakta, yük boşaltılırken harici yük hücresinden okunan değerler daha fazla seyretmektedir. Ancak boşaltma kısmında 2 kN ve altında iki sistemde aynı sonucu göstermektedir. Bu farklılık sistemin yanlış ölçüm yapmasından ileri gelmemektedir. Bu farklılık iki sistemin veri aktarım hızı ile ilgilidir. Pres makinesinin veri toplama ve işleme hızı 50 Hz’dir. Ancak harici yük hücresinin veri hızı 20 Hz’dir. Bundan dolayı yükleme faslında, harici yük hücresi yükü algılamakta yavaş kaldığı için veri düşük görünmektedir, aynı durum yük boşaltma kısmı için de geçerlidir. Bu veriler, sistemden elde edilen kuvvet verilerinin güvenilir olduğunu göstermektedir.



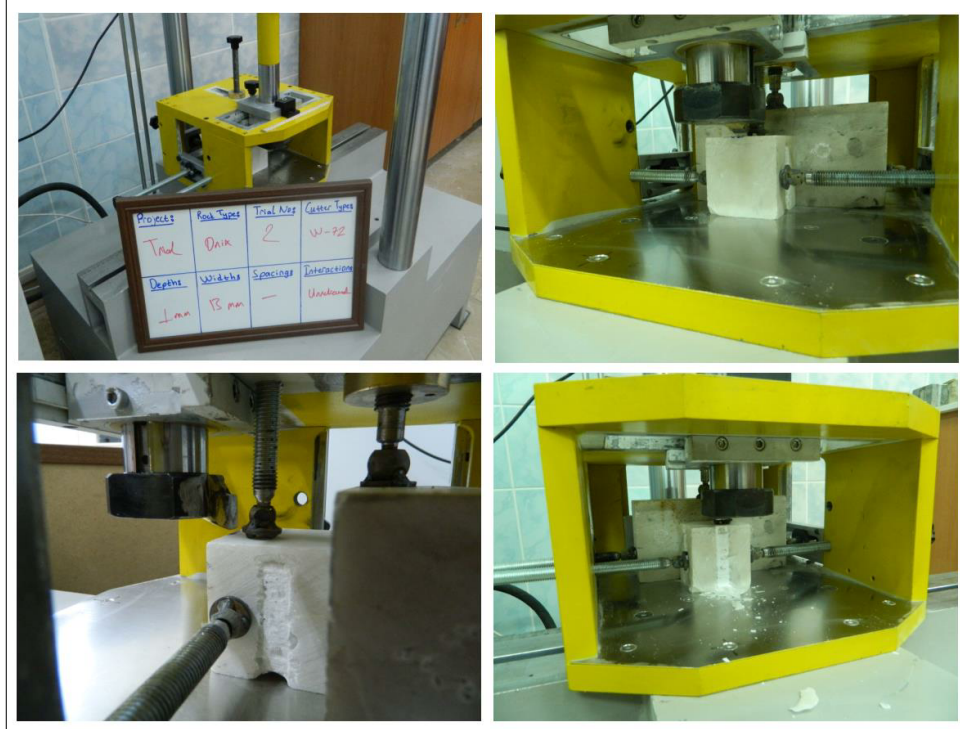
Şekil 2.7. (a) Hidrolik eğilme test makinesindeki yük hücrelerinden okunan değerlerin kalibrasyon yük hücresi ile doğrulanması (b) Makine ve kalibrasyon yük hücrelerinden okunan kuvvet değerleri



Şekil 2.8. Kalibrasyon ve eğilme test makinesinin yük hücrelerinden okunan kuvvet değerleri

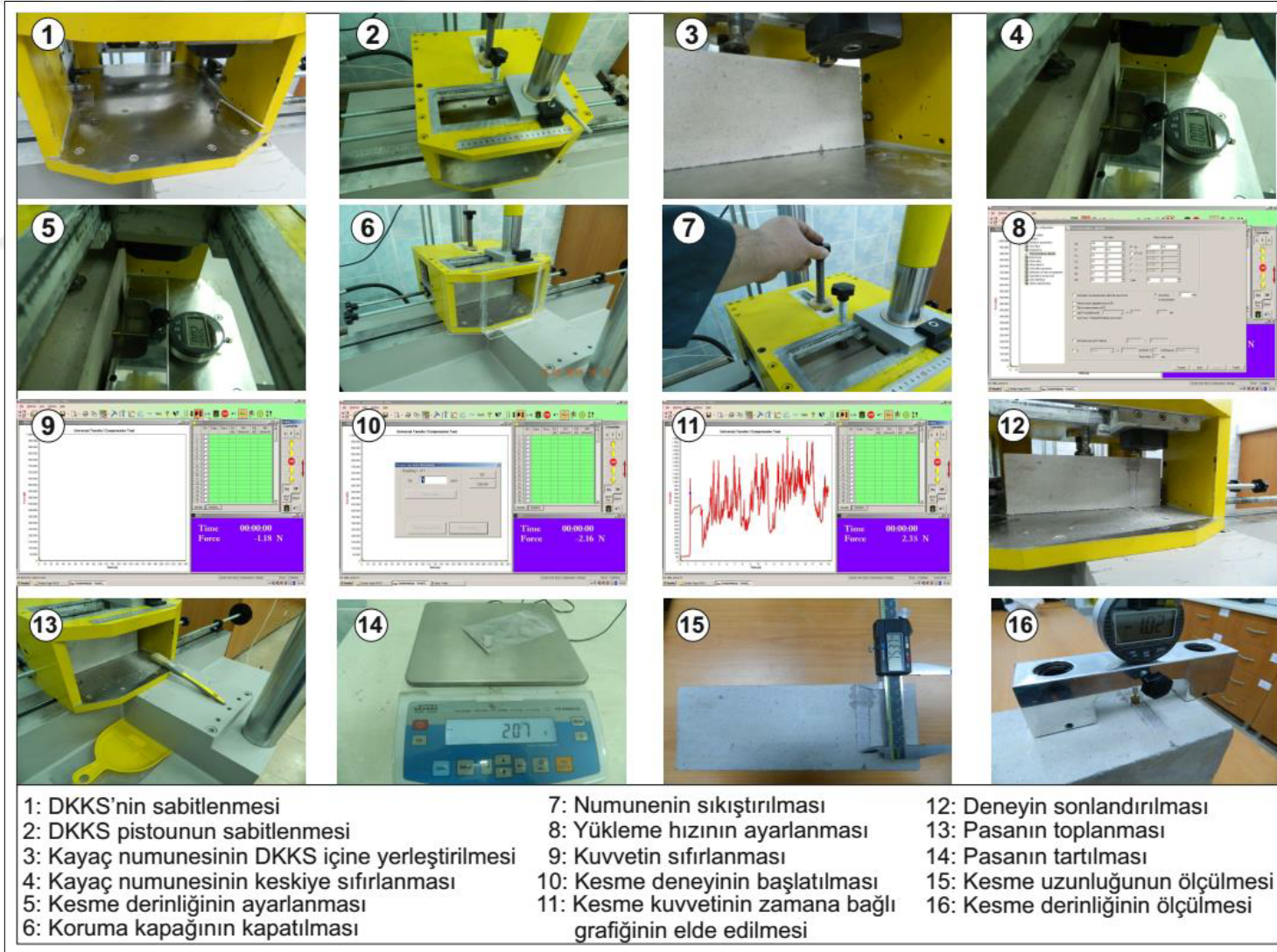
## 2.4. Kesme DeneYlerinin Standartlaştırılması

DüŞey kayaç kesme setinin (DKKS) kurulması ve makineden okunan yük değerlerinin harici bir kalibrasyon yük hücresi yardımı ile doğrulanmasının ardından, rastgele kayaç numuneleri üzerinde deney yapılarak, kesme deneyinin standardının oluşturulmasına çalışılmıştır. Bu aşamada farklı dayanımlara sahip numuneler üzerinde ilk üretilen basit şekilli kama tipi keski (Bkz. Şekil 2.6 (d)) ile kesme denemeleri yapılmıştır. Bu denemeler sırasında çeşitli mermer ve granit numuneleri üzerinde kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler sırasında yaklaşık 200 MPa dayanıma sahip olan bir granit örneğinin kesilmesi sırasında basit kama tipi keski kırılarak kullanım dışı kalmıştır. Bilindiği üzere, bu tip keski orta dayanım sınıfındaki kayaç gruplarının kazılmasında kullanılmaktadır. Bu denemenin de amacı bu tip keskinin kullanım sınırlarının belirlenmesiydi. Bu denemelerin sonucunda bu keski tipinin orta dayanımın üzerinde kayaçlarda kullanılmasının mümkün olmadığı açıkça görülmüştür. Oniks numunesi üzerinde yapılan kesme denemesi Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Farklı numuneler üzerinde yapılan çok sayıda deneyin ardından kaya kesme deneyinin genel prosedürü oluşturulmuştur. Kaya kesme deneyinin genel prosedürü sıralı olarak Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Bir oniks numunesi üzerinde basit kama tipi keski ile kesme denemeleri





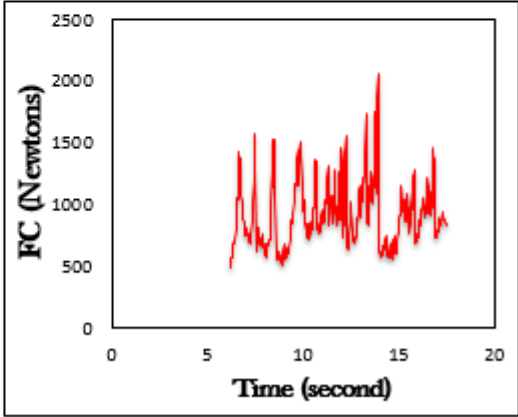


Şekil 2.10. Kaya kesme deneyinin genel aşamaları (DKKS: Düşey kayaç kesme seti)

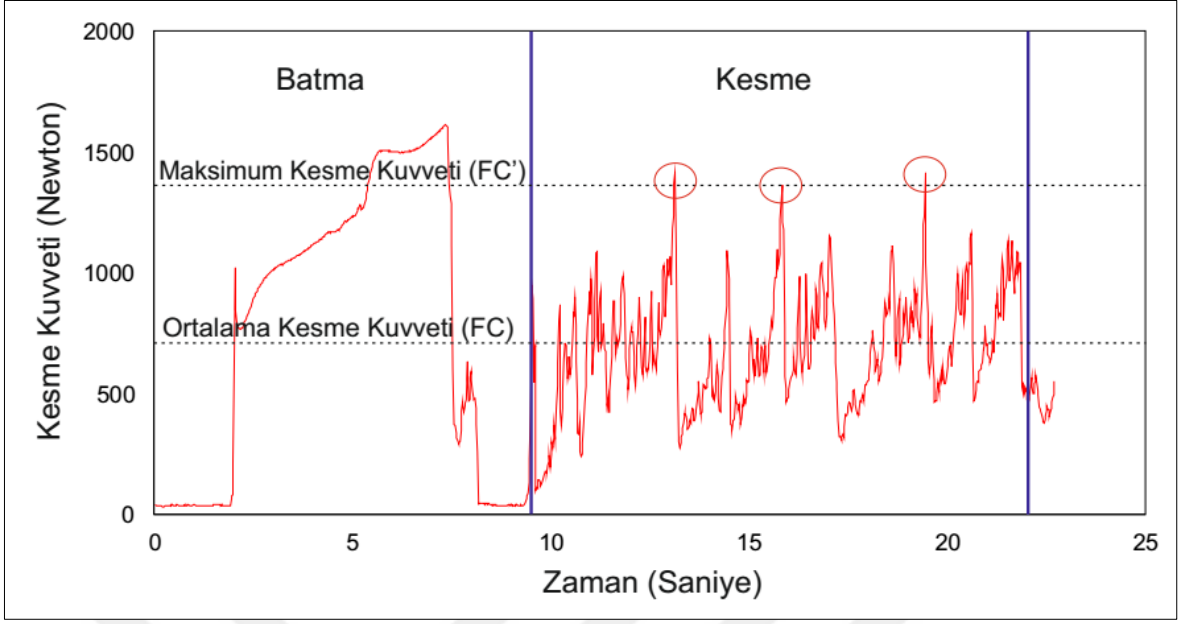
Öncelikle düşey kayaç kesme setinin (DKKS) altında bulunan sıkıştırma vidaları sıkıştırılarak DKKS eğilme gövdesine sabitlenmektedir (1). Ardından pistonun içinde hareket ettiği yatak vida ile gövdeye tutturulmaktadır (2). Kayaç pistonun dibindeki keskiye sıfırlanarak piston yukarı çekilmektedir (3). Kesme yapılacak derinliğin belirlenebilmesi için komparatör numuneye sıfırlanır (4). Ardından numune arkada bulunan sıkıştırma vidası yardımı ile ileri itilerek, kesme derinliği ayarlanmaktadır (5). Kesme derinliğinin ayarlanmasının ardından numune sıkıştırılmakta ve kazılan malzemenin dışarı sıçramaması için DKKS'nin önüne şeffaf kapak yerleştirilmektedir (6-7). Bilgisayarda kurulu olan program vasıtası ile sistem kontrol edilmektedir. Deney değişkeni olarak yükleme hızı ve ilk valf açıklığı belirlenmektedir (8). Deney şartlarının girilmesinin ardından yük hücresinde başlangıçta bulunan yük sıfırlanarak deney başlatılır (9-10). Deneyin ardından kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi 11. sıralamadaki resimde görülmektedir. Keski numune dibine yaklaşırken deney sonlandırılmaktadır (12). Oluşan pasa dikkatli bir şekilde toplanarak hassas terazide tartılır (13-14). Ardından kesme uzunluğu kumpas ile ölçülür (15). Kesme derinliği ise kontrol amaçlı olarak komparatör ile tekrar ölçülmektedir (16). Deneyin aşama aşama döngüsü bu şekilde gerçekleşmektedir. Deneyin ardından elde edilen ham kuvvet verileri, MS Excel'de oluşturulan veri işleme sayfasına aktarılmaktadır. Bu sayfada ham kuvvet verisi ve tartılan pasa yardımı ile birim uzunluktaki pasa miktarı, spesifik enerji, maksimum kesme kuvveti, ortalama kesme kuvveti, maksimum kuvvetin ortalama kuvvete oranı, birim kesme derinliğine göre normalize edilmiş ortalama ve maksimum kesme kuvveti gibi parametreler bu veri işleme sayfası sayesinde kolaylıkla elde edilmektedir. Veri işleme sayfası Şekil 2.11'de görülmektedir.

DKKS'nin deney çıktısı olarak kesme kuvveti elde edilmektedir. Elde edilen kesme kuvveti ham haldedir ve spesifik enerjinin bulunmasında kullanılabilmesi için ortalama kesme kuvveti (FC) değerinin bulunması gerekmektedir. Ortalama kesme kuvveti, kesme sırasında keskiye etkiyen kesme kuvveti verisinin ortalamasına verilen addır. Ancak, kesme işlemi keskinin kayaca batması ile başlamaktadır ve bu sırada oluşan kuvvet, kesmeyi temsil etmediği için hesaba katılmamaktadır. Maksimum kesme kuvveti (FC') ise kesme sırasında ortaya çıkan kuvvet piklerinin en yüksek üç tanesinin ortalamasıdır (Barker, 1964). Bir kaya numunesinin kesilmesi sırasında oluşan kesme kuvvetinin zaman bağlı değişimi grafiği Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Bu grafikte, yukarıda anlatılan hususlar detaylı olarak gösterilmektedir.



		<b>Karadeniz Technical University</b> <b>Mining Engineering Department</b>						
<b>Vertical Rock Cutting Rig (VRCR) Data Sheet</b>								
Project:	Doct.	Date:	5.4.2016	Crew:	S.Y.			
<b>Input Data</b>								
Cutting Depth:	3.	mm	Sample Name:	Kayseri Tuff				
Cutting Width:	10.8	mm	Lithology:	Igneous				
Cutting Length:	78	mm	Bulk Density:	2.03	g/cm <sup>3</sup>			
Cutter Type:	Simple Wedge		Trial No:	2				
Cutter Angle:	78	°	Notes: Fair					
Rake Angle:	12	°						
Friction Angle:	-	°						
Loading Rate:	300	N/s						
Valve Opening:	-40	%						
Interaction:	no							
Spacing:	-	mm						
<b>Output Data</b>								
Yield:	7	gr				FC Max:	2066.82	N
Yield:	3.448276	cm <sup>3</sup>				FC Min:	494.31	N
Yield:	0.044	m <sup>3</sup> /km	FC Peak Mean:	1797.19	N			
Specific Energy	20.71	MJ/m <sup>3</sup>	FC Mean:	915.77	N			
Specific Energy	5.75	kWh/m <sup>3</sup>	Standard Dev.:	257.16	N			
Breakout Angle	52.69	°	FC/d :	305.26	N/mm			
			FCPeakM/FCM	1.96				
			FCPeakM/d:	599.06	N/mm			
			Velocity:	6.93	mm/sn			
								

Şekil 2.11. MS Excel'de oluşturulan veri işleme sayfası



Şekil 2.12. Kaya kesme sırasında oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi ve kuvvet değerlerinin gösterimi

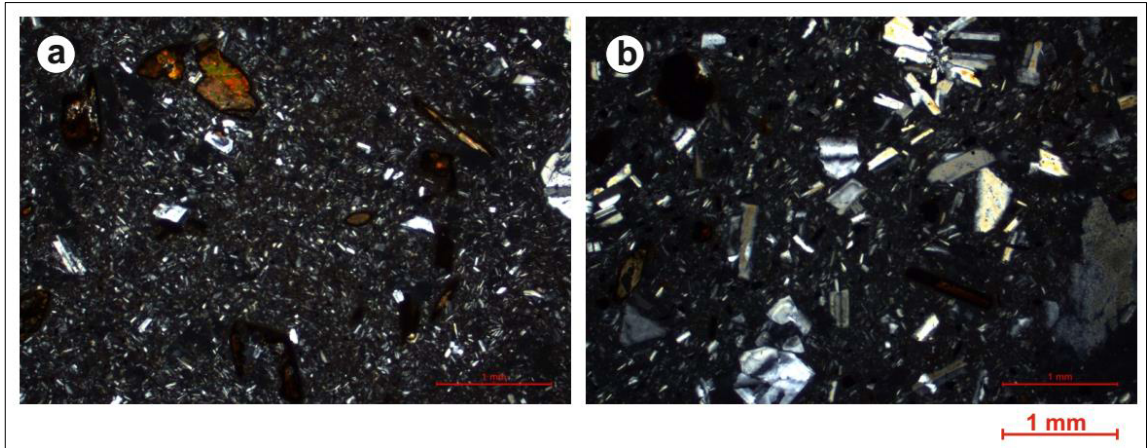
Diğer bir husus ise kazı sırasında yük hücresi tarafından kaydedilen verilerin kaydedilme hızıdır. Bazı çalışmalarda kazı deneylerde veri aktarım hızının 1000 Hz olması gerektiği vurgulanmaktadır (Bilgin vd., 2014). Örneğin, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde bulunan küçük boyutlu kesme setinde veri kaydetme hızının 1000 Hz olduğu belirtilmektedir (Bilgin vd., 2014). Ancak, geliştirilen düşey kayaç kesme setinin (DKKS) içine monte edildiği hidrolik eğilme test makinesinin veri kaydetme hızı 50 Hz'dir. Bahsedilen küçük boyutlu deneyde uygulanan kesme hızı 40 cm/sn'dir. Bununla beraber geliştirilen DKKS' ise kazı hızı 0,5 cm/sn – 1 cm/sn arasında değişmektedir. Veri aktarım hızı önerilen değer altında olmasının, kazı hızının çok daha düşük olması nedeniyle verilerin güvenilirliğine herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Ayrıca, kesme hızının kesme kuvveti üzerine herhangi bir etkisi olmadığı da belirtilmektedir (Nishimatsu, 1993).

## 2.5. Kesme Deneylerinde Kullanılan Kaya Numunelerinin Karakterizasyonu

Çalışmanın bu kısmında, 6 farklı magmatik kayaç kullanılmıştır. Bu kayaçlar, kırmızı andezit, gri andezit, yeşil tüf, gri tüf, kahverengi vitrik tüf ve sarı vitrik tüftür. Bu kayaçların seçilmesinin başlıca sebebi orta dayanıma sahip olmalarıdır. Kama tipi kesimler genellikle orta dayanıma sahip kaya formasyonlarında çalışmaktadırlar. Bundan dolayı, Bieniawski

(1973) sınıflaması kullanılarak tek eksenli basınç dayanımları 50 MPa ile 100 MPa arasında değişen bu kayalar seçilmiştir. Ayrıca, bu kayaların numunelerinin, kökensel özelliklerin (tane biçimi gibi) etkilerini minimize etmek amacıyla, tümü magmatik kayalardan seçilmiştir. Buna ek olarak, numuneler görünür süreksizlikler barındırmamaları sebebiyle de tercih sebebi olmuştur. Numunelerden alınan örnekler Maden Tektik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü'ne gönderilerek ince kesit analizleri yardımı ile petrografik analizler yaptırılmıştır.

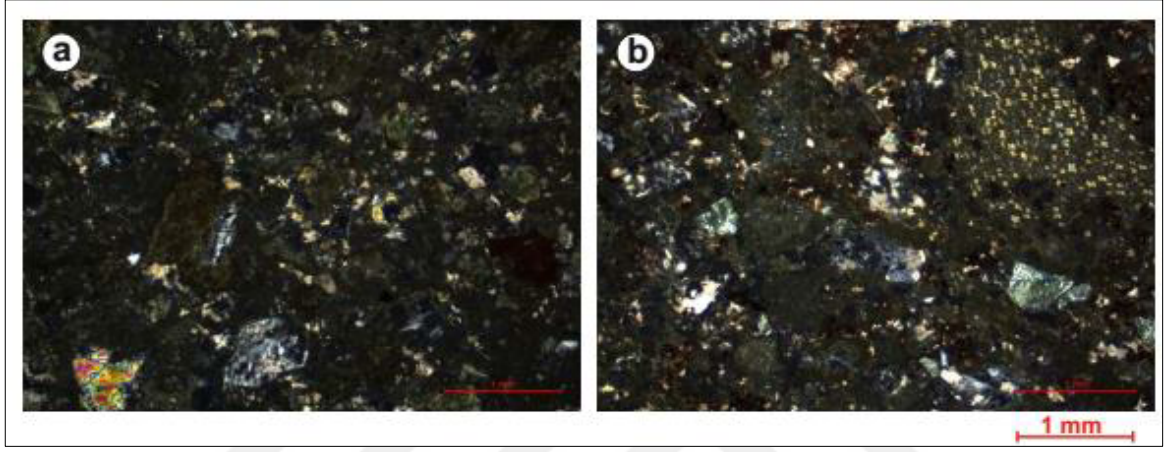
Kırmızı andezit masif ve ince tanelidir. Örnekte genel doku porfiriktir. Plajyoklaslar hem fenokristal hem de mikrolit şeklindedir. Biotit ve hornblendlerin kenar kısımlarında yoğun opasitleşme gözlenmektedir. Hornblend ve biyotit hâkim mafik minerallerdir. Plajiyoklas fenokristaller, biyotit ve hornblend taneleri; mikrolit, biyotit ve volkan camı içeren hamur içerisinde bulunmaktadır. Kayacın alterasyon derecesi düşüktür. Gri andezit masif ve ince tanelidir. Örnekte genel doku porfiriktir. Plajyoklas fenokristallerinde polisentetik ikizlenme ve zonlanma gözlenmektedir. Hornblend ve biyotit hâkim mafik minerallerdir. Plajiyoklas fenokristalleri, biyotit ve hornblend taneleri; mikrolit, kriptokristalen taneler ve volkan camı içeren hamur içerisinde bulunmaktadır. Kayacın alterasyon derecesi ortadır. Kırmızı ve gri andezit numunelerinin ince kesit görüntüleri Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13. (a) Kırmızı andezit numunesinin ince kesit görüntüsü (b) Gri andezit numunesinin ince kesit görüntüsü

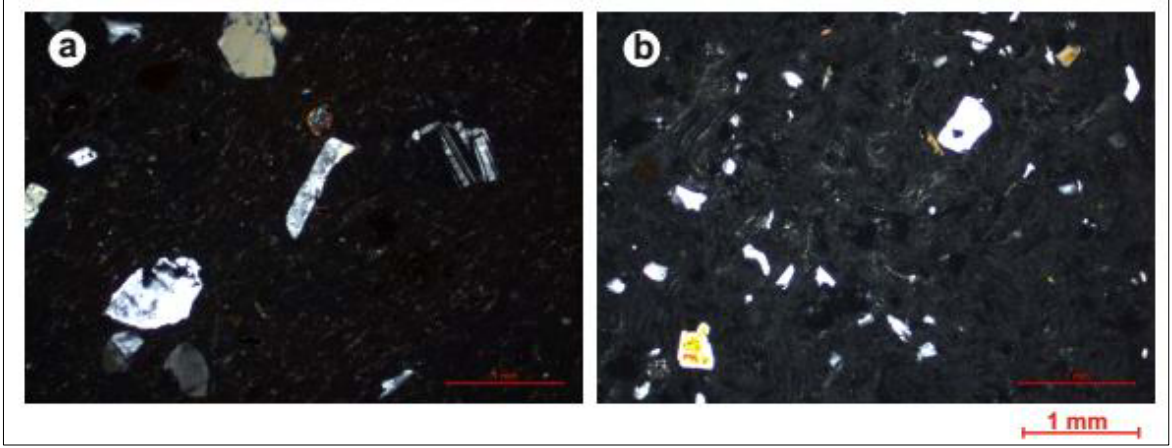
Yeşil tüf masif ve ince tanelidir ve kırıntılı bir dokuya sahiptir. Örnekte hamur killeşmiş olası camsı malzemedir. Pomza parçaları izlenmektedir. Piroksenler çoğunlukla

uralitlemiş taneler şeklindedi. Kayaç parçaları mevcut olup alterasyon nedeniyle türü tayin edilememiştir. Kayacın alterasyon derecesi ileridir. Gri tuf masif ve ince tanelidir ve kırıntılı bir dokuya sahiptir. Örnek çok ince taneli killeşmiş hamur içerisinde pomza parçaları, piroksen, kayaç parçaları, silisleşmiş parçalar, feldspat, karbonat içermektedir. Kayacın alterasyon derecesi ileridir. Yeşil ve gri tuf numunelerinin ince kesit görüntüleri Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14. (a) Yeşil tuf numunesinin ince kesit görüntüsü (b) Gri tuf numunesinin ince kesit görüntüsü

Kahverengi vitrik tuf masif ve ince tanelidir ve kırıntılı bir dokuya sahiptir. Örnek çok ince taneli killeşmiş, silisleşmiş hamur içerisinde az miktarda plajyoklas, piroksen ve amfibol mineralleri içermektedir. Amfibol minerali tek tane, piroksen birkaç tane olarak mevcuttur. Hamurda akma dokusu izlenmektedir. Çok ince taneli demir oksitleşmeler izlenmiştir. Örnek cam miktarından dolayı vitrik tuf olarak da adlandırılmaktadır. Kayacın alterasyon derecesi ortadır. Sarı vitrik tuf masif ve ince tanelidir ve kırıntılı bir dokuya sahiptir. Örnek çok ince killeşmiş hamur içerisinde plajyoklas, biyotit, kuvars mineralleri içermektedir. Hamurda zayıf bir akma dokusu izlenmektedir. Kayacın alterasyon derecesi ortadır. Kahverengi ve sarı vitrik tuf numunelerinin ince kesit görüntüleri Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15. (a) Kahverengi vitrik tuf numunesinin ince kesit görüntüsü (b) Sarı vitrik tuf numunesinin ince kesit görüntüsü

Mineralojik ve petrografik analizin sonucunda kayaçlar isimlendirilmişlerdir. Ayrıca, bu analizler sonucunda tüm numunelerin tanelerinin mikroskop görüntülerinde görüldüğü gibi köşeli oldukları belirlenmiştir. Kayaçların mineralojik-petrografik analizinin ardından, karakterizasyon amaçlı olarak bu numunelerin birtakım fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir

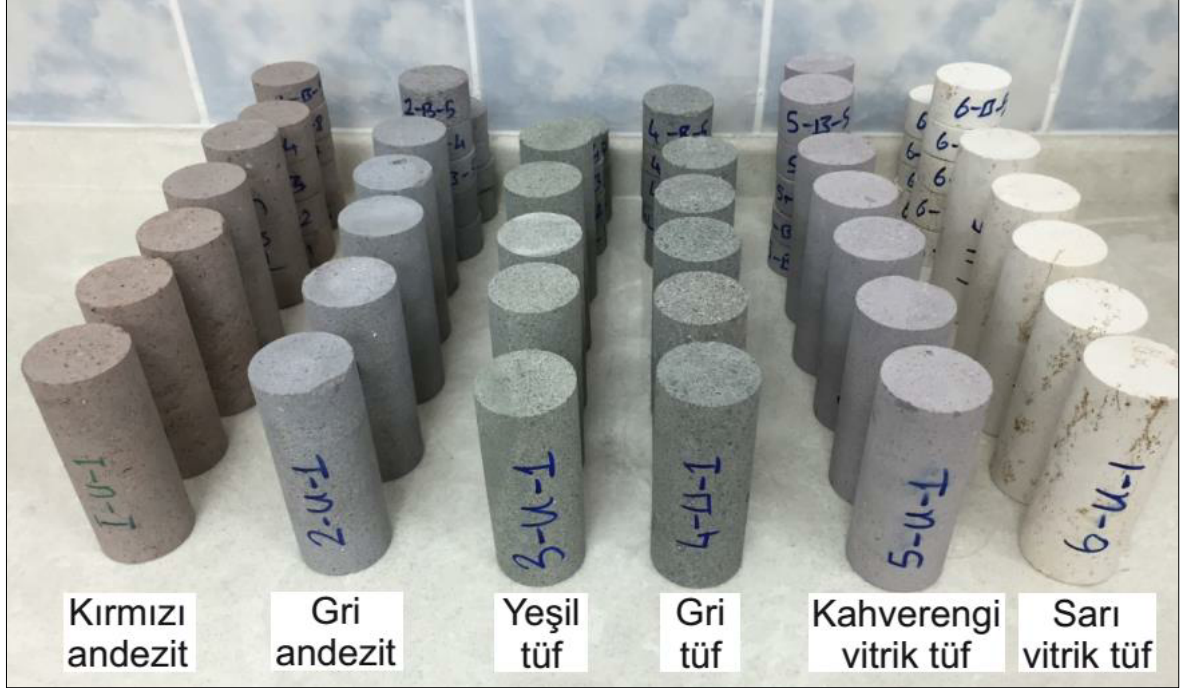
### 2.5.1. Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Kayaç numunelerinin fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi için kuru yoğunluğu, doymun yoğunluğu ve görünür porozitesi belirlenmiştir. Bu amaç için öncelikle temin edilen blok numunelerden yaklaşık 54,7 mm çapında karot numuneleri alınmıştır. Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için blok numunelerden alınan karot numuneleri Şekil 2.16'da verilmiştir.

Kuru, doymun yoğunluk ve görünür porozite belirleme deneylerinde ISRM (2007) tarafından önerilen kumpas yöntemi esas alınmıştır. Bu deney yöntemi düzgün şekilli numuneler üzerinde gerçekleştirilmektedirler. Numuneyi temsil edebilecek olan en az üç numunenin kullanılması önerilmektedir ve yöntem bu şekilde uygulanmıştır. Şekil 2.11'de görülen tek eksenli basınç dayanımı deneyi için hazırlanan karot numuneleri bu deneyde kullanılmıştır. Öncelikle, dijital kumpas kullanılarak numunelerin hacimleri (V) hesaplanmıştır. Ardından, numuneler su içine batırılarak 1 gün boyunca suya doyurulmuşlardır. Sudan çıkarıldıktan sonra dikkatlice yüzeyleri kurutulan numuneler



hassas terazide tartılarak doygun ağırlıkları ( $M_d$ ) belirlenmiştir. Ardından numuneler,  $105^\circ$ 'deki etüvde 1 gün boyunca bekletilerek sabit kütleye gelmeleri sağlanmıştır ve 30 dk soğumalarının ardından tartılarak kuru ağırlıkları ( $M$ ) belirlenmiştir. Son olarak da aşağıda verilen eşitlikler yardımı ile hesaplamalar yapılmıştır. Deneylemlerden elde edilen sonuçlar Tablo 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.16. Blok numunelerden alınan karot numuneleri

$$V_b = \frac{M_d - M}{\rho_{su}} \quad (2.1)$$

$$p = \frac{V_b}{V} \times 100 \quad (2.2)$$

$$\rho_{kuru} = \frac{M}{V} \quad (2.3)$$

$$\rho_{doygun} = \frac{M_d}{V} \quad (2.4)$$

Burada;

$V_b$  = Boşlukların hacmi,  $cm^3$ ,

$p$  = Görünür porozite, %,

$V$  = Örnek hacmi,  $cm^3$ ,

- $M_d$  = Doygun kütle, g,  
 $M$  = Kuru kütle, g,  
 $\rho_{su}$  = Suyun yoğunluğu, g/cm<sup>3</sup>,  
 $\rho_{kuru}$  = Kuru yoğunluk, g/cm<sup>3</sup>,  
 $\rho_{doygun}$  = Doygun yoğunluk, g/cm<sup>3</sup>, tür.

Tablo 2.1. Kuru ve doymun yoğunluk ve görünür porozite deneylerinden elde edilen sonuçlar

Numune Adı	Doygun Yoğunluk, $\rho_{doygun}$ , g/cm <sup>3</sup>	Kuru Yoğunluk, $\rho_{kuru}$ , g/cm <sup>3</sup>	Görünür Porozite, p, %
Kırmızı andezit	2,20	2,06	14,19
Gri andezit	2,32	2,27	5,38
Yeşil Tüf	2,25	2,14	10,93
Gri Tüf	2,25	2,14	11,08
Kahverengi vitrik tüf	2,16	2,03	13,03
Sarı vitrik tüf	1,91	1,70	21,00

The bar chart displays the following data points for each sample:

Numune Adı	$\rho_{doygun}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{kuru}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	p (%)
Kırmızı andezit	2,20	2,06	14,19
Gri andezit	2,32	2,27	5,38
Yeşil tüf	2,25	2,14	10,93
Gri tüf	2,25	2,14	11,08
Kahverengi v. tüf	2,16	2,03	13,03
Sarı v. tüf	1,91	1,70	21,00

Numunelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinin ardından tek eksenli basınç dayanımları ve dolaylı çekme dayanımları da belirlenmiştir. Bu deneylerin de yapılma amacı kayaçların karakterizasyonudur. Ayrıca, ilerleyen kısımlarda irdelenecek olan kesme kuvvetlerinin teorik olarak bulunması hususunda (Bkz. Bölüm 1.5) kayaçların bu

özelliklerine ihtiyaç vardır. Bu deneyler için de ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemler takip edilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde Şekil 2.11’de görülen karot numuneleri kullanılmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı deneylerinde Şekil 2.17’de görülen 200 ton kapasiteye sahip olan hidrolik basınç test makinesi kullanılmıştır.

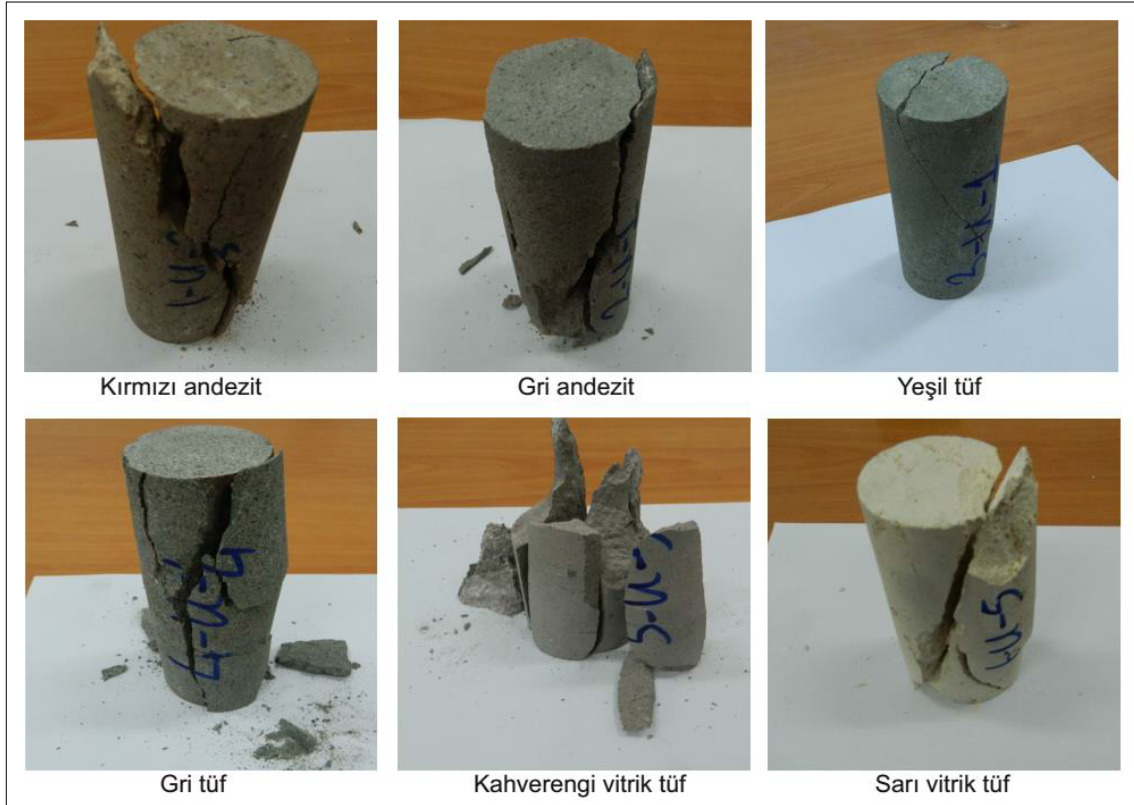


Şekil 2.17. (a) 200 ton kapasiteye sahip hidrolik basınç test makinesi (b) Dolaylı çekme dayanımı deneylerinde kullanılan çene (c) Test makinesinde tek eksenli basınç deneyi

Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinde yaklaşık 54,7 mm çapa sahip olan silindirik numuneler kullanılmıştır. Kullanılan silindirik numunelerin boy/çap oranı 2,5 olarak belirlenmiştir. Numunelerin alt ve üst yüzeylerinin düzeltilmesinde kullanılan sıvıların kayacın dayanımına etki etmesinden dolayı (Hawkes ve Mellor, 1970) numunelerin alt ve üst yüzeyleri yalnızca su kullanılarak kesilip düzeltilmiştir. Ayrıca bu yüzeylerin birbirine



paralel ve düzgün olmasına da dikkat edilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı deneyleri kuru ve nem içermeyen numuneler üzerine gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 1 kN/sn olarak seçilmiştir. Her kayaç türü için en az 5 tekrar yapılmıştır. Numunenin yenildiği maksimum kuvvet değeri yardımı ile tek eksenli basınç dayanımı bulunmuştur (Eşitlik 2.5). Altı farklı kayaç numunesine ait kırılma görüntüleri Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.18. Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kırılan karot numuneleri

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

Burada;

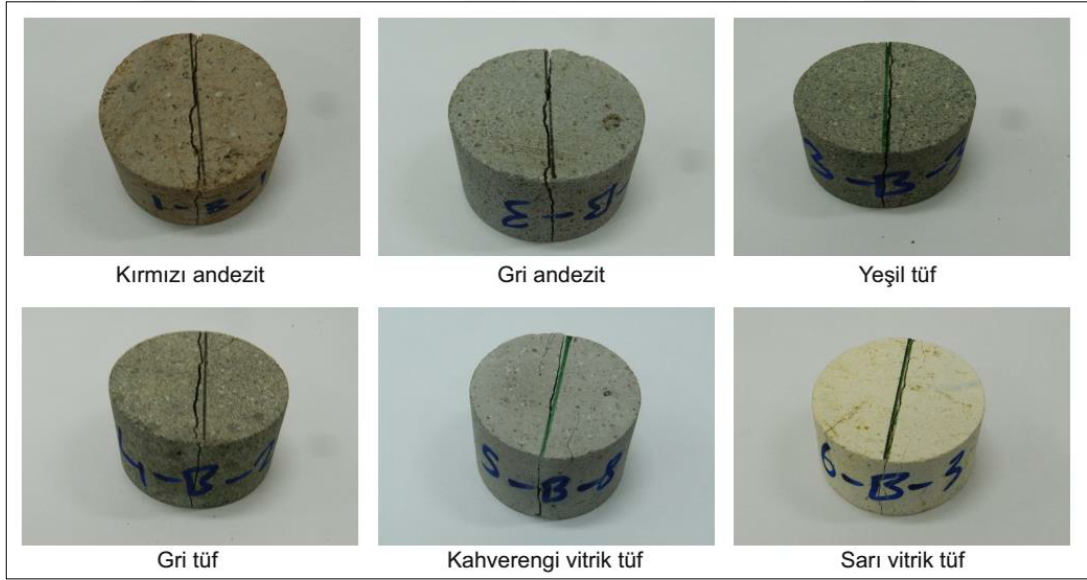
$\sigma_c$  = Tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

F = Kırılma yükü, N,

A = Numunenin yüzey alanı, mm<sup>2</sup>'dir.

Diğer taraftan, kayaçların dolaylı çekme dayanımlarının bulunabilmesi için Brazilian disk yöntemine başvurulmuştur. Bu yöntemde, yenilme anında kavrama açısı yaklaşık 10° olan çenenin içine yerleştirilen belirli ölçülerdeki disk numunenin radyal olarak yüklenerek

kırılması amaçlanmaktadır. Bu deney yöntemi için her kayaçtan disk numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin yüzeyleri titizlikle yalnızca su yardımı ile kesilerek düzeltilmiştir. Yaklaşık 54,7 mm çapındaki numunelerden boyu en az çapının yarısı kadar olan disk numuneler hazırlanmıştır. Yükleme hızı olarak 0,2 kN/sn seçilmiştir ve her kayaç türü için en az 10 adet deney yapılmıştır. Deney numuneleri herhangi bir şistozite içermedikleri için diskin pozisyonuna dikkat edilmemiştir. Deneyden elde edilen kırılma yükü yardımı ile dolaylı çekme dayanımı aşağıdaki formül (Eşitlik 2.6) yardımı ile bulunmaktadır. Dolaylı çekme dayanımı deneyinde kırılan numunelerin görüntüleri Şekil 2.19'da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Dolaylı çekme dayanımı deneyinde kırılan disk numuneleri

$$\sigma_{bt} = \frac{0,636 F}{D t} \quad (2.6)$$

Burada;

$\sigma_{bt}$  = Dolaylı çekme dayanımı, MPa,

F = Kırılma yükü, N,

D = Numunenin çapı, mm,

t = Numunenin kalınlığı, mm'dir.

Burada dikkat edilmesi gereken husus, dolaylı çekme dayanımının direkt çekme dayanımı ile karıştırılmamasıdır. Şu açıkça bilinmektedir ki; dolaylı çekme dayanımı değerleri her zaman direkt çekme dayanımından yüksek çıkmaktadır (Perras ve Diederichs,

2014). Bundan dolayı, Perras ve Diederichs (2014) çok detaylı bir derleme çalışması yaparak kayaların dolaylı ve direkt çekme dayanımı değerlerinin arasındaki ilişkileri kayaların kökenlerine göre incelemiştir. Sedimanter, metamorfik ve magmatik kayalar için önerilen farklı sabitler bu çalışmada görülebilir. Bu çalışmada, magmatik kayalar kullanıldığı için bu tip kayalar için önerilen sabit olan 0,8 değeri baz alınarak dolaylı çekme dayanımı değerleri direkt çekme dayanımı değerlerine çevrilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı deneylerinin sonuçları Tablo 2.2’de verilmiştir.

$$\sigma_t = 0,8 \sigma_{bt} \quad (2.7)$$

Burada;

$\sigma_{bt}$  = Dolaylı çekme dayanımı, MPa,

$\sigma_t$  = Direkt çekme dayanımı, MPa’dır.

Tablo 2.2. Tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı deneylerinin sonuçları

Numune Adı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı, $\sigma_c$ , MPa	Dolaylı Çekme Dayanımı, $\sigma_{bt}$ , MPa	Direkt Çekme Dayanımı, $\sigma_t$ , MPa
Kırmızı andezit	72,85	7,91	6,33
Gri andezit	99,92	8,34	6,67
Yeşil Tüf	51,65	5,84	4,67
Gri Tüf	62,63	7,08	5,66
Kahverengi vitrik tüf	88,15	8,38	6,70
Sarı vitrik tüf	62,48	5,47	4,38

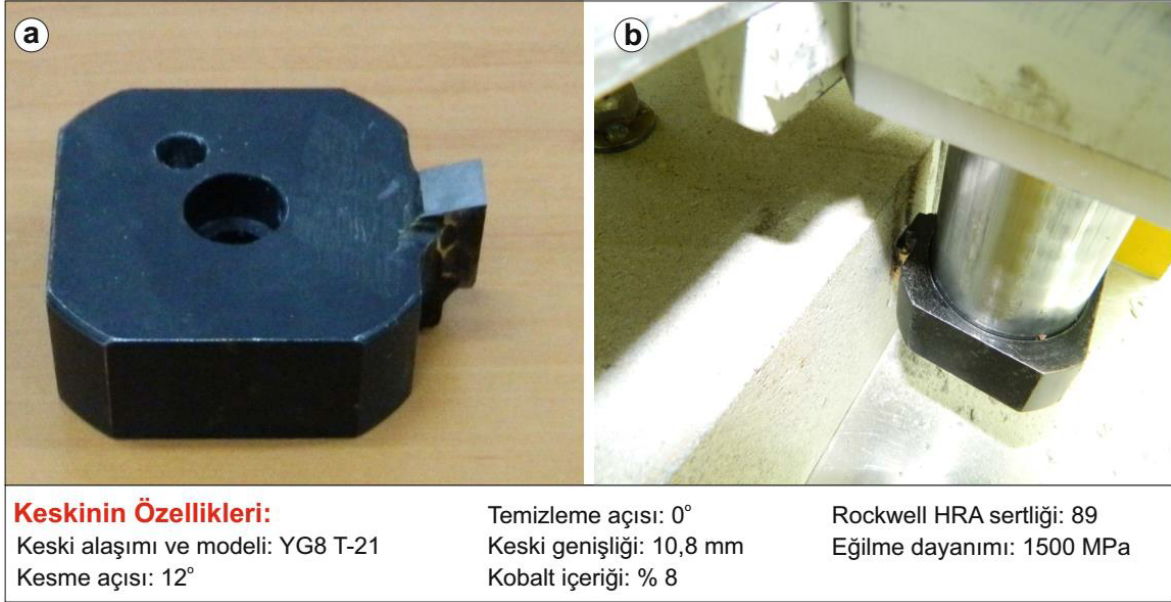
## 2.6. Basit Kama Tipi Keski ile Kontrollü Kaya Kesme Deneyleri

6 farklı numune üzerinde basit kama tipi keski yardımı ile hem etkileşimli modda hem de etkileşimsiz modda kesme deneyleri yapılmaya çalışılmıştır. Ancak, gri andezit numunesinin bu keski ile kesilmesinde uç kırılması gibi problemler yaşandığı için basit kama tipi keski ile kesme denemelerinden çıkarılmıştır ve geriye kalan 5 kayaç numunesi ile deneylere devam edilmiştir. Şekil 2.20’de görülen 10 cm x 23 cm x 20 cm boyutlarındaki kayaç numuneleri kesme işlemlerinde kullanılmıştır. Bu deney numuneleri daha önce de belirtildiği gibi orta dayanım sınıfına ait kayaçlardır, homojenlerdir ve görünür süreksizlik içermemektedirler. Bu deneylerdeki öncelikli amaç ölçüm sisteminin kesme derinliğine göre değişimi ya da kayaç dayanımına göre değişimini incelemektir. Bu sayede bağımlı değişkenler (FC ve SE) ile bağımsız değişkenler (d, s/d,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_t$ ) arasındaki ilişkiler geçmiş çalışmalar ile kıyaslanabilecektir. Bilindiği üzere, kesme derinliği arttıkça kesme kuvveti lineer olarak artmaktadır. Ayrıca, aralarında lineer bir ilişki olmasa da kayaç dayanımı arttıkça kesme kuvvetinin arttığı da bilinmektedir. Etkileşimli kesme deneylerindeki amaç ise düşey kayaç kesme seti ile (DKKS) etkileşimli kesme modunda deney yapılıp yapılamayacağını test edilmesidir.



Şekil 2.20. Kontrollü kesme deneylerinde kullanılan küçük blok numuneler

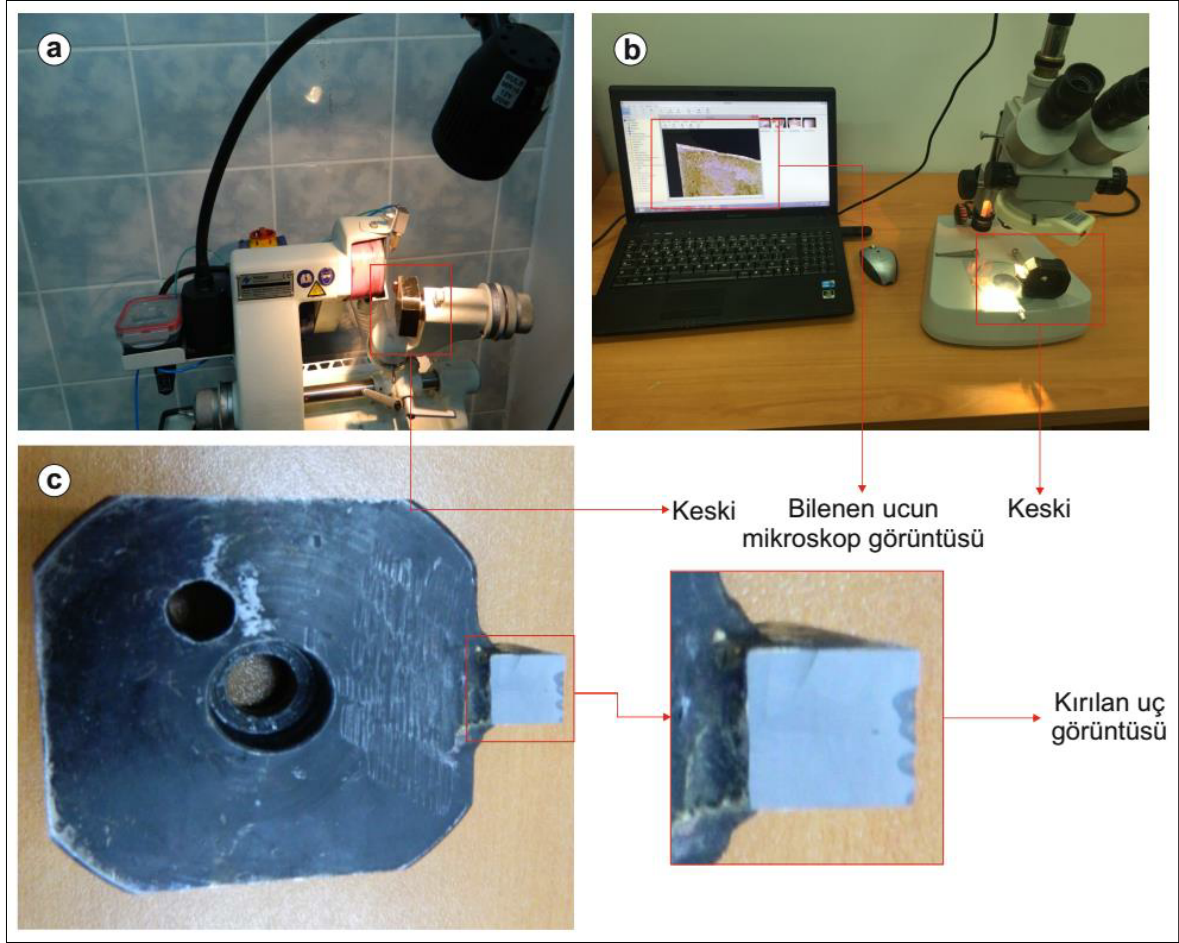
İmal edilen keski bÖlümünde de bahsedilen basit kama tipi keski çalışmanın bu kısmında kullanılmışlardır. YG8 alaşım ve T21 model tungsten karbid olarak adlandırılan bu keski sondaj makinelerinin delici kafalarında kullanılabilirler. Kesme açısı  $12^\circ$ , temizleme açısı  $0^\circ$  olan bu keskinin genişliği 10.8 mm'dir. Basit kama tipi keski ile kaya kesme deneyinin gösterimi Şekil 2.21'de verilmiştir.



Şekil 2.21. (a) Basit kama tipi keski ve özellikleri (b) Basit kama tipi keski ile kaya kesme

Kaya kesme deneylerinin ardından belirli aralıklarla keskinin aşınması takip edilmiştir. Deney numune grubu çok aşındırıcı olmadığı için keski sıklıkla aşınmamıştır. Keski aşınmalarının takibi mikroskop vasıtası ile yapılarak, aşınan keski takım bileme tezgahında bilenmiştir. Tüm deneylerde keskin uçlu keskinin kullanılmasına dikkat edilmiştir. Keskinin mikroskop altında incelenmesi ve aşınan keskinin takım bileme tezgahında bilenmesi Şekil 2.22'de gösterilmiştir. Şekil 2.22'de ayrıca, daha öncede bahsedilmiş olan gri andezit numunesinin kazısı sırasında yenilen keskinin görüntüsü görülmektedir. Buna ek olarak, kırılan bu keskinin bileme işleminin sonrasındaki görüntüsü de şekilde verilmiştir. Bileme işlemleri sırasında uç açılarının değişmemesine çok dikkat edilmiştir. Bu nedenle sıklıkla bileme işlemleri yarıda kesilerek keskinin uç açıları mikroskop altında kontrol edilmiştir.





Şekil 2.22. (a) Aşınan keski kilerin bilenmesi (b) Keski kilerin mikroskop altında incelenmesi (c) Kesme deneyi sırasında kırılmış bir keski

### 2.6.1. Etkileşimsiz Kesme Deneyleri

Etkileşimsiz kesme deneyi, birbirini izleyen kesme hatları arasındaki uzaklığın belirli bir değerin üzerinde tutularak kesme hatlarında birbirinden bağımsız olacak şekilde kesme yapılması anlamına gelmektedir (Bkz. Şekil 1.20). Etkileşimsiz kesmeler 1 mm ile 6 mm arasında değişen kesme derinliklerinde gerçekleştirilmiştir. Her numune her kesme derinliğinde en az üç kez kesilmiştir ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Yükleme hızı 300 N/sn olarak belirlenmiştir. Bu deneyler sırasında maksimum kesme kuvveti ve ortalama kesme kuvveti bulunmuştur. Ortalama kesme kuvveti ve oluşan pasa yardımı ile spesifik enerji değerleri hesaplanmıştır. Etkileşimsiz kesme deneylerinin sonuçları Tablo 2.3'te gösterilmiştir. Şekil 2.23'te basit kama tipi keski ile gerçekleştirilen kesme deneylerinden birtakım görüntüler bulunmaktadır.

Tablo 2.3. Basit kama tipi kesmelerle yapılan etkileşimsiz kesme deneylerinin sonuçları

Numune	Kesme Derinliği, d, mm	Pasa, Q, m <sup>3</sup> /km	Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	Maksimum Kesme Kuvveti, FC', N	Ortalama Kesme Kuvveti, FC, N	FC'/FC
Kırmızı andezit	1	0,012	42,83	901,30	499,57	1,82
	2	0,028	26,81	1508,96	749,02	2,01
	3	0,048	19,96	2203,85	955,94	2,30
	4	0,060	23,13	2759,29	1380,35	2,01
	5	0,091	14,13	3404,05	1285,22	2,72
	6	0,158	10,30	3793,87	1624,64	2,47
Yeşil tuf	1	0,012	31,78	638,54	365,47	1,78
	2	0,026	21,41	1003,75	548,70	1,85
	3	0,045	12,92	1277,16	588,80	2,18
	4	0,068	11,13	1652,47	745,40	2,23
	5	0,083	10,91	1961,22	873,55	2,25
	6	0,115	8,40	2268,81	953,71	2,40
Gri tuf	1	0,011	45,52	903,32	515,47	1,76
	2	0,027	24,64	1330,27	656,33	2,04
	3	0,054	16,29	1886,44	867,70	2,23
	4	0,080	11,49	1850,37	912,55	2,04
	5	0,109	11,96	3350,86	1307,94	2,55
	6	0,144	9,68	3147,93	1380,23	2,29
Kahverengi vitrik tuf	1	0,011	61,33	1032,16	686,06	1,51
	2	0,025	37,13	1562,22	928,10	1,69
	3	0,045	24,38	2112,68	1089,95	1,94
	4	0,076	17,23	2709,05	1303,24	2,08
	5	0,105	12,75	2879,59	1339,50	2,17
	6	0,102	15,92	4014,65	1624,83	2,47
Sarı vitrik tuf	1	0,011	35,66	719,76	388,67	1,86
	2	0,028	18,32	1035,87	517,39	2,00
	3	0,050	12,31	1280,60	610,53	2,10
	4	0,079	11,41	2042,51	898,68	2,33
	5	0,094	11,04	2141,03	1009,07	2,13
	6	0,167	7,07	2870,21	1143,15	2,52



Şekil 2.23. Basit kama tipi kesimler ile yapılan kesme deneylerinin ve kesilen numunelerinin görüntüleri

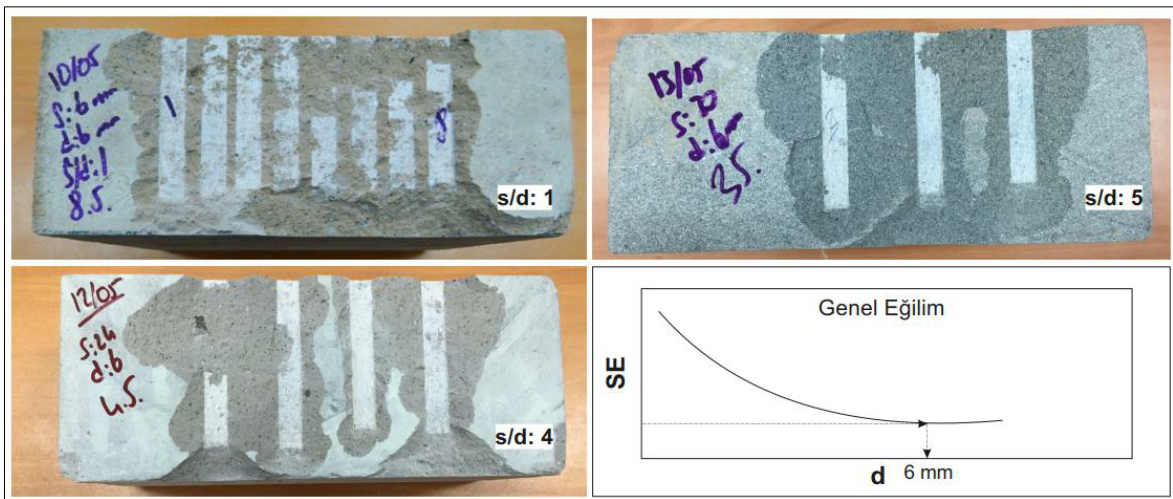
### 2.6.2. Etkileşimli Kesme Deneyleri

Kesimler kesici kafalara belirli bir dizilimde yerleştirildiğinden dolayı, etkileşimli kesme deneylerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kesimler birbirine öyle bir pozisyonda yerleştirilir ki birbiri ile etkileşirler. Etkileşimli kesme deneylerinde, DKKS ile bu deneylerin yapılabilip yapılamadığı test edilmiştir. Etkileşimsiz kesme deneylerinden elde edilen bilgilerden, spesifik enerjinin 6 mm kesme derinliği civarında yatay asimptota yakınsamaktadır. Bu durum Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma kısmında irdelenecektir ancak bu noktada etkileşimli kesme deneylerinin neden 6 mm kesme derinliğinden yapıldığı gösterilmiştir. Bundan dolayı, etkileşimli kesme deneylerinde kesme derinliği 6 mm olarak sabitlenmiştir. Kesimler arası mesafe (s) ise 3, 4, 5 ve 8 olarak seçilmiştir. Her deney en az üç kere tekrarlanmıştır. Etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları Tablo 2.4'te verilmiştir. Geliştirilen düşey kayaç kesme seti (DKKS) ile gerçekleştirilen etkileşimli kesme deneyleri ile ilgili görüntüler Şekil 2.24'te gösterilmiştir.



Tablo 2.4. Basit kama tipi keskilerle yapılan etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları

Numune Adı	Kesme Derinliği, s/d d, mm	Pasa, Q, m <sup>3</sup> /km	Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	Maksimum Kesme Kuvveti, FC', N	Ortalama Kesme Kuvveti, FC, N	FC'/FC	
Kırmızı andezit	6	3	0,135	7,05	3943,32	951,73	4,14
	6	4	0,171	5,11	3731,25	873,46	4,27
	6	5	0,118	7,29	3166,84	863,86	3,67
	6	8	0,158	10,30	3793,87	1624,64	2,47
Yeşil tuf	6	3	0,123	6,41	2666,97	787,87	3,39
	6	4	0,141	7,00	2849,19	989,19	2,88
	6	5	0,144	5,64	2545,91	813,52	3,13
	6	8	0,115	8,40	2268,81	953,71	2,40
Gri tuf	6	3	0,139	11,16	5366,48	1555,86	3,45
	6	4	0,170	5,32	3397,72	906,02	3,75
	6	5	0,149	8,61	3805,28	1282,38	2,97
	6	8	0,144	9,68	3147,93	1380,23	2,29
Kahverengi vitrik tuf	6	3	0,107	13,46	4711,65	1440,08	3,27
	6	4	0,127	12,58	4136,06	1593,75	2,60
	6	5	0,136	12,39	5151,79	1679,80	3,07
	6	8	0,102	15,92	4014,65	1624,83	2,47
Sarı vitrik tuf	6	3	0,136	9,36	4085,23	1274,65	3,20
	6	4	0,139	7,89	3730,79	1093,89	3,41
	6	5	0,194	4,59	2852,52	889,32	3,21
	6	8	0,167	7,07	2870,21	1143,15	2,52



Şekil 2.24. Çeşitli keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranında gerçekleştirilen kaya kesme deneylerinin görüntüleri ve etkileşimsiz kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji kesme derinliği grafiği

## 2.7. Düşey Kayaç Kesme Seti (DKKS) ile Karot Kesme Deneyinin Gerçekleştirilmesi

Karot kesme deneyi, daha önce de belirtildiği gibi, kaya kesme deney düzenekleri arasında en çok tekrar üretilen ve kollu galeri açma makinesi (KGAM) performans tahmininde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Daha önceki bir çalışmada (Yaşar, 2013), çeşitli kaya ve cevher numuneleri İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan karot kesme deneyinde McFeat-Smith ve Fowell (1979) tarafından önerilen standart yöntem kullanılarak kesme deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu yöntem ve deney düzeneği ile ilgili genel bilgiler önceki bölümlerde verilmiştir (Bkz. Bölüm 1.6.1 ve Şekil 1.24). Bu kayaç ve cevher örneklerinden alınan karotlar devam eden bu tez çalışması için dikkatli bir şekilde saklanmıştır. Bu numuneler, dolomitik kireçtaşı, traverten, granodiyorit, fosilli kumtaşı, litik tuf, vitrik tuf ve bakır cevheridir. Bu numunelere ait ince kesit görüntüleri Şekil 2.25'de verilmiştir. Bakır cevheri ve traverten numunesine ince kesit yapılmamıştır bundan dolayı açıklamaya ince kesit görüntüsüne yer verilmemiştir.

Dolomitik kireçtaşı, başlangıçta mikritik kireçtaşı olan kayaç yeniden kristallenmeler ile gelişen öz şekilli-yarı öz şekilli dolomit mineralleri ve fosil parçalarından meydana gelmektedir. Dolomit minerallerinin tane boyutu 0,01 mm ile 0,2 mm arasında değişmektedir. Önemli bir özellik olarak yeniden oluşan dolomit mineralleri fosil tanelerini kemirmektedir. Bu durum dolomit minerallerinin daha sonra geliştiğini göstermektedir.

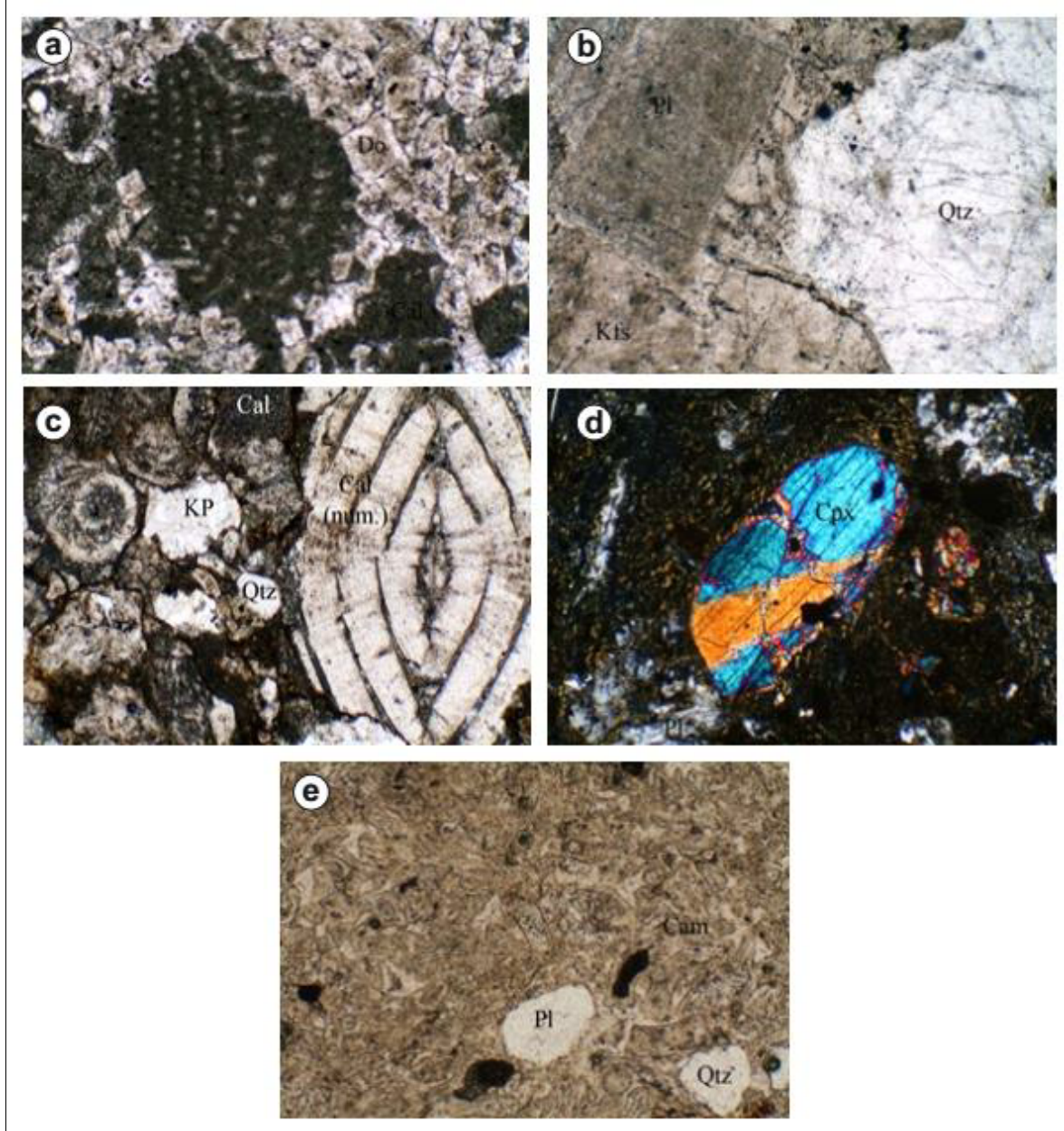
Granodiyoritte, orta taneli kuvars, alkali feldspat, plajiyoklas ve opak minerallerinden oluşan kayaçta mafik minerallerin bolluğu %1'in altıdadır. Feldspat mineralleri ayrışmalar ise olağandır.

Fosilli kumtaşı, kayaç kaba taneli köşeli kuvars, plajiyoklas minerallerinden ve kuvars minerallerinden oluşan kayaç parçalarından (kuvarsit) meydana gelmektedir. Plajiyoklas minerallerinin bir bölümü bozuşma sonucu killeşmelerdir.

Litik tuf, cam, plajiyoklas, klinopiroksen mineralleri ve bol miktarda volkanik kayaç parçalarından oluşmaktadır. Plajiyoklas ve piroksen mineralleri genellikle hamuru oluşturan cam içerisinde birbirlerinden bağımsız olarak görülmektedirler. Kayaç parçalarının matriksi oldukça alteredir.

Vitrik tufün %20'si tanelerden oluşmakta, %80'ni ise camdan meydana gelmektedir. %20'lik kesim köşeli taneli kuvars, plajiyoklas ve sanidin minerallerinden oluşmaktadır. Kuvars, plajiyoklas ve sanidin minerallerinin tane boyutları yaklaşık 0,01 mm ile 0,25 mm

arasında değişmektedir. Ayrıca çatlaklar boyunca oluşmuş klorit ve simektit türü mineraller mevcut. Kayacın bileşimi riyodasit-dasit olarak değerlendirilebilir.

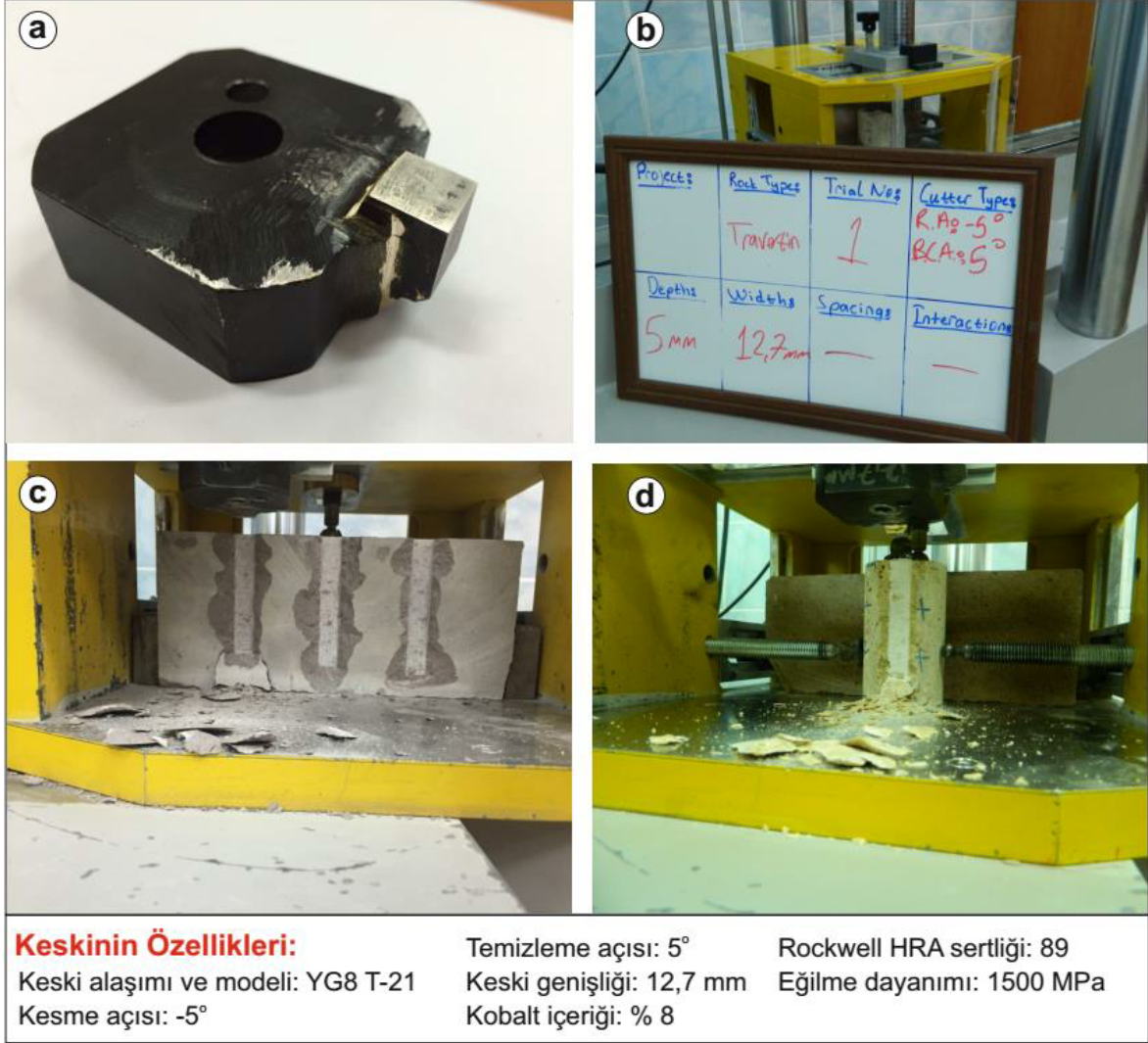


Şekil 2.25. Önceki çalışmadan kalan kayaçların ince kesit görüntüleri (a) Dolomitik kireçtaşı (b) Granadiyorit (c) Fosilli kumtaşı (d) Litik tüf (e) Vitrik tüf (Do: Dolomit; Cal: Kireçtaşı; Qtz: Kuvars; Kfs: Alkali feldspat; Pl: Plajiyoklas; Cpx: Klinopiroksen) (Yaşar vd., 2015).

Bu kayaç ve cevher örneklerinden hazırlanan yaklaşık 54 mm çapındaki karot numuneleri düşey kayaç kesme setinde (DKKS) karot kesme deneyine tabi tutulmuşlardır.



Her deney en az 3 kez tekrarlanmıştır ve yalnızca granodiyorit numunesi karotun kırılması nedeniyle bir kez kesilebilmiştir. DKKS’de karot kesme deneyi ve kullanılan keskinin özellikleri Şekil 2.26’da verilmiştir.



Şekil 2.26. (a) Karot kesme deneyinde kullanılan keski ve özellikleri (b) Deney öncesi hazırlık (c) Blok numune üzerinde kesme deneyi (d) Karot numunesi üzerinde kesme deneyi

İki deney düzeneğinden de 5 mm kesme derinliği için ortalama kesme kuvveti ve spesifik enerji değerleri kaydedilmiştir. Aynı nem durumlarında ve aynı kesme koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Her iki deneyden de elde edilen sonuçlar ve numunelerin tek eksenli basınç dayanımları Tablo 2.5’te verilmiştir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında kullanılmak üzere, çalışma kapsamında temin edilen 6 farklı magmatik kayaç ta DKKS’de

kesme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler blok numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her deney en az üç kez tekrarlanmıştır ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Magmatik kayaların kesilmesinden elde edilen sonuçlar Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.5. Karot kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar

Numune Adı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı, $\sigma_c$ , MPa	†Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	*Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	†Ortalama Kesme Kuvveti, FC, N/mm	*Ortalama Kesme Kuvveti, FC, N/mm
Dolomitik kireçtaşı <sup>1</sup>	88,51	42,21	37,27	688,27	740,76
Traverten <sup>2</sup>	42,55	23,25	32,72	375,28	483,29
Granodiyorit <sup>3</sup>	77,44	78,03	58,44	979,08	736,70
Fosilli kumtaşı <sup>4</sup>	120,07	50,77	42,85	840,12	921,04
Litik Tüf <sup>5</sup>	62,83	24,45	28,56	318,62	447,30
Bakır cevheri <sup>6</sup>	104,75	38,79	43,70	775,84	1127,81
Vitrik tüf <sup>7</sup>	63,91	15,96	18,03	243,22	312,84

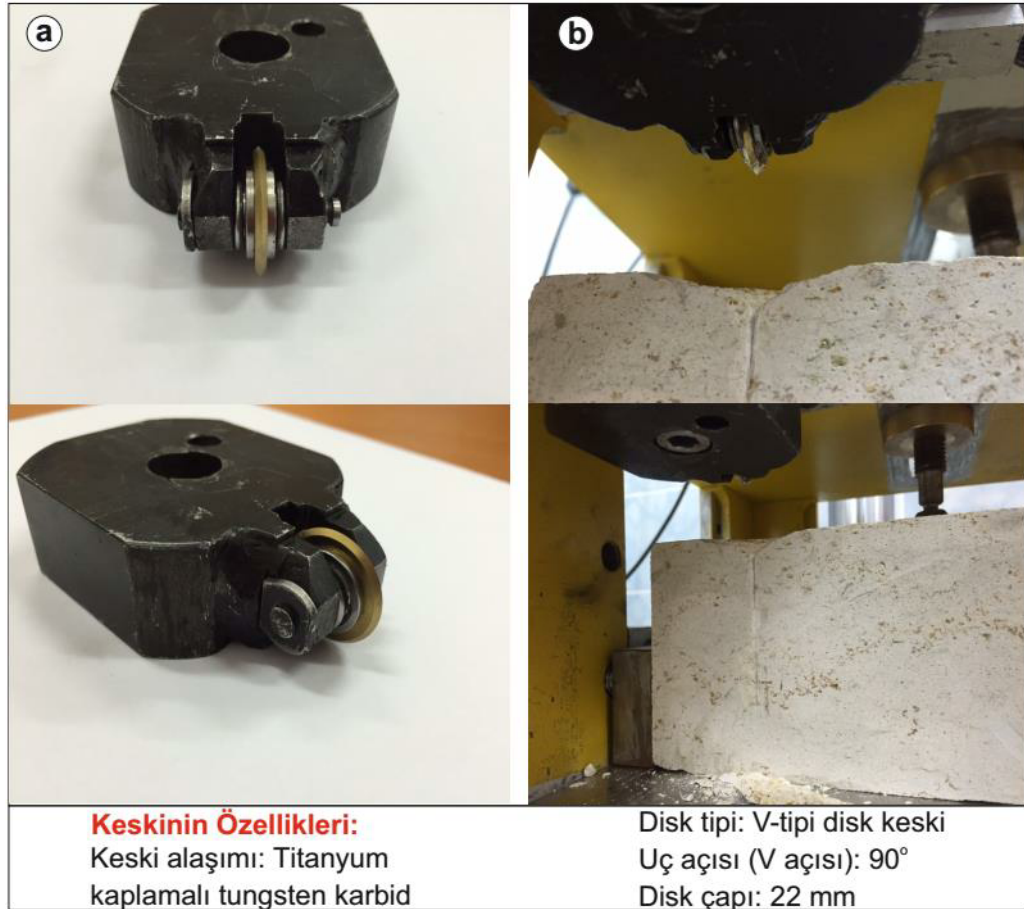
† DKKS'inden elde edilen sonuçlar  
\* İstanbul Teknik Üniversitesi'ndeki karot kesme deneyinden elde edilen sonuçlar

Tablo 2.6. Magmatik kayaların karot kesme deneyinde kesilmesinden elde edilen sonuçlar

Numune Adı	Kesme Derinliği, d, mm	Pasa, Q, m <sup>3</sup> /km	Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	Maksimum Kesme Kuvveti, FC', N	Ortalama Kesme Kuvveti, FC, N	FC'/FC
Kırmızı andezit	5	0,100	15,58	3645,42	1554,87	2,34
Gri andezit	5	0,104	34,10	9721,60	3493,36	2,78
Yeşil tüf	5	0,096	13,24	3341,15	1265,82	2,64
Gri tüf	5	0,117	15,73	4438,25	1799,56	2,47
Kahverengi vitrik tüf	5	0,104	17,24	4677,52	1805,68	2,56
Sarı vitrik tüf	5	0,105	11,48	3269,85	1206,78	2,71

## 2.8. Disk Kesimler ile Kesme Denemeleri

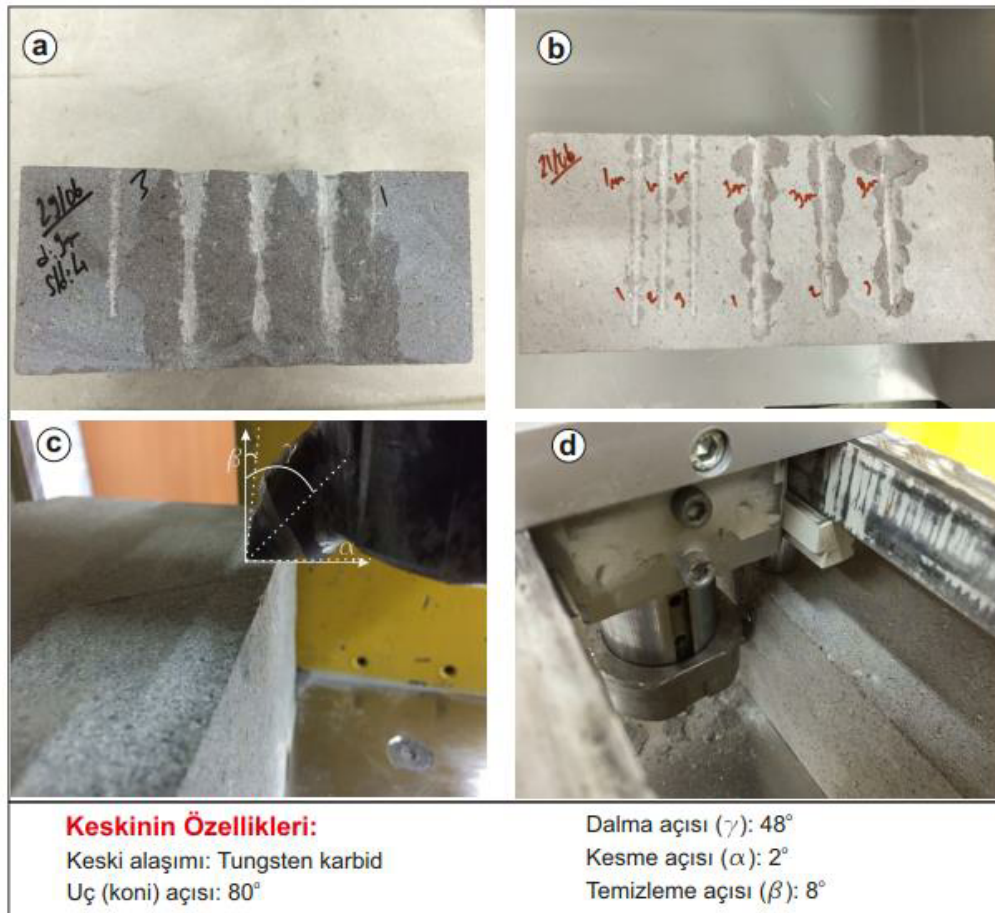
Kama tipi keskilere ek olarak çalışma kapsamında mini-disk keskilere kullanılarak da kesme denemeleri gerçekleştirilmiştir. Mini-disk keskilere ilgili herhangi bir veri toplanmamış, yalnızca düşey kayaç kesme setinde (DKKS) bu tip keskilere ile kesme yapıp yapılamayacağı denenmiştir. Bu amaç için Şekil 2.27’de görülen V-tipi mini-disk keski kullanılarak kesme yapılmıştır. Bu keskilere metalürjik bileşimi ile ilgili herhangi bir bilgi bulunmamakla birlikte tungsten karbid malzemedene yapıldığı bilinmektedir. Ancak kobalt içeriği hakkında bir bilgi bulunmamaktadır. Mini-disk keskilere ile kesmede ancak tuf numuneleri kesme işlemine tabi tutulabilmiştir, andezit numuneleri kesilememiştir ve kesme sırasında disk kırılmıştır. Yalnızca deneme amaçlı yapılan bu çalışma daha ileri safhalara taşınmamıştır. Bu tip keskilere ile kesme işleminde farklı alaşımlardan yapılmış daha az kırılğan keskilere ihtiyaç bulunduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.27. (a) V kesitli mini-disk keski (d) Mini-disk keski ile sarı vitrik tuf numunesinin kesilmesi

## 2.9. Konik Keskiler ile Kesme Deneyleri

Konik keski, kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) çok büyük bir çoğunluğunda kullanılmaktadırlar. Konik keski ile ilgili en önemli iki parametre uç açısı ve dalma açısıdır. Uç açısı KGAM’de 75-80° civarındadır (Bilgin vd., 2006). Konik keski ile dalma açısı ise genellikle 40-55° arasında seçilmektedir. Zayıf kayalar için 40°, dayanımı yüksek kayalarda ise 55° olacak şekilde seçilmektedir (Hurt, 1980). Saha kesme koşullarının bu çalışmada gerçekçi olarak canlandırılabilmesi için uç açısı 80° olan dalma açısı ise 48° olan bir konik keski kesme deneylerinde kullanılmıştır. Hem etkileşimli hem de etkileşimsiz kesme modlarında deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan keski ve deneyin gerçekleştirilmesi Şekil 2.28’de verilmiştir. Deneylerdeki yükleme/kesme hızı önceki deneyler ile aynı olacak şekilde belirlenmiştir.

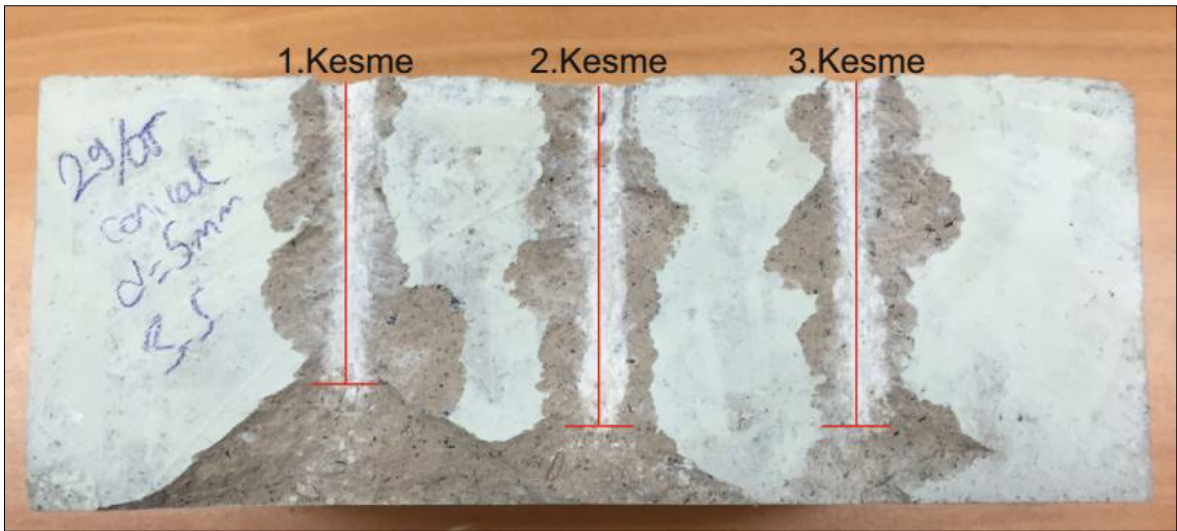


Şekil 2.28. (a) Konik keski ile etkileşimli kesme deneyleri (b) Konik keski ile etkileşimsiz kesme deneyleri (c) Konik keskinin özellikleri (d) Konik keski ile kaya kesme deneyi



### 2.9.1. Konik Keskiler ile Etkileşimsiz Kesme Deneyleri

Etkileşimsiz kesme deneyleri 1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm ve 9 mm kesme derinliklerinde yapılmıştır. Kesme deneyleri Şekil 2.28’de görülen keski yardımı ile nem içermeyen kuru numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı basit kama tipi keskinde olduğu gibi 300 N/sn olarak belirlenmiştir. Deneylerinde 10 cm x 23 cm x 20 cm boyutlarındaki kayaç numuneleri kullanılmıştır. Bu kayaç numuneleri kırmızı andezit, gri andezit, yeşil tüf, gri tüf, kahverengi vitrik tüf ve sarı vitrik tüftür. Dikkat edilmesi gereken bir husus gri andezit numunesi basit kama tipi keski ile kesilememiştir. Ancak, konik keski yardımı ile gri andezit numunesi rahat bir şekilde kesilebilmiştir. Her kesme derinliği için deneyler en az 3-4 kez tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Deneylerden elde edilen pasa, spesifik enerji, ortalama kesme kuvveti, maksimum kesme kuvveti ve maksimum kesme kuvvetinin ortalama kesme kuvvetine oranı Tablo 2.7’de verilmiştir. Şekil 2.29’da kırmızı andezit numunesinin konik keski ile etkileşimsiz moda kesilmesinden sonra oluşan kesme hatları görülmektedir. Kırmızı çizgiler kesme hattının uzunluğunu belirtmektedir. Çizgilerin bittiği noktalar kesme işleminin bittiği nokta olarak değerlendirilebilir. Alt taraftan kopan büyük parçalar hesaplama işlemlerinde hesaba katılmamaktadır. Ayrıca, bu noktadan sonra ortaya çıkan kesme kuvveti verisi de dikkate alınmamaktadır (Bkz. Şekil 2.12).



Şekil 2.29. Konik keski ile etkileşimsiz moda kesilen kırmızı andezit numunesi (d = 5 mm)

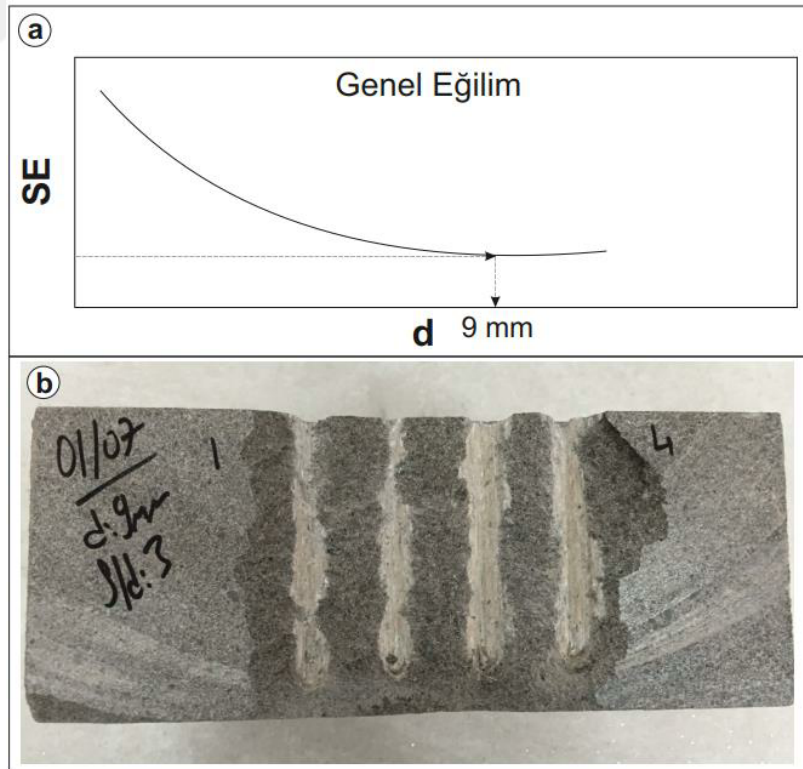


Tablo 2.7. Konik keskilerle yapılan etkileşimsiz kesme deneylerinin sonuçları

Numune Adı	Kesme Derinliği, d, mm	Pasa, Q, m <sup>3</sup> /km	Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	Ortalama Kesme Kuvveti, FC, N	Maksimum Kesme Kuvveti, FC', N	FC'/ FC
Kırmızı andezit	1	0,002	149,29	316,41	783,09	2,47
	3	0,024	48,83	1172,28	2596,83	2,22
	5	0,063	35,25	2203,92	4852,07	2,21
	7	0,100	23,67	2336,45	5804,11	2,52
	9	0,149	20,31	2906,66	6407,87	2,21
Gri andezit	1	0,008	157,45	1263,81	3119,95	2,45
	3	0,033	92,31	3043,55	7599,05	2,51
	5	0,051	95,41	4846,32	10032,70	2,07
	7	0,091	66,32	6034,53	14631,21	2,43
	9	0,206	37,83	7505,25	19878,91	2,65
Yeşil tuf	1	0,004	49,13	198,52	411,88	2,07
	3	0,042	21,19	897,78	1720,75	1,93
	5	0,071	22,82	1579,63	3305,65	2,11
	7	0,115	15,30	1760,25	3626,65	2,07
	9	0,169	14,15	2383,29	5448,41	2,29
Gri tuf	1	0,007	59,88	411,08	912,51	2,24
	3	0,026	39,83	1015,65	2231,76	2,20
	5	0,062	26,43	1641,76	3651,09	2,25
	7	0,118	19,15	2260,18	5391,29	2,39
	9	0,165	17,08	2780,72	6241,66	2,25
Kahverengi vitrik tuf	1	0,005	80,50	431,93	1134,95	2,62
	3	0,028	43,19	1205,00	2325,89	1,93
	5	0,070	30,07	2056,79	4828,20	2,37
	7	0,132	25,60	3372,77	7627,51	2,26
	9	0,188	23,62	4411,13	9266,84	2,09
Sarı vitrik tuf	1	0,005	61,95	303,20	613,59	2,03
	3	0,030	29,66	881,42	1808,99	2,06
	5	0,092	18,05	1648,65	3593,25	2,18
	7	0,131	15,67	1992,99	4484,26	2,25
	9	0,197	15,59	2965,22	6336,92	2,11

### 2.9.2. Konik Keskiler ile Etkileşimli Kesme Deneyleri

Etkileşimli kesme deneylerindeki hedef, seçilen kayaç numunesi için optimum kesme koşulunun ve konfigürasyonunun bulunmasıdır. En düşük spesifik enerji değerine karşılık gelen kesmeler arası mesafe kesme derinliği değeri, o kayaç için optimum kesme şartlarını temsil etmektedir. Etkileşimsiz kesme deneylerinde spesifik enerji değerlerinin 9 mm civarında yatay asimptota yakınsadığı görülmüştür. Bundan dolayı etkileşimli kesme deneyleri yalnızca 9 mm kesme derinliğinde yapılmıştır ve kesmeler arası mesafe 18 mm, 27 mm, 36 mm, 45 mm ve 72 mm olarak seçilmiştir. Kesme deneyleri Şekil 2.28’de görülen keski yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Kesme deneyleri nem içermeyen kuru numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.30’da gri tuf numunesi üzerinde gerçekleştirilen kesme deneyi ve etkileşimsiz kesme deneylerinden elde edilen SE-d grafiği görülmektedir. Deneylerden elde edilen pasa, spesifik enerji, ortalama kesme kuvveti, maksimum kesme kuvveti ve maksimum kesme kuvvetinin ortalama kesme kuvvetine oranı Tablo 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.30. (a) Etkileşimsiz kesme deneylerinden elde edilen SE-d grafiği (b) Gri tuf numunesi üzerinde yapılan etkileşimli kesme deneyi ( $d = 9$  mm,  $s = 27$  mm).

Tablo 2.8. Konik keskilerle yapılan etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları

Numune Adı	Kesme Derinliği, d, mm	s/d	Pasa, Q, m <sup>3</sup> /km	Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	Ortalama Kesme Kuvveti, FC, N	Maksimum Kesme Kuvveti, FC', N	FC'/FC
Kırmızı andezit	9	2	0,138	19,26	2661,30	8908,85	3,35
		3	0,145	21,65	3146,62	8386,81	2,67
		4	0,164	17,34	2846,71	7466,95	2,62
		5	0,138	21,39	2950,98	8787,99	2,98
		8	0,149	20,31	2906,66	6407,87	2,21
Gri andezit	9	2	0,164	58,18	9540,39	26559,20	2,78
		3	0,137	55,03	7535,00	19631,07	2,61
		4	0,208	31,28	6520,66	18058,07	2,77
		5	0,197	30,19	5952,00	19459,34	3,27
		8	0,206	37,83	7505,25	19878,91	2,65
Yeşil tuf	9	2	0,140	18,61	2600,17	6197,39	2,38
		3	0,151	20,35	3067,59	6582,46	2,15
		4	0,208	10,76	2243,00	5828,32	2,60
		5	0,188	12,45	2342,35	6099,72	2,60
		8	0,169	14,15	2383,29	5448,41	2,29
Gri tuf	9	2	0,158	18,42	2901,82	7248,28	2,50
		3	0,166	20,28	3374,27	8272,64	2,45
		4	0,161	17,49	2820,36	6452,06	2,29
		5	0,182	16,83	3059,72	8376,91	2,74
		8	0,165	17,08	2780,72	6241,66	2,25
Kahverengi vitrik tuf	9	2	0,162	37,11	6011,19	12399,48	2,06
		3	0,185	27,42	5067,59	11847,35	2,34
		4	0,203	21,24	4313,21	12898,43	2,99
		5	0,196	26,07	5100,40	13174,53	2,58
		8	0,188	23,62	4411,13	9266,84	2,09
Sarı vitrik tuf	9	2	0,139	16,71	2315,16	6451,73	2,79
		3	0,211	13,62	2872,79	7905,14	2,75
		4	0,168	17,93	3008,93	8222,72	2,73
		5	0,203	15,30	3111,60	7824,97	2,51
		8	0,197	15,59	2965,22	6336,92	2,11

## 2.10. Arazi Çalışmaları

Kaya kesme deneylerinin saha uygulamalarında kullanılabilmesi adına kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) çalıştığı sahalar ziyaret edilmiştir. Ziyaret edilen sahalardan KGAM'nin kazı yaptığı aynalardan örnekler alınmış ve makinelerin kazı hızları ölçülmüştür. Bu çalışmada KGAM performans değerlendirmesinde yalnızca net kazı hızı konusu dikkate alındığı için, keski sarfiyatı ve makine kullanım oranı ile ilgili veri toplaması yapılmamıştır. Saha olarak bir adet yeraltı linyit işletmesi ve bir adet yeraltı soğuk hava deposu tüneli şantiyesi ziyaret edilmiştir. Bu sahalarda çalışan KGAM'den biri aksiyel, diğeri tambur tipi kesici kafaya sahiptir. Bu sahalardan alınan kayaç numuneleri üzerinde, mineralojik ve petrografik analiz, fiziksel ve mekanik deneyler ve kaya kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

### 2.10.1. Örnek Uygulama Sahası 1: Yeraltı Linyit İşletmesi

Henüz hazırlık aşamasında olan bu linyit işletmesi İzmir ilinin Kınık ilçesi sınırları bulunmaktadır. İşletmenin yer bulduru haritası Şekil 2.31'de verilmiştir. Henüz üretime geçilmemiş olup, işletmenin ana desandrisi sürülmektedir. Maden işletmesi, üretime geçilmesinin ardından yıllık 4.500.000 ton linyit üretmeyi hedeflemektedir. Maden işletmeye alınmasının ardından Türkiye'nin en derin (700-1200 m) ve en büyük linyit işletmelerinden biri olacaktır (Kahraman, 2017).

Desandrinin sürülmesinde Sandvik MR340X model tambur tipi bir KGAM kullanılmaktadır. Kullanılan KGAM'nin özellikleri ve kesici kafanın görüntüsü Tablo 2.9'da verilmiştir. Ayrıca, makinenin resmi önceki bölümlerde verildiği için bu bölümde tekrar eklenmemiştir (Bkz. Şekil 1.2 (b)) Sürülen desandrinin eğimi  $-14^{\circ}$  ve kesit alanı  $24,3 \text{ m}^2$ 'dir. Sahada tahkimat olarak çelik hasır, rijit bağ ve püskürtme beton birlikte kullanılmaktadır. Saha çalışması sırasında geçilen formasyon volkanik kumtaşı olup ve aynada herhangi bir süreksizlik bulunmamaktadır. Geçilen volkanik kumtaşı formasyonu için makinenin net kazı hızı ölçülmüştür, geçilen aynadan blok numuneler temin edilmiştir. Makinenin çalışmadığı zamanlar için ve makine kullanım oranı gibi konular için herhangi bir veri kaydedilmemiştir.



Şekil 2.31. Arazi çalışmalarının yapıldığı sahaların yer bulduru haritası

Tablo 2.9. Kullanılan KGAM'nin özellikleri ve kesici kafa

Makine özellikleri	
Marka	Sandvik
Model	MR340X
Toplam ağırlık	55 ton
Toplam güç	357 kW
Kesme gücü	200 kW
Kesici kafa tipi	Tambur
Kullanılan keski	Konik



Alınan blok numuneler dikkatlice korunarak mevcut nemi muhafaza edilmeye çalışılmıştır ve blok numuneler Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'na getirilmiştir. Sahada yapılan ölçümler sırasında KGAM'nin bu

formasyondaki net kazı hızı 29,16 m<sup>3</sup>/s olarak tespit edilmiştir. Makinenin yalnızca kesme işlemi sırasında geçirdiği süre dikkate alınarak net kazı hızı hesaplanmıştır. İşletme bir linyit işletmesi olduğu için güvenlik nedeniyle yeraltından fazla miktarda fotoğraf alınmasına izin verilmemiştir. Yalnızca Tablo 2.9’da görülen fotoğraf alınabilmiştir. Ancak ilk bölümde Şekil 1.2 (b)’de gösterilen KGAM, bu işletmede çalışan Sandvik MR340X makinesi ile aynı makinedir.

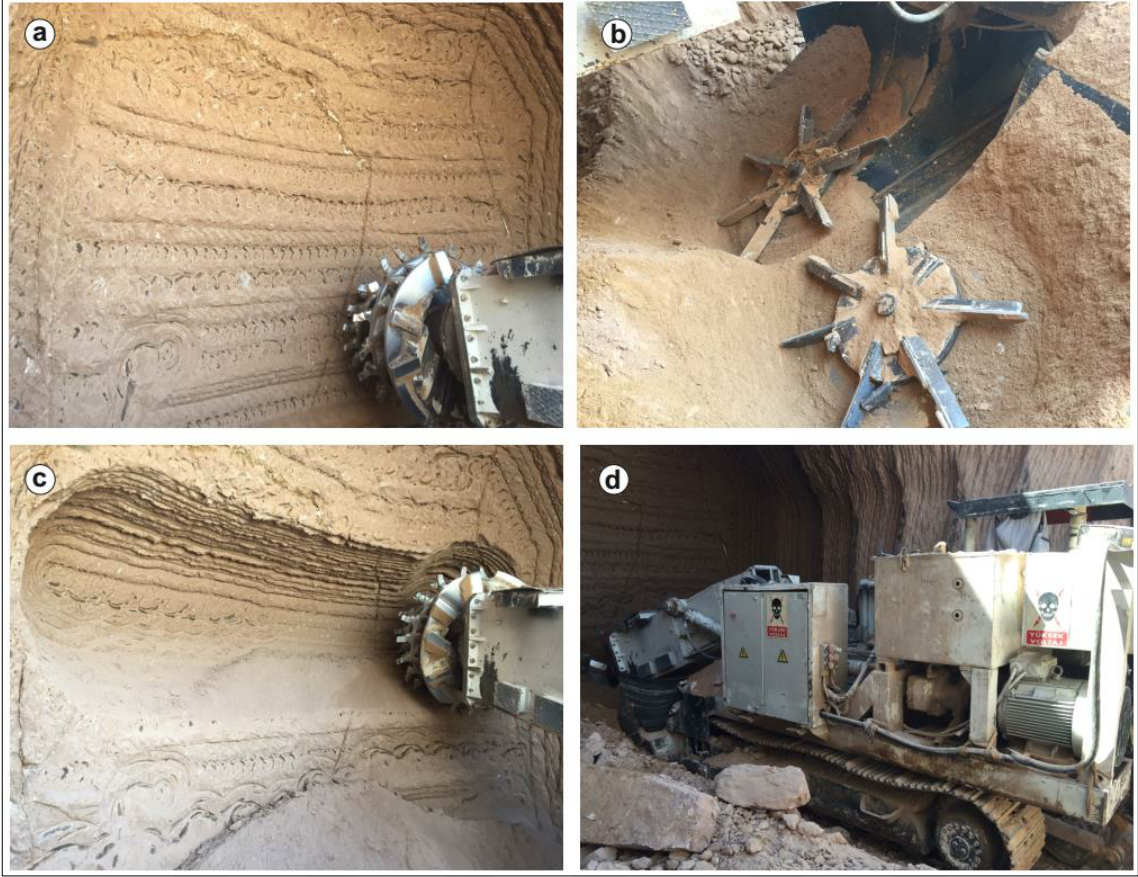
### **2.10.2. Örnek Uygulama Sahası 2: Yeraltı Soğuk Hava Deposu Tüneli**

Bu saha Nevşehir ilinin Ürgüp ilçesinde bulunmaktadır ve yer bulduru haritası Şekil 2.31’de verilmiştir. İç Anadolu Bölgesi’nde özellikle Nevşehir civarında, bu tip depolar çok sıklıkla inşa edilmektedir. Bu depoların inşasında ise genellikle kollu galeri açma makinelerine (KGAM) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sahada yerel üretici tarafından imal edilen bir KGAM çalışmaktadır. Geçilen formasyon kristal tüftür ve kazı aynası toplamda iki adet süreksizlik içerdiği için masif olarak kabul edilmiştir.

Kullanılan KGAM aksiyel tip bir makinedir ve Şekil 2.32’de gösterilmiştir. Makinenin kesme gücü 110 kW, ağırlığı ise 42 ton’dur. KGAM 25 m<sup>2</sup>’lik bir açıklık kazmaktadır. Aynadan blok numuneler temin edilmiştir ve dikkatli bir şekilde korunarak nemini kaybetmesine izin vermeden laboratuvara getirilmiştir. Bu sahada da yalnızca net kazı hızı ölçülmüş diğer performans parametreleri ile ilgili herhangi bir veri toplanmamıştır. Bu depolarda genellikle tahkimat kullanılmamaktadır ve bundan dolayı makineler maksimum verimde kesme yapmaktadırlar. Sahada ölçülen net kazı hızı 74,07 m<sup>3</sup>/s’tir. Sahadaki KGAM’de keski olarak radyal kesimler kullanılmaktadır.

### **2.10.3. Sahadan Alınan Numunelerin Karakterizasyonu**

Kollu galeri açma makinesi (KGAM) çalışma sahalarından temin edilen kayaç numuneleri, mineralojik-petrografik özelliklerinin, fiziksel ve mekanik özelliklerinin ve kesilebilirlik özelliklerinin belirlenebilmesi için Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı’na getirilmiştir.

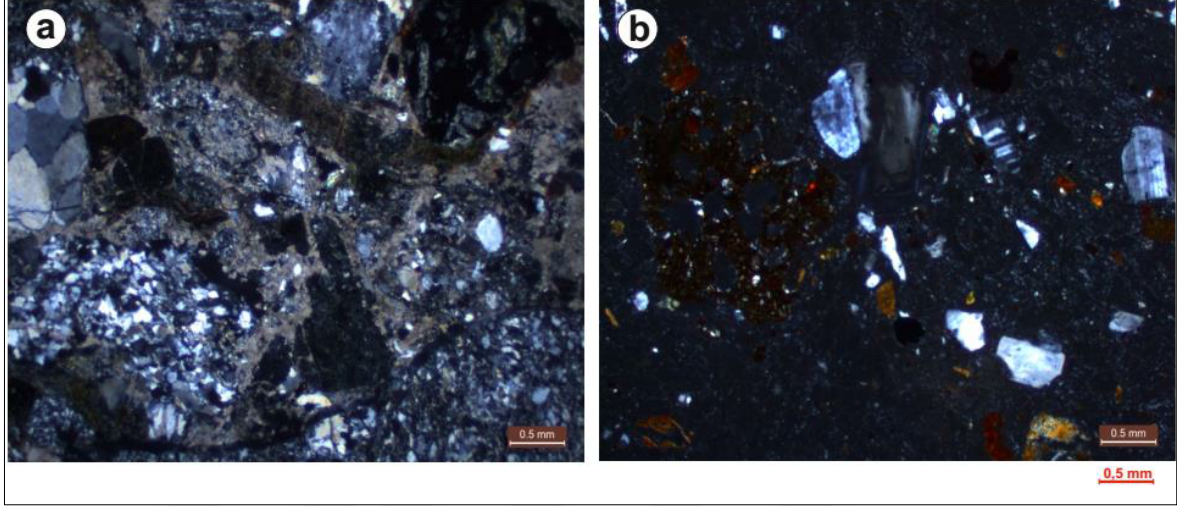


Şekil 2.32. Yeraltı soğuk hava deposunda çalışan KGAM (a) KGAM kesici kafa ve aynanın durumu (b) KGAM toplayıcı ünitesi (c) KGAM'nin kazı sırasındaki görüntüsü (d) KGAM'nin genel görünüşü

Öncelikle, kayaç numunelerinin mineralojik ve petrografik özelliklerinin belirlenebilmesi için örnekler MTA Genel Müdürlüğü'ne gönderilmiştir. Burada yapılan analizler sonucunda birinci sahadan alınan örneğin volkanik kumtaşı, ikinci sahadan alınan numunenin ise kristal tuf olduğu belirlenmiştir. Örneklerin ince kesit görüntüleri Şekil 2.33'te verilmiştir. Mineralojik-petrografik inceleme sonucunda kayaçlar hakkındaki genel açıklamalar da MTA'da yaptırılan analizlerden elde edilmiştir. Volkanik kumtaşı numunesi masif ve kırıntılı bir dokuya sahip ve küçük, orta ve iri tanelidir. Örnek büyük ölçüde kaba kum boyutunda tanelerden oluşmakta olup, çakıl boyu tanelere de rastlanmaktadır. Olası biyotit mineralleri opasitleşmiş, olası amfibol mineralleri ise kloritleşmiştir. Matriks olası volkan külü ve volkan tozundan oluşmakta olup, yaygın şekilde karbonatlaşma ile serisitleşme görülmektedir. Kristal tuf ise masif ve kırıntılı bir dokuya sahip, ayrıca küçük, orta ve iri tanelidir. Örnek plajiyoklas grubu minerallerden, biyotit



minerallerinden, kayaç parçalarından, pomza tanelerinden, piroksen grubu minerallerden tali bileşen olarak da opak minerallerden oluşmaktadır.

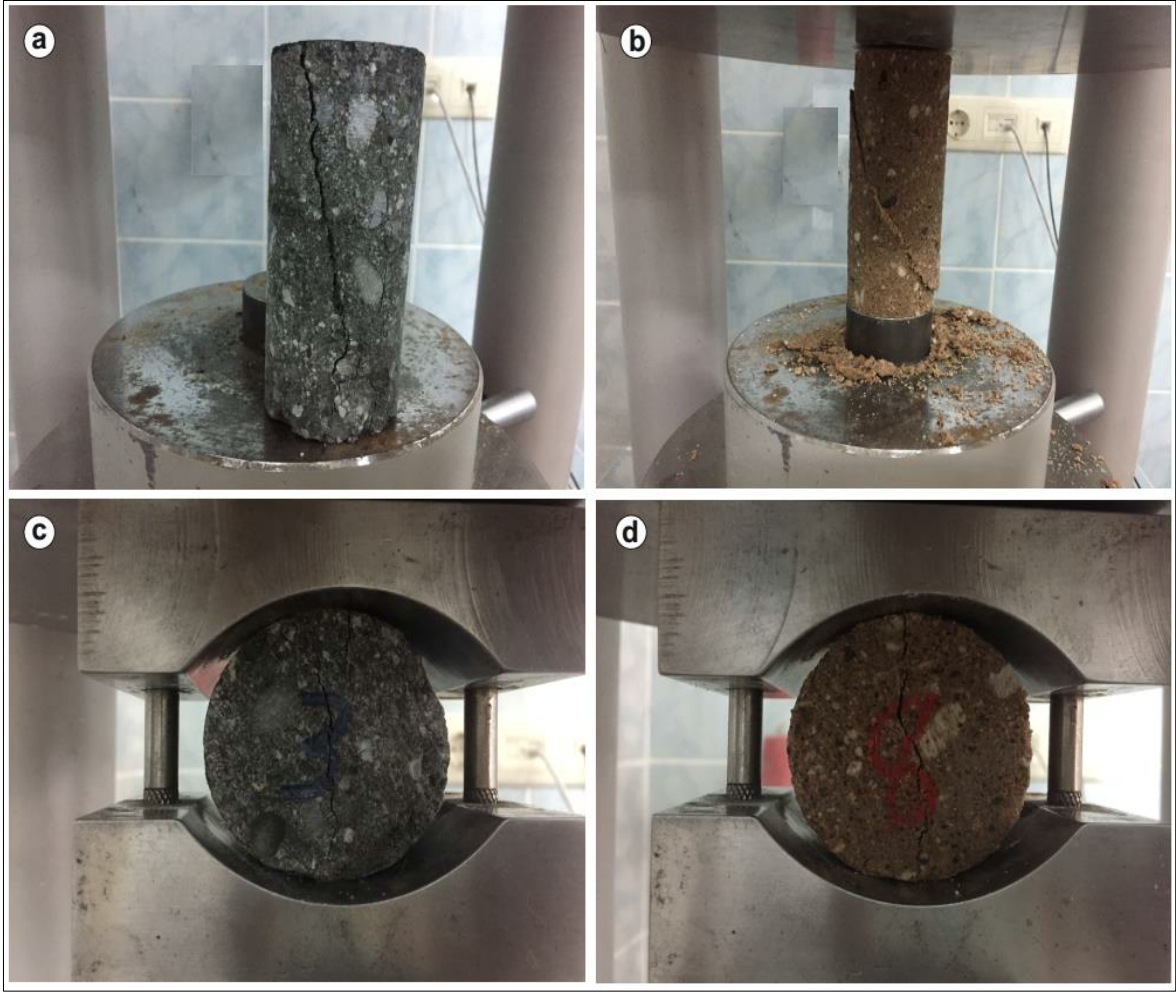


Şekil 2.33. Sahadan temin edilen numunelerin ince kesit görüntüleri (a) Volkanik kumtaşı (b) Kristal tuf

Mineralojik-petrografik incelemenin ardından kayaçların fiziksel ve mekanik özellikler açısından karakterizasyonuna başlanmıştır. Bu amaç için öncelikle kuru, doymun yoğunluk ve görünür porozite deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler için Bölüm 2.5.1’de uygulanan yöntemin aynısı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.10’da verilmiştir.

Numunelerin karakterizasyonu için son olarak tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler aynı şekilde Bölüm 2.5.1’de uygulanan yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Yalnız numune yetersizliğinden dolayı tüm numuneler için tek eksenli basınç dayanımı deneyi en az 3, dolaylı çekme dayanımı deneyi en az 9 kez tekrarlanmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 2.11’de gösterilmiştir. Sahadan alınan numuneler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda kayaçların sahadaki nem içerikleri belirlenmiştir. Bu inceleme sonucunda numunelerin sahada doymun halde bulunduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı, tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve diğer kesme deneylerinin tümü doğal nem durumu olan doymun haldeki numuneler üzerinde uygulanmıştır. Şekil 2.34’te tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımı deneylerinde kırılan numunelerin görüntüleri verilmiştir.





Şekil 2.34. (a) Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kırılan volkanik kumtaşı numunesi (b) Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kırılan kristal tuf numunesi (c) Dolaylı çekme dayanımı deneyinde kırılan volkanik kumtaşı numunesi (d) Dolaylı çekme dayanımı deneyinde kırılan kristal tuf numunesi

Tablo 2.10. Saha numunelerinin fiziksel özellikleri

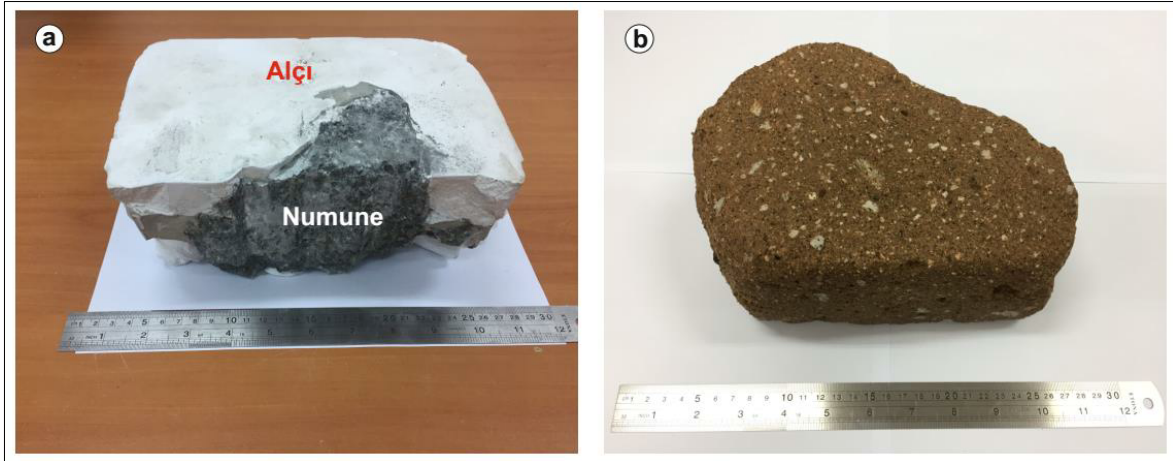
Numune Adı	Doğun Yoğunluk, $\rho_{\text{doğun}}, \text{g/cm}^3$	Kuru Yoğunluk, $\rho_{\text{kuru}}, \text{g/cm}^3$	Görünür Porozite, p, %
Volkanik kumtaşı	2,55	2,54	4,42
Kristal tuf	1,59	1,25	35,85

Tablo 2.11. Saha numunelerinin mekanik özellikleri

Numune Adı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı, $\sigma_c$ , MPa	Dolaylı Çekme Dayanımı, $\sigma_{bt}$ , MPa	Direkt Çekme Dayanımı, $\sigma_t$ , MPa
Volkanik kumtaşı	12,34	1,33	1,06
Kristal tuf	2,44	0,74	0,59

#### 2.10.4. Saha Numuneleri Üzerinde Kesme Deneyleri

Saha koşullarının laboratuvarında canlandırılabilmesi için sahadan elde edilen blok numuneler kesme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Bu deneylerde konik ve radyal keski kullanılmıştır. Birinci saha uygulamasındaki kollu galeri açma makinesinde (KGAM) konik keski kullanıldığı için kesme deneylerinde konik keski kullanılmıştır. Diğer yandan, ikinci saha uygulamasındaki KGAM'de radyal tip keski kullanıldığı için laboratuvardaki kesme deneylerinde radyal tip keski kullanılmıştır. Kesme deneylerinde kullanılan blok numuneler Şekil 2.35'te verilmiştir.



Şekil 2.35. Sahadan alınan ve kaya kesme deneylerinde kullanılan blok numuneler (a) alçı içine sabitlenmiş volkanik kumtaşı (b) Kristal tuf

Düzgün şekilli olmayan numunelerin, geliştirilen düşey kayaç kesme setinde (DKKS) sabitlenmesi konusunda zorluklar yaşanmaktadır. Bundan dolayı, şekli bozuk olan volkanik kumtaşı numunesi alçı içine sabitlenerek kullanılmıştır. Bu ve buna benzer durumlarda

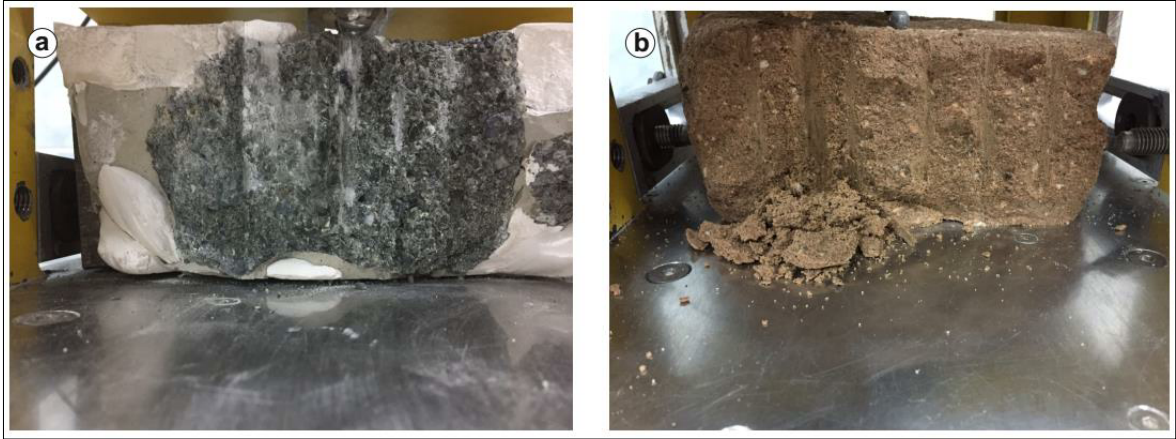
bozuk şekilli olan saha numunelerinin deneye tabi tutulabilmesi için alçı ya da beton gibi bağlayıcı ve şekil verilebilir olan yapay malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü, sahadan temin edilen numunelerden her zaman mükemmel şekilli blok numunelerin elde edilebilmesi mümkün değildir. Kristal tuf numunesi ise düzgün bir geometriye sahip olduğu için bu işleme gerek kalmadan deney yapılabilmiştir. Tüm numuneler doğal (doygun) nem içeriğine sahip şekilde kesme deneylerine tabi tutulmuştur.

İlerleyen kısımlarda kullanılmak üzere, elde edilen blok numuneler karot kesme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler Şekil 2.26'da belirtilen şartlar altında gerçekleştirilmiştir ve tüm deneyler en az 3-4 kez tekrar edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.12'de verilmiştir.

Tablo 2.12. Saha numuneleri üzerinde gerçekleştirilen karot kesme deneyinin sonuçları

Numune	Kesme Derinliği, d, mm	Pasa, Q, m <sup>3</sup> /km	Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	Ortalama Kesme Kuvveti, FC, N
Volkanik kumtaşı	5	0,175	7,08	1258,17
Kristal tuf	5	0,108	2,03	215,79

Optimum kesme koşullarının bulunabilmesi için saha numuneleri üzerinde konik keskiler ile etkileşimli kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha önceki kısımlarda, konik kesme deneylerinden elde edilen veriler ışığında kesme derinliğinin 9 mm olması gerektiğine karar verilmiştir (Şekil 2.30 (a)). Keskiler arası mesafe ise 18 mm, 27 mm, 36 mm, 45 mm ve 72 mm olarak seçilmiştir. 72 mm keskiler arası mesafe etkileşimsiz kesme koşullarını temsil etmektedir. Her kesme koşulu için deneyler en az 3 kez tekrar edilmiştir. İkinci sahada çalışan KGAM üzerinde radyal keskiler kullanılmasına rağmen, kristal tuf numunesinin üzerinde de konik keskiler ile kesme deneyleri yapılmıştır ve buradan elde edilen sonuçlar ilerleyen kısımlarda kullanılacaktır. Deneyler Şekil 2.28'de görülen keski yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Sahada çalışan makinenin üzerinde bulunan konik keskilerin geometrisi bu deneyde kullanılan keski ile benzeşmektedir. Şekil 2.36'da volkanik kumtaşı ve kristal tuf numunelerinin konik keski yardımı ile kesilmesi gösterilmektedir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar ise Tablo 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.36. Saha numuneleri üzerinde konik keski ile etkileşimli kesme deneyleri (a) Volkanik kumtaşı (b) Kristal tuf

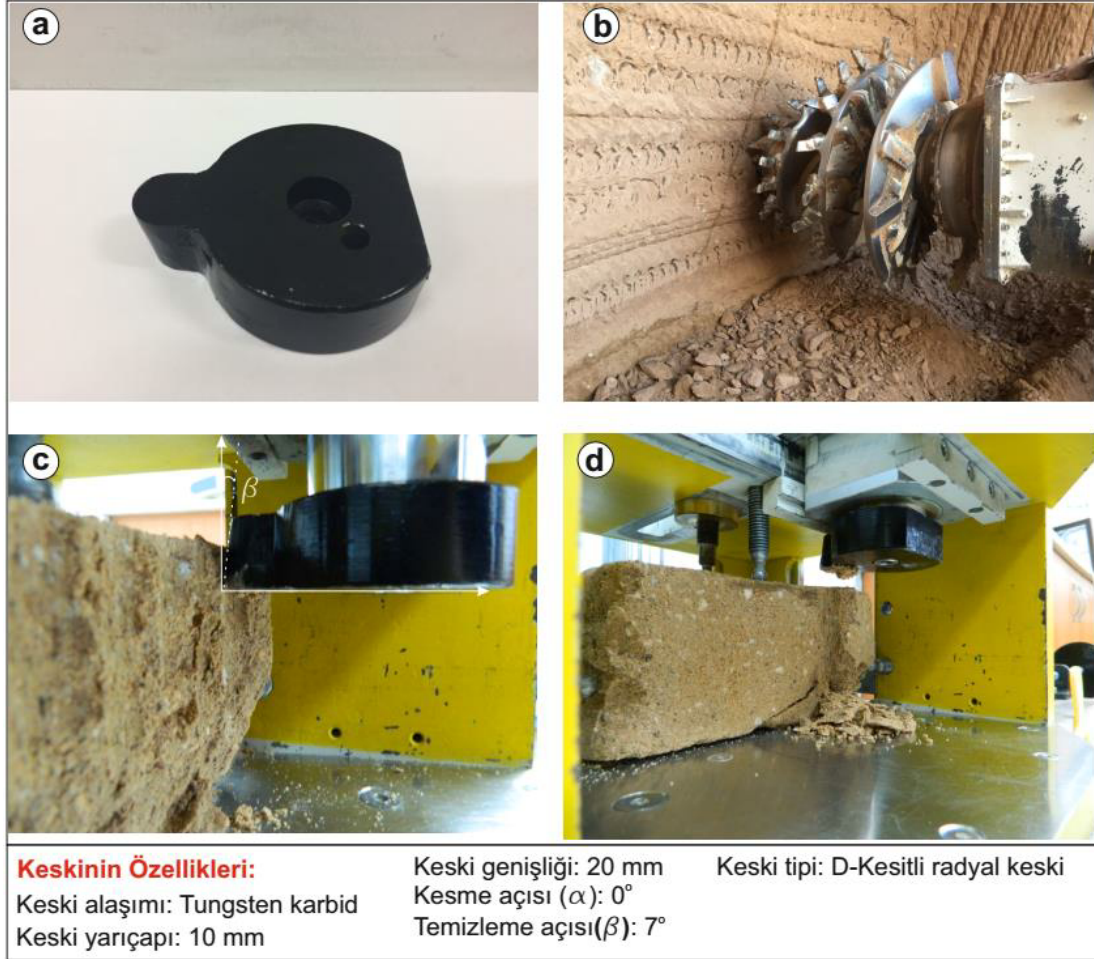
Tablo 2.13. Saha numuneleri üzerinde gerçekleştirilen konik keski ile etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları

Numune	Kesme Derinliği, d, mm	s/d	Pasa, Q, m <sup>3</sup> /km	Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	Ortalama Kesme Kuvveti, FC, N	Maksimum Kesme Kuvveti, FC', N	FC'/FC
Volkanik kumtaşı	9	2	0,143	5,90	840,50	2744,72	3,27
		3	0,239	4,19	1003,36	1940,01	1,93
		4	0,220	4,48	984,74	2239,24	2,27
		8	0,160	5,79	924,10	2089,63	2,26
Kristal tuf	9	3	0,180	2,49	449,11	893,63	1,99
		4	0,280	1,39	387,98	694,36	1,79
		5	0,183	2,51	459,70	852,21	1,85
		8	0,228	2,04	416,23	813,40	1,95

İkinci sahada çalışan kollu galeri açma makinesinde (KGAM) radyal keski kullanılmaktadır, bundan dolayı kristal tuf numunesi üzerinde radyal keski ile etkileşimli kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sahadaki tünel duvarı incelendiğinde kesme derinliğinin 10 mm civarı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, KGAM ile kazıda 10 mm kesme derinliği civarında verimli kesme yapıldığı belirtilmektedir (Hurt ve MacAndrews, 1985). Bu nedenlerden dolayı, radyal keski ile 10 mm kesme derinliğinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.37'de deneylerde kullanılan radyal keskinin özellikleri ve kesme deneyi görülmektedir. Makinenin kesici kafasında bulunan radyal keski incelenerek



aynısı imal ettirilmiştir ve deneylerde kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 2.14’te verilmiştir.



Şekil 2.37. (a) Kesme deneylerinde kullanılan radyal keski ve özellikleri (d) Araziye çalışan aksiyel tip KGAM (c) Radyal keski ile kesme deneyleri (d) Kristal tuf numunesi üzerinde radyal keski ile kesme deneyleri

Tablo 2.14. Kristal tuf üzerinde gerçekleştirilen radyal keski ile etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları

Numune	Kesme Derinliği, d, mm	s/d	Pasa, Q, m <sup>3</sup> /km	Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	Ortalama Kesme Kuvveti, FC, N	Maksimum Kesme Kuvveti, FC', N	FC'/FC
Kristal tuf	10	2	0,259	2,14	554,74	991,57	1,79
		3	0,254	1,98	501,67	927,15	1,85
		4	0,217	2,11	457,18	722,13	1,58
		6	0,288	2,16	613,82	898,90	1,47

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel ve saha çalışmalarından elde edilen veriler altı bölüm halinde incelenecektir. İlk bölümde çalışma kapsamında geliştirilmiş olan düşey kayaç kesme setinde (DKKS) basit şekilli kama tipi keski ile gerçekleştirilen kontrollü kaya kesme deneyleri incelenerek, DKKS'nde kaya kesme deneylerinin gerçekleştirilip-gerçekleştirilemeyeceği ve gerçekleştirilen deneylerin başarısı, aynı zamanda da ölçme sisteminin kesme derinliği ve kayaç dayanımı gibi değişkenlerle arasındaki ilişki irdelenecektir.

İkinci kısımda, daha önceki bir çalışmada gerçekleştirilen karot kesme deneyinin geliştirilen DKKS'de yapılabilirliği sorgulanacaktır. Bu amaçla, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde bulunan karot kesme deney setinde kesilen 7 farklı numune McFeat-Smith ve Fowell (1979) tarafından önerilen metoda uygun olarak geliştirilen DKKS'de karot kesme deneyine tabi tutulmuştur. Her iki deney düzeneğinden elde edilen ortalama kesme kuvveti ve spesifik enerji değerlerinin tutarlı olup olmadığı incelenecektir.

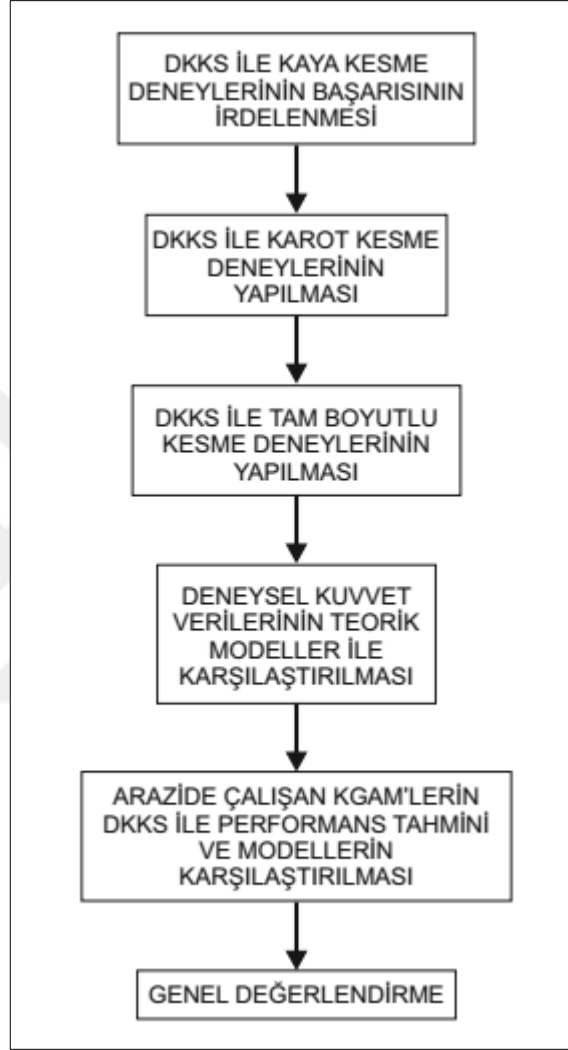
Üçüncü kısımda, özellikle de kollu galeri açma makinelerinin (KGAM) performans tahmininde kullanılmak üzere, küçük blok numuneler üzerinde konik keski ile tam boyutlu kesme deneyinin yapılıp yapılamayacağı irdelenmiştir. Bu amaç için önceki bir çalışmadan (Balcı ve Bilgin, 2007) elde edilen veriler ile bu çalışmadan elde edilen veriler karşılaştırılacak ve sonuçlar tartışılacaktır.

Diğer taraftan dördüncü kısımda, basit şekilli kama tipi keski, karot kesme deneyinde kullanılan keski ve konik keski ile yapılan kesme deneylerinden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri ile kaya kesme teorilerinde elde edilen maksimum kesme kuvveti değerli karşılaştırılacaktır. Kaya kesme teorilerinin maksimum kesme kuvvetini belirleyebilme kabiliyetleri sorgulanacaktır.

Beşinci kısımda, araziden alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen kaya kesme deneyleri kullanılarak arazide çalışan KGAM'nin kazı hızı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar hem araziden elde edilen kazı hızları ile hem de önceki bölümlerde bahsedilen ampirik yöntemler ile bulunan net kazı hızları ile karşılaştırılmıştır. Her yöntemin tahmin yeteneği ve ampirik yöntemler tartışılmıştır.

Son olarak, altıncı bölümde DKKS'nin kaya kesme deneylerindeki başarısı genel olarak irdelenmiştir. DKKS, diğer kaya kesme deney düzenekleri ile karşılaştırılmış ve

üstünlükleri ve zayıflıkları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel ve arazi çalışmalarından elde edilen verilerin irdelenmesi ile ilgili genel akım şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Bulgular ve tartışma kısmı ile ilgili genel akım şeması (KGAM: kollu galeri açma makinesi, DKKS: düşey kayaç kesme seti)

### 3.1. Basit Kama Keski ile Kesme Deneylerinin İrdelenmesi

Kama tipi aletler insanoğlunun ilk kullandığı el aletlerindedir ve eski kazı makinelerinde de sıklıkla kullanılmaktaydılar. Kama tipi keski ile ilgili çalışmalar öncelikle uç batırma deneyleri ile başlamıştır. Günümüze kadar kama tipi keski ile elastik ya da elastoplastik cisimlere batırma mekanizması birçok araştırmacı tarafından hem deneysel

hem de numerik yöntemler kullanılarak incelenmiştir (Pariseau ve Fairhurst, 1967; Tannant ve Wang, 2010).

Bu tip basit şekilli kama tipi keskinlerin günümüzde kazı makinelerinde kullanımı hemen hemen bitmiştir. Diğer tüm keskinlerden daha verimli olmalarına rağmen (Roxborough, 1976) şekillerinden dolayı yapısal hasara çok yatkındırlar. Bundan dolayı yerlerini radyal ve konik keskinlere bırakmışlardır. Ayrıca, kompleks şekilli olanları tam cepheli tünel açma makinelerinde kullanılmaktadır. Bundan dolayı, bu tip keskinlerle yapılacak olan kaya kesme deneylerinin saha uygulamalarına herhangi bir katkısı olmayacaktır. Ancak, geometrik şekillerinin basitliğinden dolayı ve kazı mekanizmalarının daha basit bir şekilde açıklanabilmesinden dolayı, bu tip keskinlerle yapılan deneylerden elde edilen verilerin teorik çalışmalara mutlak katkısı olacaktır.

Bu tip keskinlerle kesme deneylerine başlanmasının başlıca nedeni, ölçme sisteminin kesme derinliğine hassaslığının belirlenmesidir. Teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlardan bu tip keskinler ile kesmede, kesme kuvvetinin kesme derinliği ile lineer olarak arttığı bilinmektedir (Potts ve Shuttleworth 1958; Evans 1958, 1962; Evans ve Pomeroy, 1966; Nishimatsu 1972, 1993; Çopur 2010) ve bu aksiyomatik bir durumdur. Şekil 3.2’de 5 farklı magmatik kayaç için maksimum kesme kuvvetinin kesme derinliği ile değişimi görülmektedir. Bu şekilde maksimum kesme kuvvetinin kesme derinliği ile lineer olarak arttığı görülmektedir ve bu durum geçmiş çalışmalarla örtüşmektedir. Şekilde ayrıca lineer ilişkilere ait determinasyon katsayılarının ( $R^2$ ) 0,89 ile 1 arasında değişmektedir. Bu değer lineerlikten sapmanın göstergesi olarak değerlendirilebilir ve yalnızca gri tuf numunesinde lineerlikten bir miktar sapma olduğu söylenebilir.

Şekil 3.2’de aynı zamanda ortalama kesme kuvvetinin kesme derinliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Maksimum kesme kuvveti ile ortalama kesme kuvveti arasında, kesme koşullarına göre değişiklik gösterse de belirli bir oran olduğundan dolayı, ortalama kesme kuvvetinin de kesme derinliği ile lineer olarak arttığı varsayılmaktadır. Bu grafikte de ortalama kesme kuvvetinin kesme derinliği ile lineer olarak arttığı gösterilmiştir ve bu lineer ilişkilerin determinasyon katsayılarının 0,94 – 0,98 aralığında olduğu görülmektedir. Hem ortalama kesme kuvveti hem de maksimum kesme kuvvetinin kesme derinliği ile olan eğilimi aşağıda verildiği gibi lineerdir

$$FC' = xd + y \quad (3.1)$$

$$FC = xd + y \quad (3.2)$$



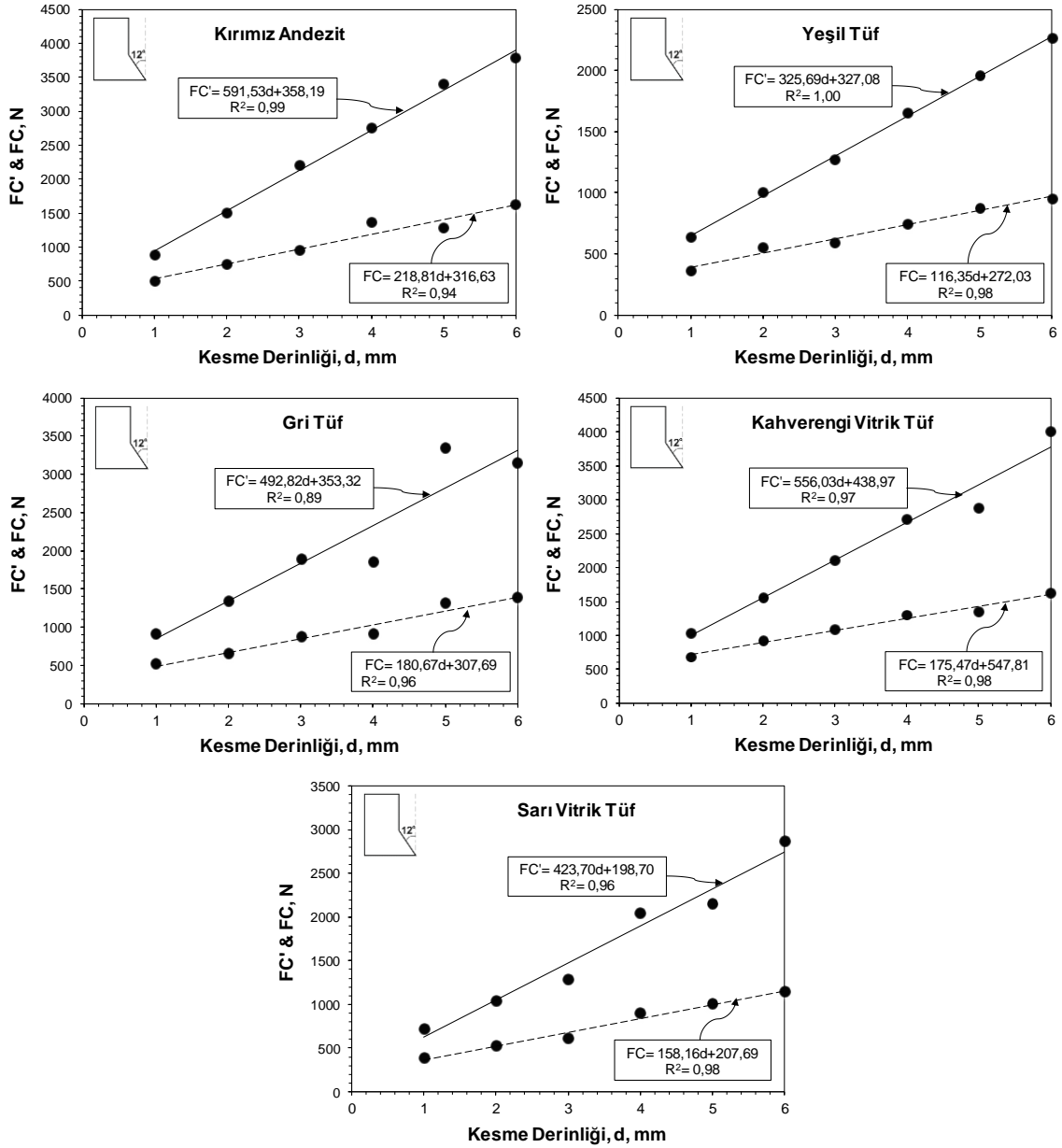
Burada;

$FC'$  = Maksimum kesme kuvveti, N,

$FC$  = Ortalama kesme kuvveti, N,

$d$  = Kesme derinliği, mm,

$x, y$  = Kayaca ve kesme koşuluna bağlı değişkenlerdir.



Şekil 3.2. Maksimum ve ortalama kesme kuvvetinin kesme derinliğine bağlı olarak değişimi

Şekil 3.3'te spesifik enerji ve pasanın kesme derinliği ile değişimi verilmiştir. Spesifik enerji ve pasa birbiri ile ilintili kavramlar olduğu için aynı grafikte verilmiştir. Kesme derinliği arttıkça spesifik enerji azalmaktadır ve 6 mm civarında yatay asimptota yaklaştığı görülmektedir. Bundan dolayı, 6 mm kesme derinliğinin optimum kesme derinliği olduğu belirtilebilir. Daha derin kesme derinliklerinin daha verimli olduğu da bilinen bir durumdur (Basit kama tipi kesimler için: Barker, 1964; Evans, 1968; Pomeroy ve Brown, 1968; Roxborough ve Rispin, 1973; Finnie vd., 1977; Roepke ve Voltz, 1983). Ancak kesme derinliğinin de alabileceği maksimum bir değer vardır ki bu değer üstünde kesme işlemi verimsiz hale gelmektedir (Çopur vd., 2001). Pasa ise kesme derinliği ile artmaktadır. Hem spesifik enerji hem de pasa ile kesme derinliği arasında üssel bir ilişki bulunmaktadır ve genel eğilim şu şekilde verilebilir:

$$SE = xd^y \quad (3.3)$$

$$Q = xd^y \quad (3.4)$$

Burada;

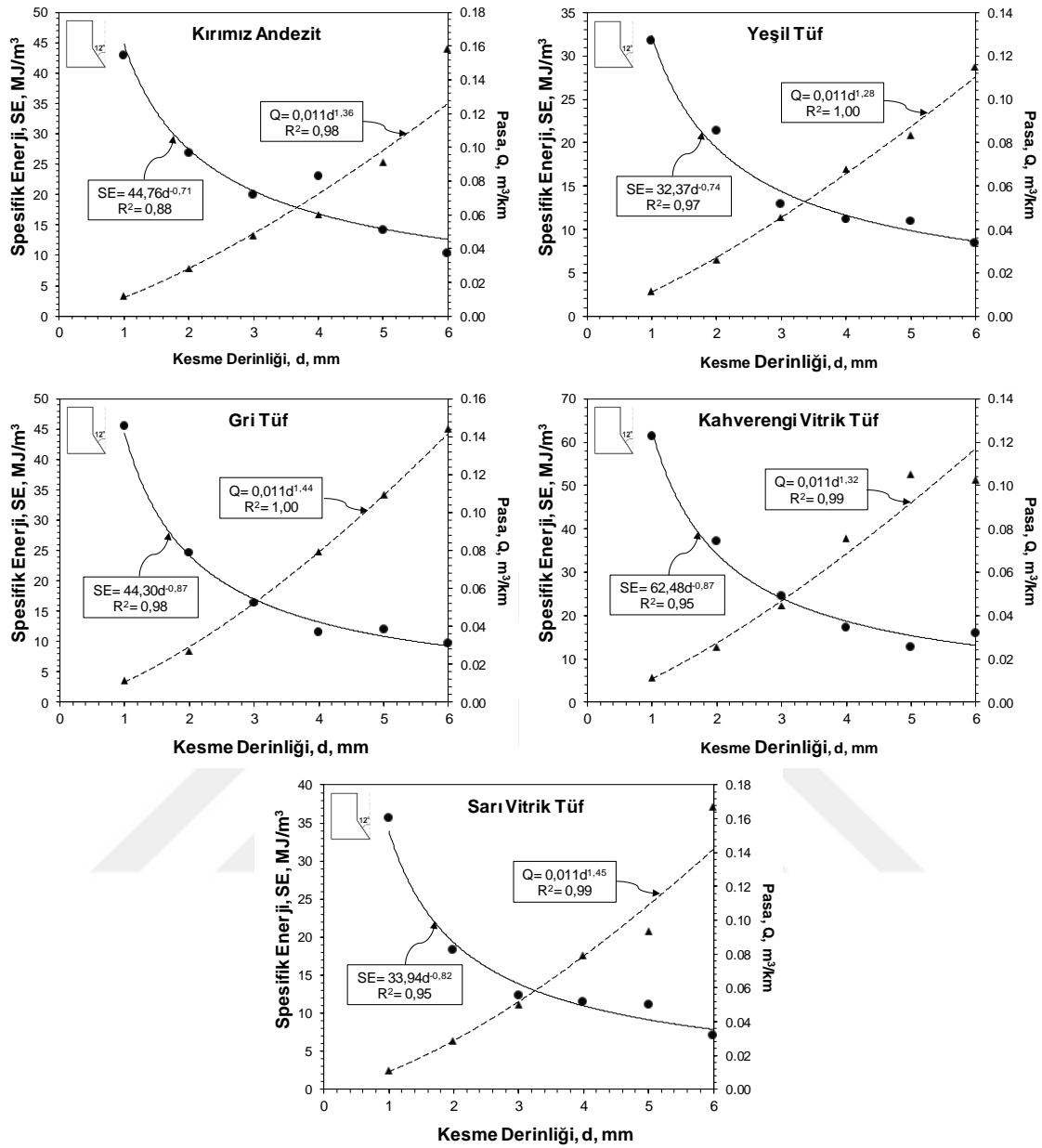
SE = Spesifik enerji, MJ/m<sup>3</sup>,

Q = Pasa, m<sup>3</sup>/km,

d = Kesme derinliği, mm,

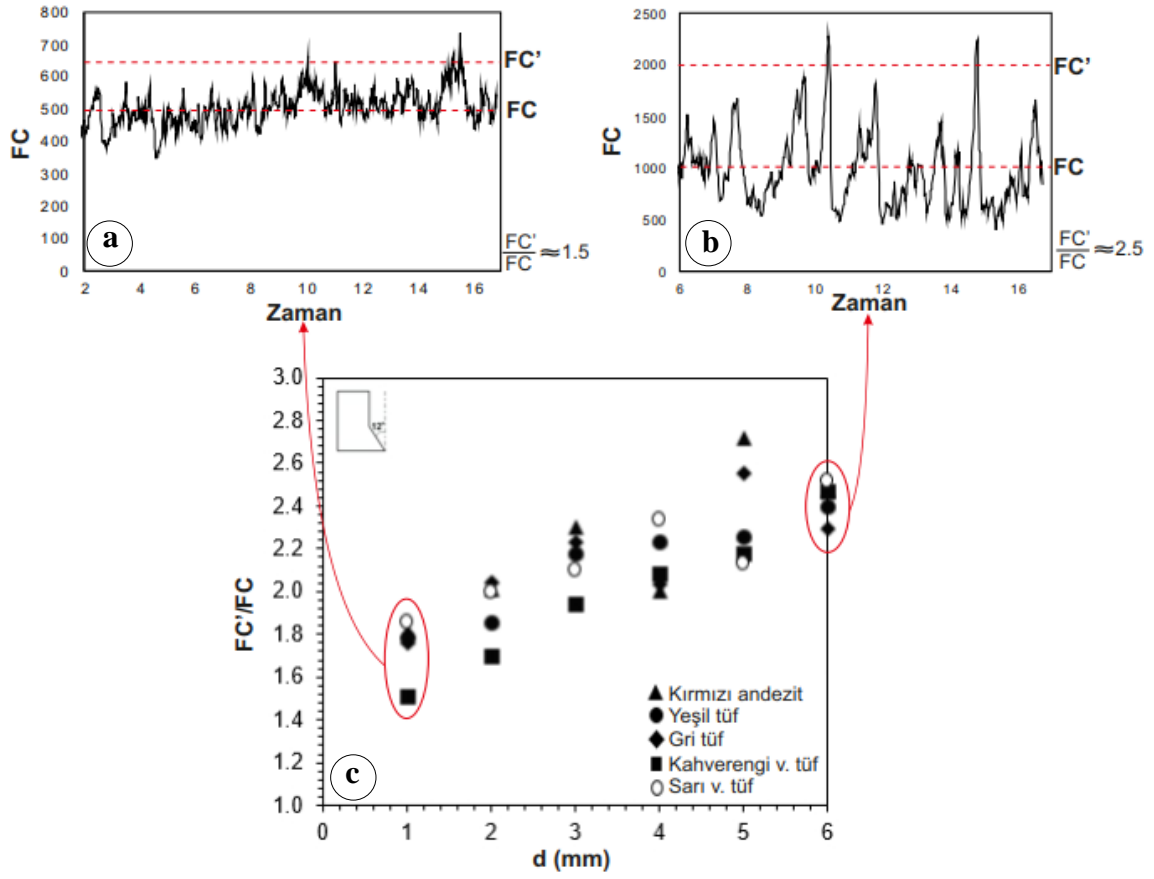
x, y = Kayaca ya da kesme koşuluna bağlı değişkenlerdir.

Yukarıda bahsedilen y parametresi Şekil 3.3'ten de görülebileceği gibi SE için -0,71 ile -0,87 arasında değişmektedir, bu değer ortalama olarak -0,80 olarak kabul edilebilir. Ayrıca bu değer, Q parametresi için 1,28 ile 1,45 arasında değişmektedir, y değeri ortalama olarak 1,35 kabul edilebilir. Birim kesme uzunluğunda meydana çıkan pasa miktarı, kayacın kırılabilirliğinin bir göstergesi olduğu söylenebilir. Birim uzunlukta çıkan malzeme hacmi, kayacın göreceli olarak kırılabilirliğini gösterir. Kesme kuvveti, kayacın kesilebilirliğinin bir göstergesi olsa da tek başına yeterli değildir. Örnek olarak, en yüksek kesme kuvvetinin kırmızı andezit numunesine ait olmasına rağmen en yüksek spesifik enerji kahverengi tuf numunesine aittir. Bunun da sebebi birim kesme uzunluğunda meydana çıkan pasa miktarıdır. Kahverengi tuf numunesinin 6 mm kesme derinliğindeki pasa miktarı incelendiğinde, en düşük değeri aldığı görülmektedir. Bu da spesifik enerji değerinin yükselmesine sebep olmaktadır.



Şekil 3.3. Spesifik enerji ve pasanın kesme derinliği ile değişimi

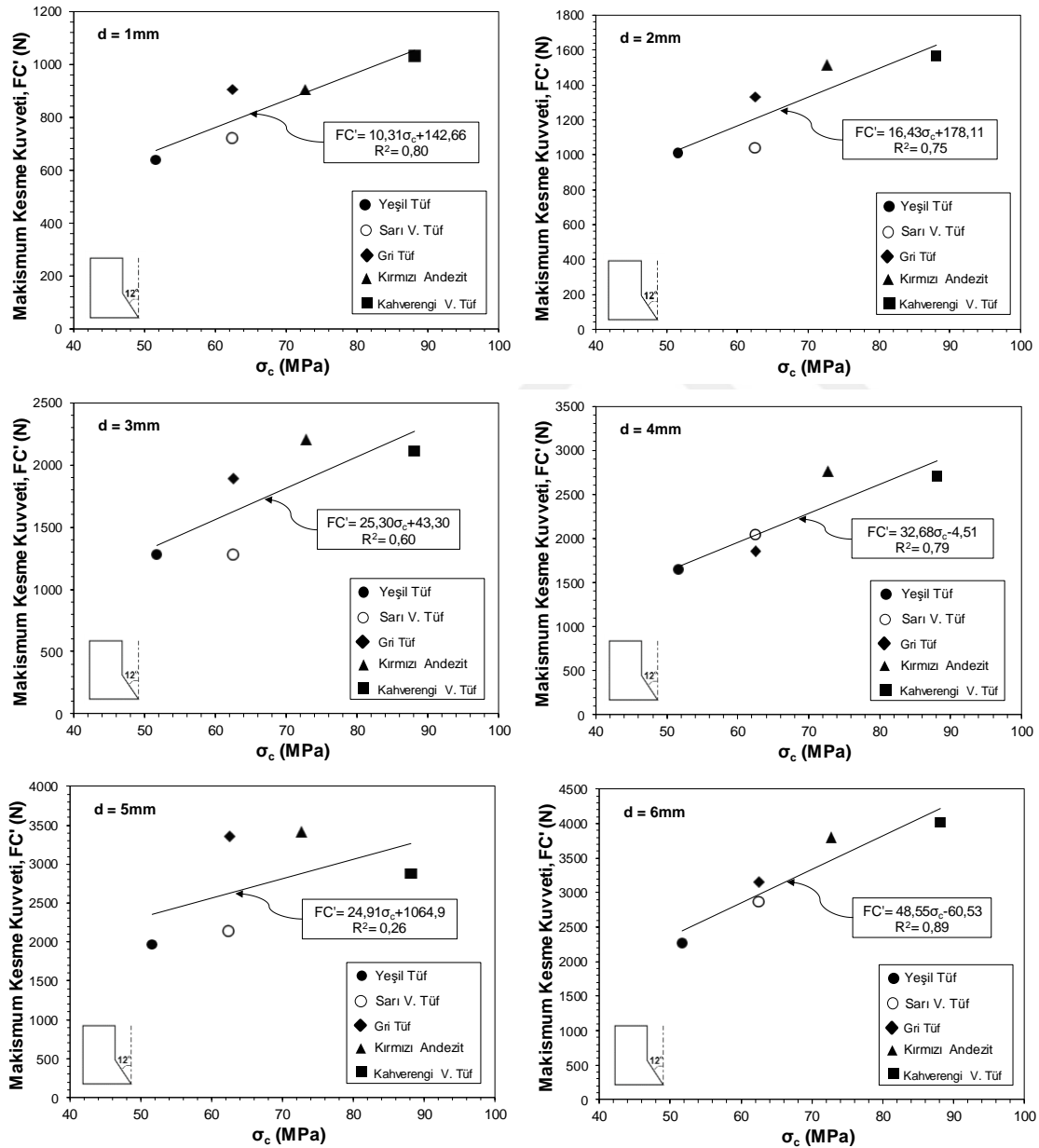
Şekil 3.4'te maksimum kesme kuvvetinin ortalama kesme kuvvetine oranının (FC'/FC) kesme derinliği ile değişimi verilmiştir. Eğilim olarak, tüm kayaçlar için FC'/FC kesme derinliği ile artmaktadır. Ancak, dikkat çeken bir husus tüm kayaçlar için bu oranın 6 mm kesme derinliğinde sabitlendiği ve yaklaşık 2,5 değerine yakınsadığı görülmektedir. Aynı spesifik enerjiye sahip olan kayaçlarda FC'/FC oranı yüksek olan kayacın kazılması düşük olan kayaçtan daha zor olmaktadır (Cook, 1970), bu da FC'/FC'nin pratik uygulamadaki önemini vurgulamaktadır. Şekil 3.4(a) tipik bir sığ kesmedeki, Şekil 3.4(b) ise tipik bir derin kesmedeki kuvvet zaman grafiğini göstermektedir (Richard vd., 2012).



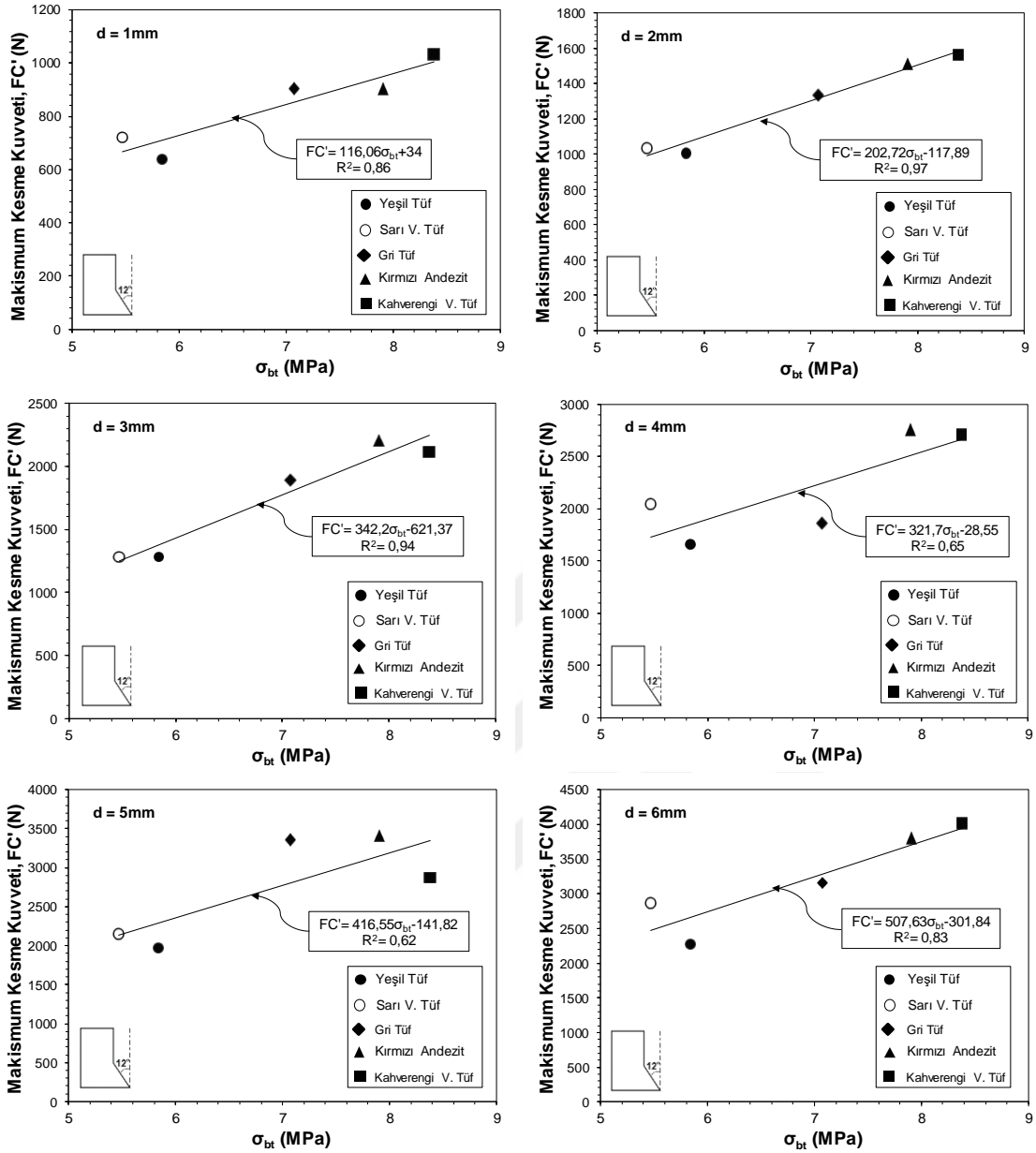
Şekil 3.4. (a) Sığ derinliklerde (1 mm ve aşağısı) yapılan kesme deneyinde oluşan tipik bir kuvvet dalgalanması (b) Büyük derinliklerde yapılan kesme deneyinde oluşan tipik bir kuvvet dalgalanması (c)  $FC'/FC$  oranının kesme derinliği ile değişimi

Bu oran ( $FC'/FC$ ) daha önceki bölümlerde bahsedilen kesme kuvveti-zaman diyagramındaki (Bkz. Şekil 2.9) piklerin ortalama değerden sapmasına işaret etmektedir. Bu değer ne kadar büyük olursa piklerin boyu o kadar büyük olmaktadır. Kesme derinliği ile ilişkisine gelince, kesme derinliği arttıkça koparılan parçaların boyutları artmaktadır ve bu da piklerin daha büyük değerler almasına neden olmaktadır. Bu veriler ışığında maksimum kesme kuvvetinin ortalama kesme kuvvetinden, kesme derinliği arttıkça daha hızlı arttığı sonucuna varılabilir. Sonuç olarak,  $FC'/FC$  oranının basit kama tipi kesimler için pratik olarak 1 mm kesme derinliğinde, yani sığ derinliklerdeki kesme sırasında 1,5-2 civarı, 6 mm civarında ise 2,5 civarı olduğu görülmektedir. Elde edilen bu veriler, teorik yaklaşımlarda ortalama kesme kuvvetinin bulunabilmesinde kullanılabilir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus ise  $FC'/FC$  oranının kesinlikle sabit olarak kabul edilmemesi gerektiğidir ki deneysel sonuçlar bu değerın kesme derinliği ile arttığını göstermektedir (Yaşar ve Yılmaz, 2017b).

Şekil 3.5 ve 3.6'da sırası ile beş farklı kayaç için maksimum kesme kuvvetinin farklı kesme derinliklerinde tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile olan ilişkisi verilmiştir. Bu grafiklerde maksimum kesme kuvvetinin tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve kesme derinliği ile lineer olarak arttığı açıkça görülmektedir. Benzer sonuçlar elde edilmesine rağmen, maksimum kesme kuvveti üzerinde dolaylı çekme dayanımının tek eksenli basınç dayanımından daha etkili olduğu söylenebilir. Bu da Evans (1958 ve 1962) tarafından elde edilen teorik çalışmalardaki bulguları desteklemektedir.



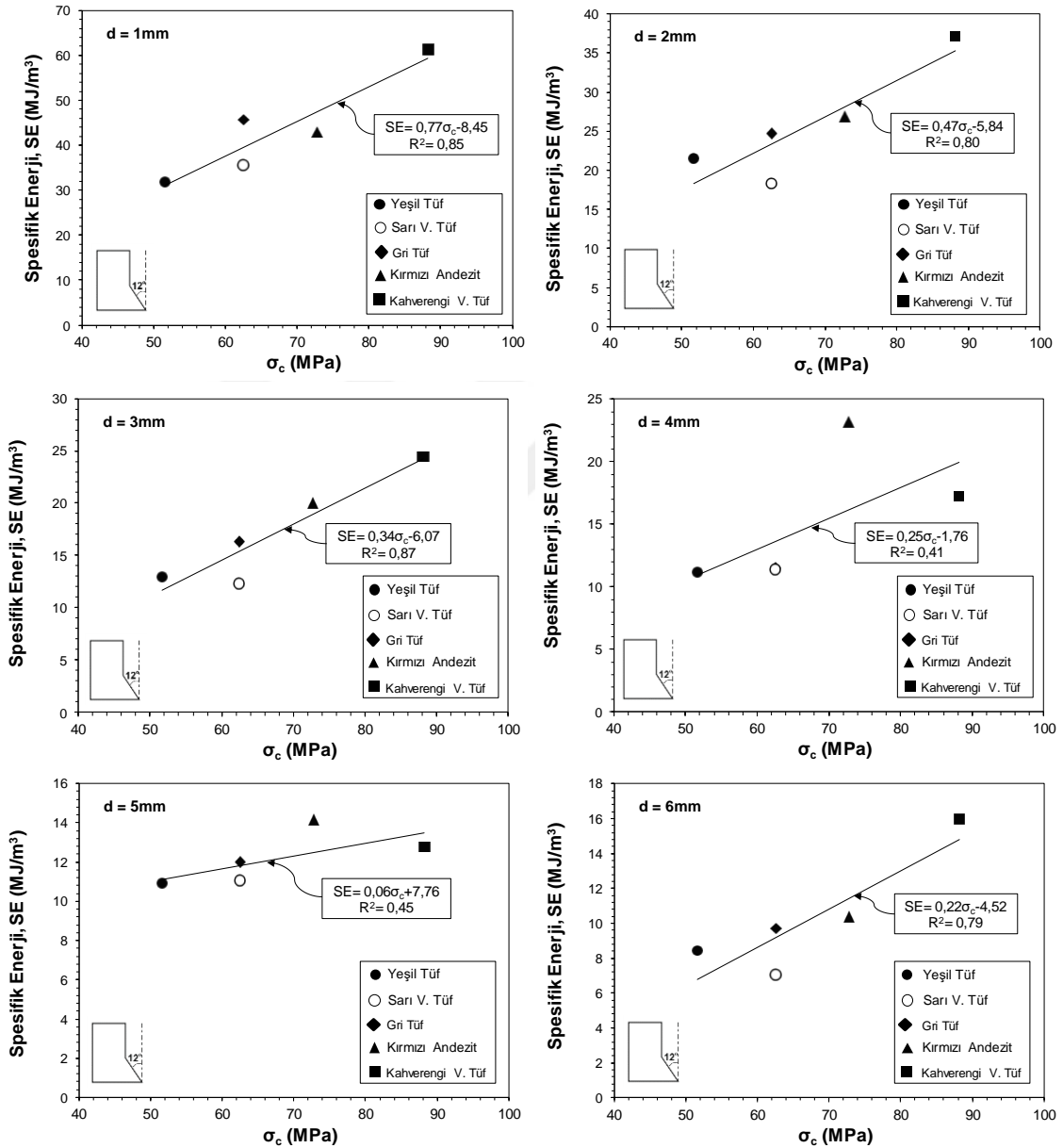
Şekil 3.5. Maksimum kesme kuvvetinin farklı kesme derinliklerine göre tek eksenli basınç dayanımı ile değişimi



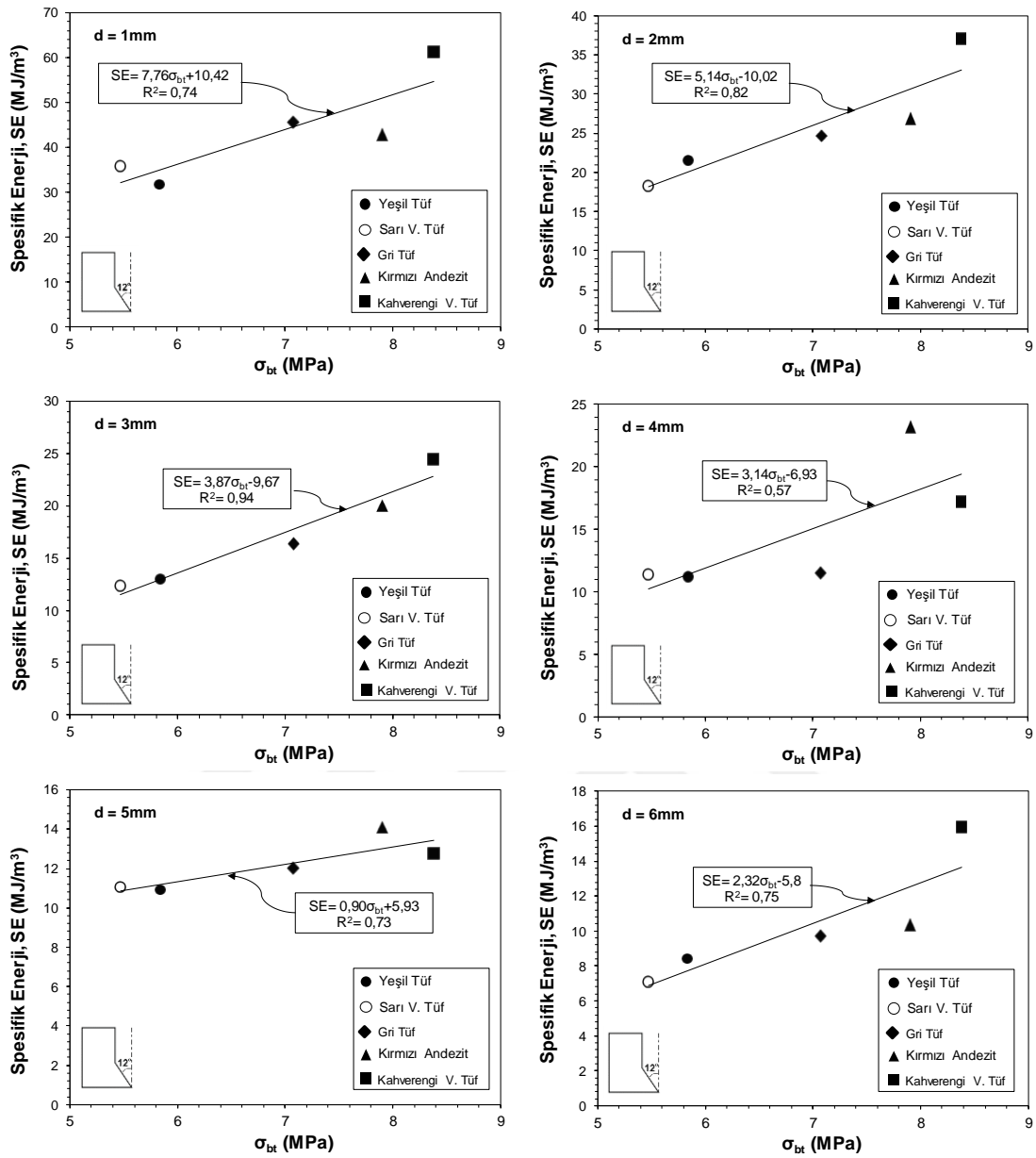
Şekil 3.6. Maksimum kesme kuvvetinin farklı kesme derinliklerine göre dolaylı çekme dayanımı ile değişimi

Şekil 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6'daki grafikler incelendiğinde, ölçme sisteminin kesme derinliğindeki değişikliklere duyarlı olduğu açıkça görülmektedir. Buna ek olarak, ölçme sistemi dayanım parametrelerine de hassastır. Kayaç dayanımında meydana gelen artma genel eğilim olarak kesme kuvvetlerinde lineer olarak artmaya neden olmaktadır. Bu da bu ölçme sisteminin kesme deneylerinde kullanılabilmesinin bir göstergesidir.

Şekil 3.7 ve 3.8’de spesifik enerjinin farklı kesme derinliklerinde sırası ile tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile değişimini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden açıkça her kesme derinliğinde spesifik enerjinin tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile lineer olarak arttığı görülmektedir. Çok büyük farklılıklar olmamasına rağmen, determinasyon katsayıları incelendiğinde dolaylı çekme dayanımının spesifik enerji üzerinde biraz daha etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 3.7. Spesifik enerjinin farklı kesme derinliklerine göre tek eksenli basınç dayanımı ile değişimi

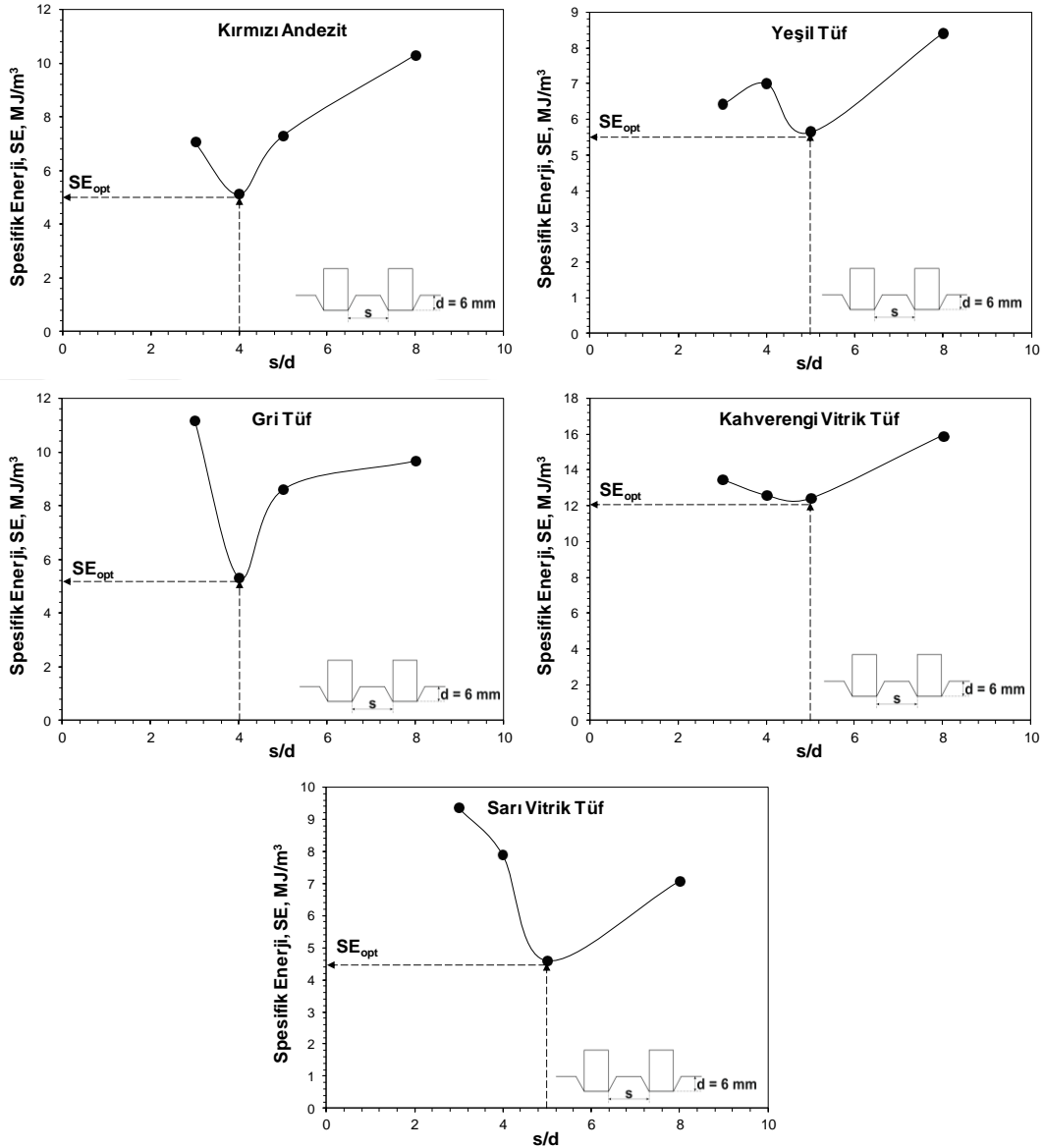


Şekil 3.8. Spesifik enerjinin farklı kesme derinliklerine göre dolaylı çekme dayanımı ile değişimi

Hali hazırda harici yük hücresi ile kalibrasyonda doğrulanan kuvvet değerleri etkileşimsiz kesme deneylerinden elde edilen veriler yardımı ile de doğrulanmıştır. Bu sonuçlar da düşey kayaç kesme setinde (DKKS) etkileşimsiz kaya kesme deneylerinin başarılı bir şekilde yapılabildiğini, deneylerin tutarlı ve tekrar edilebilir olduğunu göstermiştir. DKKS’de kesme deneylerinin yapılabildiğinin gösterilmesinin ardından, kesme deneylerinin diğer bir modu olan etkileşimli kesme deneylerinin yapılabilişliği denenmiştir. Bu amaç için aynı kayaç numuneleri 6 mm sabit kesme derinliğinde etkileşimli



kaya kesme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Şekil 3.9’da spesifik enerji değerinin keskiler arası mesafenin ( $s$ ) kesme derinliğine ( $d$ ) oranı ( $s/d$ ) ile değişimi verilmiştir.

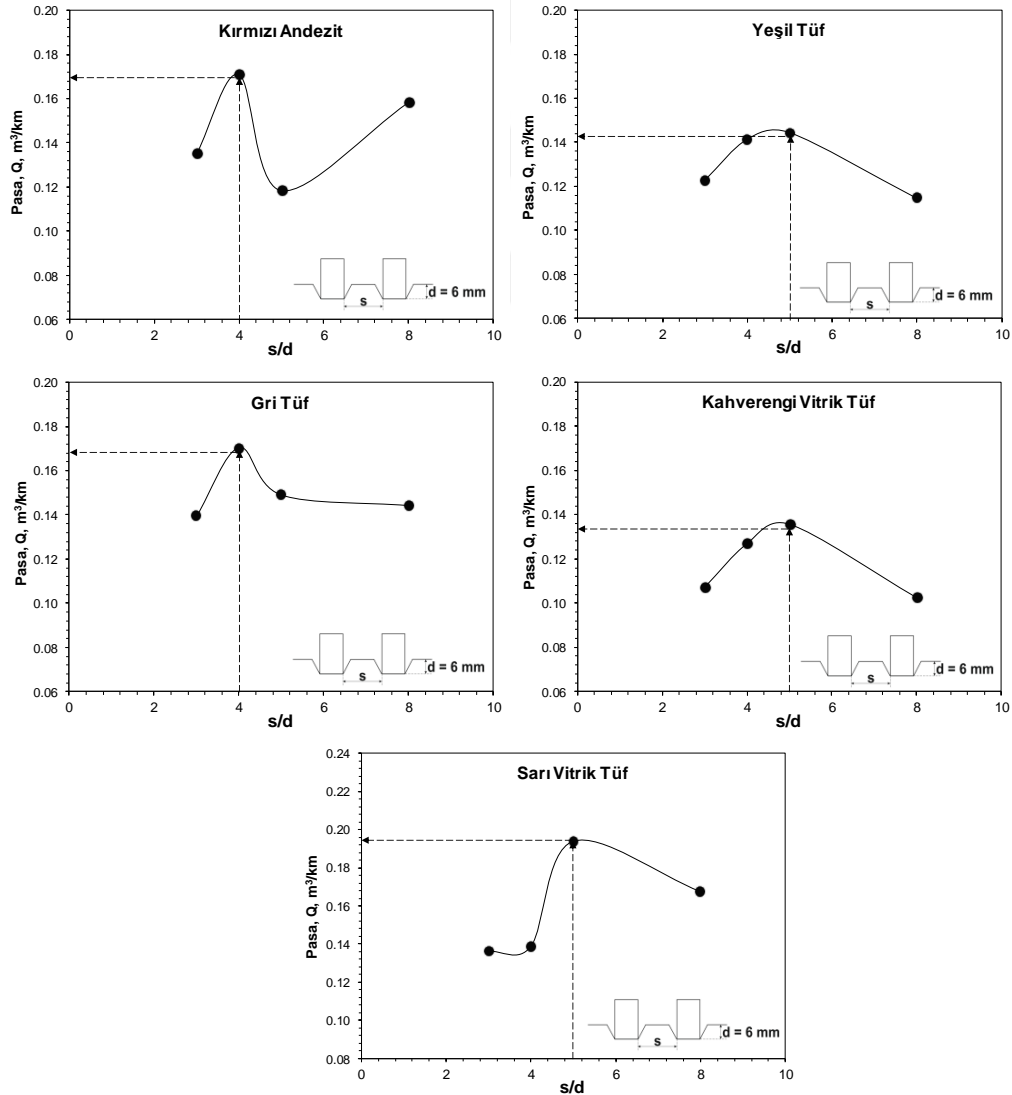


Şekil 3.9. Etkileşimli kesme deneylerindeki spesifik enerjinin  $s/d$  oranı ile değişimi

Beş farklı magmatik kayaç numunesi için optimum keskiler arası mesafenin kesme derinliğine oranının ( $s/d$ ) 4-5 arasında değiştiği Şekil 3.9’da görülmektedir. Evans (1972) teorik olarak  $s/d$  oranının basit kama tipi keskiler için 3-4 arasında olması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, çeşitli araştırmacılar da bu değer 2-5 arasında değiştiğini deneysel veriler ile göstermişlerdir (Barker, 1964; Roxborough ve Rispin, 1973; Roxborough, 1976). Bu kayaç grubunda elde edilen optimum  $s/d$  değerleri literatür ile karşılaştırıldığında bir

miktar yüksek görülebilir, öyle ki  $s/d$  değeri nadir olarak 5 değerine ulaşır. Ancak bu durum, doğrudan kayaç grubu ile ilintili olabilir ki; geçmiş çalışmalarda bu çalışmada kullanılan kayaç tipleri basit kama tipi kesmelerle kesme deneyine tabi tutulmamıştır. Diğer bir açıklama olarak ise yüksek kesme açısının yüksek kırılma açısına sebep olduğu söylenebilir.

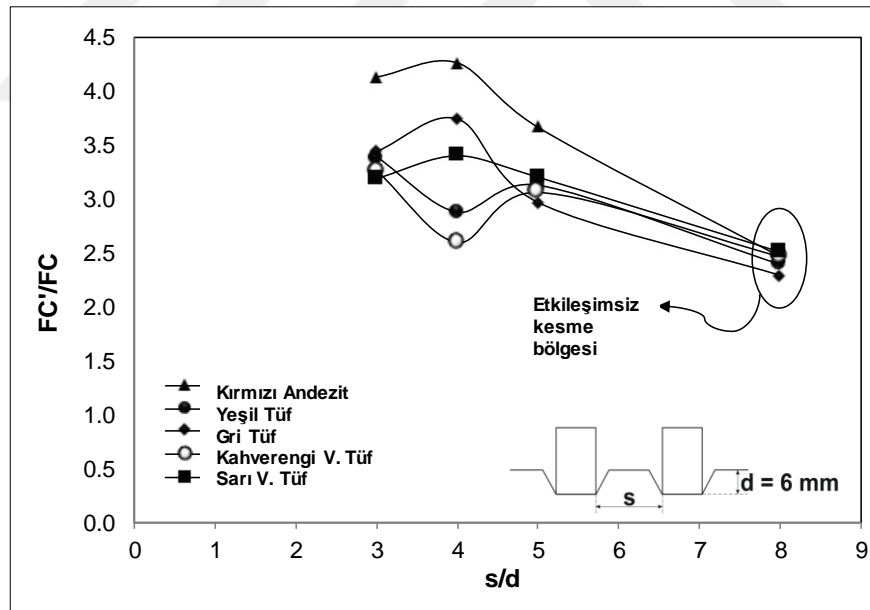
Kazı sırasında çıkan pasanın  $s/d$  oranı ile değişimi Şekil 3.10'da verilmiştir. Bu şekilden de Şekil 3.9 ile benzer bulgulara ulaşmak mümkündür. Tam ters bir trend ile optimum kesme koşulunun bulunabilmesi için en fazla pasanın olduğu  $s/d$  oranına bakmak gerekmektedir. Bu oran optimum kesme koşulunu göstermektedir. Grafiğe göre etkileşimli kesme deneylerinde en yüksek pasa sarı vitrik tüf numunesinin 30 mm kesmeler arası mesafede kesilmesinde meydana gelmiştir.



Şekil 3.10. Etkileşimli kesme deneylerindeki pasanın  $s/d$  oranı ile değişimi

Optimum s/d oranı her kayaca ait olan karakteristik bir özelliktir ve o kayacın kırılma karakteristiği hakkında bilgi vermektedir. s/d oranı ne kadar büyükse kayacın kırılmalığına ya da kırılmaya olan yatkınlığına o kadar fazla olduğu söylenebilir. Optimum s/d oranı ile kayaçların herhangi bir mekanik ya da kırılmalık özelliği arasında şu ana kadar anlamlı bir ilişki bulunamamıştır ve bu konu daha detaylı olarak araştırılması gereken bir konudur (Bilgin vd., 2006).

Şekil 3.11’de FC’/FC oranının s/d oranı ile değişimi grafiği verilmiştir. Bu grafikte, optimum kesme koşullarında FC’/FC oranının maksimum değere ulaştığı açıkça görülmektedir. Bu durum da bu koşullarda en büyük parçaların koptuğunu göstermektedir. Kopan büyük parçalar ise kesme kuvvetinde büyük kuvvet piklerinin olmasına sebep olmaktadır. Şekilde daire içine alınan bölge 6 mm kesme derinliğinde yapılan etkileşimsiz kesme deneylerinden elde edilen değerleri göstermektedir. Bu değerler etkileşimsiz durumda 2,5 değeri civarındayken, optimum etkileşimli kesme durumunda 4,5 civarına çıkabilmektedir.



Şekil 3.11. Etkileşimli kesme deneylerindeki FC’/FC oranının s/d oranı ile değişimi

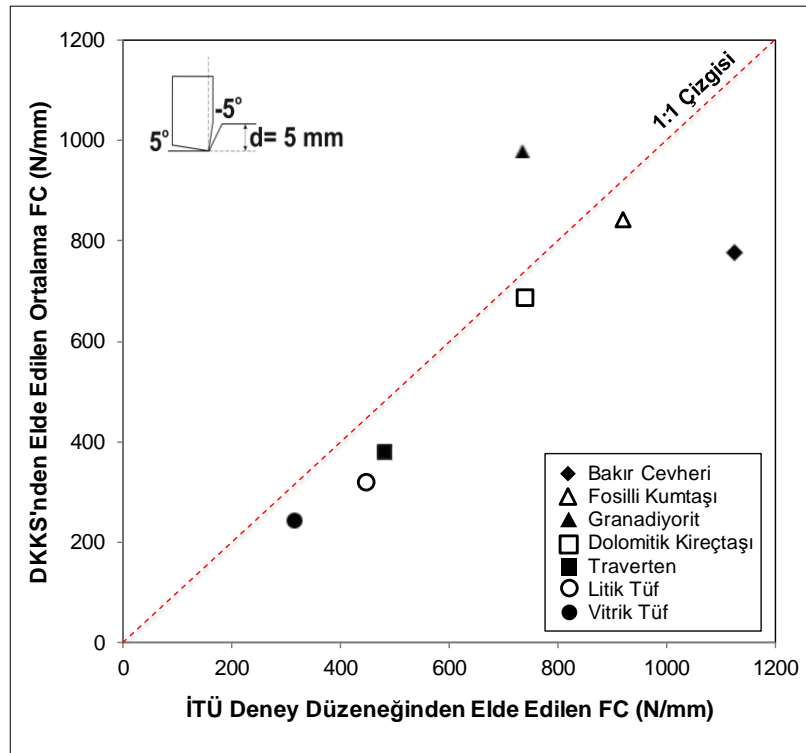
Basit kama tipi keskiiler ile hem etkileşimli hem de etkileşimsiz kesme deneylerinden birtakım sonuçlar elde edilmiştir. Şekiller yakından incelendiğinde şu sonuçlar ön plana çıkmaktadır:

- Ortalama kesme kuvveti ve maksimum kesme kuvveti kesme derinliği ile lineer olarak artmaktadır,
- Spesifik enerji değeri, kesme derinliğinin artması ile azalmaktadır ve aralarında üssel bir ilişki vardır,
- Spesifik enerji gibi pasa ile kesme derinliği arasında da üssel bir ilişki bulunmaktadır ve kesme derinliğinin artması ile pasa artmaktadır,
- Maksimum kesme kuvvetinin ortalama kesme kuvvetine oranı ( $FC'/FC$ ) etkileşimsiz kesme deneylerinde pratik olarak 2,5 civarında gözlemlenmiştir,
- Ortalama kesme kuvveti tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile yaklaşık olarak lineer olarak artmaktadır,
- Spesifik enerji de tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile yaklaşık olarak lineer olarak artmaktadır. Çekme dayanımının hem kesme kuvveti hem de spesifik enerji üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir,
- Etkileşimli kesme deneylerinde optimum s/d değerleri 4-5 arasında değişmiştir
- Etkileşimli kesme deneylerinde  $FC'/FC$  değeri 4,5 civarına çıkabilmektedir,
- Daha önce harici yük hücresi ile doğrulanmış DKKS'de okunan kuvvet değerleri, kesme deneyleri ile de doğrulanmıştır. Ölçüm sisteminin kesme derinliği ve kayaç dayanımı parametrelerine hassas olduğu belirlenmiştir. Bu da yapılan deneylerin güvenilirliğini ve tekrar edilebilirliğini pekiştirmektedir,
- Etkileşimli ve etkileşimsiz kesme deneylerinin DKKS'de yapılabileceği bu deneysel sonuçlar ışığında görülmüştür,
- Basit kama tipi kesimler ile yapılan deneylerin sonuçlarının yalnızca keskin uçlu kesimler için geçerli olduğunu belirtmek gerekmektedir. Uçta meydana gelecek herhangi bir körelme bu deneysel sonuçların bazılarını değiştirebilir (Kenny ve Johnson, 1976). Örneğin, spesifik enerji bir miktar körelme ile 5 kata kadar artabilirken (Roxborough, 1976; Bilgin vd., 2014), FC birkaç kat artabilir (Verhoef, 1997). Ancak, aşınmanın optimum s/d üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı bilinmektedir (Roxborough ve Sen, 1986).

### 3.2. Düşey Kayaç Kesme Setinde (DKKS) Karot Kesme Deneylerinin Yapılması

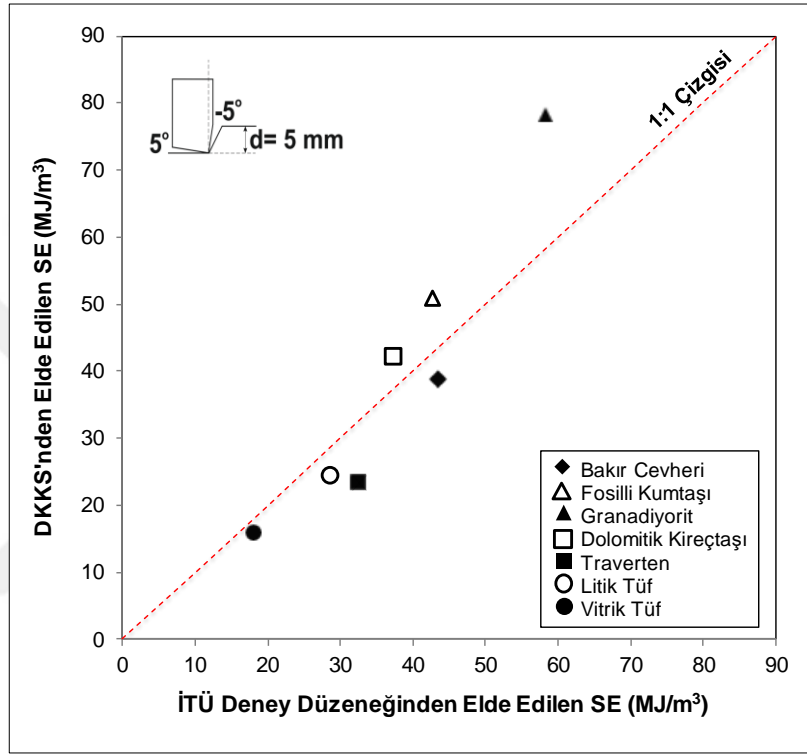
Bu çalışmanın amaçlarından bir diğeri de Roxborough ve Philips (1974) tarafından geliştirilen ve McFeat-Smith ve Fowell (1979) tarafından standart bir deney olarak önerilen

karot kesme deneyinin düşey kayaç kesme setinde (DKKS) gerçekleştirilmeye çalışılmasıdır. Bu amaç için Yasar (2013) tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan karot kesme deney düzeneğinde birtakım kayaç ve cevherlere bu deneyler uygulanmış olup, bu numuneler DKKS'de de karot kesme deneyine tabi tutulmuştur. Geliştirilen DKKS'den elde edilen ortalama kesme kuvveti ve spesifik enerji değerleri, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan karot kesme deney düzeneğinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmışlardır. Şekil 3.12'de iki deney düzeneğinden elde edilen ortalama kesme kuvvetinin 1:1 çizgisine göre konumları görülmektedir. Ortalama kesme kuvvetleri, kesme derinliğine göre lineer olarak arttığı için kesme derinliğine bölünerek birim kesme derinliği için ortalama kesme kuvveti (FC/d) olarak verilmiştir. Grafikten İTÜ'deki kesme setinden elde edilen değerlerin DKKS'den elde edilen değerlerden bir miktar düşük olduğu görülmektedir. Ancak, bunun genel bir trend olduğu iddia edilemez, şekildeki granadiyorit numunesi için ölçülen ortalama kesme kuvveti DKKS'nde daha fazla gözlemlenmiştir. İki deneyden elde edilen verilerin lineer regresyonu sonucu elde edilen determinasyon katsayısı 0,67'dir.



Şekil 3.12. DKKS'den ve İTÜ'deki kesme setinden elde edilen kesme kuvveti değerleri

Şekil 3.13'te DKKS'den elde edilen spesifik enerji değerleri ile İTÜ'deki deney düzeneğinden elde edilen spesifik enerji değerleri görülmektedir. Spesifik enerji değerlerinin 1:1 çizgisi etrafında kümelendikleri görülmektedir ve bazı numuneler için çizginin altında bazı numuneler için üstünde bulunduğu dikkat çekmektedir. Değerler arasında bir genelleyici bir trend gözlemlenmemiştir.



Şekil 3.13. DKKS'den ve İTÜ'deki kesme setinden elde edilen spesifik enerji değerleri

Hem Şekil 3.12 hem de 3.13'ten da görülebileceği gibi iki deney düzeneğinden de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen kesme kuvveti ve spesifik enerji değerlerindeki sapmalar, iki farklı ölçme sistemi kullanıldığı için doğal karşılanmaktadır. Ancak elde edilen değerlerin anlamlılığının test edilebilmesi için bağımlı örneklem t-testi gerçekleştirilmiştir. Bu test sayesinde aynı numunelerin iki farklı ölçüm sistemi ile ölçülmesi konusu ve ölçüm sistemlerinin birbirine göre doğru ölçüm yapıp yapmadığı araştırılmaktadır. IBM SPSS Statistics 20 programı ile gerçekleştirilen bağımlı örneklem t testi sonuçları Tablo 3.1'de verilmiştir. Bu tabloda çeşitli veriler sunulmuştur ancak dikkat edilmesi gereken bölge anlamlılık kısmıdır. %95 güven aralığındaki testte, elde edilen anlamlılık değerlerinin 0,05'ten büyük olması beklenmektedir. Bu değer 0,05'ten küçükse

iki ölçüm sisteminin farklı ölçüm yaptığı sonucuna varılmaktadır. Bağımlı örneklem t testi sonucunda hem kesme kuvveti hem de spesifik enerji değerleri için anlamlılık düzeyleri 0,67 ve 0,28 olarak bulunmuştur. Bu değerler 0,05'ten büyük olduğu için iki ölçüm sisteminin birbiri ile aynı sonuçları verdiği sonucuna varılabilir.

Tablo 3.1. Bağımlı örneklem t testinin sonuçları

	Bağımlı Farklar					t	df	Anlamlılık (Çift yönlü)
	Ortalama	Standart Sapma	Standart Hata Ortalaması	95% Güven Aralığındaki Farklar				
				Alt	Üst			
SE	1,69	9,88	3,74	-7,45	10,83	0,45	6	0,67
FC/d	-78,47	174,12	65,81	-239,50	82,56	-1,19	6	0,28

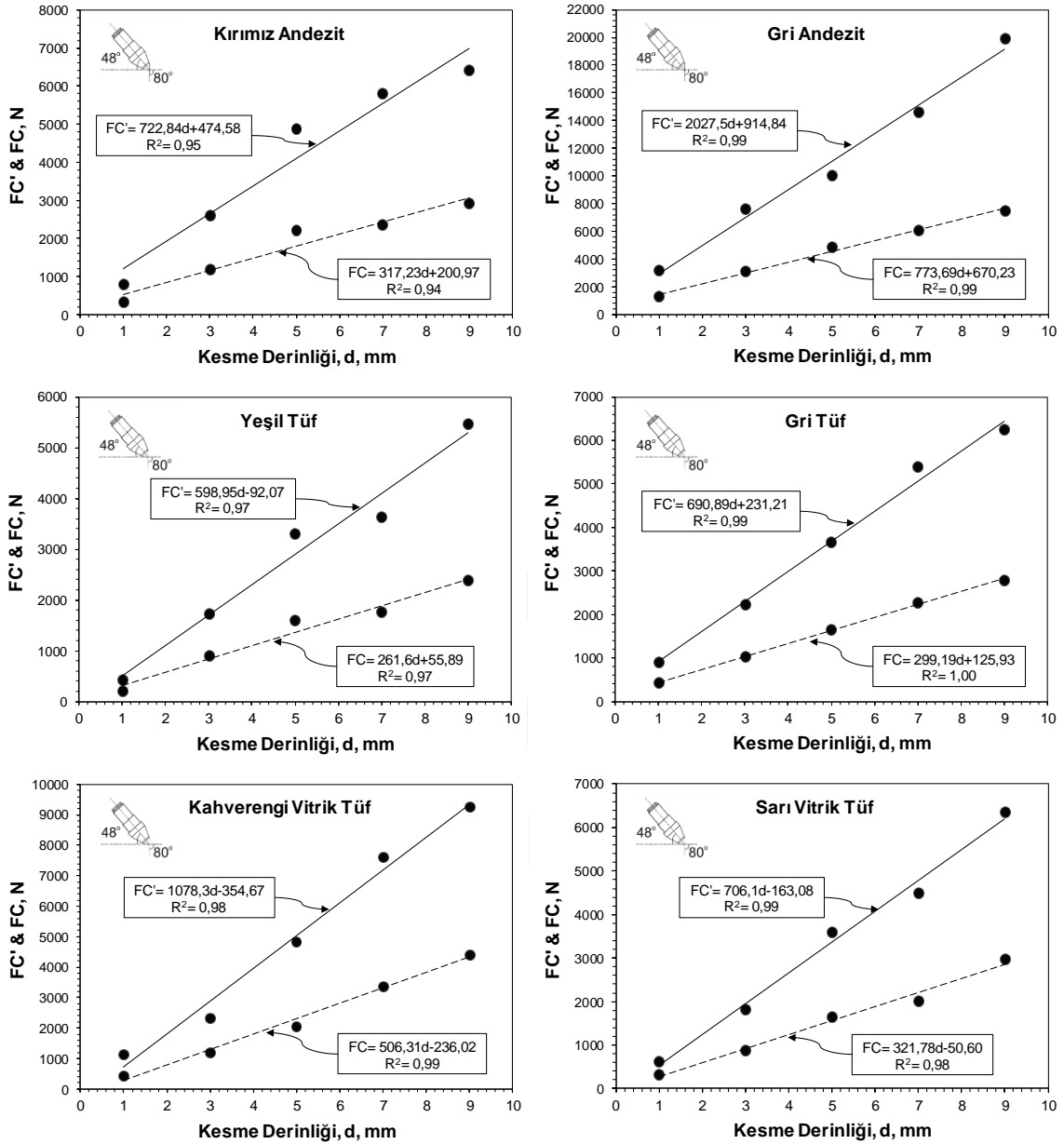
McFeat-Smith ve Fowell (1979) tarafından önerilen standart yöntem kullanılarak hem DKKS'de hem de İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan küçük boyutlu kaya kesme (karot kesme) deney düzenğinde gerçekleştirilen karot kesme deneyleri sonucunda elde edilen sonuçları maddeler halinde sıralamak gerekirse:

- İki deney düzeninden de elde edilen ortalama kesme kuvveti değeri birbirine yakındır,
- İki deney düzeninden de elde edilen spesifik enerji değeri birbirine yakındır,
- DKKS'den elde edilen kuvvet ve spesifik enerji değerleri bağımlı örneklem t testine göre anlamlıdır,
- 120,07 MPa'a kadar olan kayaçlar (fosilli kumtaşı) DKKS'de kesilebilmektedir,
- Hem karot hem de küçük blok numuneler kesme deneyine tabi tutulabilmektedir,
- Karot kesme deneyi, DKKS'de başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir,
- Ayrıca, DKKS'den elde edilen kesme kuvveti değerleri diğer bir ölçme sistemi ile de doğrulanmıştır.

### 3.3. Düşey Kayaç Kesme Setinde (DKKS) Konik Keskiler ile Tam Boyutlu Kesme Deneylerinin Yapılması

Tez çalışmasının diğer bir amacı, performans tahmini amaçlı kullanılmak üzere kaya numuneleri üzerinde tam boyutlu kesme deneylerinin gerçekleştirilebilmesidir. Konik keskiler, kısmi cepheli tünel/galeri açma makinelerinde en çok kullanılan keski tipidir. Bundan dolayı, konik keskiler ile kaya kesme deneyleri gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaç için gerçekleştirilen etkileşimsiz ve etkileşimli kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar burada irdelenmiştir. Şekil 3.14'te konik keskiler ile etkileşimsiz kesme deneylerinden elde edilen maksimum kesme kuvvetinin kesme derinliğine bağlı değişimi görülmektedir. Tüm kayaçlar için maksimum kesme kuvveti kesme derinliğinin artması ile lineer olarak artmıştır. Geçmiş çalışmalar incelendiğinde kesme kuvvetinin kesme derinliği ile lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir (Hurt ve Laidlaw, 1979; Hurt, 1980; Roxborough vd., 1981; Inyang, 2002; Bilgin vd., 2006, Liu vd., 2009; Liu vd., 2014; Shao vd., 2017). Tek istisna olarak, Demou vd. (1983) ve Yao (2012) kesme kuvveti ile kesme derinliği arasında üslü bir ilişki olduğunu göstermiştir ve kesme derinliğinin üssünün 1,3-1,5 civarı olduğunu belirtmiştir. Buna ek olarak, teorik çalışmalarda maksimum kesme kuvvetinin kesme derinliğinin karesi ( $d^2$ ) ile lineer olarak arttığı belirtilmektedir (Evans, 1984; Roxborough ve Liu, 1995; Gökten, 1997; Gökten ve Güneş, 2005). Ayrıca Şekil 3.14'te ortalama kesme kuvvetinin kesme derinliği ile ilişkisi görülmektedir. Maksimum kesme kuvveti gibi, ortalama kesme kuvveti de kesme derinliği ile lineer olarak artmıştır. Şekilde görülen lineer regresyonların determinasyon katsayıları 0,94 ile 1,00 arasında değişmiştir. Hem maksimum kesme kuvveti hem de ortalama kesme kuvvetinin kesme derinliği ile olan bağıntı Eşitlik 3.1 ve 3.2'de olduğu gibidir. Basit kama tipi keskilerle deneylerde olduğu gibi kesme derinliğinin ölçüm sistemi üzerindeki etkisi bu deneyler sonucunda da açıkça görülmektedir. Bunun dışında, en düşük dayanıma sahip olan yeşil tuf numunesinin en düşük kesme kuvvetine, en yüksek dayanıma sahip olan gri andezitin ise en yüksek kesme kuvvetine sahip olduğu görülmektedir. Bunun dışında dikkat çekilmesi gereken diğer bir husus ise, gri andezit numunesi basit kama tipi keskiler ile kesilememiştir ve uçların yenilmesine neden olduğundan dolayı kesme deneylerine devam edilmemiştir. Ancak, gri andezit numunesi, konik keskiler ile başarılı bir şekilde kesilmiştir. Buna ilave olarak, Şekil 3.14'ten görülebileceği gibi, gri andezitin 9 mm kesme derinliğine denk gelen maksimum kesme kuvveti 20 kN'a yaklaşmaktadır. Buradan da 20 kN'a (2 ton) ulaşan yüklerin ölçme sistemi ile ölçülebildiği açıkça görülmektedir.

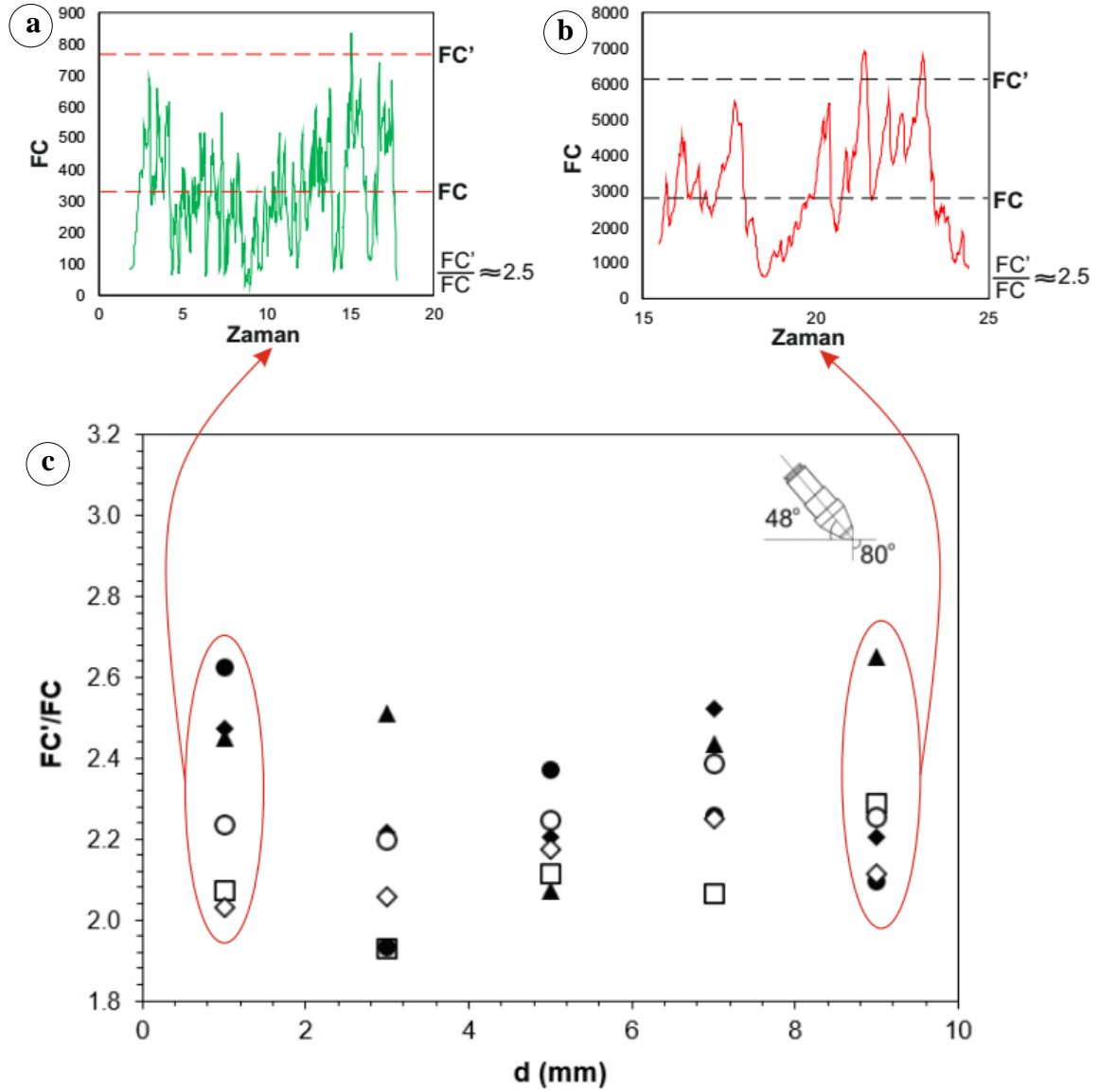




Şekil 3.14. Maksimum ve ortalama kesme kuvvetinin kesme derinliği ile değişimi

Maksimum kesme kuvvetinin ortalama kesme kuvvetine oranı ( $FC'/FC$ ), basit kama tipi keskilere göre farklı olarak herhangi bir değere yakınsamamıştır. Birkaç numunede genel eğilim olarak kesme derinliği ile bu oranın arttığı görülse de tamamen kapsayıcı bir trend görülebilmiştir. Şekil 3.15'te  $FC'/FC$  oranının kesme derinliği ile değişimi görülmektedir. Bu oran, optimum kesme koşulu olarak sayılabilecek 9 mm kesme derinliğinde 2,09 ile 2,65 arasında değişmiştir. Bu sonuçlardan da genel olarak bu değerlerin pratik olarak 2-2,5 arasında değişebileceği iddia edilebilir. Elde edilen bu sonuçlar, geçmiş çalışmalarda elde edilen

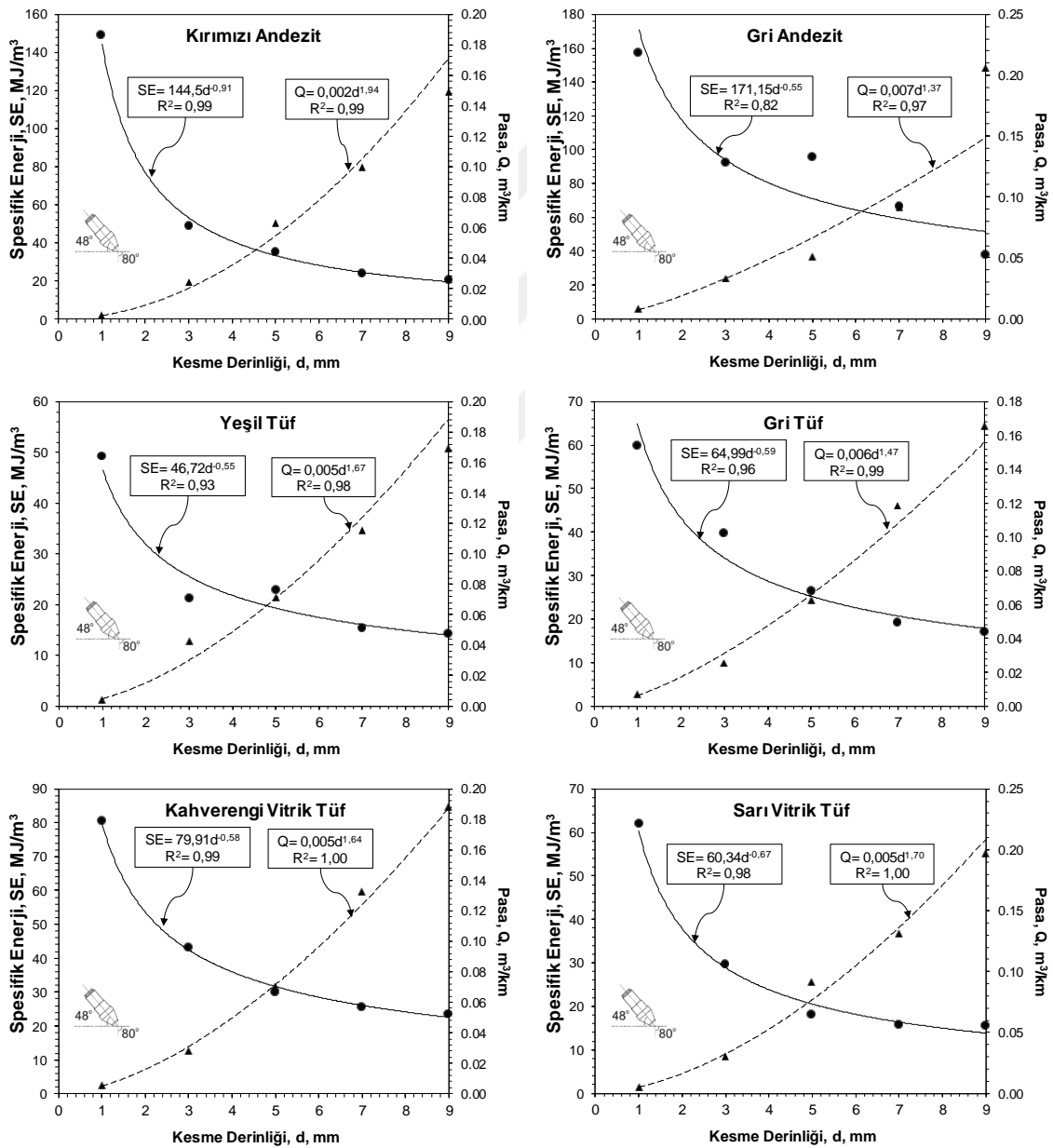
bulgular ile örtüşmektedir (Bilgin vd., 2006). Kama tipi keskilere (Bkz. Şekil 3.4) farklı olarak kesme derinliğine bağlı olarak  $FC'/FC$  oranında anlamlı bir değişim olmamıştır.



Şekil 3.15. (a) 1 mm kesme derinliğinde oluşan kuvvet-zaman grafiği (b) 9 mm kesme derinliğinde oluşan kuvvet-zaman grafiği (c)  $FC'/FC$  oranının kesme derinliği ile değişimi (Yasar ve Yılmaz, 2017c)

Kesme verimliliğinin en önemli göstergesi olan spesifik enerji değerinin ve pasanın kesme derinliği ile olan ilişkisi Şekil 3.16'da verilmiştir. Grafikte, spesifik enerjinin kesme derinliğinin artması ile azaldığı görülmektedir. Bu durum geçmiş çalışmalar ve bu çalışmada elde edilen diğer sonuçlar ile örtüşmektedir. Kazı makinelerinin sahadaki uygulamalarında,

kesme derinliğinin 10 mm civarında olması halinde verimli kesme koşullarının oluştuğu iddia edilmektedir (Hurt ve MacAndrew, 1985). Bu çalışmada, konik keskilerle yapılan etkileşimsiz kesme deneylerinden elde edilen bu sonuçlarda da buna benzer sonuçlar elde edilmiştir ve spesifik enerjinin 9 mm kesme derinliğine yaklaşırken sabitlenerek optimum değerine ulaştığı görülmüştür. Bu sonuçlar geçmiş çalışmalar ile uyum içindedir (Copur vd., 2001, 2003; Bilgin vd., 2006; Tumac vd., 2007). En yüksek spesifik enerji değerine, en yüksek dayanıma sahip olan gri andezit numunesinin kesilmesinde ulaşılmıştır.



Şekil 3.16. Spesifik enerjinin ve pasanın kesme derinliği ile değişimi

Sarı vitrik tuf ve yeşil tuf numunelerinin kesilmesinden elde edilen spesifik enerji değeri ise birbirine çok yakın olarak bulunmuştur ve en düşük spesifik enerji değerine bu numunelerin kesilmesinden ulaşılmıştır. Dayanımları ve kesme kuvvetleri farklı olmasına rağmen spesifik enerji değerleri birbirine çok yakın çıkan bu numuneler, kesme deneylerinin kayaçların kesilebilirliğinin tayininde ne kadar önemli olduğunu açıkça göstermektedir.

Hem spesifik enerji hem de pasa ile kesme derinliği arasında Eşitlik 3.3 ve 3.4'te verildiği gibi üssel bir ilişki elde edilmiştir. Etkileşimsiz kesme deneylerinin ardından, etkileşimli kesme deneylerinden elde edilen sonuçların da irdelenmesi gerçekleştirilecektir. Deneylerden elde edilen verilerin araziye uygulanabilmesi noktasında etkileşimli kesme deneyleri çok büyük öneme sahiptir. Optimum kesme derinliği 9 mm olarak belirlendiği için etkileşimli kesme deneyleri, 9 mm kesme derinliği sabit tutularak gerçekleştirilmiştir ve kesmeler arası mesafe değişken olarak tanımlanmıştır.

Şekil 3.17'de maksimum kesme kuvvetinin farklı kesme derinliklerinde tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile değişimi verilmiştir. Tüm kesme derinliklerinde maksimum kesme kuvveti ile tek eksenli basınç dayanımı arasında üssel bir ilişki elde edilmiştir. Bu üssel ilişkilerin determinasyon katsayıları 0,71 ile 0,93 arasında değişmektedir. Eğilimlerin genel eşitliklerini yazmak gerekirse:

$$FC' = x e^{y\sigma_c} \quad (3.5)$$

$$FC' = x e^{y\sigma_{bt}} \quad (3.6)$$

Burada;

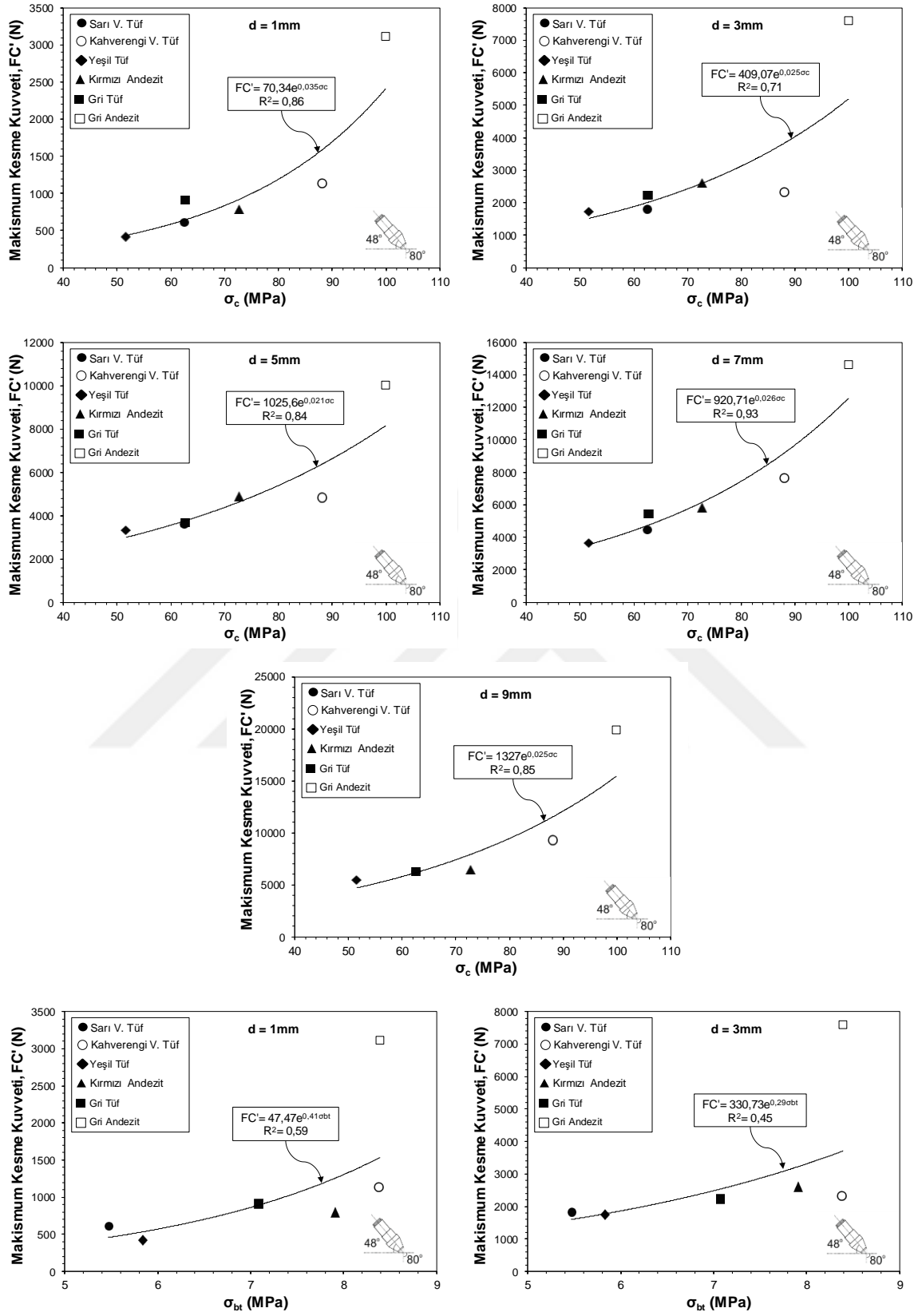
$FC'$  = Maksimum kesme kuvveti, N,

$\sigma_c$  = Tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

$\sigma_{bt}$  = Dolaylı çekme dayanımı, MPa,

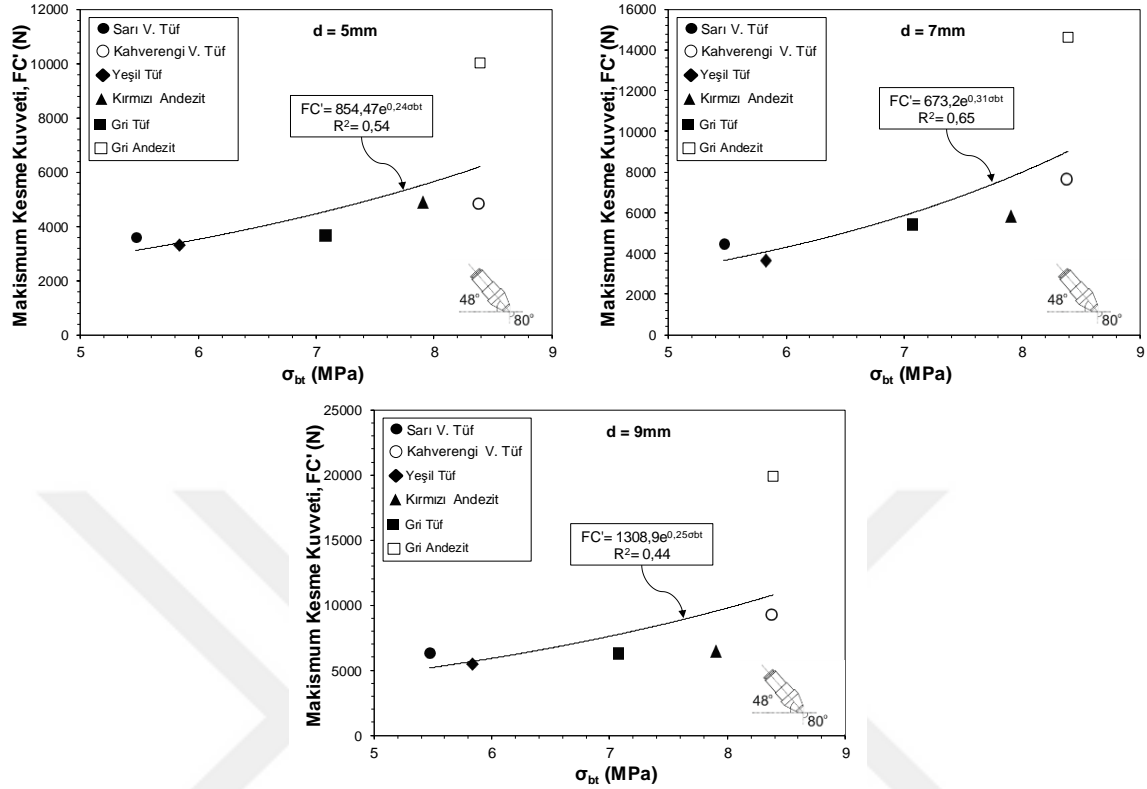
$x, y$  = Kayaca ya da kesme koşuluna bağlı değişkenlerdir.

Tek eksenli basınç dayanımı değeri, her kesme derinliğinde dolaylı çekme dayanımından daha iyi sonuçlar vermiştir. Tek eksenli basınç dayanımının kesme kuvvetinin tahmininde daha iyi sonuçlar verebileceği bu sonuçlara göre iddia edilebilir. Buna sebep olarak da gri andezit numunesinin düşük çekme dayanımına rağmen çok yüksek kesme kuvveti değerleri üretmesi gösterilebilir. Tüm teorik modellerde kesme kuvvetinin bu iki parametreden (basınç ya da çekme dayanımı) biri ile lineer olarak arttığı belirtilmektedir (Evans, 1984; Roxborough ve Liu, 1995; Gökten, 1997; Gökten ve Güneş, 2005). Ancak, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar bu bulgular ile çelişmektedir.



Şekil 3.17. Maksimum kesme kuvvetinin farklı kesme derinliklerinde tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile değişimi

Şekil 3.17'nin devamı



Kesme verimliliğinin en önemli göstergesi olan spesifik enerjinin farklı kesme derinliklerinde tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile değişimi Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Kesme kuvveti ile benzer olarak spesifik enerji de tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile üssel olarak değişmektedir. Kesme kuvvetinde olduğu gibi, spesifik enerjide de tek eksenli basınç dayanımı dolaylı çekme dayanımından daha iyi sonuçlar vermiştir. Genel eğilim olarak vermek gerekirse:

$$SE = xe^{y\sigma_c} \quad (3.7)$$

$$SE = xe^{y\sigma_{bt}} \quad (3.8)$$

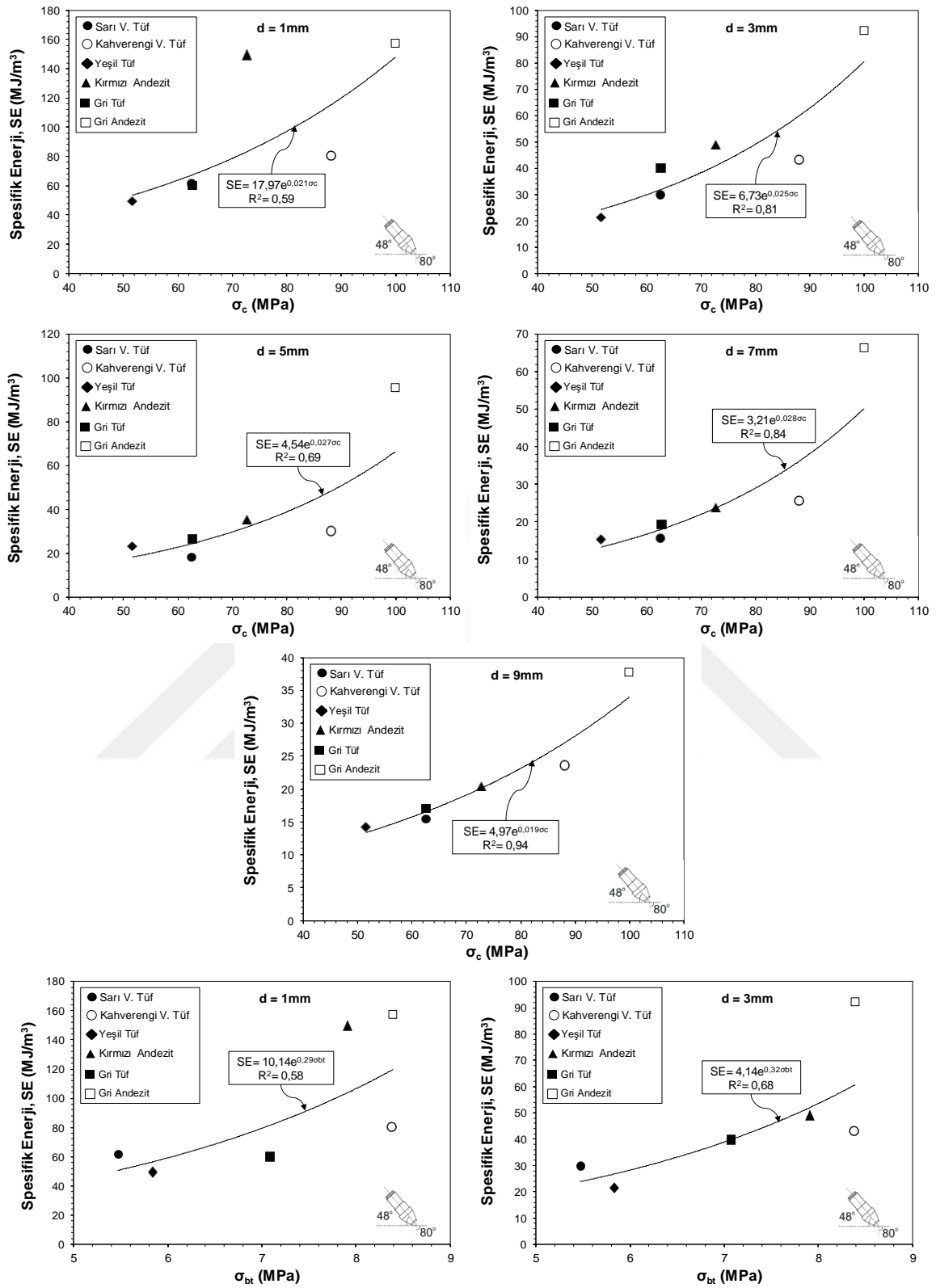
Burada;

SE = Spesifik enerji, MJ/m<sup>3</sup>,

σ<sub>c</sub> = Tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

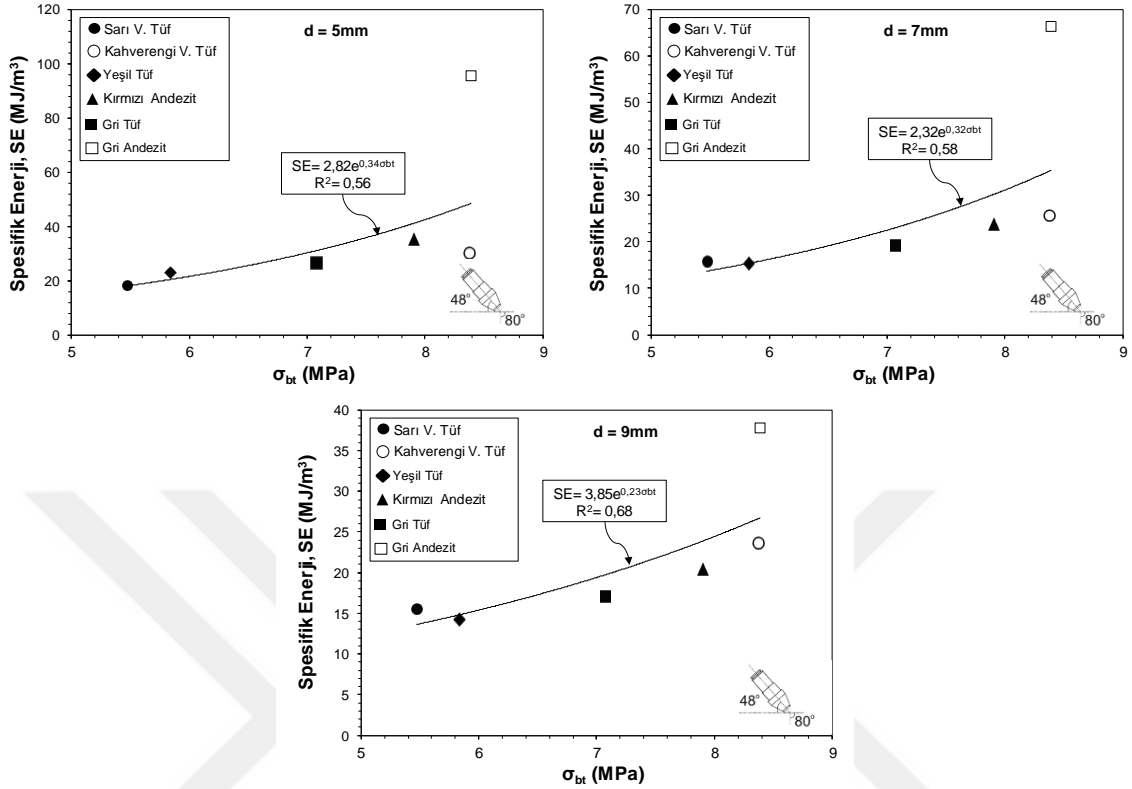
σ<sub>bt</sub> = Dolaylı çekme dayanımı, MPa,

x, y = Kayaca ya da kesme koşuluna bağlı değişkenlerdir.



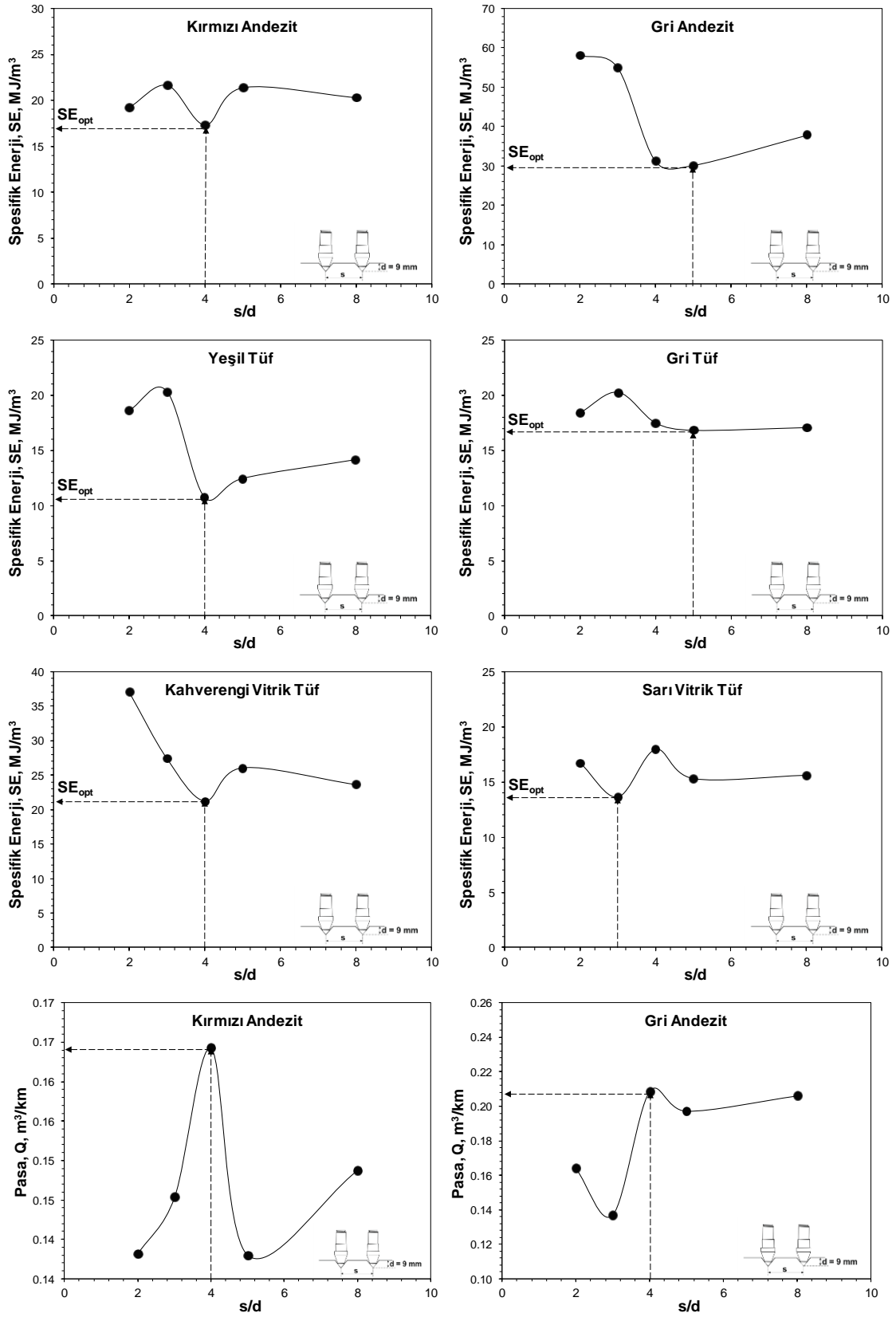
Şekil 3.18. Spesifik enerjinin farklı kesme derinliklerinde tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile değişimi

Şekil 3.18'in devamı



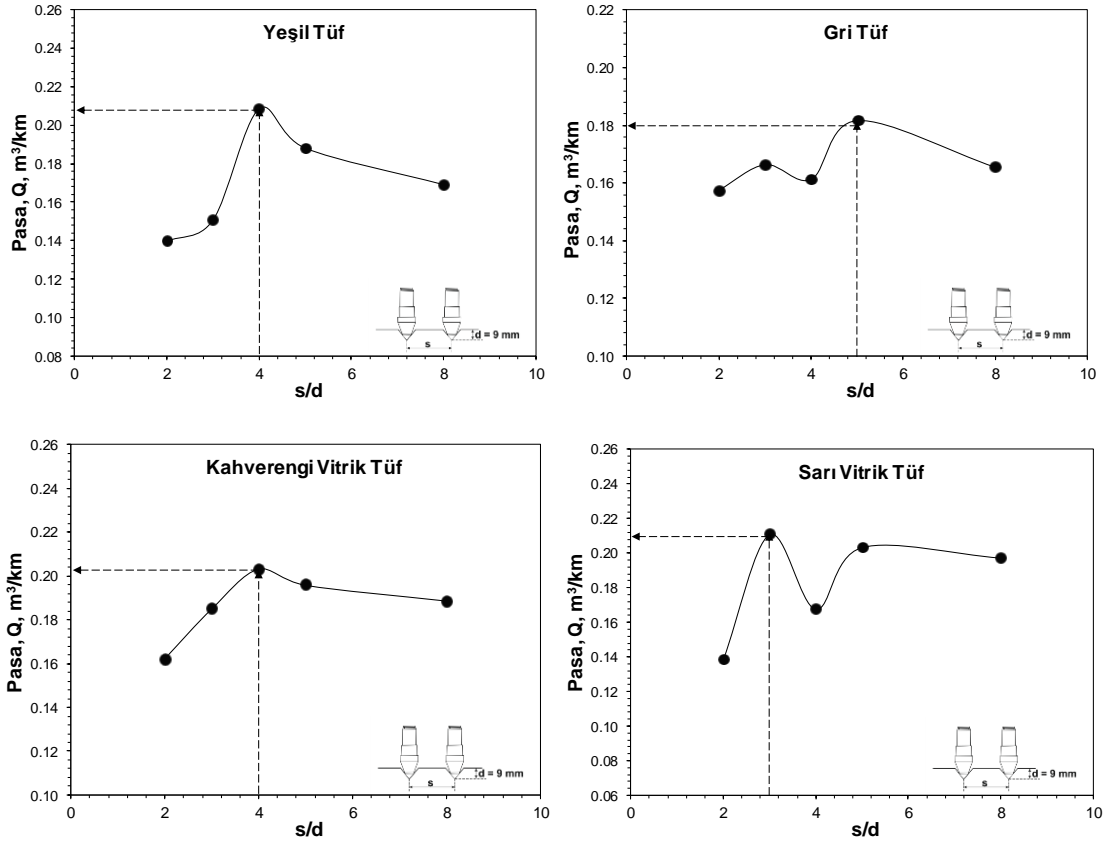
Etkileşimli kesme deneyleri sahadaki kesme koşullarının laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilmesi için önemli bir yere sahiptir. Buradan elde edilen optimum spesifik enerji ( $SE_{opt}$ ) değerleri Rostami vd. (1994) tarafından önerilen performans tahmini modelinde kullanılmaktadır. Şekil 3.19'da keskinerler arası mesafenin kesme derinliğine oranı ( $s/d$ ) ile spesifik enerjinin ve oluşan pasanın  $s/d$  oranı ile değişimi gösterilmiştir. Optimum  $s/d$  oranının 3 ile 5 arasında değiştiği Şekil 3.16'dan görülmektedir, bu değer de önceki çalışmalardaki bulgular ile örtüşmektedir (Evans, 1984; Neil vd., 1994; Bilgin vd., 2006). En yüksek dayanıma sahip olan gri andezit numunesinin kesilmesinden elde edilen spesifik enerji değeri en yüksek spesifik enerji değeri olarak gözlemlenmiştir, aynı zamanda yeşil tüf numunesinin optimum spesifik enerji değeri en düşük seviyede seyretmiştir. Şekil 3.18'dan pasalar değerlerinin optimum kesme koşullarında maksimum seviyeye ulaştığı görülmektedir. Basit kama tipi keskinerler ile kesmede olduğu gibi en yüksek pasalar sarı vitrik tüf numunesinin optimum koşullarda ( $s=30$  mm) kesilmesinden elde edilmiştir.





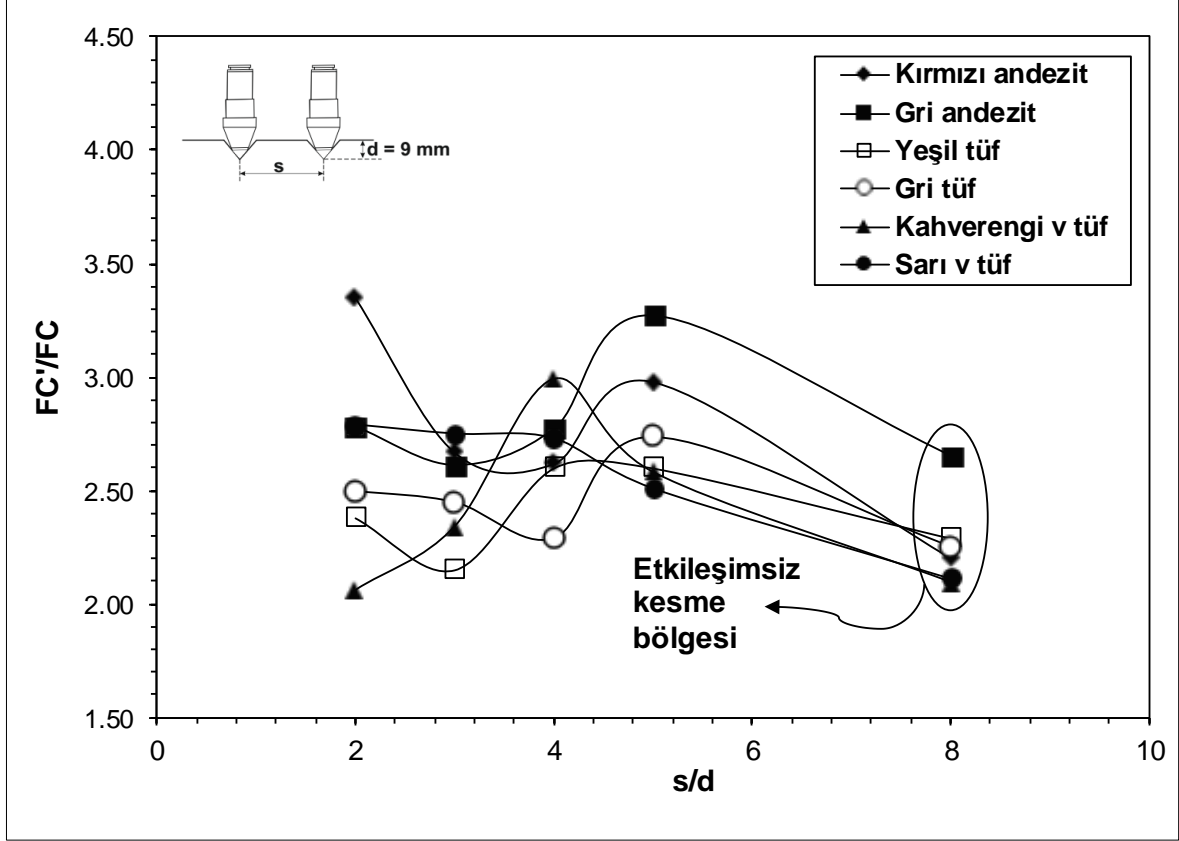
Şekil 3.19. Etkileşimli kesme deneyinde spesifik enerjinin ve pasanın s/d oranı ile değişimi

Şekil 3.19'un devamı



Etkileşimli kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji grafiklerinden elde edilen diğer bir bulgu ise, 9 mm etkileşimsiz kesmede elde edilen spesifik enerji değerinin etkileşimli ve optimum kesme durumunda tüm kayalar için ortalama %15 oranında azalmasıdır. Şekil 3.20’de maksimum kesme kuvvetinin ortalama kesme kuvvetine oranının ( $FC'/FC$ ) etkileşimli kesme deneylerinde  $s/d$  oranı ile değişimi verilmiştir.  $FC'/FC$  oranı 2,06 ile 3,35 arasında değişmektedir. Bu oran, karmaşık bir dağılım göstermektedir. Ancak, genel bir eğilim olarak optimum kesme noktasında maksimum değere ulaşmaktadır. Bu da kırılmanın ya da büyük parça koparmanın en yüksek olduğu noktayı temsil etmektedir. Optimum kesme durumları için  $FC'/FC$  oranı 2,60 ile 3,27 arasında değişmektedir. Bilgin vd. (2006) benzer koşullar altında çeşitli cevher ve kayaların kesilmesinden sonra  $FC'/FC$  oranının 3,07 civarında olduğunu belirlemişlerdir. Bu sonuçlarda, Bilgin vd. (2006) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir. Bu değer kayacın birtakım özellikleriyle, özellikle de kırılgenlik özellikleri ile ilgili olduğu tartışmasız bir gerçektir. Ancak bu konuda yapılmış herhangi bir çalışma şu ana kadar göze çarpmamıştır.

Bundan dolayı,  $FC'/FC$  oranının pratik koşullarda kullanılması için basitçe 3 olarak kabul edilebileceği iddia edilebilir.



Şekil 3.20. Etkileşimli kesme deneyinde  $FC'/FC$  oranının  $s/d$  oranı ile değişimi

Buraya kadar elde edilen sonuçlar ile konik keskiyer yardımı ile kaya kesme deneylerinin yapılabileceği açıkça gösterilmiştir. Ancak konik keskiyer yardımı ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerin daha anlamlı bir hale gelmesini sağlamak için elde edilen veriler geçmiş çalışmalar ile karşılaştırılacaktır. Daha önce de kısaca değinildiği gibi Balcı ve Bilgin (2007) çeşitli kayaç ve cevher numuneleri üzerinde karot kesme deneyi ve konik keskiyer ile tam boyutlu kesme deneyi gerçekleştirmişlerdir. Karot kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji değerinin pratik kullanımının daha da yaygınlaştırılması adına gerçekleştirilen bu çalışmada, 9 mm kesme derinliğinden konik keskiyer ile kesilen çeşitli kayaç ve cevherlere ait optimum spesifik enerji değerleri, aynı numunelerin karot kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji değerleri ile ilişkilendirilmiştir. Balcı ve Bilgin (2007) karot kesme deneyinde McFeat-Smith ve Fowell (1979) tarafından önerilen yöntemi ve keskiyeri, konik kesme deneyinde ise  $80^\circ$  uç açısına

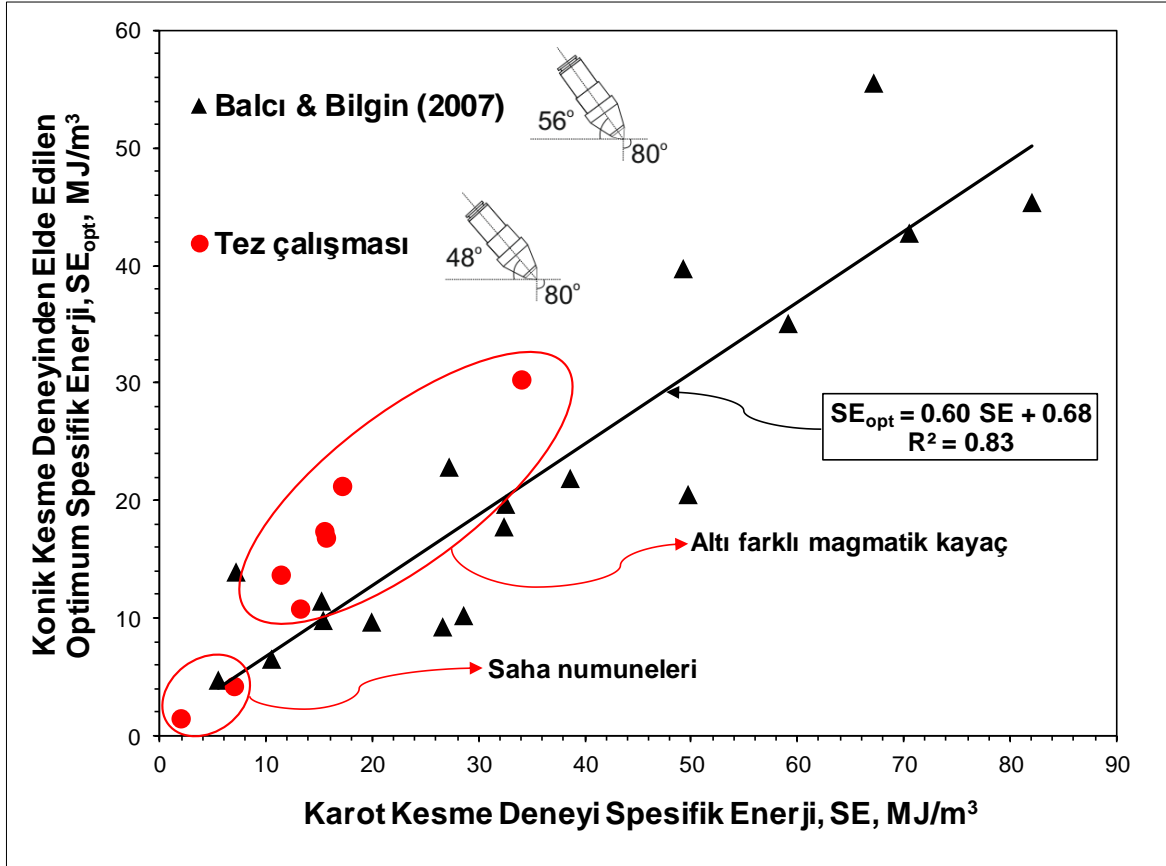
sahip olan ve  $56^\circ$  dalma açısı ile yerleştirilen bir konik keskiyi kullanmışlardır. Bu çalışmada da karot kesme deneyi McFeat-Smith ve Fowell (1979) tarafından önerilen metot ve keski ile gerçekleştirilirken, konik keski olarak uç açısı  $80^\circ$ , dalma açısı  $48^\circ$  olan bir keski kullanılarak aynı şartlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Kontrollü deneylerde kullanılan altı farklı magmatik kayaç ve iki saha numunesi üzerinde gerçekleştirilen karot kesme ve konik keski ile etkileşimli kesme deneyinin sonuçları özet olarak Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Karot kesme ve konik keski ile gerçekleştirilen etkileşimli kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji değerleri

Numune Adı	Karot Kesme Deneyi Spesifik Enerji, SE, MJ/m <sup>3</sup>	Konik Keskidenden Elde Edilen Optimum Spesifik Enerji, SE <sub>opt</sub> , MJ/m <sup>3</sup>
Kırmızı andezit	15,58	17,34
Gri andezit	34,10	30,19
Yeşil tüf	13,24	10,76
Gri tüf	15,73	16,83
Kahverengi vitrik tüf	17,24	21,24
Sarı vitrik tüf	11,48	13,62
Volkanik kumtaşı	7,08	4,19
Kristal tüf	2,03	1,39

Şekil 3.21’de bu çalışmadaki ve önceki çalışmadaki değerlerin grafik üzerinde işaretlenmesi verilmiştir. Balcı ve Bilgin (2007) çalışmalarında farklı tenörlerde kromitler, harzburjit, serpantin, trona, kitaşı, kumtaşları, silttaşı, kireçtaşı ve tüflerden oluşan 18 farklı kayaç ve cevher kullanmıştır. Sonuç olarak, Şekil 3.21’de görülen  $SE_{opt} = 0,60SE + 0,68$  eşitliğini elde etmişlerdir ve bu eşitliğin lineer regresyon çizgisi de şekilde gösterilmiştir. Balcı ve Bilgin (2007) çalışmasında numuneleri doğal saha nemleri ile kesme deneylerine tabi tutmuşlardır. Bu çalışmada ise altı magmatik kayaç kuru halde kesme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Saha numuneleri ise sahadaki doğal nem durumları olan doygun halde kesme deneyine tabi tutulmuşlardır. Her iki çalışmanın da sonuçları bu grafikte verilmiştir. Bu grafiğe göre, bu çalışmadan elde edilen değerler Balcı ve Bilgin (2007) tarafından elde edilen değerler ile örtüşmektedirler. Bu çalışmada kullanılan magmatik kayaçlardan elde edilen

değerler bir miktar yüksek görülmektedir. Bunun nedeni deneye tabi tutulan kayaç tipi olabilir ki önceki çalışmada çok farklı kayaç ve cevherlerden oluşan numuneler üzerinde kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise yalnızca magmatik kökenli kayaçlar üzerinde kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme deneylerinde kullanılan sarı vitrik tüf ve yeşil tüf numuneleri lineer regresyon çizgisine yakın bir dağılım göstermişlerdir.



Şekil 3.21. Konik kesme deneylerinden elde edilen sonuçların Bacı ve Bilgin (2007) tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması

Diğer yandan, doğal nem içerikleri ile deneye tabi tutulan saha numunelerinin tam olarak lineer regresyon çizgisinin üzerine düştüğü de dikkat edilmesi gereken bir sonuçtur. Sonuçların farklı çıkmasına sebep olabilecek diğer bir etken olarak keskinin dalma açısı gösterilebilir. Teorik çalışmalardan daha yüksek dalma açılarının daha yüksek kesme kuvvetine neden olacağı belirtilmektedir (Göktan ve Güneş, 2005). Ancak pratikte bu durum her zaman böyle olmamaktadır ki Hurt (1980) konik keskiner ile ilgili gerçekleştirdiği kapsamlı çalışmasında kesme kuvvetinin 48-56° arasındaki dalma açılarından çok büyük miktarda etkilenmediğini yani bu aralıktaki dalma açılarının birbirine yakın sonuçlar

vereceğini göstermiştir. Buna ilave olarak, Spagnoli vd. (2017) tarafından da benzer (35°-55° dalma açılarında) sonuçlar elde edilmiştir. Bundan dolayı, keskinin dalma açısının da bu konuda anlamlı bir etki oluşturmayabileceği iddia edilebilir.

Bu farklılık konusunda ileri sürülebilecek diğer bir durum numune boyutları olabilir. Tam boyutlu kesme deneylerinde küçük boyutlu kesme deneylerine nazaran çok büyük boyutlardaki numuneler kullanılmaktadır ve numune boyut arttıkça içerdiği makro ve mikro süreksizlik miktarı artacağından dolayı büyük boyuttaki numunelerin dayanımının daha düşük olması beklenir (Weibull, 1939). Ancak, kaya kesme deneylerinde numune boyutu olarak keski ile kayacın temas yüzeyi dikkate alınmalıdır. Çünkü, bazı araştırmacılar keski ile kayaç arasında bulunan temas alanının artması ile kayacın dayanımının düştüğünü göstermişlerdir (Reichmuth, 1968; Brook, 1974). Ayrıca, Wagner ve Schumann (1971), Cook vd. (1984) ve Chiaia (2001) artan keski boyutuyla temas basıncının düştüğünü göstermişlerdir. Bundan dolayı, numunenin boyutundan ziyade önemli olan parametrenin keskinin temas yüzeyinin alanı yani boyutu olduğu belirtilebilir. Her iki çalışmada da benzer geometriye sahip keskinler kullanıldığından dolayı, numune boyutunun etkisi de ihmal edilebilir. Bu sonuçlar ışığında sonuçların farklı çıkmasına neden olabilecek olası sebep olarak farklı numunelerin kullanılması gösterilebilir.

Elde edilen bu veriler sonucunda, düşey kayaç kesme setinde (DKKS) konik keskinler ile kaya kesme deneylerinin yapılabilmesinin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Çok daha küçük numunelerle tam boyutlu kesme deneyi gerçekleştirilerek elde edilen optimum spesifik enerji değerleri performans tahmininde güvenli bir biçimde kullanılabilir. Çalışmanın bu kısmından elde edilen sonuçları tekrar maddeler halinde özetlemek gerekirse:

- Ortalama ve maksimum kesme kuvveti kesme derinliği ile lineer artmaktadır,
- Maksimum kesme kuvveti tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile üssel olarak artmaktadır,
- Spesifik enerji tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı ile üssel olarak artmaktadır
- FC'/FC oranı etkileşimsiz kesmelerde 2,5 civarında kabul edilebilir,
- Spesifik enerji kesme derinliği üssel olarak azalmaktadır,
- Etkileşimli ve optimum durumdaki spesifik enerji değeri, etkileşimsiz durumdaki spesifik enerjiden ortalama %15 daha düşük seyretmektedir,
- Pasa miktarı kesme derinliği ile üssel olarak artmaktadır,
- Optimum kesme koşulları için s/d oranı 3-5 arasında değişmektedir,

- Optimum kesme koşullarında, FC'/FC oranı 3 civarındadır,
- Konik kesmeler ile tam boyutlu kesme deneyleri yapılabilir,
- Bu deneylerden elde edilen spesifik enerji değerleri performans tahmininde kullanılabilir.

### 3.4. Düşey Kayaç Kesme Setinden (DKKS) Elde Edilen Verilerin Teorik Çalışmalar ile Karşılaştırılması

Kaya kesme deneylerinden elde edilen kuvvet değerlerinin kaya kesme teorilerinden elde edilen kesme kuvveti değerleri ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Bu amaç için öncelikle 12° kesme açısına sahip olan basit şekilli kama tipi kesmeler ile kayaçların kesilmesinden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Sonra, kesme açısının ve temizleme açısının kesme kuvvetinin tahmin kabiliyetine etkisinin irdelenebilmesi için, karot kesme deneylerinde kullanılan -5° kesme açısına sahip olan keski ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri teorik formüllerden elde edilen kuvvet değerleri ile kıyaslanmıştır. Son olarak ta konik kesmeler ile yapılan kesme deneylerinden elde edilen kuvvet değerleri, konik kesmeler için önerilen kesme teorilerinden elde edilen kuvvet değerleri ile karşılaştırılmıştır ve tüm kaya kesme teorilerinin kesme kuvvetlerinin tahmin kabiliyetleri tartışılmıştır.

Basit kama tipi kesmeler ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen maksimum kesme kuvveti (FC') değerleri Evans (1958) ve Nishimatsu (1972) tarafından önerilen ve Eşitlik 1.2 ve Eşitlik 1.4'te verilen formüller yardımı ile bulunan teorik kesme kuvveti değerleri ile kıyaslanmıştır. Evans (1958) kaya kesme teorisinde, dolaylı çekme dayanımı değil, direkt çekme dayanımı parametresi kullanılmıştır. Nishimatsu (1972) tarafından önerilen eşitlikte ise kesme dayanımı ( $\sigma_s$ ) ve içsel sürtünme açısı (k) değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımı ile bulunmuştur.

$$\sigma_s = \frac{\sigma_c \sigma_{bt}}{2\sqrt{(\sigma_{bt} (\sigma_c - 3\sigma_{bt}))}} \quad (3.9)$$

$$\tan k = \frac{\sigma_c^2 - 4\sigma_s^2}{4\sigma_c \sigma_s} \quad (3.10)$$

Burada;

$\sigma_s$  = Kayacın kesme dayanımı, MPa,

$\sigma_c$  = Kayacın tek eksenli basınç dayanımı, MPa,

$\sigma_{bt}$  = Kayacın dolaylı çekme dayanımı, MPa,

$k$  = Kayacın içsel sürtünme açısı, ° dir.

Nishimatsu (1972), kendi çalışmasında kesme dayanımı ve içsel sürtünme açısı değerlerinin bulunmasında da Eşitlik 3.9 ve 3.10'dan faydalanmıştır. Buna ek olarak, Nishimatsu tarafından önerilen eşitlikte bulunan kaya kesmedeki sürtünme açısı ( $\phi$ ) ve gerilme dağılım faktörü de ( $n$ ) yazarın kendi tarafından önerilen ampirik bağıntılar yardımı ile hesaplanmıştır. Kaya kesmedeki sürtünme açısının ( $\phi$ ) bulunabilmesi için iki adet eşitlik bulunmaktadır (Eşitlik 1.6 ve 1.7). Bu eşitliklerden Eşitlik 1.6 beton için, Eşitlik 1.7 ise Aoishi tüfü içindir. Bu çalışmada kesme deneylerinde kaya numuneleri kullanıldığından dolayı Eşitlik 1.7 kullanılarak  $\phi$  parametresi hesaplanmıştır. Nishimatsu (1972) tarafından önerilen bu eşitlik tamamen bir ampirik yaklaşımdır ve bu değer her hangi bir kayaç için nasıl hesaplanacağına dair herhangi bir açıklama ne yazık ki bu çalışmada bulunmamaktadır. Bundan dolayı Aoishi tüfü için önerdiği eşitlik baz alınmıştır. Kaya kesme deneylerinden ve kesme teorilerinden bulunan maksimum kesme kuvveti değerleri (FC') Tablo 3.3'te verilmiştir. Hem Evans (1958) hem de Nishimatsu (1972) tarafından önerilen modeller ile kesme kuvvetinin hesaplanmasına yönelik uygulama aşağıda verilmiştir.

*Evans (1958) tarafından önerilen ve Roxborough (1973) tarafından yeniden düzenlenen eşitlik ile hesaplama (Bkz. Eşitlik 1.2):*

Nunume = Kırmızı andezit,

$\sigma_t$  = 6,33 MPa,

$d$  = 1 mm,

$w$  = 10,8 mm,

$\alpha$  = 12°,

$$FC' = \frac{2 \sigma_t d w \sin \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} - \alpha)}{1 - \sin \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} - \alpha)},$$

$$FC' = \frac{2 \times 6,33 \text{ MPa} \times 1 \text{ mm} \times 10,8 \text{ mm} \times \sin \frac{1}{2}(90 - 12)}{1 - \sin \frac{1}{2}(90 - 12)},$$

$$FC' = 232,12 \text{ N}$$



Tablo 3.3. Basit kama tipi kesimler için elde edilen deneysel ve teorik FC' değerleri

Numune	Kesme Derinliği, d, mm	FC', N (Deneysel)	FC', N (Evans, 1958)	FC', N (Nishimatsu, 1972)
Kırmızı andezit	1	901,30	232,13	166,14
	2	1508,96	464,26	332,27
	3	2203,85	696,39	498,41
	4	2759,29	928,52	664,55
	5	3404,05	1160,60	830,68
	6	3793,87	1392,80	996,82
Yeşil tuf	1	638,54	171,26	114,72
	2	1003,75	342,51	229,43
	3	1277,16	513,77	344,15
	4	1652,47	685,02	458,86
	5	1961,22	856,28	573,58
	6	2268,81	1027,50	688,30
Gri tuf	1	903,32	207,56	139,14
	2	1330,27	415,12	278,27
	3	1886,44	622,68	417,41
	4	1850,37	830,24	556,55
	5	3350,86	1037,80	695,68
	6	3147,93	1245,40	834,82
Kahverengi vitrik tuf	1	1032,16	245,70	222,16
	2	1562,22	491,40	444,33
	3	2112,68	737,09	666,49
	4	2709,05	982,79	888,66
	5	2879,59	1228,50	1110,82
	6	4014,65	1474,20	1332,98
Sarı vitrik tuf	1	719,76	160,62	168,11
	2	1035,87	321,24	336,22
	3	1280,60	481,86	504,33
	4	2042,51	642,48	672,45
	5	2141,03	803,10	840,56
	6	2870,21	963,72	1008,67

*Nishimatsu (1972) tarafından önerilen model ile hesaplama için örnek uygulama (Bkz.*

*Eşitlik 1.4):*

$$\sigma_s = 14,62 \text{ MPa (Eşitlik 3.9),}$$

$$d = 1 \text{ mm,}$$

$$w = 10,8 \text{ mm,}$$

$$k = 46,27^\circ \text{ (Eşitlik 3.10),}$$

$$n = 9,14 \text{ (Eşitlik 1.5),}$$

$$\alpha = 12^\circ,$$

$$\phi = 26,74^\circ \text{ (Eşitlik 1.7),}$$

$$FC' = \frac{2}{n+1} \frac{\sigma_s d w \cos(k) \cos(\phi - \alpha)}{1 - \sin(k - \alpha + \phi)}$$

$$FC' = \frac{2}{9,14+1} \frac{14,62 \text{ MPa} \times 1 \text{ mm} \times 10,8 \text{ mm} \times \cos(46,27) \cos(26,74 - 12)}{1 - \sin(46,27 - 12 + 26,74)},$$

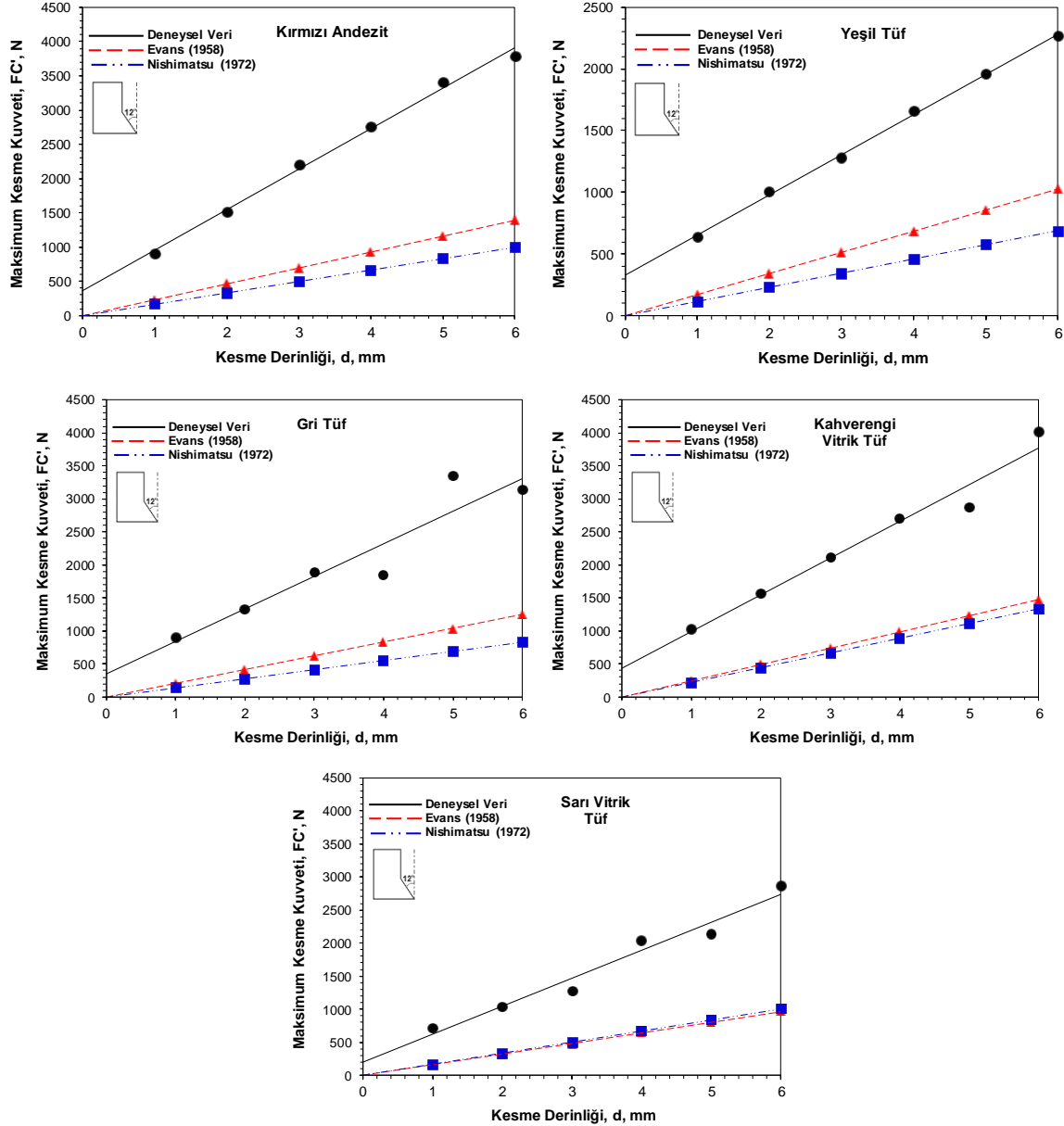
$$FC' = 166,14 \text{ N}$$

Elde edilen ve hesaplanan maksimum kesme kuvveti değerleri her kayaç için ayrı ayrı Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Grafikler ile ilgili ilk göze çarpan ayrıntı, kaya kesme teorilerinden hesaplanan kuvvet değerlerinin, kaya kesme deneyinden elde edilen kuvvet değerlerinden çok düşük bir seviyede olmasıdır. Deneysel kuvvet değeri, Evans (1958) tarafından önerilen eşitlik ile hesaplanan kuvvet değerinden ortalama 3 kat fazla görünürken, Nishimatsu (1972) tarafından önerilen eşitlik ile bulunan kuvvet değerinin yaklaşık 4 katına yakın bulunduğu görülmektedir.

Kimi araştırmacılar gerçekleştirdikleri kesme deneylerinin sonucunda, Evans tarafından önerilen eşitlik ile bulunan maksimum kesme kuvveti değerleri ile laboratuvar kesme deneylerinden ölçülen maksimum kesme kuvveti değerlerinin birbirine yakın olduğunu göstermişlerdir (Roxborough, 1973 ve 1985; Roxborough ve Rispin, 1973; Bilgin, 1977). Ancak, Bilgin (1989) dayanımı yüksek bir kireçtaşı ve dayanımı düşük bir kumtaşı numunesi üzerinde kesme deneyleri gerçekleştirmiştir ve Evans yaklaşımının dayanımı düşük olan kayaçta daha doğru sonuçlar verdiğini belirtirken, Nishimatsu yaklaşımının dayanımı yüksek olan kireçtaşı numunesinde daha doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Bu çalışmada hesap edilen kesme kuvvetinin deneyden elde edilen kesme kuvvetinden büyük olmasına neden olan etmenler, sürtünme ve temizleme açısının ihmal edilmesi, problemin iki boyutta incelenmesi ve kesme sırasında kayaç içinde oluşan gerilme durumunun tam olarak açıklanamaması gösterilebilir. Hem Evans (1958) hem de Nishimatsu (1972) tarafından önerilen eşitlikler incelendiğinde şu açıkça görülmektedir ki keski ile kayaç arasındaki temas yüzeyini temsil eden temizleme açısı hesaba katılmamaktadır. Şu bilinen bir gerçektir ki, 5-6°’ye kadar olan temizleme açısının kesme kuvveti üzerinde pozitif bir etkisi vardır (Roxborough, 1985; Sundae ve Myren, 1987). Bundan dolayı, aynı geometriye ve kesme açısına sahip ve temizleme açısı 0° ve 5° olan iki keskidenden 5° temizleme açısına sahip olan keski ile kesmede daha düşük kesme kuvvetinin oluşması

beklenmektedir. Ancak, her iki kesme teorisi ile hesaplamada da bu iki keski için maksimum kesme kuvveti aynı olarak hesaplanacaktır.



Şekil 3.22. Basit kama tipi keski ile kesmede elde edilen maksimum kesme kuvveti ile kaya kesme teorileri ile bulunan kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

Diğer bir husus ise sürtünme açısıdır. Temizleme açısı  $0^\circ$  olan bir keski sürekli olarak kaya yüzeyi ile etkileşim halindedir ve sürekli olarak sürtünmeye maruz kalmaktadır. Bundan dolayı, kayayı keserken bir miktar kuvvetin de keski ile kaya arasındaki sürtünmenin yenilmesine harcadığı bir gerçektir (Fairhurst ve Lacabanne, 1957; Detournay and

Defourny, 1992). Sürtünme açısı, Evans (1958) tarafından önerilen eşitlikte ihmal edilmektedir. Ancak, daha sonraki bir çalışmasında sürtünme açısı da işin içine katılmıştır (Evans, 1965). Bu eşitlik şu şekilde verilmektedir:

$$FC' = \frac{2 \sigma_t d w \sin \left( \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \psi \right)}{1 - \sin \left( \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \psi \right)} \quad (3.5)$$

Burada;

FC' = Maksimum kesme kuvveti, N,

$\sigma_t$  = Kayacın direkt çekme dayanımı, MPa,

d = Kesme derinliği, mm,

w = Keski genişliği, mm,

$\alpha$  = Kesme açısı, °,

$\psi$  = Sürtünme açısı, °.

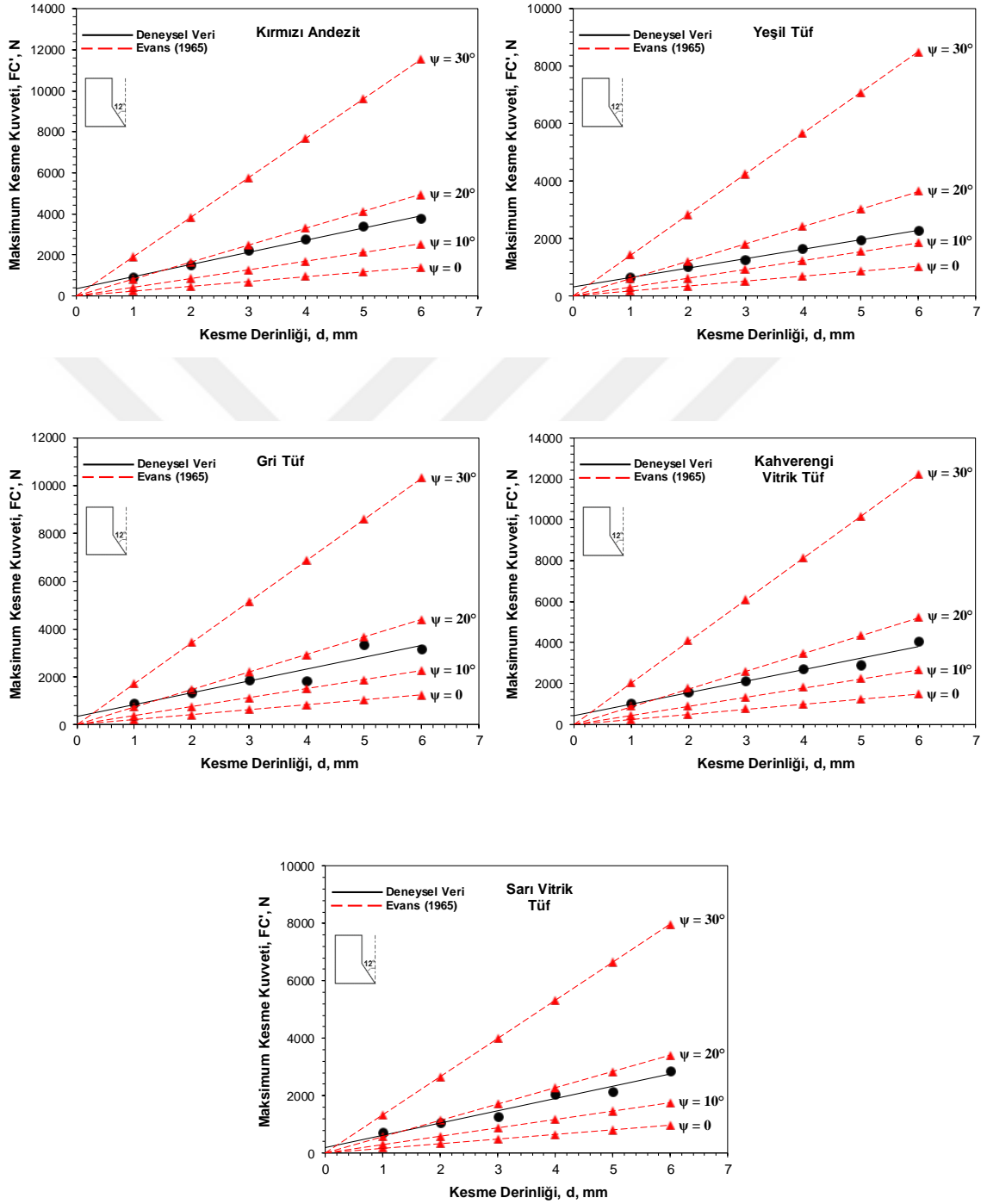
Buna ek olarak, bazı araştırmacılar, Nishimatsu tarafından önerilen eşitlikteki kaya kesmedeki sürtünme açısının ( $\phi$ ) yerine kaya ile keski arasındaki sürtünme açısı ( $\psi$ ) parametresini kullanmaktadırlar (Bilgin vd., 2014; Wang vd., 2017). Çeşitli araştırmacılar, farklı kayaç türleri ile farklı kesici uçlar arasındaki sürtünme açısını inceleyerek hesaplamışlardır ve kayaç türüne göre bu parametre çok farklı değerler alabilmektedir (Schatzov, 1964; Evans ve Pomeroy, 1966; Roxborough 1973; Bilgin, 1977; Bilgin vd., 2006). Tüm araştırmacıların bulgularının değişkenlik göstermesi ile birlikte, genel olarak sürtünme açısının  $10^\circ$ - $30^\circ$  arasında değiştiği göze çarpmaktadır. Bahsi geçen eşitliklerde sürtünme açısının eklenmesi ve artması ile birlikte hesap edilen maksimum kesme kuvvetinin de artacağı bir gerçektir. Ancak, çalışma sırasında kayaç numuneleri ile kesici uçlar arasındaki sürtünmenin hesaplanmasına dair herhangi bir çalışma gerçekleştirilmediği için, rastgele bir değer atayarak sonuçların tartışılması bilimsel bir anlam sağlamamaktadır. Buna rağmen,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  sürtünme açıları için Eşitlik 3.5 yardımı ile hesaplanan kesme kuvvetlerinin değişimi Şekil 3.23'te gösterilmiştir. Evans tarafından önerilen teorinin bu kayaç grubu için Nishimatsu (1972) modeline göre gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği için dolaylı Nishimatsu (1972) tarafından önerilen model kullanılmaya devam edilmemiştir. Önceki bölümde belirtildiği gibi, keski ile kaya arasındaki sürtünme açısı ( $\psi$ ) kaya kesmedeki sürtünme açısı ( $\phi$ ) yerine kullanıldığı bazı çalışmalarda görülmüştür. Bu durumda  $\phi$  açısı  $26,74^\circ$  olarak kullanılmıştır ve sürtünme açısının  $26,74^\circ$  olarak alındığı durumda dahi bu eşitlik yardımı ile hesaplanan kesme kuvveti değeri gerçek değerinin çok altında seyretmiştir.

Şekil 3.23 dikkatli bir şekilde incelendiğinde, sürtünme açısının kesme kuvvetinin doğru tahmin edilebilirliği üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Tüm kayaç numunelerinde  $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$  arasındaki sürtünme açıları için gerçeğe yakın sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar ışığında, eğer teorik yaklaşımlar kullanılarak kesme kuvvetleri hesaplanacaksa, mutlaka sürtünme etkisinin de işin içine katılması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Buna rağmen bu sonuçlar bu kayaç grubunu temsil etmektedir ve farklı kayaç gruplarında da denenerek bu etkinin daha detaylı olarak araştırılması gerekmektedir. Hem Şekil 3.22 hem de Şekil 3.23'te dikkat çeken diğer bir husus ise, deneysel olarak bulunan kesme kuvvetinin sıfırdan başlamadığıdır. Yani noktaları birleştiren lineer regresyon doğrusu y-eksenini kesecek şekilde uzatıldığında sıfıra denk gelmemekle birlikte, tüm kayaçlar için farklı noktalara tekabül etmektedir. Ancak, kesme teorilerinde kesme kuvveti  $d=0$  için  $FC'=0$  olacak şekilde hesaplama yapmaktadır. Elbette kesme derinliğinin 0 olduğu durumda herhangi bir kuvvet ortaya çıkmamaktadır. Ancak, bu deneysel bulgular kesme derinliği ile kesme kuvveti arasındaki lineer ilişkinin kesme derinliğine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Kaya kesmede iki mod hakimdir. Bunlar, kırılğan (gevrek) ve plastik kesmedir (Huang vd., 2013; Nicodeme, 1997; Richard, 1998; Richard vd., 1999; Zhou ve Lin, 2013). Kesme derinliği arttıkça da kesme işlemi plastik moddan gevrek moda geçmektedir ve genellikle 1 mm'nin altında olan kesme işlemleri plastik kesme olarak değerlendirilmektedir (Richard vd., 2012; He vd., 2017). Plastik kesme için daha çok kuvvet harcadığı da bilinmektedir ki bu durumda maksimum kesme kuvveti değerinin küçük kesme derinliklerinde bir anda yükseldiği ve daha sonra kesme kuvvetinin kesme derinliğine bağlı değişim hızının azaldığı söylenebilir. Bu durum tüm derinlikler için kesme kuvvetinin aynı oranda arttığını kabul eden kesme teorileri tarafından ihmal edilmektedir. Bu durum, Mellor (1977) tarafından detaylı bir biçimde incelenmiştir ve geçmişte yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, derleme şeklinde sunulmuştur. Bu çalışmaya göre düşük kesme derinliklerinde, kesme kuvveti kesme derinliğine bağlı olarak lineer olmayan bir biçimde artmaktadır. Buna ek olarak Fairhurst ve Lacabanne (1957), arka temizleme açısı sıfır olan, yani kayaç ile sürekli temas halinde olan kesmelerde iki kuvvet (sürtünme ve kesme) takımının hakim olduğunu göstermişlerdir ve bu konsept daha sonraları Detournay ve Defourny (1992) tarafından da kullanılmıştır. Buradan çıkarılacak sonuç, kesme sırasında harcanan kuvvetin ve enerjinin bir kısmının sürtünme için harcadığıdır ve düşük kesme derinliklerinde sürtünmenin kesme kuvveti üzerindeki etkisinin daha fazla olduğudur. Deneysel süreçten elde edilen neticeler de bu yargıyı desteklemektedir. Buna ek olarak, kazı

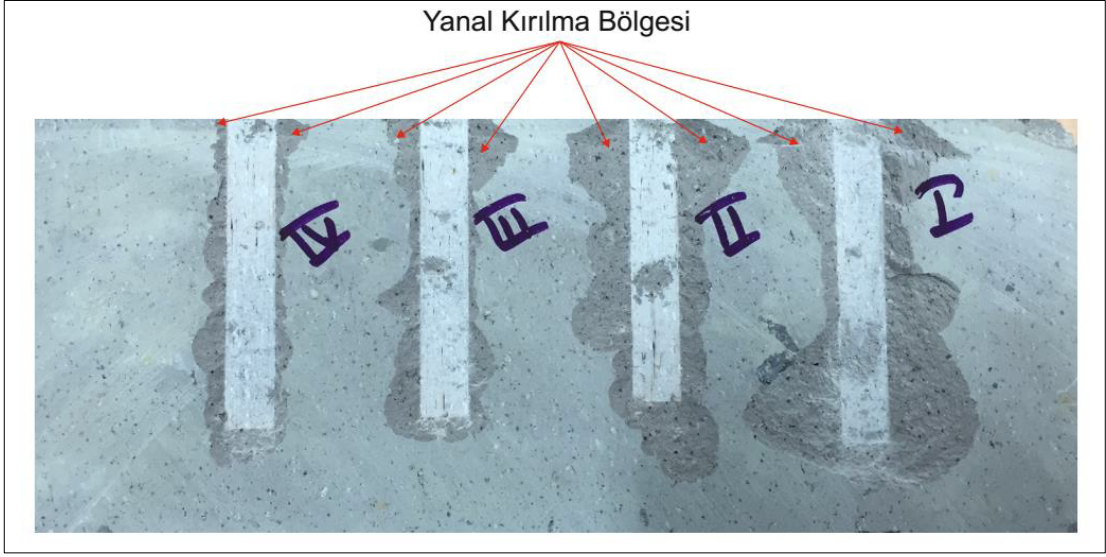
mekaniği çerçevesinden bakıldığında, her ne kadar disk keskinin kesme mekaniği ile kazıyıcı keskinin kesme mekaniği birbirinden farklı olsa da yukarıda bahsedilen 1 mm'nin altındaki kesme bölgesindeki lineer olmayan bölge ile ilgili Frenzel vd. (2012) disk keskinin ile yapılan deneylerin sonucunda ilginç sonuçlara ulaşmışlardır. Sonuç olarak, disk keskinin derinliklerinde kuvvet-kesme derinliği ilişkisini gösteren doğruların 2 mm'nin altındaki kesme derinliklerindeki özellikleri incelendiğinde, 2 mm'nin üstündeki kesme derinliklerinde doğrusal bir yapıya sahip olan ilişki, 2 mm'nin altından doğrusal olmayan bir karaktere bürünmektedir ve bahsi geçen yazarlar bu bölgeyi, kritik altı batma bölgesi olarak adlandırmışlardır. Buna ek olarak, gevrek-plastik (sünek) kesme moduna geçiş ile ilgili olarak bir hususun burada değerlendirilmesi gerekmektedir. Kaya kesmede gevrek(kırılğan)-sünek (plastik) modu geçişinden bahsedildiğinde, kayanın davranışı değil kaya kesme rejimindeki değişiklikten bahsedilmektedir. Kayaların, artan yanal basınçlar altında sünek (plastik) özellik kazandıkları bilinen bir gerçektir (Mogi, 1966). Ancak, tekrar dile getirmek gerekirse burada kastedilen kayanın davranışı ya da tepkisi değil kesme rejimindeki değişiktir. Bu değişiklik de genellikle kesme kuvvetinin zaman bağı olarak değişimini gösteren grafik yardımı ile değerlendirilmektedir. Bu kapsamda önceki kısımlarda gösterilen bulgulara tekrar değinilmesi gerekmektedir. Şekil 3.5 dikkatli olarak incelendiğinde, kesme kuvvetindeki dalgalanmaların kesme derinliği ile arttığı tespit edilmiştir. Bu dalgalanmaların artması da kesme rejimindeki değişimin göstergesidir ki bu durum Deketh vd. (1998) tarafından detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Ayrıca, şunu da açıkça belirtmek gerekir ki kesme kuvvetindeki dalgalanmalardaki kesme derinliğine bağlı bu değişim konik keskinin ile yapılan deneylerin neticesinde görülmemiştir (Bkz. Şekil 3.15). Buradan da bu durumun daha çok basit kama tipi keskinin var olduğu belirtilebilir.

Kesme kuvvetinin, kaya kesme teorileri yardımı ile tam olarak bulunmamasının diğer bir nedeni ise basit kama tipi keskinin ile kesme işleminin iki boyutta incelenmesidir. Keskinin genişliği kesme derinliğinden çok büyük olduğu kabulü ile, basit kama tipi keskinin ile ilgili teorik çalışmalar yürüten tüm araştırmacılar, keskinin kayaca batması durumundaki gerilme durumunun bir düzlem germe (plane strain) elastisite problemi olduğunu kabul ederek problemi ele almışlardır (Merchant, 1944; Evans, 1958; Nishimatsu, 1972). Ancak kesme deneylerinde tecrübe edilen gözlemlere dayanarak, kayacın kesilmesinde mutlaka bir yanal kırılmanın meydana geldiği iddia edilebilir. Keskinin kalınlığı boyunca kesme kuvveti sabit ve eşit olarak dağıldığı varsayılrsa da kesme işleminde harcanan kuvvetin bir kısmı da şüphesiz

yanal kırılmalara harcanmaktadır. Şekil 3.24'te kesme sırasında oluşan yanıl kırılma durumu açıkça görülmektedir.



Şekil 3.23. Sürtünme açısının maksimum kesme kuvvetine etkisi

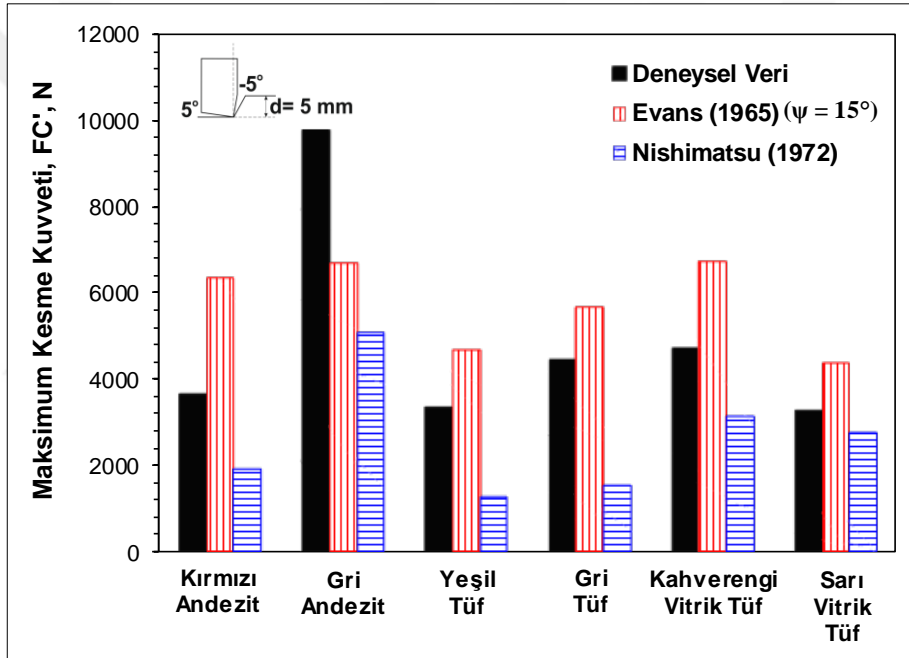


Şekil 3.24. Basit kama tipi keski ile kesme sırasında oluşan yanıl kırılma bölgeleri

Ayrıca, farklı araştırmacılar kesme sırasında keski ucunda oluşan gerilme durumunu farklı şekillerde açıklamışlardır. Evans kırılmanın çekme gerilmesinin yenilmesi ile gerçekleştiğini belirtirken, Nishimatsu kırılma sırasındaki gerilme durumunun Mohr-Coloumb yenilme kriterinin sağladığını ve kırılma hattı boyunca kesme gerilmelerinin oluştuğunu iddia ederek, kayacın kesme dayanımının aşılması ile birlikte keski ucundaki parçanın koptuğunu belirtmiştir. Ancak şu bilinen bir gerçektir ki hem kayaç tipi ve özellikleri hem de keski özellikleri ve kesme şartları keski kayaç ara yüzeyindeki gerilme durumunu etkileyecektir. Örneğin, çok geniş kapsamlı bir çalışmanın sonucu olarak Deliac (1993), küçük kesme derinliklerinde kesme kuvvetinin kayacın tek eksenli basınç dayanımına, yüksek kesme derinliklerinde ise kayacın kırılma tokluğu değerine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Buna benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da desteklenmiştir (Richard vd., 1998; Huang ve Detournay, 2008; He vd., 2017). Diğer yandan, Göktan (1990) çalışmasında yüksek dayanıma sahip kayaçların negatif kesme açısına sahip keski ile kesilmesinde çekme tipi yenilmenin görülmeyeceğini ve kesme yenilmesinin görülmesinin daha olağan olduğunu iddia etmiştir. Şu ana kadar kesme işlemine tabi tutulan ve kesme kuvvetlerinin teorik olarak bulunmasına çalışılan 5 farklı kayacın maksimum tek eksenli basınç dayanımı 88,15 MPa'dır (kahverengi vitrik tüf). Bu kayaçlar orta dayanım sınıfına girmektedir ve Evans'ın teorisinin bu kayaç grubu için Nishimatsu (1972) tarafından önerilen modele göre gerçeğe daha yakın sonuç verdiği görülmüştür.



Kesme ve temizleme açısının bahse konu olan kesme teorilerinin tahmin yeteneğine olan etkilerinin incelenebilmesi için 6 farklı magmatik kayaç üzerinde gerçekleştirilen karot kesme deneylerinden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri ve bu kesme şartları için hesaplanan kesme kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır. Bu amaç için Eşitlik 3.5'te verilen Evans (1965) yaklaşımı kullanılmıştır ve Şekil. 3.23'ten elde edilen sonuçlar yardımı ile sürtünme açısı ( $\psi$ )  $15^\circ$  olarak kabul edilerek işlemlere devam edilmiştir. Buna ek olarak Nishimatsu (1972) tarafından önerilen eşitlik yardımı ile de hesaplamalar yapılmıştır ve kesme deneylerinden ve teorik çalışmalardan elde edilen kesme kuvveti değerleri Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25. Karot kesme deneyinden ve kesme teorilerinden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri

Şekilden görülebileceği gibi kaya kesme teorilerinin kaya kesme deneyinden elde edilen kesme kuvveti değerlerini tahmin yeteneği kayaç türüne göre değiştiği görülmektedir. Basit kama tipi keskinler ile yapılan deneylerin sonucunun irdelenmesi kısmında açıkça görüldüğü gibi, Nishimatsu (1972) yöntemi ile tahmin edilen değerler gerçek değerlerin çok altında kalmıştır. Ancak, uç geometrisinin değişmesi ile birlikte, bu teorinin tahmin kabiliyeti gelişmiştir. Sarı ve kahverengi vitrik tüf numunelerinde Nishimatsu teorisi daha gerçeğe yakın sonuçlar vermiştir. Geri kalan diğer numunelerde ise Evans (1965) yaklaşımı

daha gerçeğe yakın sonuçlar vermiştir. Şu belirtilmelidir ki burada başvuru Evans yönteminde kullanılan sürtünme açısı değeri daha önceki sonuçlardan esinlenilerek seçilmiştir. Bundan dolayı, bu yöntemin de en azından bu veri grubu için, tahmin yeteneğine ihtiyatlı bir şekilde yaklaşmak gerekmektedir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise pozitif kesme açılı basit kama keski ile kesilemeyen gri andezit numunesinin negatif uçlu bu keski ile başarılı bir şekilde kesilebilmesidir. Bu durumda kayaç dayanımının artması ile birlikte keski açısının azalması gerektiği gerçeğini desteklemektedir (Anderson ve Rostami, 1998).

Bu sonuçlara ilave olarak şu açıkça belirtilmelidir ki, Nishimatsu (1972) tarafından önerilen yöntem ile yapılan tahminlerde kullanılan hem içsel sürtünme açısı ( $k$ ) hem de kesme dayanımı ( $\sigma_s$ ) parametreleri dolaylı olarak bulunmaktadır. Öyle ki Nishimatsu tarafından yapılan orijinal çalışmada da bu yöntem bu şekilde uygulanmıştır. Bu amaç için kayacın tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı parametreleri kullanılmaktadır (Bkz. Eşitlik 3. ve 3.4). Buna ek olarak kesme kuvvetinin hesaplandığı eşitlikte bulunan gerilme dağılım faktörü de ( $n$ ) ampirik bir yaklaşımla elde edilmektedir ve bu amaç için Nishimatsu tarafından önerilen Eşitlik 1.5 kullanılmaktadır. Ancak farklı kayaç grupları için bu eşitliğin farklı bir hal alacağı şüphesizdir ve bunu destekleyen sonuçlar geçmiş çalışmalarda görülmektedir (Philips, 1975). Aynı durum, kesmedeki sürtünme açısı ( $\phi$ ) için de geçerlidir ve Philips (1975) bu parametre için de farklı bir eşitlik önermiştir. Bu sebeplerden dolayı teorik yaklaşımlara daha ihtiyatlı bir şekilde yaklaşılması gerekmektedir.

Son olarak çalışmanın giriş kısımlarında bahsedilen keski altına/önündeki ezilmiş bölge ile ilgili bir değerlendirme yapmak gerekmektedir. Disk kesmede ve uç (kama ya da koni) batırma deneylerinde keskinin altında bir ezilmiş bölge oluşmaktadır. Yapılan geçmiş çalışmalarda elde edilen bulgular, bu işlem için harcanan enerjinin toplam enerjinin yaklaşık %90'ı olduğunu göstermiştir (Entacher vd., 2015; Bao vd., 2011). Bu durum hem koni batırma deneylerinde hem de disk kesme deneylerinde gözlemlenmiştir. Ancak, kazıyıcı keskinin kesme mekanizması, disk keskinlerden ve uç batırma deneylerinden farklılıklar göstermektedir. Disk kesmede ve uç batırmada, keski kayaç yüzeyine dik olarak hücum ederken, kazıyıcı keskinde keski kayaca paralel olarak hücum etmektedir. Bu çalışmada kullanılan, temizleme açısı  $0^\circ$  olan, keskin uçlu bir basit kama tipi keskinde bu ezilmiş zonun bulunması pek muhtemel değildir. Keski, hareket şeklinden dolayı, kayacı kazıyarak kesmektedir ve küçük parçalar sadece bu hareketin sonucunda oluşmaktadır. Şu göz önüne alınmalıdır ki keski özellikleri, özellikle de keski ucundaki körelme bu ezilmiş bölgenin

büyümesine ve kayaç tozlarının oluşumunun artmasına neden olmaktadır (Organiscak vd., 1995). Tüm bu değerlendirmeler göz önüne alındığında, kesme teorilerinin büyük kayaç parçalarının oluşumu üzerine kurulduğu bilindiğinden bu teorilerinin kullanılmasına ihtiyatla yaklaşmak gerekmektedir.

Basit kama tipi keski için gerçekleştirilen kesme deneylerinden elde edilen kesme kuvveti değerleri ile bu değerlerin kaya kesme teorileri yardımı ile tahmin edilmeye çalışılmasından elde edilen sonuçları maddeler halinde özetlemek gerekirse:

- Pozitif uçlu keski ile yapılan kesme deneylerinden elde edilen kuvvet değerlerinin hesaplanmasında Evans (1958) tarafından önerilen yöntem gerçeğe daha yakın sonuçlar vermiştir,
- Buna rağmen gerçek değer ile tahmin edilen değer arasında 3 kata varan farklar gözlemlenmiştir,
- Nishimatsu (1972) tarafından önerilen yöntem ile kesme kuvveti değerleri gerçek değerden yaklaşık 4 kata kadar düşük hesaplanmıştır,
- Kaya kesme teorilerinde hesaplama yaparken mutlaka sürtünme açısı hesaba katılmalıdır. Evans (1965) yaklaşımı sürtünme açısını da hesaba kattığından gerçeğe çok yakın sonuçlar sunabildiği görülmüştür. Ancak, eğer sürtünme açısı Bilgin vd. (2006) tarafından önerildiği gibi  $30^\circ$  olarak kabul edilirse Evans yaklaşımı ile elde edilen değerlerin hem pozitif hem de negatif açılı kesimde gerçek değerden çok fazla olacak şekilde hesaplandığı görülmektedir,
- Kesme kuvvetinin hesaplanmasında sığ derinliklerde ( $<1$  mm) farklı bir yaklaşım, daha yüksek derinliklerde ( $>1$  mm) farklı yaklaşımlar kullanılmalıdır,
- Kaya kesme işleminin iki boyutta incelenmesi fiili duruma aykırı gözükmektedir,
- Negatif uç açılı keskiyle yapılan deneylerde, bazı numunelerde Nishimatsu (1972) yaklaşımı daha iyi sonuç vermiştir, diğer numunelerde ise Evans (1965) ( $\psi=15^\circ$  için) daha gerçeğe yakın sonuç vermiştir,
- Evans tarafından önerilen yöntem ile kesme kuvvetinin hesaplanması daha kolay ve pratiktir. Nishimatsu'nun önerdiği yöntemde birtakım ampirik katsayılar vardır ve kesme kuvvetinin bulunabilmesi için birden fazla deneyin yapılması gerekmektedir.

Kollu galeri açma makinelerinde (KGAM) en sık kullanılan keski türü olan konik keski ile ilgilide kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir ve elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri geliştirilen teorik modeller ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda, Evans (1984), Roxborough ve Liu (1995), Göktan (1997) ve Göktan ve Güneş (2005) tarafından önerilen modeller kullanılmıştır. Bu modellerden Evans (1984) hariç diğerlerinde kaya ile keski arasındaki sürtünme hesaba katılmaktadır. Göktan ve Güneş (2005) sürtünme açısını  $10^\circ$  olarak kabul etmiştir, Roxborough ve Liu (1995) ise çalışmasında sürtünme açısını  $16^\circ$  olarak kullanmıştır. Ancak, Bilgin vd. (2006) konik keski ile gerçekleştirdikleri kapsamlı çalışmalarında kullandıkları 22 farklı kayaç ve cevher numunesi için sürtünme açılarının  $25^\circ$ - $32^\circ$  arasında değiştiğini göstermişlerdir. Bundan dolayı, çalışmanın bu kısmında sürtünme açısı ( $\psi$ ) ortalama değer olarak  $30^\circ$  olarak kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Tablo 3.4'te konik keski ile kesme deneylerinden elde edilen maksimum kesme kuvvetleri ve teorik modellerden hesaplanan maksimum kesme kuvvetleri (FC') verilmiştir. Elde edilen maksimum kesme kuvvetleri Şekil 3.25'te verilmiştir. Her bir kesme teorisi için hesaplama uygulaması da aşağıda verilmiştir.

*Evans (1984) (Bkz. Eşitlik 1.8):*

Nunume = Kırmızı andezit,

$$\sigma_t = 6,33 \text{ MPa},$$

$$\sigma_c = 72,85 \text{ MPa},$$

$$d = 1 \text{ mm},$$

$$\theta = 40^\circ,$$

$$FC' = \frac{16 \pi d^2 \sigma_t^2}{\sigma_c \cos^2(\theta)},$$

$$FC' = \frac{16 \times \pi \times (1 \text{ mm})^2 \times (6,33 \text{ MPa})^2}{72,85 \text{ MPa} \times \cos^2(40)},$$

$$FC' = 47,11 \text{ N}$$

*Roxborough ve Liu (1995) (Bkz. Eşitlik 1.9):*

Nunume = Kırmızı andezit,

$$\sigma_t = 6,33 \text{ MPa},$$

$$\sigma_c = 72,85 \text{ MPa},$$

$$d = 1 \text{ mm},$$

$$\theta = 40^\circ,$$

$$\psi = 30^\circ,$$

$$FC' = \frac{16\pi d^2 \sigma_c \sigma_t^2}{\left[ 2\sigma_t + \frac{\sigma_c \cos(\theta)}{1 + \frac{\tan(\psi)}{\tan(\theta)}} \right]^2},$$

$$FC' = \frac{16 \times \pi \times (1\text{mm})^2 \times 72,85 \text{ Mpa} \times (6,33 \text{ MPa})^2}{\left[ 2 \times 6,33 \text{ MPa} + \frac{72,85 \text{ MPa} \cos(40)}{1 + \frac{\tan(30)}{\tan(40)}} \right]^2}$$

$$FC' = 70,20 \text{ N}$$

*Göktan (1997) (Bkz. Eşitlik 1.10):*

Nunume = Kırmızı andezit,

$$\sigma_t = 6,33 \text{ MPa},$$

$$d = 1 \text{ mm},$$

$$\theta = 40^\circ,$$

$$\psi = 30^\circ,$$

$$FC' = \frac{4 \pi d^2 \sigma_t \sin^2(\theta + \psi)}{\cos(\theta + \psi)},$$

$$FC' = \frac{4 \times \pi \times (1 \text{ mm})^2 \times 6,33 \text{ MPa} \times \sin^2(40 + 30)}{\cos(40 + 30)},$$

$$FC' = 205,37 \text{ N}$$

*Göktan ve Güneş (2005) (Bkz. Eşitlik 1.11):*

Nunume = Kırmızı andezit,

$$\sigma_t = 6,33 \text{ MPa},$$

$$d = 1 \text{ mm},$$

$$\alpha = 2^\circ,$$

$$\psi = 30^\circ,$$

$$FC' = \frac{12 \pi d^2 \sigma_t \sin^2\left[\frac{1}{2}(90 - \alpha) + \psi\right]}{\cos\left[\frac{1}{2}(90 - \alpha) + \psi\right]},$$

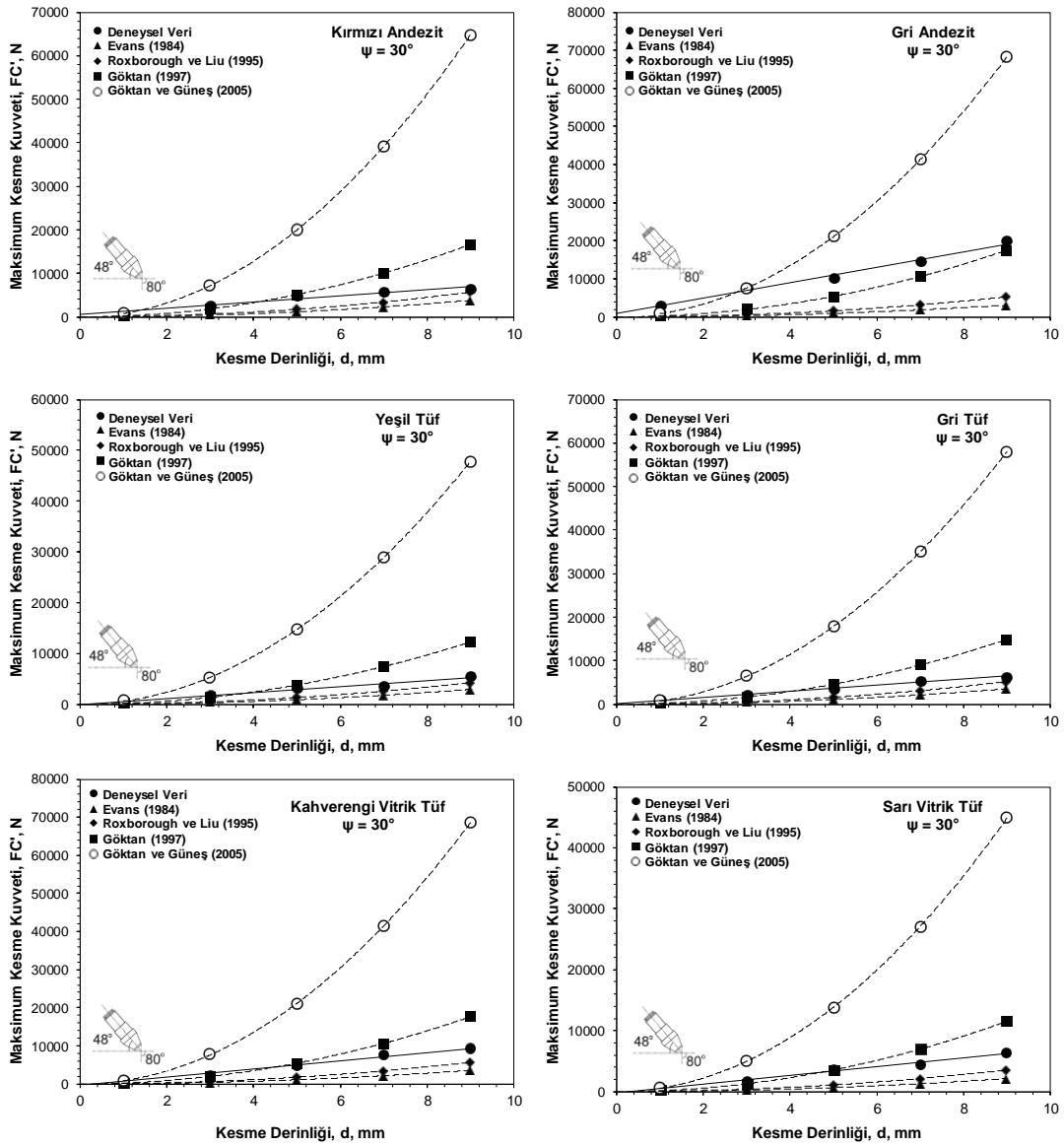
$$FC' = \frac{12 \times \pi \times (1 \text{ mm})^2 \times 6,33 \text{ MPa} \times \sin^2\left[\frac{1}{2}(90 - 2) + 30\right]}{\cos\left[\frac{1}{2}(90 - 2) + 30\right]},$$

$$FC' = 799,98 \text{ N}$$

Tablo 3.4. Konik kesme deneylerinden ve teorik modellerden elde edilen FC' değerleri ( $\psi=30^\circ$ )

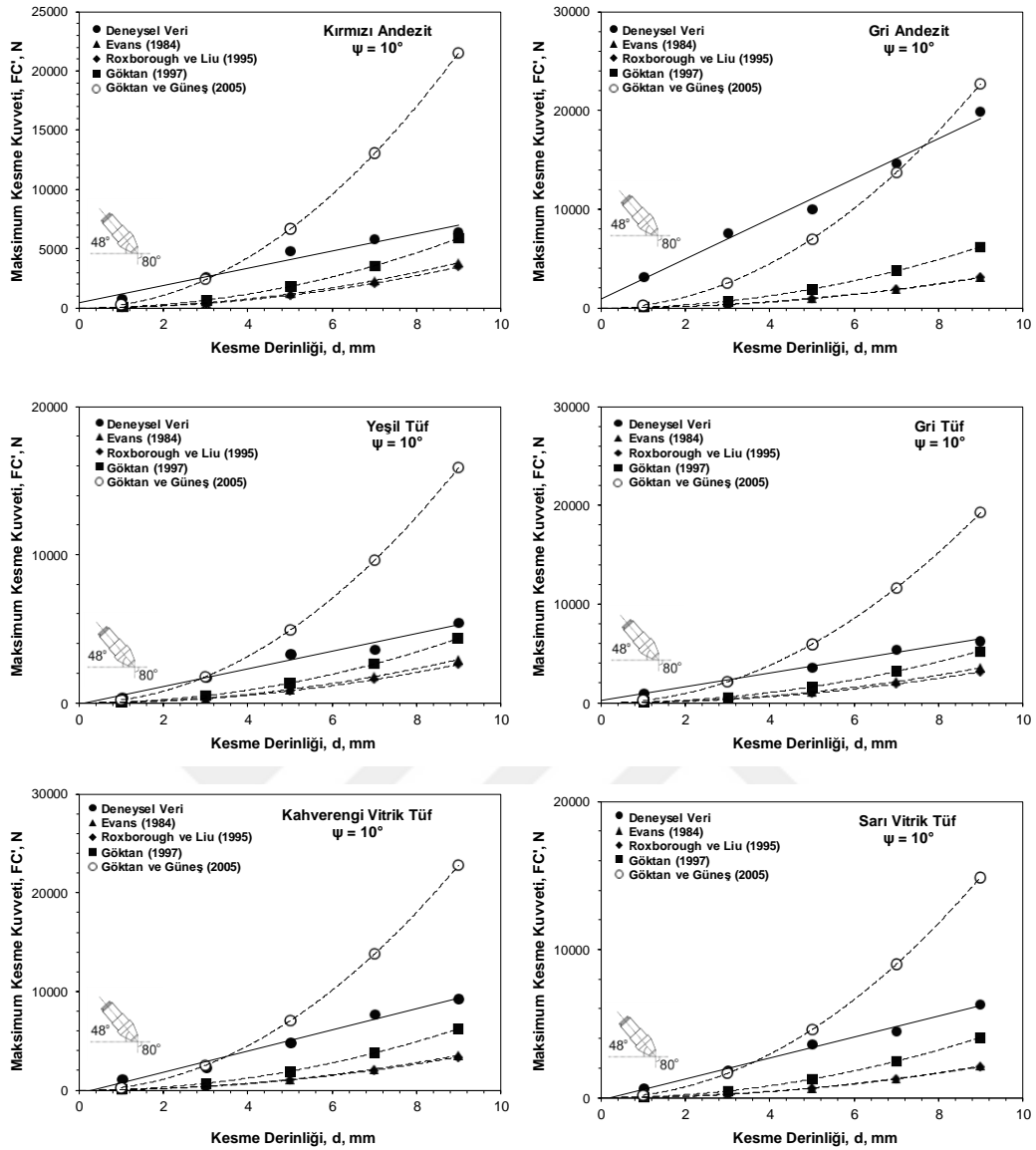
Numune	Kesme Derinliği, d, mm	FC', N (Deneysel)	FC', N (Evans, 1984)	FC', N (Roxborough ve Liu, 1995)	FC', N (Göktaş, 1997)	FC', N (Göktaş ve Güneş, 2005)
Kırmızı andezit	1	783,09	47,11	70,20	205,37	799,98
	3	2596,83	424,02	631,77	1848,32	7199,83
	5	4852,07	1177,82	1754,93	5134,21	19999,54
	7	5804,11	2308,53	3439,66	10063,05	39199,10
	9	6407,87	3816,14	5685,96	16634,84	64798,51
Gri andezit	1	3119,95	38,14	64,89	216,40	842,95
	3	7599,05	343,24	583,97	1947,59	7586,56
	5	10032,70	953,46	1622,15	5409,98	21073,77
	7	14631,21	1868,78	3179,42	10603,56	41304,58
	9	19878,91	3089,20	5255,77	17528,34	68279,00
Yeşil tuf	1	411,88	36,17	52,70	151,51	590,19
	3	1720,75	325,51	474,29	1363,61	5311,73
	5	3305,65	904,20	1317,47	3787,80	14754,80
	7	3626,65	1772,24	2582,24	7424,08	28919,40
	9	5448,41	2929,61	4268,60	12272,46	47805,54
Gri tuf	1	912,51	43,81	63,86	183,63	715,31
	3	2231,76	394,33	574,71	1652,68	6437,77
	5	3651,09	1095,35	1596,42	4590,78	17882,69
	7	5391,29	2146,88	3128,99	8997,92	35050,07
	9	6241,66	3548,93	5172,42	14874,12	57939,90
Kahverengi vitrik tuf	1	1134,95	43,62	69,75	217,37	846,74
	3	2325,89	392,58	627,73	1956,35	7620,68
	5	4828,20	1090,51	1743,70	5434,31	21168,55
	7	7627,51	2137,40	3417,65	10651,25	41490,36
	9	9266,84	3533,25	5649,58	17607,17	68586,10
Sarı vitrik tuf	1	613,59	26,30	43,74	142,10	553,54
	3	1808,99	236,71	393,69	1278,93	4981,88
	5	3593,25	657,52	1093,58	3552,58	13838,55
	7	4484,26	1288,74	2143,41	6963,06	27123,55
	9	6336,92	2130,37	3543,19	11510,36	44836,89

Maksimum kesme kuvveti değerleri hem  $10^\circ$  hem de  $30^\circ$  sürtünme açıları için hesaplanmıştır.  $30^\circ$  için hesaplanan kuvvet değerleri Şekil 3.26'da verilirken  $10^\circ$  için hesaplanan kuvvet değerleri Şekil 3.27'de gösterilmiştir. Bu grafikler karşılaştırıldığında, Göktaş ve Güneş (2005) yaklaşımının sonuçlarının sürtünme açısı değerinden çok fazla etkilendiği görülmektedir. Sürtünme açısı  $10^\circ$ 'ye düşürüldüğünde ise Göktaş ve Güneş (2005) yaklaşımı gerçeğe daha yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 3.26. Konik eskiler ile kesmede elde edilen maksimum kesme kuvveti ile kaya kesme teorileri ile bulunan kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması ( $\psi = 30^\circ$ )

Şekil 3.26 ve 3.27’de konik kesimler için geliştirilen kaya kesme teorilerinin tahmin performansları görülmektedir. İlk dikkat çeken husus, daha önce de belirtildiği gibi, maksimum kesme kuvvetinin kesme derinliği ile lineer olarak arttığıdır ve bu geçmiş çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile de sabittir (Hurt ve Laidlaw, 1979; Hurt, 1980; Roxborough vd., 1981; Inyang, 2002; Bilgin vd., 2006). Ancak kesme teorilerinde maksimum kesme kuvveti kesme derinliğinin karesi ( $d^2$ ) ile lineer olarak artmaktadır ve kesme derinliğindeki artma ile çok büyük değerlere çıkmaktadır.



Şekil 3.27. Konik eskiler ile kesmede elde edilen maksimum kesme kuvveti ile kaya kesme teorileri ile bulunan kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması ( $\psi = 10^\circ$ )

Evans (1984) ve Roxborough ve Liu (1995) tarafından önerilen modeller ile tahmin edilen kuvvet değerleri deneysel verilerin altında seyretmektedir ve birbirlerine yakın sonuçlar vermektedirler. Göktaş (1995) tarafından önerilen modelde ise gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmiştir. Göktaş ve Güneş (2005) tarafından önerilen yarı-ampirik modelde ise kesme kuvvetleri 9 mm kesme derinliği için gerçek değerden 10 kat fazla olacak şekilde hesap edilmiştir. Konik kesimler ile ilgili yapılan deneysel ve teorik kuvvet değerlerinin karşılaştırıldığı geçmiş çalışmalarda da bahsedilen bu teorik modellerin gerçek değere yakın sonuçlar vermediği belirtilmiştir (Kel, 2003; Bilgin vd., 2006, Su ve Akcin, 2011).



Bu sonuçlar ışığında altı çizilmesi gereken birtakım hususlar bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi Gökten ve Güneş (2005) hariç tüm modeller konik keskinin dik olarak kayaca battığı durumu baz alacak şekilde geliştirilmişlerdir. Ancak, saha koşullarında konik keskinler kesici kafalara belirli bir dalma açısı ile yerleştirilmektedirler ve kayaca dik olarak değil açılı olarak hücum etmektedirler. Keskinin kayaca dik batması halinde oluşacak kesme kuvveti ile açılı batması halinde oluşacak kesme kuvvetinin birbiri ile aynı olması beklenemez. Bundan dolayı, bu tip modellerden hesaplanan kesme kuvveti değerleri her zaman tartışmaya açıktır. Dalma açısının etkisini yalnızca Gökten ve Güneş (2005) dikkate almıştır. Ancak bu çalışmada da konik keskinin koni açısı göz ardı edilmektedir. Aynı kesme açısına sahip olan iki keskinden, koni açısı düşük olan keski ile kesmede oluşacak maksimum kesme kuvvetinin daha düşük olması gerekmektedir.

Evans (1984) tarafından önerilen modelde sürtünme açısı ihmal edilmektedir ki bundan önceki deneylerde de sürtünme açısının kesme kuvvetleri açısından önemi vurgulanmıştır. Roxborough ve Liu (1995) önerdikleri modelin sağlamasını yaparken kullandıkları kayacın sürtünme açısı  $16^\circ$ 'dir. Ancak bu çalışmada sürtünme açısı  $30^\circ$  seçilmesine rağmen, bu model ile tahmin edilen kuvvet değerleri gerçek değerlerin çok altında kalmıştır. Gökten (1997) modelinde ise tahmin edilen değerler gerçek değere yakın sonuçlar vermiştir. Ancak derinliğin daha fazla artması ile bu farkın açılacağı grafiklerdeki eğilimlerden görülebilmektedir. Gökten ve Güneş (2005) yaptıkları çalışmada geçmiş çalışmalarda yayınlanan verileri kullanarak yarı-ampirik bir yaklaşımla kesme teorisini sunmuşlardır. Bu çalışmada hesaplanan kesme kuvveti değerleri geçmiş çalışmalarda elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır ve birbirine yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür. Ancak, bu çalışmada sürtünme açısı  $10^\circ$  olarak kabul edilmiştir. Verilerin alındığı geçmiş çalışmalar incelendiğinde ki bu verilerin hepsi Bilgin vd. (2006) tarafından yayınlanmıştır ve bu çalışmada bu kayaç ve cevher grubu için sürtünme açısının  $25^\circ$ - $32^\circ$  arasında değiştiği gösterilmiştir. Sürtünme açısı  $10^\circ$  olarak kabul edilecek olursa Gökten ve Güneş (2005) tarafından önerilen teorinin daha gerçeğe yakın sonuçlar verdiği bu çalışmada da görülmektedir. Ancak, deneysel olarak elde edilen gerçek sürtünme açısının  $30^\circ$  olarak belirtilmesinden dolayı bu değer baz alınarak yapılan hesaplamalar dikkate alınmıştır. Ancak, konik keskinler için sürtünme meselesinin, basit kama tipi keskinlerden farklı bir biçimde ele alınması gerekmektedir. Önceki bölümlerde kullanılan basit kama tipi keski ele alınırsa, bu keskinin arka yüzeyi kesme bitene kadar kaya ile temas halindedir ve çok büyük bir sürtünme etkisine maruz kalmaktadır. Konik keskinlerde ise durum biraz daha farklıdır.

Çünkü, konik kesimler kayaca noktasal olarak temas ederler ve bu yüzeydeki sürtünmenin kesme kuvvetine etkisi tartışmaya açıktır. Şekil 3.26 ve 3.27'den görülebileceği gibi sürtünme açısındaki  $20^\circ$ 'lik değişim, tahmin edilen kuvvet değerini neredeyse 10 kata kadar arttırabilmektedir. Bu durum da elde edilen sonuçların güvenilirliğini tehdit etmektedir. Bundan dolayı, konik kesimler için geliştirilen teorik modellerde sürtünme açısının konumu daha farklı bir şekilde ele alınmalıdır.

Evans (1984) ile Roxborough ve Liu (1995) modellerinde göze çarpan bir diğer önemli husus ise kesme kuvvetinin tek eksenli basınç dayanımı ile ters orantılı olmasıdır ve bu eksikliğin giderilebilmesi için Gökten (1997) ve Gökten ve Güneş (2005) bu teori (Evans, 1984) üzerinde güncellemeler yapmıştır.

Bir diğer husus ise basit kama tipi kesimler ile kesme de olduğu gibi kesme kuvvetinin sıfırdan başlamamasıdır. Bunun sebebi ve sonuçları daha önceki bölümde tartışıldığı için burada daha fazla detaya girilmeyecektir. Basit kama tipi kesimler için geliştirilen kesme teorilerinden farklı olarak, konik kesimler için geliştirilen teoriler problemi üç boyutlu olarak ele almaktadırlar. Bundan dolayı, yanal kırılmanın da etkisi göz önüne alınmaktadır. Buna rağmen sürtünmenin ve dalma açısının etkisinin daha detaylı olarak incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için de çok daha farklı kayaç türü üzerinde kesme deneylerinin yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca, konik kesimler için geliştirilen tüm teoriler keskinin mükemmel bir koni olduğunu varsaymaktadır. Ancak, sahada kullanılan kesimler, keskinin kullanım ömrünün arttırılabilmesi için belirli bir körelme ile üretilmektedirler. Geliştirilecek teorilerin bu konuyu da göz önüne alması gerekmektedir. Son olarak da daha önce değinildiği gibi kayaç kesilirken harcanan enerjinin büyük bir kısmı keski altındaki alanda bir ezilmiş zonun oluşmasına (neredeyse enerjinin %90'ı) harcanmaktadır ve bu modellerde bu durum ihmal edilmektedir (Bao vd., 2011).

Konik kesimlerle yapılan deneylerden elde edilen verilerin teorik modeller ile karşılaştırılmasından elde edilen sonuçları maddeler halinde sıralamak gerekirse:

- Konik kesimler ile kesmede elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri kesme derinliği ile lineer olarak artmıştır,
- Sürtünme açısı  $30^\circ$  olarak alındığında, Evans (1984), Roxborough ve Liu (1995) ve Gökten ve Güneş (2005) tarafından önerilen modeller ile hesaplanan maksimum kesme kuvveti değerleri, gerçek değerlerden çok farklı bulunmuştur,

- Sürtünme açısı  $30^\circ$  olarak alındığında, Gökten (1997) tarafından önerilen model ise gerçeğe daha yakın sonuçlar vermiştir,
- Sürtünme açısı  $10^\circ$  olarak alındığında, gri andezit numunesi için Gökten ve Güneş (2005) tarafından önerilen model gerçeğe çok yakın sonuç vermiştir,
- Konik kesimler tarafından tecrübe edilen kesme kuvvetlerinin bulunabilmesi için önerilen modeller mutlaka olarak, dalma, sürtünme ve koni açılarını hesaba katmalıdırlar,
- Tüm keski tipleri için önerilen teorik modellerin geliştirilebilmesi ve gerçeğe daha yakın sonuçlar verebilmesi için çok daha farklı kayaç üzerinde çok daha fazla kaya kesme deneyinin gerçekleştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

### 3.5. Arazide Çalışan Kollu Galeri Açma Makinelerinin Kazı Hızlarının Tahmin Edilmesi

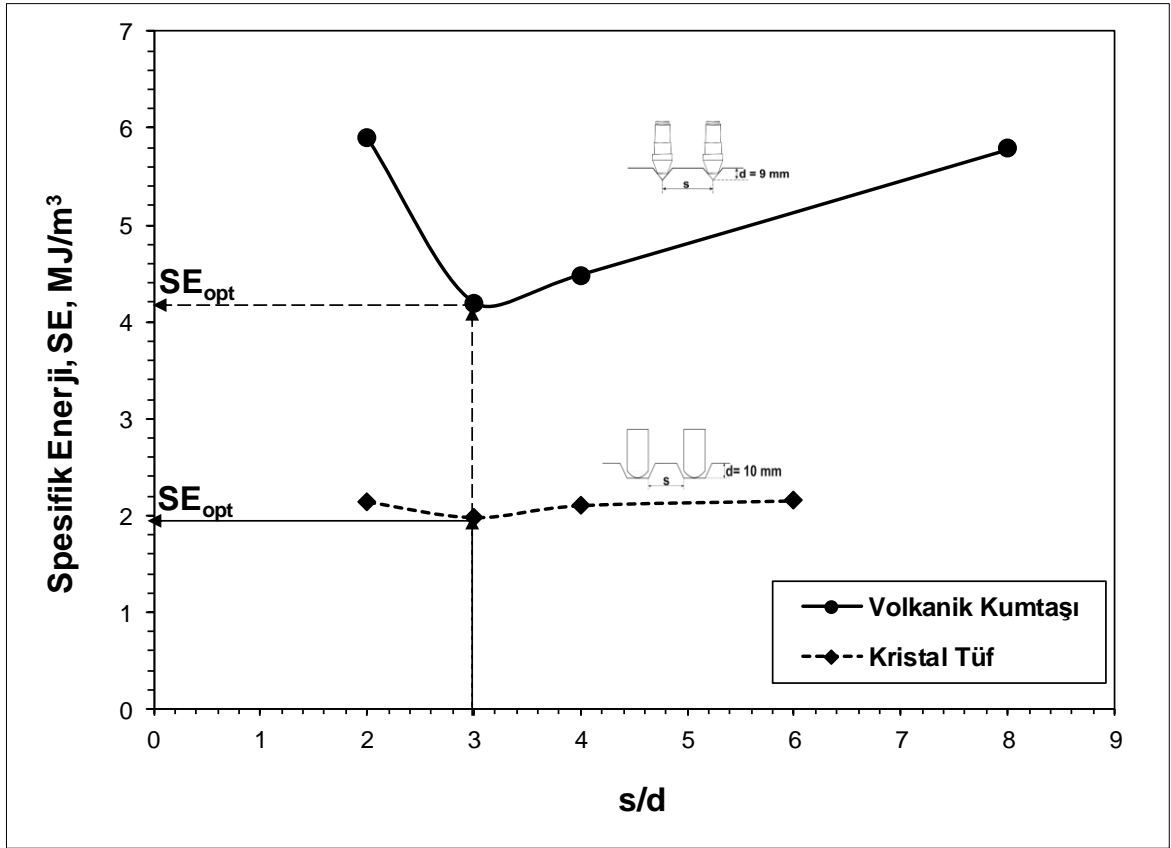
Ziyaret edilen arazilerde çalışan kollu galeri açma makinelerinin performans tahmini için, araziden alınan numuneler üzerinde konik ve radyal kesimler ile etkileşimli kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Konik kesimler ile yapılan deneyler 9 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilirken, radyal keski ile deneyler 10 mm derinlikte yapılmıştır ve optimum spesifik enerji değerleri bulunmuştur. Optimum s/d oranları hem kristal tuf hem de volkanik kumtaşı için 3 olarak belirlenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar özet olarak Tablo 3.5'te verilmiştir. Spesifik enerjinin s/d oranı ile değişimi ise Şekil 3.28'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Saha numunelerinin kesme deneylerinden elde edilen sonuçların özeti

Numune	Alınan Saha	Çalışan Makine Tipi	Makinede Kullanılan Keski	Kesme Deneylerinden Elde Edilen Optimum Spesifik Enerji, $SE_{opt}, MJ/m^3$ (kWs/m <sup>3</sup> )
Volkanik kumtaşı	Yeraltı linyit işletmesi	Tambur tipi KGAM	Konik	4,19 (1,16) *
Kristal tuf	Yeraltı soğuk hava deposu tüneli	Aksiyel Tip KGAM	Radyal	1,98 (0,55)

\* Bu işletmede çok yüksek bir örtü kalınlığı olduğu için ( $\approx 700$  m), bulunan bu spesifik enerji değeri Bilgin vd. (2000) önerileri doğrultusunda 1,3 katsayısı ile çarpılarak net kazı hızı hesaplamalarında 1,51 kWs/m<sup>3</sup> olarak kullanılacaktır.

Yüksek örtü kalınlıklarının olduğu kazı aynalarında yüksek bir arazi basıncı bulunmaktadır. Laboratuvarda yapılan deneylerde kullanılan numuneler bu etkiden bağımsız olduğundan dolayı, daha doğru sonuçların elde edilebilmesi için Bilgin vd. (2000) bu tip durumlarda laboratuvarda bulunan spesifik enerjinin 1,3 ile çarpılması gerektiğini iddia etmiştir. Bundan dolayı, yeraltı linyit işletmesinden alınan volkanik kumtaşı numunesinin kesilmesinden elde edilen spesifik enerji değeri 1,3 katsayısı ile çarpılmıştır ve Tablo 3.5'te verilmiştir. Soğuk hava deposunun üstünde çok düşük bir örtü kalınlığı ( $\approx 10$  m) bulunduğundan dolayı bu numune için bu işleme gerek görülmemiştir.



Şekil 3.28. Sahadan alınan numunelerin üzerinde gerçekleştirilen etkileşimli kesme deneylerinin sonuçları

Elde edilen bu iki spesifik enerji değeri ile her iki formasyonda çalışan iki ayrı makine için de net kazı hızları tahmin edilmiştir. Net kazı hızı tahmininde, Rostami vd. (1994) tarafından önerilen eşitlik ile geliştirilen düşey kayaç kesme setinden (DKKS) elde edilen spesifik enerji değerleri kullanılmıştır. Rostami vd. (1994) tarafından önerilen model daha

önceki bölümlerde (Bkz. Eşitlik 1.29) verilmişti ancak hatırlatılması amacıyla burada tekrar verilecektir.

$$NKH = k_o \frac{P}{SE_{opt}} \quad (3.5)$$

Burada;

$SE_{opt}$  = Tam boyutlu kaya kesme deneyinden elde edilen spesifik enerji,  $kWs/m^3$ ,

$P$  = Makinenin kesici kafa gücü,  $kW$ ,

$NKH$  = Net kazı hızı,  $m^3/s$ 'tir.

$k_o$  = Enerji transfer oranıdır.

Kollu galeri açma makineleri için enerji transfer oranının ( $k_o$ ) 0,45-0,55 arasında değiştiği belirtilmişti. Ancak, aksiyel ve tambur tipi makineler için seçilecek  $k_o$  değerleri hakkında kesin bir bilgi bulunmamaktadır. Bilgin vd. (2005) aksiyel tip makineler için  $k_o$  değerinin 0,4 olarak seçilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bundan dolayı, soğuk hava deposu tüneline çalışan aksiyel KGAM'nin performans tahmininde  $k$  değeri 0,4 olarak seçilmiştir. Tambur tipi makinelerin performanslarının aksiyel makinelerden daha iyi olduğu bilindiği için (Bkz. Bölüm 1.3) bu değer 0,50 olarak seçilmiştir. Bu yöntem ile gerçekleştirilen net kazı hızı tahmini çalışması özet olarak Tablo 3.6'da verilmiştir.

Saha 1'de gerçekleşen net kazı hızı ( $NKH$ )  $29,16 m^3/s$ 'tir. Geliştirilen DKKS'de yapılan kesme deneyleri sonucu hesaplanana  $NKH$  ise  $66,09 m^3/s$ 'tir. Diğer taraftan, saha 2'de ölçülen  $NKH$   $74,07 m^3/s$ 'tir. Bu çalışmada hesaplanan net kazı hızları saha 2'de gerçeğe çok yakın sonuçlar vermiştir. Ancak, saha 1'de ise  $NKH$  neredeyse 2 kat daha fazla hesaplanmıştır. Performans tahmin modellerinde kullanılan girdi parametreleri özet olarak Tablo 3.7'de ve modellerden elde edilen net kazı hızları ( $NKH$ ) Tablo 3.8'de gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Arazide çalışan KGAM için gerçekleştirilen performans tahminin sonuçları

Numune	Alınan Saha	Çalışan Makine Tipi	Spesifik Enerji, $SE_{opt}$ , $kWs/m^3$	Kesici Kafa Gücü, $P$ , $kW$	Eşitlik 3.5	Tahmin Edilen Net Kazı Hızı, $NKH$ , $m^3/s$
Volkanik kumtaşı (Arazi 1)	Yeraltı linyit işletmesi (İzmir)	Tambur tipi KGAM	1,51	200	$NKH = 0,5 \times \frac{200}{1,51}$	66,09
Kristal tuf (Arazi 2)	Yeraltı soğuk hava deposu tüneli (Nevşehir)	Aksiyel Tip KGAM	0,55	110	$NKH = 0,4 \times \frac{110}{0,55}$	80,00

Tablo 3.7. Performans tahmini modelleri için gerekli olan girdi parametreleri

	<b>Arazi 1</b>	<b>Arazi 2</b>
Kesici kafa tipi	Tambur	Aksiyel
Makine kesme gücü (P) (kW)	200	110
Makine ağırlığı (W) (ton)	55	42
Sahadan alınan numune	Volkanik kumtaşı	Kristal tüf
Tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ) (MPa)	12,34	2,44
Dolaylı çekme dayanımı ( $\sigma_{bt}$ ) (MPa)	1,33	0,74
Kaya kalite değeri (RQD)	100	100
Optimum spesifik enerji ( $SE_{opt}$ ) (kWs/m <sup>3</sup> )	1,51	0,55
Sahada ölçülen net kazı hızı (NKH) (m <sup>3</sup> /s)	29,16	74,07

Diğer araştırmacılar tarafından önerilen ampirik yöntemler kullanılarak da bu sahalarda çalışan KGAM'nin net kazı hızları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Rostami vd. (1994), Bilgin vd. (1996), Çopur vd. (1997), Restner ve Plinninger (2015) tarafından önerilen modellerde makinelerin kesme gücü dikkate alınırken, Gehring (1989), Thuro ve Plinninger (1999) ve Ebrahimabadi vd. (2012) tarafından önerilen modellerde makinelerin kesme gücü dikkate alınmamaktadır. Bilgin vd. (1996) net kazı hızının makinelerin kesme gücü ile lineer arttığını göstermiştir. Bundan dolayı, makine kesme gücünü dikkate almayan modeller bu çalışmada kullanılan makinelerin kesme gücüne göre doğru orantı yöntemi normalize edilmiştir.

Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise bazı modeller sadece aksiyel tip makineler için, bazıları sadece tambur tipi makineler için ve bazıları da tüm makine tipleri için geliştirilmişlerdir. Bundan dolayı, aksiyel tip makine için geliştirilen modeller tambur tipi makineler için kullanılmamıştır. Çopur vd. (1997) modelini tambur tipi makineler için geliştirdiği için aksiyel tip makinelerin performans tahmininde kullanılmamıştır. Diğer yandan, Thuro ve Plinninger (1999) aksiyel tipi makineler için modellerini geliştirdikleri için tambur tipi makinelerin performans tahmininde bu model kullanılmamıştır. Diğer modeller, iki tip makine için de kullanılmıştır.

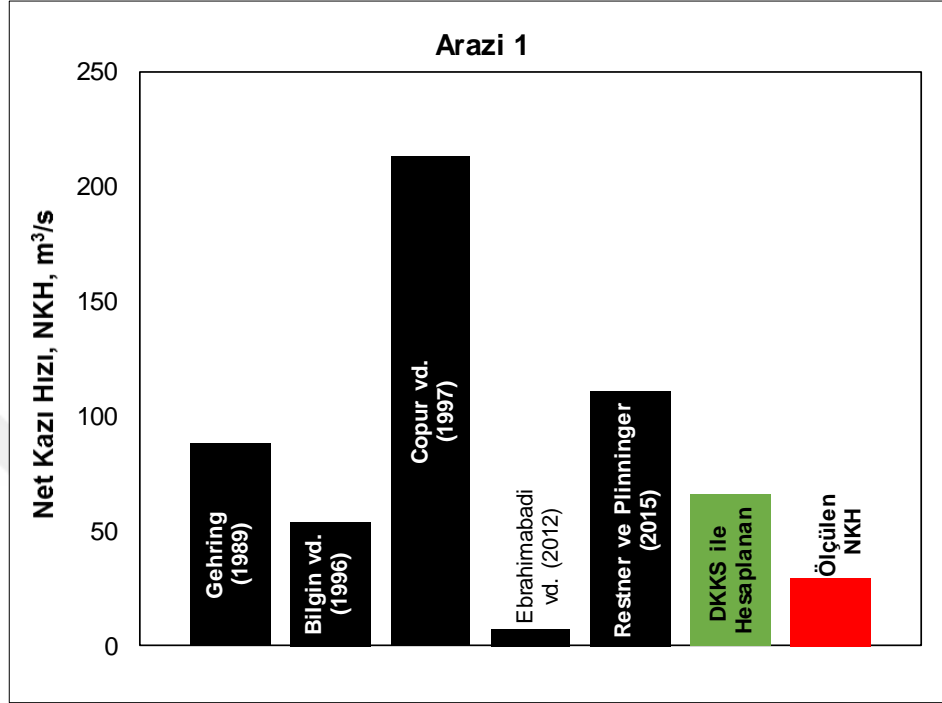
Şekil 3.29'da yeraltı linyit işletmesinde çalışan tambur tipi KGAM için gerçekleştirilen performans tahmin çalışmalarını ve sahada elde edilen net kazı hızının (NKH) karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde ilk dikkati çeken nokta Ebrahimabadi vd. (2012) tarafından önerilen model ile Çopur vd. (1997) tarafından önerilen model ile hesaplanan NKH'nın gerçek değerden çok düşük ve çok yüksek olmasıdır.

Tablo 3.8. Performans tahmini modellerinden elde edilen net kazı hızı değerleri

Performans Tahmin Modelleri	Kullanılan Eşitlik	Net Kazı Hızı (NKH) (m <sup>3</sup> /s) Arazi 1	Net Kazı Hızı (NKH) (m <sup>3</sup> /s) Arazi 2
Gehring (1989)	$NKH = \frac{719}{\sigma_c^{0.78}} (\text{Tambur})$ $NKH = \frac{1739}{\sigma_c^{1.13}} (\text{Aksiyel})$	88,06	279,26
Bilgin vd. (1996)	$RMCI = \sigma_c (RQD/100)^{2/3}$ $NKH = 0.28 P (0.974)^{RMCI}$	54,25	38,73
Çopur vd. (1997)	$RPI = \frac{P W}{\sigma_c}$ $NKH = 27.511 e^{0.0023 RPI}$	213,71	-
Thuro ve Plinninger (1999)	$NKH = 75.7 - 14.3 \ln(\sigma_c)$	-	52,45
Ebrahimabadi vd. (2012)	$RMBI = e^{\frac{\sigma_c}{\sigma_c}} (RQD/100)^3$ $NKH = 35.22 e^{-0.541 \log RMBI}$	7,14	21,81
Restner ve Plinninger (2015)	$NKH = k_1 k_2 k_3 \frac{7}{\sigma_c} P$	110,97	218,63
Bu çalışma (Rostami vd., 1994)	$NKH = k_o \frac{P}{SE_{opt}}$	66,09	80,00

Ebrahimabadi vd. (2012) modellerini kömür gibi çok kırılğan ve çok süreksizlikler içeren malzeme üzerine kurdukları için sahada süreksizliğin olmaması NKH'nın çok düşük seviyelerde bulunmasına neden olmuştur. Çopur vd. (1997) tarafından önerilen model ise daha önce belirtildiği gibi yalnızca evaporitik kayalarda çalışan makinelerden alınan veriler ile geliştirildiği için çalışma konusu olan volkanik kumtaşındaki kazı hızını hesaplamakta yetersiz kalmıştır. Ayrıca, Çopur vd. (1997) bu çalışmalarında, kollu galeri açma

makinelerinin (KGAM) performans tahmininde kullanılacak olan modelin genel bir model olmasından ziyade, o saha şartlarına uygun bir model olması gerektiğini belirtmişlerdir.

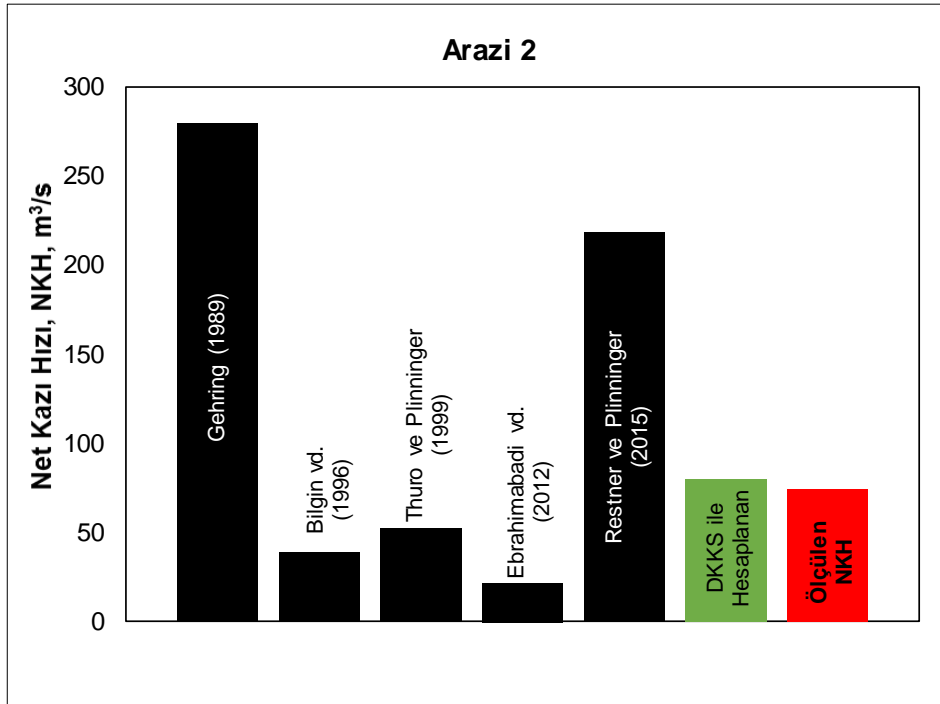


Şekil 3.29. Yeraltı linyit işletmesinde (Arazi 1) çalışan KGAM'nin ölçülen kazı hızı ve performans tahmin modellerinden elde edilen net kazı hızları

Şekil 3.29 incelendiğinde bu saha şartları için gerçeğe en yakın sonuç veren modelin Bilgin vd. (1997) tarafından önerilen model olduğu göze çarpmaktadır. Buna rağmen, bu modelde dahi NKH iki katına yakın olarak hesaplanmıştır. Düşey kayaç kesme seti ile yapılan kesme deneylerinin yardımı ile yapılan NKH hesaplamasında ise Bilgin vd. (1996) yaklaşımına yakın sonuçlar elde edilmiştir ve NKH iki kat fazla olarak tahmin edilmiştir. Ancak bu durumda tahmin modellerinin yetersizliğinden çok makinenin tam performansla çalışmadığının iddia edilmesi mantığa aykırı değildir. Yeraltı linyit işletmesindeki çalışma şartları bir KGAM için çok zorlu bir ortam oluşturmaktadır. Bu ortam koşulları makineyi kullanan operatörün yeteneklerini çok etkilemektedir ki kısmi cepheli tünel/galeri açma makinelerinin performansları operatör yeteneklerine çok bağlıdır (Breeds ve Conway, 1992). Kazı hızının düşük gerçekleşmesinin bir diğer sebebi ise galerinin baş aşağı eğimli olarak açılması ve eğiminin  $-14^\circ$  olması gösterilebilir. Eğimli tünel/galerilerde KGAM'nin performansı beklenilenin altında seyredebilmektedir (Bilgin vd. 2004). Buna ilave olarak, yapılan ince kesit analizlerinin sonucunda volkanik kumtaşı numunesinin matriksinin



volkanik toz ve külden oluştuğu görülmektedir, volkanik külün yapışıcı özelliği bulunduğundan (Mackie vd., 2016) bu durum kesici kafaya yapışma problemini ortaya çıkarabilir (Bkz. Tablo 2.9'daki kesici kafa). Bunun sonucu olarak da makine performansının düşebildiği daha önceki çalışmalarda görülmüştür (Bilgin vd., 2004). Restner ve Plinninger (2012) ve Gehring (1989) tarafından önerilen modeller NKH'yı gerçek değer için çok üstünde tahmin etmişlerdir. Gehring (1989) tarafından önerilen model yalnızca tek eksenli basınç dayanımını hesaba katarak tahminde bulunduğu için zayıflıkları olan bir modeldir ve gerçeğe yakın sonuç vermemesi şaşırtıcı bir sonuç değildir. Ancak, Restner ve Plinninger (2012) tarafından önerilen modelde kaya kütleli özellikleri, kayacın tek eksenli basınç dayanımı, kayacın tokluk/kırılma dayanımı gibi birçok parametre hesaba katılmasına rağmen, yapılan tahmin gerçek değer için çok üstündedir. Bu modelde makine tipi göz önüne alınmamaktadır. Ayrıca, arazi basıncının da NKH üzerinde etkili olduğunun gösterilmesine rağmen bu modelde bu konu ile ilgili düzeltme yapılmaması görülmüştür ve kabaca bu düzeltme faktörünün 1 olarak alınabileceği belirtilmiştir. Şekil 3.30'da yeraltı soğuk hava deposu tüneline (Arazi 2) çalışan KGAM için gerçekleştirilen performans tahmin çalışmasının sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 3.30. Yeraltı soğuk hava deposu tüneline (Arazi 1) çalışan KGAM'nin ölçülen kazı hızı ve performans tahmin modellerinden elde edilen net kazı hızları

Şekil 3.30'da açıkça görülmektedir ki düşey kayaç kesme setinden elde edilen spesifik enerji değeri ile yapılan performans tahmininde gerçek değere çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Gerçek değer  $74,07 \text{ m}^3/\text{s}$  iken kesme deneyi ile hesaplanan NKH  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  olmuştur. Diğer dikkat çeken nokta ise bir önceki saha koşullarında olduğu gibi Restner ve Plinninger (2012) ve Gehring (1989) tarafından önerilen model kazı hızını olması gerektiğinden çok yüksek hesaplamıştır. Diğer modeller ise kazı hızını neredeyse yarı yarıya düşük hesaplamıştır. Bu sahada çalışma şartları mekanize kazıya çok uygun olduğu için ve herhangi bir tahkimat uygulamadığı için makine maksimum performansta çalışmaktadır. Bundan dolayı, düşey kayaç kesme seti ya da diğer kesme deneyleri ile yapılan tahminler makinenin ulaşabileceği maksimum performans olarak değerlendirilebilir.

Performans tahmin modellerinden elde edilen bu sonuçlar irdelendiğinde, şu açıkça göze çarpmaktadır ki bir performans tahmin modeli saha ile ilgili tüm parametreleri kapsamalıdır. Bu parametreler, kaya özellikleri, kaya kütlesi özellikleri ve makine özellikleri gibi başlıklar altında toplanmaktadır (Breeds ve Conway, 1992). Bir performans tahmin modeli mutlaka bu üç özellik grubunu içermelidir. Aynı kaya özelliklerine sahip ancak farklı süreksizlik özelliklerine sahip iki formasyonda aynı özelliklerdeki makinenin aynı performansı göstermesi beklenemez. Düşey kayaç kesme setinden elde edilen spesifik enerji değerleri yardımı ile Rostami vd. (1994) tarafından önerilen model ile yapılan performans tahmin çalışmalarında bu parametrelerin birçoğunun kullanıldığı görülmektedir. Bu modelde, keski-kayaç etkileşimini ( $SE_{opt}$ ), makine kayaç etkileşimini ( $k_o$ ) ve makine özelliklerini ( $k_o$  ve  $P$ ) hesaba katmaktadır. Spesifik enerji (SE) kayaç kesilebilirliğinin tayininde kullanılacak olan en kesin yöntemdir. Bundan dolayı kaya özelliklerini mekanize kazı yönünden en iyi temsil edecek parametre olduğu söylenebilir. Birçok çalışmada ve modelde kayaç özelliği olarak tek eksenli basınç dayanımı kullanılmaktadır (Gehring, 1989; Bilgin vd., 1996; Çopur vd., 1997; Thuro ve Plinninger, 1999; Ebrahimabadi vd., 2012; Restner ve Plinninger, 2015). Ancak, tek eksenli basınç dayanımının kesme koşullarını temsil edemeyeceği birçok çalışmada belirtilen bir durumdur (Johnson ve Fowell, 1986; Fowell, 1993; Fowell vd. 1994; Thuro ve Plinninger, 1998). Bunun en başlıca sebebi, tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçlarının çok farklı koşullardan etkilenmesidir. Bu koşulları sıralamak gerekirse: yükleme hızı, alt ve üst yüzeylerin pürüzlülüğü, numune uçları düzeltilirken kullanılan sıvı, deney sırasında numune diplerinin yağlanması, numunenin boy/çap oranı, numune boyutu vb. birçok parametre aynı numune tipi için bile tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin sonuçlarını çok önemli oranda

değiştirmektedir (Hawkes ve Mellor, 1970). Örneğin, Miller ve Sikarskie (1968) Indiana kireçtaşı numuneleri üzerinde tek eksenli basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu deneylerin bir grubu numune ve platenlerin ara yüzeylerini yağlanarak diğer grubu ise ara yüzeyi kuru tutularak tek eksenli basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak ara yüzey yağlama işleminin tek eksenli basınç dayanımı değerini %35'ten fazla düşürdüğü görülmüştür. Bu tip hususlardan dolayı tek eksenli basınç dayanımı kayaçların içsel bir özelliği olmadığı belirtilebilir ve bu deneylerden elde edilen değerlere ihtiyatlı yaklaşılması ve performans tahmini çalışmalarında kullanılırken dikkatli olunması gerekmektedir. Ayrıca, tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kırılma mekanizmasının kaya kesmedeki kırılma mekanizmasını temsil etmesi imkansızdır (Fowell, 1993).

Diğer bir husus ise makine özellikleridir. Bilgin vd. (1996) çalışmalarında kesme hızının makine kesme gücü ile lineer arttığını göstermiştir. Ayrıca, Rostami vd. (1994) tarafından önerilen modelde de kesme gücü ile kesme hızı arasında aynı ilişki bulunmaktadır. Bundan dolayı, bir performans tahmin modelinde mutlaka makine kesme gücü hesaba katılmalıdır. Makine özelliklerinden bir diğeri ise, kollu galeri açma makineleri özelinde, kesici kafa tipidir. Aynı kesme gücüne sahip olan tambur ve aksiyel tip makinelerden tambur tipi makinenin performansının daha yüksek olacağı daha önceki bölümlerde (Bkz. Şekil 1.6) belirtilmiştir (Schenck, 1982; Gehring, 1989). Bundan dolayı, KGAM performans tahmininde kullanılacak olan bir modelin mutlaka makine kesici kafa tipini de dikkate alması gerekmektedir. Geliştirilen düşey kayaç kesme seti (DKKS) ile yapılan deneylerin sonucu ve Rostami vd. (1994) modeli kullanılarak yapılan tahminlerde aksiyel ve tambur tipi makineler için farklı enerji transfer oranı ( $k_o$ ) değerleri kullanıldığından dolayı, bu modelin bu parametreyi de hesaba kattığı belirtilebilir. Ayrıca  $k_o$  parametresi, farklı makine tiplerine göre de farklı değerler aldığından dolayı daha gerçekçi bir model olduğu belirtilebilir.

Her ne kadar, Whittaker vd. (1992) tarafından belirtildiği gibi, kesme, delme, patlatma ve kırma konularında, kaya malzemesi özellikleri kaya kütlesi özelliklerinden daha büyük öneme sahip olsa da kaya kütlesi özellikleri bir performans tahmini modelinde mutlaka değinilmesi gereken diğer bir parametredir. Birçok performans tahmin modeli bu parametreyi ihmal etmektedir. Kaya kütlesi özelliklerinin hesaba katıldığı bir model her zaman daha gerçekçi sonuçlar verecektir. Bu çalışmada, üzerinde çalışılan sahalarda kazı aynası masif olduğundan dolayı Rostami vd. (1994) modeli ve DKKS'den elde edilen veriler anlamlıdır. Ancak, bu formasyonlarda ayna masif özellikler göstermeseydi bu modelden de

elde edilen kazı hızları da tartışmaya açık olarak değerlendirilmesi gerekirdi. Net kazı hızının kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji değeri ve Rostami vd. (1994) modeli kullanılarak hesaplanacağı formasyonlar eğer süreksizlik içeriyor ise bu model üzerinde bir düzeltme uygulanması gerekmektedir. Thuro ve Plinninger'ın (1998) çalışmaları (Bkz. Şekil 1.18) göstermiştir ki 63 cm süreksizlik aralığı için bir kesme noktasıdır. 63 cm'den büyük süreksizlik aralığına sahip formasyonlarda kaya özellikleri belirleyicidir ve 63 cm'den küçük süreksizlik aralığına sahip formasyonlarda ise kaya kütlesi özellikleri belirleyicidir ve bu bölgede süreksizlik aralığı azaldıkça net kazı hızı artmaktadır. Ancak, bu 63 cm değeri aksiyel tip bir KGAM için geçerlidir. Tambur tipi makinelerden kesici kafa çapı daha fazla olacağı için bu değerın büyümesi muhtemeldir. 63 cm'lik bu sınır geçildiğinden kaya kütlesi özellikleri tamamen yok olmamaktadır ancak etkisi azalmaktadır. Bu hususlardan dolayı kaya kütlesi özelliklerinin NKH üzerindeki etkilerinin daha detaylı çalışılarak, masif olmayan formasyonlarda Rostami vd. (1994) modeli üzerinde güncellemeler yapılmalıdır. Bu güncellemeler yapılırken de kullanılacak olan kaya kütlesi sınıflama sistemi ya da kaya kütlesi özelliği çok dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Örneğin, bazı çalışmalarda kaya kalite değeri (RQD) hemen hemen her proje öncesindeki sondaj verileri yardımı ile belirlendiği için kaya kütlesi özelliği parametresi olarak kullanılmaktadır (Bilgin vd., 1996; Ebrahimabadi vd., 2012). Palmstrom (2005) tarafından da belirtildiği gibi kimi durumlarda RQD yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir ki RQD=100 olan iki formasyondan birinde süreksizlik aralığı 100 cm değerinde ise 11 cm olabilmektedir. Bu iki formasyondaki kazı hızlarının birbiri ile aynı olması beklenemez. Bundan dolayı, formasyonun kaya kütlesi özellikleri belirlenirken, kaya kütlesini en iyi şekilde temsil edebilecek olan özelliğin kullanılması daha mantıklı gözükmektedir. Buna örnek olarak, Barton vd. (1974) tarafından geliştirilen Q sistemi ve Bieniawski (1973) tarafından geliştirilen RMR sistemi ya da KGAM performans tahmin yöntemlerinde de değinilen Restner ve Gehring (2002) tarafından geliştirilen RMCR (Bkz. Tablo 1.8) gösterilebilir.

Burada belirtilmesi gereken bir diğer husus ise performans tahmin modellerinde kabul edilen RQD değeri ile alakalıdır. Örnekleme yapılan sahalardaki kayaların basınç dayanımları çok düşüktür ve karot alma işleminin ardından hesap edilecek olan RQD değerinin 100 olamayacağı açıktır. Kazı aynaları masif olduğundan dolayı RQD'ye rastgele değerler vermek yerine doğrudan 100 kabul edilerek hesaplamalara devam edilmiştir. Daha düşük değerler verildiği durumlarda Bilgin vd. (1996) tarafından önerilen modelden elde

edilen kazı hızları daha da artacaktır. Aynı zamanda, Ebrahimabadi vd. (2012) modeli ile yapılan hesaplamalarda da kazı hızı aynı şekilde artacaktır.

Düşey kayaç kesme seti yardımı ile ve diğer tahmin modelleri ile yapılan performans tahmini çalışmalarından elde edilen sonuçlar maddeler halinde özet olarak sıralanacak olursa:

- Yeraltı linyit işletmesinde (Arazi 1) çalışan tambur tipi kollu galeri açma makinesinin performans tahmininde gerçeğe en yakın sonucu veren yöntem düşey kayaç kesme seti (DKKS) ve Bilgin vd. (1997) tarafından önerilen yöntemdir,
- Yeraltı soğuk hava deposu tüneline (Arazi 2) çalışan aksiyel tip kollu galeri açma makinesinin performans tahmininde gerçeğe en yakın sonuç düşey kayaç kesme seti (DKKS) ile elde edilmiştir. Arazideki kesme hızı çok başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir,
- Yapılan değerlendirmeler sonucunda, düşey kayaç kesme seti ya da diğer kaya kesme deneyleri kullanılarak Rostami vd. (1994) yöntemi yardımı ile yapılan tahminlerin makinenin elde edebileceği maksimum değeri gösterdiği söylenebilir,
- Mekanize kazı açısından kaya özelliklerini en iyi temsil eden parametre spesifik enerjidir,
- Performans tahmini modellerinde kaya, kaya kütlesi ve makine özellikleri mutlaka temsil edilmelidir.

### **3.6. Düşey Kayaç Kesme Seti (DKKS) ile İlgili Genel Değerlendirme**

Düşey kayaç kesme seti (DKKS) ile yapılan deneylerden ve elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve tartışılması ile birtakım sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçları özetlemek gerekirse: DKKS ile etkileşimli ve etkileşimsiz kaya kesme deneyleri yapılabilmektedir, elde edilen kuvvet değerleri harici yük hücresi ile doğrulanmıştır, DKKS ile karot kesme deneyi (küçük boyutlu kesme deneyi) yapılabilmektedir, DKKS’de konik kesimler kullanılarak kesme deneyleri hem etkileşimli hem de etkileşimsiz modda yapılabilmektedir, radyal kesimler ile kesme deneyleri yapılabilmektedir, konik ve radyal kesimler kullanılarak tam boyutlu kesme deneyleri yapılabilmektedir, tam boyutlu kesme

deneylerinden elde edilen optimum spesifik enerji parametresi ile kollu galeri açma makinelerinin performans tahmini başarılı bir şekilde yapılabilmektedir.

Elde edilen bu sonuçlara ek olarak DKKS'nin genel bir değerlendirmesi yapılması gerekmektedir. Bölüm 1.6.2'de bir kaya kesme deneyinin sahip olması gereken özellikler ISRM tarafından tarif edilmiştir (Bamford, 1987). Bu özellikler burada tekrar edilecek olursa:

- Sahada kazı yapan makinenin kestiği kayaç spektrumu deneyde kesilebilmelidir. Yani, KGAM 120 MPa'a kadar kayaçları kazdığı varsayılırsa bu amaç için imal edilen bir deneyde 120 MPa'a kadar dayanıma sahip olan kayaçlar deneye tabi tutulabilmelidir,
- Deney güvenilir olmalıdır,
- Deneyin yapılışı kolay, hızlı ve ucuz olmalıdır,
- Deney yöntemi farklı araştırmacılar tarafından tekrar üretilebilir olmalıdır.
- Deneyde küçük boyutlarda numuneler kullanılmalıdır.

Bu özellikler DKKS özelinde irdelendiği zaman, DKKS'de 120 MPa'a kadar olan kayaçlar kesilebilmektedir (Bkz. fosilli kumtaşı). Deneylerden elde edilen kuvvet değerleri hem harici bir yük hücresi ile hem de başka bir araştırma merkezinde bulunan kaya kesme seti ile kalibre edilmiştir ve sonuç olarak elde edilen kuvvet değerlerinin güvenilir ve tutarlı olduğu rahatlıkla söylenebilir. Ayrıca, kaya kesmedeki bağımlı (FC ya da SE) ve bağımsız değişkenler (d ya da s/d) arasındaki ilişkiler incelenerek geçmiş çalışmalar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. DKKS ile deney yapmak çok pratik ve hızlıdır, bir gün içerisinde çok sayıda deney yapılabilmektedir. Bu sayede kaya kesme deneyleri rutin bir kaya mekaniği deneyi (tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, nokta yük dayanımı deneyleri gibi) gibi pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. DKKS bir prototip olmakla beraber seri üretime uygun olması ile birlikte başka araştırmacılar tarafından da tekrar üretilebilir bir karaktere sahiptir. Dolayısıyla, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar başka araştırmacılar tarafından kontrol edilebilir. DKKS'de tüm çaplarda karot numuneleri ve küçük blok numuneleri deneye tabi tutulabilmektedir. Bu sonuçlar ışığında, DKKS'nin ISRM tarafından talep edilen tüm özellikleri karşıladığı sonucuna varılabilir (Yaşar ve Yılmaz, 2017a).

Diğer kaya kesme deney düzenekleri ile karşılaştırılma yapılırsa eğer, tam boyutlu kesme deney setleri en kesin yöntemler olarak bildirilmesine rağmen, deneyler çok büyük kaya blokları üzerinde deney gerçekleştirilmektedir. Bu tip kaya bloklarının sahadan temin

edilmesi kimi zaman, özellikle de projeler başlamadan önce, imkansızdır. Proje öncesinde, çoğunlukla ön araştırmalar sırasında elde edilen numune tipi değişen ölçülerde karot numuneleridir. Proje başlamadan önce o formasyondaki kayanın kesilebilirliğinin tayini için ISRM tarafından da belirtildiği gibi küçük numuneler üzerinde deneylerin yapılabilir olması gerekir. DKKS’de her boyutta karot numunesi kesme deneyine tabi tutulabilmektedir. Bu durum da DKKS’nin pratik kullanımı bir avantaj teşkil etmektedir. Geri kalan diğer kaya kesme deneyleri ile karşılaştırma yapıldığında, pres makinelerinin içinde kullanıma uygun olan tek tasarım Entacher vd. (2014) tarafından geliştirilen ölçekli kaya kesme setidir. Bu düzenekte yalnızca 56 mm çapında küçük bir disk keski ve numune olarak ta yalnızca ortadan ikiye bölünmüş karot numuneleri kullanılabilir. Bu düzenekten elde edilen kesme kuvveti değerleri tam cepheli tünel açma makineleri için bir indeks performans tahmin yöntemi işlevine sahiptir ve başka herhangi bir pratik kullanıma sahip değildir. DKKS’de ise çok çeşitli numuneler (karot, blok, şekilsiz vb.) kaya kesme deneylerinde kullanılabilirliği gibi birçok keski türü (basit şekilli kama, konik ve radyal) ile kesme deneyi yapılabilir. Yukarıda bahsedilen özellikler DKKS ile kesme deneylerine rutin bir dayanım deneyi karakteri kazandırmaktadır. Örnek olarak, bir tek eksenli basınç dayanımı deneyinde 5 adet karot numunesine ihtiyaç duyulurken, DKKS’de gerçekleştirilecek olan bir karot kesme deneyinde bir karot numunesi üzerinde 4 adet deney yapılabilir. Bu avantaj sayesinde de kaya kesilebilirliğinin dolaylı olarak farklı deney sonuçlarından yorumlanması yerine, doğrudan belirlenebilmesi daha zahmetsiz olmaktadır.

Her sistemin şüphesiz üstünlüklerinin yanında birtakım eksiklikleri de bulunmaktadır. DKKS ile ilgili göze çarpan ilk eksiklik keskiye etkiyen üç boyuttaki kuvvet bileşenlerinden yalnızca kesme kuvvetini ölçüyor olmasıdır. Bunun getireceği kısıtlamalar ve eksiklikler dikkatli bir şekilde incelenmelidir. Yanal kuvvet genellikle bir tasarım parametresi olarak kullanılmamaktadır ve diğer bileşenlere göre daha düşük seviyelerde seyretmektedir (Yaşar vd., 2015; Shao vd., 2017). Ancak normal kuvvet özellikle de tam cepheli tünel açma makinelerinde önemli bir tasarım parametresidir. Ayrıca, kısmi cepheli galeri/tünel açma makinelerinde kesici kafa tepki kuvvetlerinin ve itme kuvveti ihtiyacının bulunmasında da normal kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır. Kesme kuvveti hareketin yönündeki kuvvet olduğu için dinamiğin temel prensiplerine göre işi yapan kuvvet bileşenidir ve spesifik enerjinin bulunmasında kullanılmaktadır. Performans tahmini ve kesme kuvveti ile ilgili çalışmalarda DKKS şu anki hali ile yeterli olmakla birlikte normal kuvvet (bom tepki kuvvetleri vb.) ile ilgili gerçekleştirilecek olan çalışmalarda tasarım üzerinde yenilikler yapılması gerekecektir.

Ayrıca, kesme kuvveti ile normal kuvvet arasında, özellikle de konik keski için, belirli bir oran bulunmaktadır. Bu oranın (FC/FN) 0,5 ile 1 arasında değiştirildiği belirtilmektedir (Neil vd., 1994). CSM tarafından önerilen detaylı performans analiz yönteminde (Neil vd., 1994) kesme kuvvetleri deneysel olarak bulunamadığında, teorik olarak Evans (1984) modeli ile bulunan kesme kuvveti değerleri ve yukarıda verilen oran yardımı ile normal kuvvet hesaplanarak makine için gerekli olan itme gücü miktarı belirlenmektedir.

Elde edilen bu kesme kuvveti ve normal kuvvet, kazı makinesinin tork, itme gücü ve kesme gücü değerlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu yöntemin detayları Neil vd. (1994) tarafından detaylıca gösterilmiştir. Ancak burada yalnızca bu hesaplamalar için gerekli eşitliklere yer verilecektir.

$$T = N_c \times FC' \times R_{avg} \quad (3.6)$$

$$R_{avg} = R - \left(\frac{D_{batma}}{2}\right) \quad (3.7)$$

$$T_{itme} = N_c \times FN' \quad (3.8)$$

$$P = T \times RPM \quad (3.9)$$

Burada;

T = Gerekli tork miktarı, kN.m,

$N_c$  = Kaya ile temastaki toplam keski miktarı, adet,

FC' = Tek bir keski tarafından tecrübe edilecek maksimum kesme kuvveti, kN,

$R_{avg}$  = Aktif kesme alanının yarıçapı, m,

R = Kesici kafa çapı, m,

$D_{batma}$  = Kesici kafanın kaya içine batma miktarı, m,

$T_{itme}$  = Makine için gerekli itme gücü miktarı, kN,

FC' = Tek bir keski tarafından tecrübe edilecek maksimum normal kuvvet, kN,

P = Makinenin kesici kafa gücü, kW,

RPM = Kesici kafa devir hızı, devir/dk'dır.

DKKS ile ilgili göze çarpan bir diğer eksiklik ise disk keski ile yapılan deneylerin çok başarılı bir biçimde gerçekleştirilememesidir. Bu deneyleri başarılı bir şekilde yapılabilmesi için yeni malzemeler ile bu sisteme özel disk keskinin üretilmesi gerekmektedir. Ayrıca, disk keski ile yapılacak olan deneylerde normal kuvvetin önemi artmaktadır bundan dolayı bu iki husus birbiri ile bağlantılıdır.

Son olarak numune boyu konusu dikkati çekmektedir. Hidrolik test makinelerinin strok boyu (pistonun hareket edebildiği maksimum uzunluk) genellikle 10 cm civarındadır



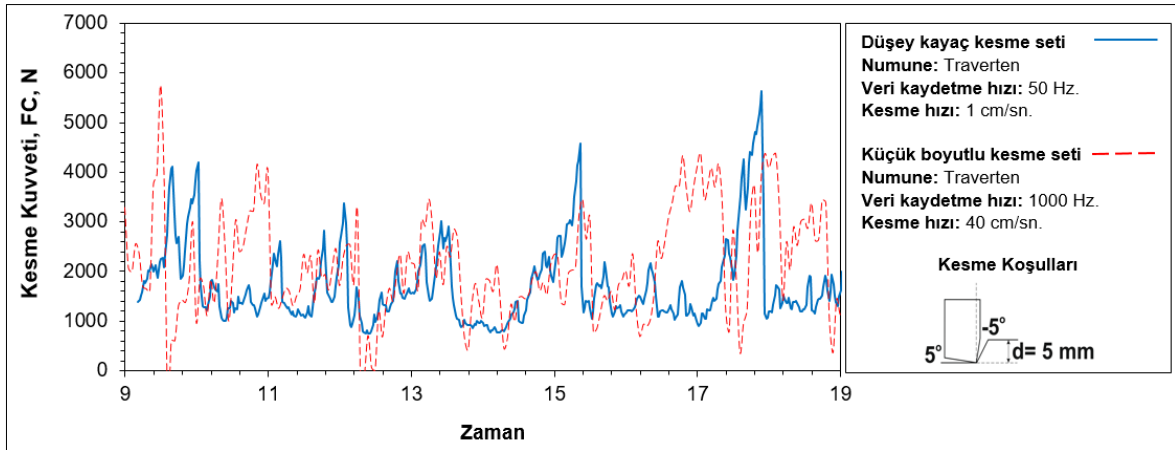
(Entacher vd., 2014). Bundan dolayı, kesme deneylerinde kullanılan keskinin maksimum yer değiştirme miktarı 10 cm ile sınırlıdır. Bu durumda DKKS'de kesilebilecek maksimum numune boyu da 10 cm olarak göze çarpmaktadır. Bu durum, tez kapsamında çalışılan kesme derinliklerinde herhangi bir sorun teşkil etmemiştir. Kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi grafikleri incelendiğinde sıradan bir kaya kesme deneyine ait oldukları görülebilir. En büyük kesme derinliklerinde dahi ( $d = 9\text{mm}$ ) kesme kuvveti en az 3-5 arası büyük pik yapmıştır. Bunun sayesinde Barker (1964) tarafından önerilen maksimum kesme kuvvetinin hesaplanmasına yönelik yöntemin rahatlıkla uygulanabildiği görülmüştür. Ancak daha derin kesmelerin yapılacağı durumlarda numune boyu, kesme verilerinin geçerliliğini tehdit edebilecektir. Çünkü, kaya malzemesinin kırılma yapısından dolayı kesme derinliği arttıkça kopan numune boyutu büyük miktarda artmaktadır. Kesme boyunun sabit olduğu düşünüldüğünde, kesme derinliği ne kadar artarsa oluşacak kaya parçası (chip) miktarı da o kadar düşmektedir. Büyük kesme derinliklerinde Barker (1964) tarafından önerilen yöntem doğrultusunda 3 adet pikin oluşmaması bile söz konusu olabilir. Bundan dolayı, daha derin kesme deneylerinin geçerliliğinin gösterilebilmesi için bu derinliklerde kesme deneylerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir ve bu durumun daha detaylı bir biçimde ele alınması gerekmektedir. Buradan elde edilecek sonuçlar ışığında, eğer numune boyunda herhangi bir artma söz konusu olursa, sistemin tasarımında bir geliştirmeye gidilmesi kaçınılmazdır.

DKKS'den elde edilen kuvvet verilerinin doğruluğu ile ilgili öne sürülebilecek iki husus bulunmaktadır. Bunlar, kaya kesme hızı ve hidrolik test makinelerinin veri okuma hızıdır. DKKS'de kaya kesme hızı (0,5-1 cm/sn), literatürde karşılaşılan doğrusal kesme setlerinden daha düşük seyretmektedir. Ancak, kaya kesme deneylerinde uygulanması gereken kesme hızları ile ilgili herhangi bir standart bulunmamaktadır. Buna ek olarak, kaya kesme hızının keski kuvvetleri üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı kazı mekaniğinin ana prensiplerinden biridir ve birçok araştırmacı çalışmalarıyla bu yargıyı kuvvetlendirmişlerdir (Potts ve Shuttleworth, 1959; Crisp, 1963; O'Dogherty ve Burney, 1963; Demou vd., 1983; Valantin vd., 1964; Roxborough, 1973; Mellor, 1977; Roxborough, 1985; Nishimatsu, 1993; Çopur vd., 2017; Shao vd., 2017; Keller ve Drebenstedt, 2017). Diğer taraftan, Cook vd. (1968) kesme hızının kesme kuvveti üzerinde etkisi olmadığını vurgularken, normal kuvvetin kesme hızı ile arttığını göstermiştir. Bu durumdaki artmaya sebep olarak da kesme sırasındaki titreşimlerin kesme hızı ile artması gösterilmektedir (Mellor, 1977). Kaya kesme hızının kesme kuvvetine etkisinin olmamasının sebebi, kayalarda kesme sırasında meydana gelen kırılma hatlarındaki çatlakların ilerleme hızının

500 m/sn'den (bu durumda 1 cm'lik bir çatlağın oluşması  $2 \times 10^{-5}$  sn gibi bir sürede gerçekleşmektedir) yüksek olmasıdır (O'Dogherty ve Burney, 1963). Ayrıca, Bieniawski (1967) bu hızın 2 km/sn gibi değerlere çıkabildiğini deneysel olarak göstermiştir ve bu hızın kayacın elastisite modülü ve yoğunluğu ile bulunabileceği bir eşitlik önermiştir. Bu hız hem laboratuvardaki doğrusal kesme setlerindeki kesme hızlarının hem de kazı makinelerindeki kesme hızının yüzlerce katıdır. Bundan dolayı, rahatlıkla kesme hızının düşük olmasının kesme kuvveti üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı sonucu çıkarılabilir. Kesme hızının, kesme kuvveti üzerinde olan etkisi ancak suya doymuş zemin gibi malzemelerin kesilmesinde ve nümerik yöntemlerle kaya kesmenin incelenmesi durumlarında gözlemlenmektedir. Örneğin, suya doymuş zeminlerin kesilmesinde, kesme hızının artması ile birlikte kesme kuvvetinin de arttığı belirtilmektedir (Palmer, 1999). Bunlara ek olarak bazı nümerik modellerde kesme hızı arttıkça kesme kuvveti artmıştır (Menezes vd., 2014). Sonuç olarak, kayanın da dinamik yükleme koşulları altında dayanımının arttığı bilinmektedir, özellikle de çok yüksek dinamik yükleme hızlarında (gerinme hızı normalin yüz katı ve üzerinde artırıldığında) (Zhang ve Zhao, 2014). Ancak kaya kesme her ne kadar statik değil dinamik bir süreç olarak kabul edilse de kaya kesme de yukarıda sözü edilen gerinme hızlarına ulaşılması pek mümkün görünmemektedir. Bu gerinme hızlarına split Hopkinson çubuk deneyi gibi işlemlerde ulaşılmaktadır. Kesme deneylerinde tek istisna olarak Yao (2012) kesme hızının artması ile kesme kuvveti, normal kuvvet ve spesifik enerji değerlerinin değiştiğini gözlemlemiştir. Ancak, bu değişimi fiziksel olarak açıklamakta yetersiz kalmıştır ve bu değişimin nedenini açıklayamamıştır. Bundan dolayı, kesme hızının kesme kuvveti ve spesifik enerji üzerinde etkisinin olmadığı belirtilebilir.

Diğer husus ise hidrolik test makinesinin ve dolayısıyla kesme sisteminin veri kaydetme hızıdır. Ne yazık ki bu konu ile ilgili de herhangi bir standart değer bulunmamaktadır. Kimi araştırmacılar 1000 Hz veri hızında deneylerini gerçekleştirirken (Bilgin vd., 2014), kimi araştırmacılar 300 Hz veri toplama hızında kesme deneylerini yapmaktadırlar (Kim, 2010). Bazı araştırmacılar ise 100 Hz veri kaydetme hızında kesme deneylerini gerçekleştirmektedirler (Richard vd., 2012). Buna ilave olarak Richard vd. (2012) kesme deneylerinde kesme hızını 4 mm/sn olarak gerçekleştirmektedirler. Ayrıca, DKKS benzeri bir sistem olan, Entacher vd. (2014) tarafından geliştirilen ölçekli kaya kesme deneyi de hidrolik test makinelerinde kullanılmaktadır ve bu makinelerin veri toplama hızları birbirine benzerdir. Bilgin vd. (2014) kaya kesmede veri toplama hızının 1000 Hz olması gerektiğini söylemektedir ancak yukarıda da görüldüğü gibi farklı araştırmacılar farklı veri

kaydetme hızları ile kesme deneyleri gerçekleştirmektedirler. Kaya kesme deneylerinde veri toplama hızı tek başına yeterli olmamakla birlikte bu değer kesme hızı ile birlikte değerlendirilmelidir. Genellikle doğrusal kesme setlerinde 40 cm/sn gibi (Bilgin vd., 2014), DKKS'nin 40 katına yakın hızlarda kesme deneyleri yapılmaktadır. Bir karşılaştırma yapmak gerekirse, doğrusal kesme setlerinin (örnek olarak küçük boyutlu kesme deneyi) veri toplama hızı DKKS'nin 20 katı iken (50 Hz ve 1000 Hz), kesme hızı 40 katıdır (1 cm/sn ve 40 cm/sn). Bundan yola çıkarak basit bir hesaplama ile, 10 cm kesme uzunluğunda DKKS ile 500 veri toplanırken, kıyaslama yapılan kesme setinde bu mesafede 250 veri toplanmaktadır. Bundan dolayı, veri toplama hızındaki farklar sonuçların doğruluğu açısından bir tehlike yaratmayacaktır. Bunlara ilave olarak, kesme hızı ve veri kaydetme hızındaki farkın anlamlı olmadığını göstermek için, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde bulunan küçük boyutlu kesme setinde kesilen traverten numunesine ait kuvvet zaman grafiği ile DKKS'de traverten numunesinin kesilmesinden elde edilen kuvvet zaman grafiği Şekil 3.31'de verilmiştir. Bu grafiklere göre iki kuvvet zaman grafiği arasında, veri kalitesi açısından bir fark olduğu iddia edilemez. Bunlara ilave olarak, Jamie (2011) çalışmasında 100 Hz veri kaydetme hızına sahip kesme düzeneği ile 800.000 Hz veri kaydetme hızına sahip sayısal modelde gerçekleştirilen kesme deneylerinden elde edilen kesme kuvveti grafikleri arasındaki farkları incelemiş ve bu grafikler arasında fark olmadığını göstermiştir.



Şekil 3.31. Traverten numunesinin iki farklı deney düzeneğinde kesilmesi ile elde edilen kuvvet-zaman grafikleri

Veri kaydetme ve kaya kesme hızının kesme kuvveti üzerinde etkisinin, DKKS özelinde olmadığı çalışma sırasında elde edilen sonuçlardan da açıkça görülmektedir. Kaya

kesme sırasında oluşan kesme kuvveti-zaman grafikleri incelendiğinde, kuvvet değerlerindeki dalgalanma tipik bir kesme deneyi grafiğidir (Bkz. Şekil 3.4 ve 3.14). Şekil 3.4'teki grafikler incelendiğinde, dalgalanmaların sıg kesme koşulları için farklı ve derin kesme koşulları için farklı olarak gerçekleşmektedir. Bu durum da veri toplama hızı ve kesme hızının kesme deneylerinin sonuçlarının güvenilirliğini etkilemediğini açıkça göstermektedir. Ayrıca, bu bulgulara ek olarak, DKKS'den elde edilen hem ortalama kesme kuvveti hem de spesifik enerji değerleri diğer bir kesme setinden (küçük boyutlu kesme deneyi) elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve iki deney düzeneğinden de bulunan değerlerin birbirinden farklı olmadığı sonucuna varılmıştır (Bkz. Bölüm 3.2.).



#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mekanize kazıya olan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Hem yerüstü hem de yerüstüne yakın mineral rezervlerinin tükenmesi daha derin madencilik faaliyetlerini kaçınılmaz hale getirmektedir. Ayrıca, önüne geçilemeyen nüfus artışı hem madencilik hem de inşaat sektöründeki yeraltı kazılarına olan ihtiyacı önemli oranda arttırmaktadır. Bundan dolayı hem mekanize kazı ile ilgili hem de mekanize kazıya yardımcı yöntemler (suj jeti ve mikrodalga enerjisi gibi) ile ilgili çalışmalar günümüzde bir cazibe merkezi haline gelmiştir. Buna ek olarak, birçok kazı makinesi üreticisi olan firma bu amaçlar için yeni kesme teknolojilerini (örnek olarak alttan kesme) de göz önüne alan kazı makineleri üretmeye çalışmaktadırlar.

Kaya kesme deneyleri, kayaç kesilebilirlik tayininde kullanılan en doğru yöntemlerdir. Ancak bu deney düzenekleri çok sınırlı sayıda araştırma merkezinde bulunmaktadır ve gerçekleştirilmesi zahmetli deneylerdir. Çalışmanın motivasyonu halihazırda bulunan kaya kesme deney düzeneklerine alternatif olabilecek yeni bir deney düzeneğinin geliştirilmesidir. Bu çalışmada hemen hemen her kaya mekaniği laboratuvarında bulunan hidrolik test makinelerinde kaya kesme deneylerinin yapılabilmesine olanak sağlayacak olan taşınabilir, tamamen sökülüp/takılabilir ve seri üretime uygun bir kaya kesme deney düzeneği, düşey kayaç kesme seti (DKKS) geliştirilmiştir. DKKS'nin geliştirilmesinin ardından sistemden okunan kuvvet değerleri harici yük hücresi ve başka bir kaya kesme deney düzeneğinden elde edilen veriler ile doğrulanmıştır. DKKS'de basit kama tipi, disk radyal ve konik kesimler yardımı ile çeşitli kayaçlar üzerinde kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardından sahada çalışan iki adet kollu galeri açma makinesinin net kazı hızları DKKS'de yapılan kesme deneyleri ile kestirilmeye çalışılmıştır. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Farklı kesimler ile kesme deneylerinin sonuçları detaylı olarak önceki bölümde sunulduğu için burada tekrar edilmeyecektir. Öncelikle, basit kama tipi kesimler kullanılarak yapılan kesme deneylerinden sayısal verilerin dışında, kama tipi kesimler ile DKKS'de hem etkileşimli hem de etkileşimsiz modda rahatlıkla kesme deneyi yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Hem elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kontrol edilebilmesi hem de kollu galeri açma makinelerinin performans tahmininde sıklıkla kullanılan bir yöntem olan karot kesme deneyinin gerçekleştirilmesi amacı ile

başka bir deney düzeneği ile elde edilen kesme kuvveti ve spesifik enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, yalnızca kollu galeri açma makinelerinin performans tahmininde değil kayaçların sökülebilirliği ve mermerlerin kesilebilirliği konularında da kullanılan karot kesme deneyinin (küçük boyutlu kesme deneyi) DKKS’de başarılı bir şekilde yapılabileceği gösterilmiştir. Taşınabilir ve seri üretime uygun olan DKKS ile ISRM tarafından önerilen şartlarda bir karot kesme deneyinin yapılabilir olması bu deneyin ilerleyen zamanlarda bir ISRM standardına sahip olabilmesinin önünü açacaktır. Bu deneyde negatif açılı bir keski kullanılmaktadır. Bu tip keski, önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarının, elastik özelliklerinin ve delinebilirlik özelliklerinin değerlendirilmesinde de kullanılabilir.

- Konik keski ile kesme deneyleri yapılarak tam boyutlu kesme deneyi gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak hem etkileşimli hem de etkileşimsiz kesme deneylerinin DKKS’de konik keski yardımı ile yapılabileceği görülmüştür. Elde edilen veriler önceki çalışmalar ile karşılaştırılarak anlamlı sonuçların elde edildiği gösterilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar yardımı ile kollu galeri açma makinelerinde ve diğer kısmi cepheli tünel/galeri açma makinelerinde en sıklıkla kullanılan keski tipi olan konik keski ile kesme deneylerinin yapılabileceği ve performans tahmininde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak, radyal keski kullanılarak da tam boyutlu kesme deneylerinin yapılabildiği gösterilmiştir. Bu deneylerden elde edilen kesme kuvveti ve spesifik enerji değerleri ile detaylı Colorado School of Mines (CSM) modeli ile kollu galeri açma makinelerinin net kazı hızı, itme gücü, tork ve kesme gücü miktarlarının kolaylıkla belirlenebileceği görülmüştür.
- Hem basit kama tipi keski hem de konik keski ile yapılan deneylerden elde edilen kesme kuvveti değerleri çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen teorik modellerden elde edilen kesme kuvveti değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler sonucu, teorik modellerin çok güvenilir sonuçlar vermediği ve daha fazla geliştirilmeleri gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar da kaya kesme deneylerinin önemini daha da vurgulamaktadır. Herhangi bir yöntem, temel keski-kayaç etkileşimini kaya kesme deneylerinden daha iyi temsil edememektedir. Kaya kesme deneylerinin yaygınlaşması, teorik modellerin daha fazla geliştirilebilmesine ve sonuç olarak kazı mekaniği prensiplerinin daha iyi anlaşılabilmesine hizmet edecektir. Buna ek olarak,

kaya kesme deneylerinin yaygınlaşması, günümüzde kazı mekaniği prensiplerini açıklamakta tam anlamıyla yeterli olmayan nümerik modellerden elde edilen verilerin doğrulanabilmesi için tartışılmaz bir öneme sahip olacaktır.

- DKKS ile yapılan deneylerin pratik uygulamalarına örnek teşkil etmesi amacı ile iki adet kollu galeri açma makinesinin çalıştığı saha ziyaret edilmiştir. Sahalardan alınan kayaçlar DKKS ile kesme deneyine tabi tutulmuştur ve elde edilen optimum spesifik enerji değeri yardımı ile kollu galeri açma makinelerinin performans tahmini gerçekleştirilmiştir. 1. sahada ampirik bir yöntem ile birlikte DKKS ile tahmin edilen kazı hızı gerçekleşen kazı hızınının neredeyse iki katıdır. Ancak, 2. sahada DKKS ile yapılan tahmin gerçek kazı hızı ile birbirine çok yakın bulunmuştur. İki saha için de kazı hızları geçmişte araştırmacılar tarafından geliştirilen ampirik modeller ile hesaplanmıştır ve sonuçlar DKKS ile yapılan tahminler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, gerçeğe en yakın sonuçların DKKS ile yapılan deneylerden bulunduğu görülmüştür. Bu sonuçlar ışığında, sahada çalışan kollu galeri açma makinesi ya da diğer kısmi cepheli tünel/galeri açma makinelerinin net kazı hızlarının tahmin edilmesinde DKKS'nden faydalanılabileceği görülmüştür. Kaya kesme deneyleri ve Rostami vd. (1994) tarafından önerilen modelin birçok parametreyi ve kaya-keski etkileşimini kapsamamasından dolayı çok güçlü bir model olduğu görülmüştür. Ancak, bu model ancak masif ve masife yakın formasyonlarda geçerlilik kazanmaktadır. Masif olmayan formasyonlar için güncellenmesi gerekmektedir.
- Sonuç olarak genel bir değerlendirme yapıldığında, DKKS ile hem karot kesme deneyi hem de tam boyutlu kesme deneyinin yapılabildiği ve basit kama, konik ve radyal keskinlerin kullanılabildiği görülmüştür. Bir kaya kesme deneyinin sahip olması gereken özellikler ISRM tarafından belirtilmiştir ve DKKS bu özelliklerin tümünü karşılamaktadır.
- DKKS tasarımı bir prototip olarak değerlendirilebilir. Farklı amaçlarda kullanılabilmesi için farklı tasarımlar geliştirilebilir. Bu çalışmada amaçlanan, kesin bir tasarımdan ziyade, kaya kesme deneylerinin hidrolik test makineleri gibi her kaya mekaniği laboratuvarında bulunan düzenekler yardımı ile yapılıp yapılamadığının gösterilmesidir ve bir deney felsefesinin oluşturulmasıdır. Tüm sonuçlar irdelendiğinde bu tip aparatlar yardımı ile kaya kesme deneylerinin yapılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, DKKS ile çok zahmetli, büyük boyutlarda kaya numunelerine ve çok tecrübeli personele ihtiyaç duyulan kaya kesme deneyleri tek eksenli basınç

dayanımı ya da dolaylı çekme dayanımı gibi rutin bir kaya mekaniği deneyi olarak gerçekleştirilebilecektir.

- DKKS'nin birtakım eksikliklerinin ilerleyen çalışmalarda giderilebilmesi için bu noktada bazı saptamalar yapılmalıdır. Kısmi cepheli tünel/galeri açma makinelerinde kullanılan keski bu deney setindeki deneylerde başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Ancak, disk keski ile yapılan deneyler başarıya ulaşamamıştır. Tam cepheli tünel açma makinelerinde kullanılan disk ya da diğer dönen keski ile kaya kesme deneylerinin DKKS'de gerçekleştirilebilmesi için tasarıma bir yenilik getirilmesi gerekmektedir. Bu tip keskinin şimdilik deney yapılmasına uygun olmaması DKKS'nin bir zayıflığı olarak nitelendirilebilir. Diğer bir husus ise normal kuvvetin ölçülememesi durumudur. Her ne kadar konik keski ile kesme deneylerinden elde edilen kesme kuvveti yardımı ile normal kuvvet kestirilebiliyor olsa da disk keski ile kesme de bu parametrenin doğrudan bulunabilmesi gerekmektedir. Bu durumun üstesinden gelinmesi için tasarımın yenilenmesine ihtiyaç vardır. Ayrıca, numune yüksekliği konusu tez kapsamında çalışılan derinliklerde sorun teşkil etmese de daha derin kesmelerde sorun yaratabileceği düşünüldüğünden bu konunun detaylı olarak incelenmesi ve gerekli olduğunda tasarımın, numune yüksekliğinin artırılabilmesi amacı ile yenilenmesi gerekmektedir.



## 5. KAYNAKLAR

- Abdolreza, Y.C. ve Yakhchali, S.H., 2013. A New Model to Predict Roadheader Performance Using Rock Mass Properties, Journal of Coal Science and Engineering, 19, 1, 51–56.
- Abu Bakar, M.Z., Gertsch, L.S. ve Rostami, J., 2014. Evaluation Of Fragments From Disc Cutting Of Dry and Saturated Sandstone, Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, 5, 1891–1903.
- Acaroglu, O. ve Ergin, H., 2006. A New Method to Evaluate Roadheader Operational Stability, Tunnelling and Underground Space Technology, 21, 172-179.
- Acaroglu, O., Ergin, H. ve Eskikaya, S., 2006. Analytical Hierarchy Process for Selection of Roadheaders, The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 106, August, 569–576.
- Adachi, J.I., Detournay, E. ve Drescher, A., 1996. Determination of Rock Strength Parameters from Cutting Tests, 2<sup>nd</sup> North American Rock Mechanics Symposium, Montreal, Quebec, Canada.
- Agricola, G., 1556. De Re Metallica, Translated from the first Latin edition of 1556 by H.C. Hoover and L.H. Hoover, 1950. Dover Publications, Inc., New York.
- Akkaş, E., 2010. Gelik İşletmesi'nde Kullanılan Kollu Galeri Açma Makinasının Performansına Etki Eden Etkenlerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.
- Aleman, V.P., 1983. Prediction of Cutting Rates for Boom Type Roadheaders, Tunnels and Tunnelling, 15, January, 23-25.
- Anderson, J.M. ve Rostami, J., 1998. Criteria for Selection and Application of Rock Cutting Tools for Soft Rock Mining, SME/AIME Annual Meeting and Exhibition, March 9–11, Orlando, 1-13.
- Atkinson, T., 1992. Future Concepts in Surface Mining, Minning Engineering Handbook, H.L. Hartman, Ed., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1352-1365.
- Avunduk, E., Tumac, D. ve Atalay, A. K., 2014. Prediction of Roadheader Performance by Artificial Neural Network. Tunnelling and Underground Space Technology, 44, 3–9.
- Balcı, C., 2004. Mekanize Kazı Makinalarının Seçiminde Küçük Boyutlu Kazı ile Tam Boyutlu Kazı Deneylerinin Karşılaştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Balçı, C. ve Bilgin, N., 2007. Correlative Study of Linear Small and Full Scale Rock Cutting Tests to Select Mechanized Excavation Machines, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 44, 468 - 476.
- Bamford, W.E., 1986. Cuttability and Drillability of Rock, Civil College Technical Report Engineers Australia, July, 1-4.
- Bamford, W.E., 1987. Workshop On Rock Cuttability and Drillability, International Congress on Rock Mechanics, G. Herget ve S. Vongpaisal, Ed., Montreal, 3, 1508–1510.
- Bao, R.H., Zhang, L.C., Yao, Q.Y. ve Lunn, J., 2011. Estimating the Peak Indentation Force of the Edge Chipping of Rocks Using Single Point-Attack Pick, Rock Mechanics and Rock Engineering, 44, 339-347.
- Barker, J.S., 1964. A Laboratory Investigation of Rock Cutting Using Large Picks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1, 519–534.
- Barton, N.R., Lien, R. ve Lunde, J., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics, 6, 4, 189-239.
- Başarır, H. ve Karpuz, C., 2004. A Rippability Classification System for Marls in Lignite Mines. Engineering Geology, 74, 303–318.
- Başarır, H., Karpuz, C. ve Tutluoğlu, L., 2008. Specific Energy Based Rippability Classification System for Coal Measure Rock, Journal of Terramechanics, 45, 1–2, 51–62.
- Bauer, R., 2004. Improvements of the Capabilities of Cutting Tools and Cutting Systems, North American Tunneling Conference, L. Ozdemir, Ed., Georgia, A.B.D., 37-46.
- Bieniawski, Z.T., 1967. Mechanism of Brittle Fracture of Rock- Part I Theory of the Fracture Process. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 4, 395-406.
- Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering Classifications of Jointed Rock Masses. Civil Engineer in South Africa, 15, 335–345.
- Bilgin, N., 1977. Investigation into Mechanical Cutting Characteristics of Some Medium and High Strength Rocks, Ph.D. Thesis, Newcastle Upon Tyne University, England.
- Bilgin, N., 1983. Prediction of Roadheader Performance from Penetration Rates of Percussive Drills: Some Applications to Turkish Coalfields. Eurotunnel '83 Conference, June, Basle, Switzerland, 111–114.

- Bilgin, N. ve Shahriar K., 1988. Madenlerde Mekanize Kazı için Bir Ölçme Sisteminin Geliştirilmesi ve Amasra Karbonifer Havzasına Uygulanışı, Türkiye 6. Kömür Kongresi, Mayıs, Zonguldak, Bildiriler Kitabı: 13-28.
- Bilgin, N. ve Shahriar K., 1989. İstanbul Haliç Tünelinin Sürülmesinden Elde Edilen Sonuçlar, Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 11. Kongresi, Nisan, Ankara, Bildiriler Kitabı: 306-319.
- Bilgin, N., 1989. İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 192 s.
- Bilgin, N., Yazıcı, S. ve Eskikaya, S., 1996. A Model to Predict the Performance of Roadheaders and Impact Hammers in Tunnel Drivages, International Eurock '96 Symposium, Eylül, Torino, Bildiriler Kitabı: 715-720.
- Bilgin, N., Tunçdemir, H., Balcı, C., Çopur, H. ve Eskikaya, Ş., 2000. A Model to Predict the Performance of Tunneling Machines Under Stressed Conditions, AITES-ITA World Tunnel Congress, Johannesburg, Bildiriler Kitabı: 47-53.
- Bilgin, N., Dinçer, T., Çopur, H. ve Erdoğan, 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., Tümaç, D., Feridunoğlu, C., Karakaş, A.R. ve Akgül, M., 2005. The Performance of a Roadheader in High Strength Rock Formations in Kucuksu Tunnel. 31st ITA-AITES World Tunnel Congress, Istanbul, Turkey, 815–820.
- Bilgin, N., Demircin, M.A., Çopur, H., Balcı, C., Tunçdemir, H. ve Akçin, N., 2006. Dominant Rock Properties Affecting the Performance of Conical Picks and the Comparison of Some Experimental and Theoretical Results, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 43, 1, 139–156.
- Bilgin, N., Çopur, H. ve Balcı, C., 2012. Effect of Replacing Disc Cutters with Chisel Tools on Performance of a TBM in Difficult Ground Conditions, Tunnelling and Underground Space Technology, 27, 1, 41–51.
- Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., 2014. Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries, CRC Press, 366 s.
- Bölükbaşı, N., Koncagül, O. ve Paşamehmetoğlu, A.G., 1991. Material Diggability Studies for the Assessment of Bucket Wheel Excavator Performance, Mining Science and Technology, 13, 271-277.
- Boston, O., 1945. A Bibliography on Cutting of Metals. ASME, 547.
- Breeds, C.D. ve Conway, J.J., 1992. Rapid Excavation, SME Mining Engineering Handbook, H.L. Hartman, Ed., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1871-1907.

- Brook, A., 1974. A Method of Overcoming Both Shape and Size Effect in Point Load Testing, Conference on Rock Engineering, Newcastle upon Tyne, 53-70.
- Cardu, M., Iabichino, G., Pierpaolo, O. ve Rispoli, A., 2017. Experimental and Analytical Studies of the Parameters Influencing the Action of TBM Disc Tools in Tunnelling, Acta Geotechnica, 12, 293-304.
- Ceylanoğlu, A., Karpuz, C. ve Paşamehmetoğlu, A.G., 1994. Specific Digging Energy as a Measure of Diggability. In: Third International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Istanbul, Turkey.
- Chapman, D., Metje, N. ve Stark, A., 2010. Introduction to Tunnel Construction, Spon Press, 390 s.
- Chen, L.H., 2003. Failure of Rock under Normal Wedge Indentation, Doktora Tezi, University of Minnesota, 131 s.
- Chiaia, B., 2001. Fracture Mechanisms Induced in a Brittle Material by a Hard Cutting Indenter, International Journal of Solids and Structures, 38, 7747–7768.
- Choi, S.W., Chang, S.H., Park, Y.T. ve Lee, G.P., 2014. Performance Estimation of Conical Picks with Slim Design by The Linear Cutting Test (I): Depending on Attack Angle Variation (Korece), Journal of Korean Tunnelling Underground Space Association, 16, 6, 573-584.
- Cho, J.W., Jeon, S., Jeong, H.Y. ve Chang, S.H., 2013. Evaluation of Cutting Efficiency During TBM Disc Cutter Excavation within a Korean Granitic Rock Using Linear-Cutting-Machine Testing and Photogrammetric Measurement, Tunnelling Underground Space Technology, 35, 37–54.
- Cook, N.G.W., Joughin, N.C. ve Wiebols, G.A., 1968. Rock Cutting and its Potentialities as a New Method of Mining, Journal of South African Institute of Mining & Metallurgy, 68, 266-271.
- Cook, N.G.W., 1970. Analysis of Hard-Rock Cuttability for Machines, Society Mining Engineers Transactions, 39-54.
- Cook, N.G.W., Hood, M. ve Tsai, F., 1984. Observations of Crack Growth in Hard Rock Loaded by an Indenter. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstracts, 1, 2, 97–107.
- Çomaklı, R., 2015. Taşınabilir Doğrusal Kazi Deney Seti Kullanılarak TBM Performans Tahmin Modeli Geliştirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çopur, H., Rostami, J., Ozdemir, L. ve Bilgin, N., 1997. Studies on Performance Prediction of Roadheaders Based on Field Data in Mining and Tunneling Projects, International 4th Mine Mechanization and Automation Symposium, Brisbane, 4A1–4A7.

- Çopur, H., Tunçdemir, H., Bilgin, N. ve Dinçer, T., 2001. Specific Energy as a Criterion for Use of Rapid Excavation Systems in Turkish Mines, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section A, 110, 149–157.
- Çopur, H., 2010. Linear Stone Cutting Tests with Chisel Tools for Identification of Cutting Principles and Predicting Performance of Chain Saw Machines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 47, 1, 104–120.
- Çopur, H., Balcı, C., Tümaç, D. ve Bilgin, N., 2011. Field and Laboratory Studies on Natural Stones Leading to Empirical Performance Prediction of Chain Saw Machines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 48, 269–282.
- Çopur, H., Bilgin, N., Balcı, C., Tümaç, D. ve Avunduk, E., 2017. Effects of Different Cutting Patterns and Experimental Conditions on the Performance of a Conical Drag Tool. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50, 6, 1585-1609.
- Crisp, H.A., 1963. Additional Studies: Fixed Blade Planing of Rocks in the Brittle Stress State, Yüksek Lisans Tezi, The University of Texas, 109 s.
- Dagrain, F., Detournay, E. ve Richard, T., 2001. Influence of Cutter Geometry in Rock Cutting, The 38<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics, Temmuz, Washington, A.B.D.
- Dagrain, F., Richard, T. ve Detournay, E., 2002. Influence of Polished PDC cutters in rock cutting, NARMS-TAC 2002 Symposium “Mining and Tunneling Innovation and Opportunity”, Toronto, Kanada.
- Deketh, H.J.R., Grima, M.A., Hergarden, I.M., Giezen, M. ve Verhoef, P.N.W., 1998. Towards the Prediction of Rock Excavation Machine Performance, Bulletin of Engineering Geology and Environment, 57, 3-15.
- Deliac, E. ve Gripp, M.F., 1983. Etude Quantitative De L’abattage Mecanique Par Pics A Partir D’essais En Modele Reduit. Ind Miner Les Tech, 5, 82, 275–292.
- Deliac, E.P., 1985. Recent Developments in the Design and Optimization of Drum Type Cutting Machines in France, Rapid Excavation and Tunnelling Congress, M.N. Kelly ve C.O. Man, Ed., New York, 264–283.
- Deliac, E.P., 1993. Theoretical and Practical Rules for Mechanical Rock Excavation, Comprehensive Rock Engineering, J.A. Hudson, Ed., 4, 177–227.
- Demou, S.G., Olson, R.C. ve Wingquist, C.F. 1983. Determination of Bit Forces Encountered in Hard Rock Cutting for Application to Continuous Miner Design. Report of Investigations 8748. US Bureau of Mines.
- Detournay, E. ve Defourny, P., 1992. A Phenomenological Model for the Drilling Action of Drag Bits, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 29, 1, 13-23.

- Detournay, E., Drescher, A. ve Hultman, D.A., 1997. Portable Rock Strength Evaluation Device. United States Patent 5670711.
- Detournay, E., Richard, T. ve Shepard, M., 2008. Drilling Response of Drag Bits: Theory and Experiment, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 45, 1347–1360.
- Dubugnon, O. ve Barendsen, P., 1985. Small Scale Model Testing a New Approach in TBM Development, Rapid Excavation and Tunnelling Congress, M.N. Kelly ve C.O. Man, Ed., New York, 245–263.
- Ebrahimabadi, A., Goshtabi, K., Shahriar, K. ve Seifabad, M.C., 2012. A Universal Model To Predict Roadheaders' Cutting Performance. Archives of Mining Science, 57, 4, 1015-1026.
- Ebrahimabadi, A., Azimipour, M. ve Bahreini, A., 2015. Prediction of Roadheaders' Performance Using Artificial Neural Network Approaches (MLP and KOSFM). Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7, 573-583.
- Entacher, M., Lorenz, S. ve Galler, R. 2014. Tunnel Boring Machine Performance Prediction with Scaled Rock Cutting Tests. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 70, 450–459.
- Entacher, M., Schuller, E. ve Galler, R., 2015. Rock Failure and Crack Propagation Beneath Disc Cutters. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, 1559-1572.
- Evans, I., 1958. Theoretical Aspects of Coal Ploughing, Mechanical Properties of Non-Metallic Brittle Materials, W.H. Walton, Ed., Butterworths, London, 451–468.
- Evans, I., 1962. A Theory of the Basic Mechanics of Coal Ploughing, International Symposium on Mining Research, vol. 2. University of Missouri, Pergamon Press, 761–768.
- Evans, I., 1965. The Force Required to Cut Coal with Blunt Wedges. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 2, 1–12.
- Evans, I. ve Pomeroy, C.D., 1966. The Strength, Fracture and Workability of Coal. Pergamon Press, 277 s.
- Evans, I., 1968. Properties of Coal in Relation to Mechanical Coal Winning, International Insititute of Fuel, 249.
- Evans, I., 1972. Line Spacing of Picks for Efficient Cutting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 9, 355-359.
- Evans, I., 1984. A Theory of Cutting Forces for Point Attack Picks, International Journal of Mining Engineering, 2, 63-71.

- Evenden, M.P. ve Edwards, J.S., 1985. Cutting Theory and Coal Seam Assessment Techniques and Their Application to Shearer Design. Mining Science and Technology, 2, 253–270.
- Eyyüboğlu, E.M. ve Bölükbaşı, N., 2004. TKİ-OAL Çayırhan Yeraltı İşletmesinde Hazırlık Çalışmalarının Değerlendirilmesi. Türkiye 14.Kömür Kongresi, Zonguldak, 13-26.
- Fairhurst, C. ve Lacabanne, W.D., 1957. Hard Rock Drilling Techniques. Mine and Quarry Engineering, 157-161, 194-197.
- Fairhurst, C., 2014. The Scratch Test an Innovative and Inexpensive Method to Determine the Compressive Strength and Mohr-Coulomb Failure Envelope for Sedimentary Rock, 8<sup>th</sup> Asian Rock Mechanics Symposium, Ekim, Sapporo, Japan, 438-446.
- Faradonbeh, R. S., Salimi, A., Monjezi, M., Ebrahimabadi, A. ve Moormann, C., 2017. Roadheader Performance Prediction Using Genetic Programming (GP) and Gene Expression Programming (GEP) Techniques, Environmental Earth Sciences, 76, 584.
- Farmer, I.W. ve Garrity, P., 1987. Prediction of Roadheader Cutting Performance from Fracture Toughness Considerations, 6th International Congress on Rock Mechanics, Montreal, Canada, 1, 621–624.
- Feridunoğlu, O.C., 2009. Kayaç Kazılabilirliğinin Tayini için Taşınabilir Kayaç Kesme Deney Aletinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Finnie, I., Streit, R. ve Foote, L., 1977. Relationship of Coal Properties and Machine Parameters to Continuous Mining Machine Cutting Rates, NTIS PB- 297291, 38 s.
- Fowell, R.J. ve McFeat-Smith, I., 1976. Factors Influencing the Cutting Performance of a Selective Tunneling Machine, Tunnelling Symposium, M.J. Jones, Ed., vol. 76. IMM, London, 301–309.
- Fowell, R.J., 1993. The Mechanics of Rock Cutting, Comprehensive Rock Engineering, J.A. Hudson, 4, Pergamon, Oxford, 155–176.
- Fowell, R.J., Richardson, G. ve Gollick, M.J., 1994. Rock Cutting with Roadheaders, Tunnelling, 785-796.
- Frenzel, C., Galler, R., Kasling, H. ve Villeneuve, M.. 2012. Penetration Tests for TBMs and Their Practical Application. Geomechanics and Tunnelling, 557-566.
- Gehring, K.H., 1989. A Cutting Comparison, Tunnels and Tunnelling, 27–30.
- Gerbaud, L., Menand, S. ve Sellami, H., 2006. PDC Bits : All Comes from the Cutter Rock Interaction, IADC/SPE Drilling Conference, Feb, Miami, A.B.D.

- Gillani, S.T.A. ve Butt, N., 2009. Excavation Technology for Hard Rock - Problems and Prospects, Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences, 4, 24-33.
- Göktan, R.M., 1990. Effect of Cutter Pick Rake Angle on the Failure Pattern of High-Strength Rocks, Mining Science and Technology, 11, 281–285.
- Göktan, R.M., 1997. A Suggested Improvement on Evans' cutting Theory for Conical Bits, 4th International Symposium on Mine Mechanisation and Automation, H. Gürgenci ve M. Hood., Ed., Brisbane, Australia, 57–61.
- Göktan, R.M., ve Güneş, N., 2005. A Semi-Empirical Approach to Cutting Force Prediction for Point-Attack Picks, The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 105, April, 257–263.
- Gregory, C.E., 2001. A Concise History of Mining, CRC Press, 216 s.
- Hawkes, I., ve Mellor, M., 1970. Uniaxial Testing in Rock Mechanics Laboratories. Engineering Geology, 4, 3, 177-285.
- He, X., Xu, C., Peng, K. ve Huang, G., 2017. On the Critical Failure Mode Transition Depth for Rock Cutting with Different Back Rake Angles, Tunnelling and Underground Space Technology, 63, 95–105.
- Heiniö, M., 1999. Rock Excavation Handbook. Sandvik Tamrock Corp, 305 s.
- Herrenknecht, H. ve Bappler, K., 2014. State of the Art and Current Design Approaches of Large Diameter TBM Technology, Tünelcilik Dergisi, 3, 18-22.
- Hood, M.C. ve Roxborough, F.F., 1992. Rock Breakage: Mechanical, SME Mining Engineering Handbook, H.L. Hartman, Ed., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 680-721.
- Howarth, D.F., Adamson, W.R. ve Berndt, J.R., 1986. Correlation of Model Tunnel Boring and Drilling Machine Performances with Rock Properties, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 23, 2, 171–175.
- Huang, H. ve Detournay, E., 2008. Intrinsic Length Scales in Tool-Rock Interaction, International Journal of Geomechanics, 8, 39–44.
- Huang, H., Lecampion, B. ve Detournay, E., 2013. Discrete Element Modeling of Tool–Rock Interaction I: Rock Cutting, International Journal of Numerical Analysis and Methods in Geomechanics, 37, 1913–1929.
- Hudson, J.A., Crouch, S.L. ve Fairhurst, C., 1972. Soft, Stiff and Servo-Controlled Testing Machines: A Review with Reference to Rock Failure, Engineering Geology, 6, 3, 155-189.



- Hurt, K.G. ve Laidlaw, D.G., 1979. Laboratory Comparison of Three Rock-Cutting Tools, Tunnels and Tunnelling, 6, 11-13.
- Hurt, K.G., 1980. Rock Cutting Experiments with Point Attack Tools, Colliery Guardian Coal International, April, 47-50.
- Hurt, K.G. ve MacAndrew, K.M., 1985. Cutting Efficiency and Life of Rock Cutting Picks. Mining Science and Technology, 2, 139-151.
- Inyang, H. I., 2002. Developments in Drag Bit Cutting of Rocks for Energy Infrastructure. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 16 (June), 248-260.
- ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Suggested methods prepared by the commission on testing methods. In: Ulusay R, Hudson JA (eds), Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group. ISRM, Ankara.
- Jamie, M.C., 2011. Numerical Modeling of Rock Cutting and Its Associated Fragmentation Process Using the Finite Element Method, Doktora Tezi, University of Pittsburgh, 239 s.
- Jang, J.S., Yoo, W.S., Kang, H., Cho, J.W., Jeong, M.S., Lee, S.K., Cho, Y.J., Lee, J.W. ve Rostami, J., 2016. Cutting Head Attachment Design for Improving the Performance by Using Multibody Dynamic Analysis, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 17, 3, 371-377.
- Johnson, S.T. ve Fowell, R.J., 1986. Compressive Strength is Not Enough (Assessing Pick Wear Rates for Drag Tool Equipped Machines), 27th U.S. Rock Mechanics Symposium, Tuscaloosa, 840-845.
- Kahraman, E., 2016. Kişisel Görüşme.
- Kahraman, E. ve Kahraman, S., 2016. The Performance Prediction of Roadheaders from Easy Testing Methods, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75, 4, 1585-1596.
- Kang, H., Cho, J.W., Park, J.Y., Jang, J.S., Kim, J.H., Kim, K.W., Rostami, J. ve Lee, J.W., 2016. A New Linear Cutting Machine for Assessing the Rock-Cutting Performance of a Pick Cutter, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 88, 129-136.
- Karakoç, K., 1980. G.L.İ. Tunçbilek Bölgesinde Galeri Açma Makinası ile Tam Mekanize Galeri Açma Çalışmaları ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi, Türkiye 2. Kömür Kongresi, Zonguldak, 119-150.
- Kel, K., 2003. Zonguldak Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Kazılabilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 181.

- Keleş, S., 2005. Cutting Performance Assessment of a Medium Weight Roadheader at Cayırhan Coal Mine, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 58.
- Keller, A. ve Drebenstedt, C., 2017. Hard Rock Cutting and Activated Cutting - Lessons Learned from the Laboratory, *BHM*, 162, 2, 67-71.
- Kenny, P. ve Johnson, S.N., 1976. An Investigation of the Abrasive Wear of Mineral Cutting Tools, *Wear*, 36, 337-361.
- Kim, E., 2010. Investigation of Conical Bit Rotation in Full Scale Cutting Tests, PhD Thesis, The Pennsylvania State University, 143 s.
- Koeller, K., Sherry, G., Stauber, W. ve Liebno, D., 2012. Roadheading a Lake Tap: Construction of a Deep Water Intake for the City of Austin's Water Treatment Plant No. 4, North American Tunneling, M. Fowler, R. Polermo, R. Pintabona, M. Smithson, Ed., 651-660.
- Kogelmann, W.J., 1982. Increased Productivity Through Boom-Type Continuous Miners. *South African Mining World*, August, 63-80.
- Kogelmann, W.J., ve Schenck, G.K., 1982. Recent North American Advances in Boomtype Tunnelling Machines, *Tunnelling* 82, London, A155-A165.
- Kogelmann, W.J., 1989. New Roadheader-Type Continuous Shaft Sinking Systems, Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Haziran, California, 480-500.
- Kogelmann, W.J., 1988. Roadheader Application and Selection Criteria, Alpine Equipment Corp., State College, PA.
- Koncagül, O., 1997. Diggability Assessment of Bucket Wheel Excavators in Elbistan Lignite Mine, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 147.
- Kwietnewski, D., Henn, R. ve Brierley, G., 2011. Versatility of Roadheaders in Tunnel Construction, *Tunneling & Underground Construction*, 5, 2, 17-21.
- Li, X., Lv., Y., Zeng, Q. ve Wang, J., 2015. Research on Strength of Roadheader Conical Picks Based on Finite Element Analysis, *The Open Mechanical Engineering Journal*, 9, 521-526.
- Liu, S.Y., Du, C.L., Cui, X.X. ve Cheng, X., 2009. Model Test of the Cutting Properties of a Shearer Drum, *Mining Science and Technology*, 19, 74-78.
- Liu, S., Liu, Z., Cui, X. ve Jiang, H., 2014. Rock Breaking of Conical Cutter with Assistance of Front and Rear Water Jet, *Tunneling & Underground Space Technology*, 42, 78-86.

- Lundberg, B., 1974. Penetration of Rock by Conical Indenters, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstracts, 11, 209–214.
- Mackie, S., Cashman, K., Ricketts, H., Rust, A. ve Watson, M., 2016. Volcanic Ash: Hazard Observation, Springer, 288 s.
- Madencilik Türkiye, 2015. Sandvik MR340 Roadheader Türkiye’de, 15 Nisan 2015, 38-39.
- Maidl, B., Schmidz, L., Ritz, W. ve Herrenknecht, M., 2008. Hard Rock Tunnel Boring Machines, Ernst and Sohn, Berlin, 343 s.
- Matsui, K. ve Shimada, H., 1993. Rock Impact Hardness Index for Predicting Cuttability of Roadheader. Mine Mechanization and Automation, G. Almgren, U. Kumar, N. Vagenas, Ed., Balkema, Rotterdam, 265-270.
- McFeat-Smith, I. ve Fowell, R. J., 1977. Correlation of Rock Properties and the Cutting Performance of Tunneling Machines, Conference on Rock Engineering, Newcastle, 581-602.
- McFeat-Smith, I. ve Fowell, R. J., 1979. The Selection and Application of Roadheaders for Rock Tunneling. Rapid Excavation Tunneling Conference, Georgia, 1, 261-279.
- Mellor, M., 1977. Mechanics of Cutting and Boring: Part IV: Dynamics and Energetics of Parallel Motion Tools, CRREL Report No:77-7, 96.
- Menezes, P.L., Lovell, M.R, Avdeev, I.V., Lin, J.S., Higgs III, C.F., 2014. Studies on the Formation of Discontinuous Chips During Rock Cutting Using an Explicit Finite Element Model, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 70, 635-648.
- Merchant, M.E., 1944. Basic Mechanics of Metal Cutting Process, Journal of Applied Mechanics, 11, A, 168–175.
- Miller, M.H. ve Sikarskie, D.L., 1968. On the Penetration of Rock by Three-Dimensional Indenters, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts, 5, 375–398.
- Mitaim, S., Dagrain, F., Richard, T., Detournay, E. ve Drescher, A., 2004. A Novel Apparatus to Determine the Rock Strength Parameters, 9<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering, Mayıs, Phetburi, Tayland.
- Natau, O., Mutschler, T.H. ve Lempp, C.H., 1991. Estimation of the Cutting Rate and Bit Wear of Partial Full Face Tunnelling Machines, 7th International Rock Mechanics Congress. ISRM, Aachen, 1591–1595.
- Neil, D.M., Rostami, J., Özdemir, L ve Gertsch, R., 1994. Production Estimating Techniques for Underground Mining Using Roadheaders. SME Annual Meeting, Albuquerque, New Mexico, Feb. 20–25.

- Nicodeme, P., 1997. Transition Between Ductile and Brittle Mode in Rock Cutting, Rapport de stage d'option scientifique. Ecole Polytechnique.
- Nishimatsu, Y., 1972. The Mechanics of Rock Cutting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 9, 261-270.
- Nishimatsu, Y., 1993. Theories of Rock Cutting, Comprehensive Rock Engineering, J.A. Hudson, Ed., Oxford, Pergamon Press, 647-662.
- Ocak, I., Eyigun, Y., Cinar, M. ve Nahya, T., 2007. Investigation into Roadheader Excavation Performance and Pick Consumption Used in Kadikoy–Kartal Metro Tunnels, Symposium on Underground Excavations for Transportation, Istanbul, Turkey, 199–206.
- Organiscak, J.A., Khair, A.W. ve Ahmad, M., 1995. Studies of Bit Wear and Respirable Dust Generation, SME-AIME Annual Meeting and Exhibition, Denver, CO, March 6-9. 1995, 1874- 1879.
- O'Dogherty, M.J., ve Burney, A.C., 1963. A Laboratory Study of the Effect of Cutting Speed on the Performance of Two Coal Cutter Picks. Colliery Eng. (London) 40, 51-54, 111-114.
- Palmer, A.C., 1999. Speed Effects in Cutting and Ploughing. Géotechnique, 49, 3, 285–294.
- Palmstrom, A., 2005. Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD), Tunnels and Underground Space Technology, 20, 362-377.
- Pariseau, G. ve Fairhurst, C., 1967. Force-Penetration Characteristic Penetration into Rock for Wedge Penetration into Rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 4, 165–180.
- Perras, M.A. ve Diederichs, M.S., 2014. A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing, Geotechnical and Geological Engineering, 32, 525-546.
- Philips, H.R., 1975. Rock Cutting Mechanics Related to the Design of Primary Excavation Systems, Doktora Tezi, University of Newcastle Upon Tyne, England, 202 s.
- Pomeroy, C.D. ve Brown. J.H., 1968. Laboratory Investigation of Cutting Process Applied to Coal Winning Machines, Journal of Strain Analysis, 3, 3, 232-243.
- Potts, E.L.J. ve Shuttleworth, P., 1959. A Study of Ploughability of Coal with Special Reference to the Effects of Blade Shape, Direction of Planning to the Cleat, Planning Speed and Influence of Water Infusion. Transactions of the Institution of Mining Engineers, 117, 519-553.
- Ranman, K.E., 1985. A Model Describing Rock Cutting with Conical Picks, Rock Mechanics and Rock Engineering, 18, 131–140.

- Reichmuth, R.D., 1968. Point Load Testing of Brittle Materials to Determine Tensile Strength and Relative Brittleness, Symposium of Rock Mechanics, University of Colorado, 134–159.
- Restner, U. ve Gehring, K.H., 2002. Quantification of Rock Mass Influence on Cuttability with Roadheaders. TUR 2002, University of Mining and Metallurgy, Kraków-Krynica, Poland, 53-68.
- Restner, U. ve Plinninger, R.J., 2015. Rock Mechanical Aspects of Roadheader Excavation, EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, W. Schubert ve A. Kluckner, Ed., 249-254.
- Richard, T., Detournay, E., Drescher, A., Nicodeme, P. ve Fourmaintraux, D., 1998. The Scratch Test as a Means to Measure Strength of Sedimentary Rocks, Rock Mechanics in Petroleum Engineering. Society of Petroleum Engineers, Trondheim, Norway, 15–22.
- Richard, T., 1999. Determination of Rock Strength from Cutting Tests, Master Thesis, University of Minnesota, ABD.
- Richard, T., Dagrain, F., Poyol, E. ve Detournay, E., 2012. Rock Strength Determination from Scratch Tests, Engineering Geology, 147-148, 91-100.
- Roepke, W.W., Lindroth, D.P. ve Myren, T.A., 1976. Reduction of Dust and Energy During Coal Cutting Using Point-Attack Bits with an Analysis of Rotary Cutting and Development of a New Cutting Concept. Bureau of Mines RI S185, 53 s.
- Roepke, W.W. ve Voltz., J.I., 1983. Coal-Cutting Forces and Primary Dust Generation Using Radial Gage Cutters. Bureau of Mines RI 8800, 24 s.
- Rostami, J., Ozdemir, L. ve Neil, D., 1994. Performance Prediction: The Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining, Mining Engineering, 1263-1267.
- Rostami, J. ve Ozdemir, L., 1996. Computer Modeling of Mechanical Excavators Cutterhead, Proceedings of the World Rock Boring Association Conference: Mechanical Excavation's Future Role in Mining, 17–19 Eylül, Laurentian University, Sudbury, Ontario, Kanada.
- Rostami, J., Ozdemir, L., Nilsen, B., 1996. Comparison Between CMS and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models, Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling and Technology (ISDT), 1–11.
- Roxborough, F.F., 1973. The Cutting Rock with Picks, Mining Engineer, June, 445-454.
- Roxborough, F.F. ve Rispin, A., 1973. The Mechanical Cutting Characteristics of the Lower Chalk, Tunnels and Tunnelling, January, 45-67.

- Roxborough, F. F. ve Eskikaya, S., 1974. Dimensional Considerations in The Design of a Scale Model for Coal Face Production System Research, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 11, 129–137.
- Roxborough, F.F. ve Philips H.R., 1974. Experimental Studies on the Excavation of Rocks Using Picks, *Advances in Rock Mechanics*, Third ISRM Congress, Denver, 1407-1412.
- Roxborough, F.F., 1976. Rock Excavation by Machine-A Comparative Study of Picks and Discs, *Second Australian Tunnelling Conference*, Australia, 133-143.
- Roxborough, F.F., King, P. ve Pedroncelli, E.J., 1981. Tests on the Cutting Performance of a Continuous Miner, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, January, 9–25.
- Roxborough, F.F. ve Pedroncelli, E.J., 1982. A Practical Evaluation of Some Coal-Cutting Theories Using a Continuous Miner, The Mining Engineer, 142, 252, 145–155.
- Roxborough, F.F., 1985. Research in Mechanical Rock Excavation: Progress and Prospects. *Rapid Excavation Tunneling Conference*, Las Vegas, 225–244.
- Roxborough, F.F. ve Sen, G.C., 1986. Breaking Coal and Rock. In: Martin C.H. (ed) *Australian Coal Mining Practice*. Australia Institute of Mining and Metallurgy, 130–147.
- Roxborough, F.F. ve Liu, Z.C. 1995. Theoretical Considerations on Pick Shape in Rock and Coal Cutting. *6th Underground Operator's Conference*, 189–193.
- Salsani, A., Daneshian, J., Shariati, S. ve Yazdani-Chamzini, A., Taheri, M., 2014. Predicting Roadheader Performance by Using Artificial Neural Network, Neural Computing and Applications, 24, 7, 1823-1831.
- Sandbak, L.A., 1985. Roadheader Drift Excavation and Geomechanical Rock Classification At San Manuel, Arizona. *Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, New York, 2, 902–916.
- Schatzov, N.I., 1964. *Bohren auf Erdöl und Erdgas*, Band I. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 295.
- Schenck, G.H.K., 1974. Mechanised Rock Excavation in Mining, *Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, San Francisco, U.S.A., 937-954.
- Schenck, G.H.K., 1982. Boom Type Miners and Roadheaders, *Underground Mining Methods Handbook*, W.A. Hustralid, Ed., 1160-1168.
- Schneider, H., 1988. Criteria for Selecting a Boom-Type Roadheader. Mining Magazine, September, 183-187.

- Seker, S.E. ve Ocak, İ., 2017. Performance Prediction of Roadheaders Using Ensemble Machine Learning Techniques. Neural Computing and Applications, DOI 10.1007/s00521-017-3141-2.
- Shahriar, K., 1988. Kayaçların Kazılabilirlik ve Jeoteknik Özelliklerinin Kollu Galeri Açma Makinelerinin Kazı Hızları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Shao, W., Li, W., Sun, Y. ve Huang, H., 2017. Parametric Study of Rock Cutting with SMART\*CUT Picks, Tunneling & Underground Space Technology, 61, 134-144.
- Sifferlinger, N.A., Hartlieb, P. ve Moser, P., 2017. The Importance of Research on Alternative and Hybrid Rock Extraction Methods, BHM, 162, 2, 58–66.
- Spagnoli, G., Bosco, C. ve Oreste, P., 2017. The Influence of the Rake Angle on the Excavation Energy in A Sandstone, Géotechnique Letters, 7, 1, 30-35.
- Stack, B., 1982. Handbook of Mining and Tunnelling Machinery. John Wiley, Chichester, 556s.
- Stack, B., 1995. Encyclopaedia of Tunnelling, Mining and Drilling Equipment. Muden Pub. Co., Hobart, Tasmania.
- Su, O. ve Akcin, N.A., 2011. Numerical Simulation of Rock Cutting Using the Discrete Element Method, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48, 434–442.
- Sundae, L.S. ve Myren, T.A., 1987. In Situ Comparison of Radial and Point Attack Bits, USBM RI 9127, 15 s.
- Şirin, A., 2016. Karayolu Ulaşım Modunda Tünelciliğin Yeri, Gelişimi ve Hedefleri, 1. Ulusal Tünelcilik ve Yeraltı Yapıları Kongresi, Ankara.
- Tannant, D.D. ve Wang, C., 2010. PFC Model of Wedge Penetration into Oil Sands. Discrete Element Methods, 259, 55, 311–316.
- Tatiya, R.R., 2005. Civil Excavations and Tunnelling-A Practical Guide. Thomas Telford Publishing, 310 s.
- Tatiya, R.R., 2013. Surface and Underground Excavations. CRC Press, 846 s.
- Thuro, K. ve Plinninger, R.J., 1998. Geological Limits in Roadheader Excavation - Four Case Studies, 8th IAEG Congress, 3545–3552.
- Thuro, K. ve Plinninger, R.J., 1999. Roadheader Excavation Performance - Geological and Geotechnical Influences, 9th ISRM Congress, 1241–1244.

- Tregelles, P.G. ve Morris, A.H., 1983. Improvement in Roadheaders, Symposium on Roadway Drivage Techniques in the Coal Mines of the European Community, Luxembourg, 91-106.
- Tümaç, D., Balcı, C., Bilgin, N. ve Çopur, H., 2012. Comparison of Cutting Forces for V-Type Disc Cutter and Performance Prediction of TBM Using Portable Linear Rock Cutting Machine ( PLCM ), 7th Asian Rock Mechanics Symposium, 1156–1165.
- URL-1, <http://www.alpinecutter.com/en/applications.html>, 02.03.2017.
- URL-2, <http://www.emi.mines.edu/EMI-Linear-Cutting-Test>, 02.03.2017.
- URL-3, <http://www.cefor-umn.com/facilities/rsd>, 02.03.2017.
- URL-4, <http://biyokam.gazi.edu.tr/posts/view/title/kalibrasyon-nedir%3F-62218>, 20.03.2017.
- Valantin, A., Belugou, P. ve Guillon, P., 1964. Etude Des Pies Des Machines D 'Abattage, Rev. de l'Industrie Minerale, October, 815-848.
- Verhoef, P.N.W., Ockeloen, J.J. ve Van Kesteren, W.G.M., 1996. The Significance of Rock Ductility for Mechanical Rock Cutting, North American Rock Mech Symp, M. Aubertin, F. Hassani, M. Mitri, Ed., Montreal, Balkema, 1, 709–716.
- Verhoef, P.N.W., 1997. Wear of Rock Cutting Tools. Balkema, Amsterdam, 327 s.
- Wagner, H. ve Schümann, E.H.R., 1971. The Stamp-Load Bearing Strength of Rock: An Experimental and Theoretical Investigation, Rock Mechanics, 3, 185–207.
- Waldburger, M., 1992. Use of Roadheaders for Concrete Refurbishment in a Head Race Gallery, Tunnels and Tunnelling, April, 19-23.
- Walker, S.F., 1902. Coal Cutting by Machinery in the United Kingdom, Colliery Guardian, London, 142 s.
- Wang, X., Liang, Y., Wang, Q. ve Zhang, Z., 2017. Empirical Models for Tool Forces Prediction of Drag-Typed Picks Based on Principal Component Regression and Ridge Regression Methods, Tunnelling and Underground Space Technology, 62, 75-92.
- Weibull, W., 1939. A Statistical Theory of the Strength of Materials. The Royal Swedish Institute for Engineering Research, 1-45.
- Whittaker, B.N. ve Frith, R.C., 1990. Tunnelling. The Institution of Mining and Metallurgy, 460 s.
- Whittaker, B.N., Singh, R.N. ve Sun, G., 1992. Rock Fracture Mechanics: Principles, Design and Applications. Elsevier, Amsterdam.



- Yao, Q., 2012. An Investigation of Rock Cutting: Towards a Novel Design of Cutting Bits, Doktora Tezi, The University of New South Wales, 178 s.
- Yaşar, S., 2013. Doğu Karadeniz Bölgesinde Bulunan Çeşitli Kayaçların ve Cevherlerin Kazılabilirlik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yaşar, S., Çapık, M. ve Yılmaz, A.O., 2015. Cuttability Assessment Using the Drilling Rate Index (DRI), Bulletin of Engineering Geology and Environment, 74, 4, 1349–1361.
- Yaşar, S. ve Yılmaz, A.O., 2017a. A Novel Mobile Testing Equipment for Rock Cuttability Assessment: Vertical Rock Cutting Rig (VRCR). Rock Mechanics and Rock Engineering, 50, 4, 857-869.
- Yaşar, S. ve Yılmaz, A.O., 2017b. Rock Cutting Tests with a Simple-Shaped Chisel Pick to Provide Some Useful Data. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50, 12, 3261-3269.
- Yaşar, S., ve Yılmaz, A.O., 2017c. Vertical Rock Cutting Rig (VRCR) Suggested for Performance Prediction of Roadheaders. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, DOI: 10.1080/17480930.2017.1363482.
- Zhang, J., Jin, L.Y., Xu, J.C. ve Liu, X.Q., 2007. Microstructure and Properties of Brazing Joint between YG8 Cemented Carbide and A3 Steel. Solid State Phenomena, 127, 265–270.
- Zhang, Q.B. ve Zhao, J., 2014. A Review of Dynamic Experimental Techniques and Mechanical Behaviour of Rock Materials. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, 1411-1478.
- Zhou, Y., ve Lin, J.S., 2013. On the Critical Failure Mode Transition Depth for Rock Cutting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 62, 131–137.
- Zhou, Y., ve Detournay, E., 2014. Analysis of the Contact Forces on a Blunt PDC Bit, 48<sup>th</sup> U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Minneapolis, Minnesota, A.B.D.

## 6. EKLER

### Ek 1. Kırmızı andezit numunesinin basit kama tipi keski ile yardımsız kesme deneylerinin tüm sonuçları

Kesme Açısı (°)	Yükleme Hızı (N/s)	Keski Genişliği (mm)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
12	350	10.8	60	1	0.012	41.80	901.89	493.26
12	350	10.8	70	1	0.011	55.56	1051.67	632.28
12	350	10.8	71	1	0.012	36.17	789.17	426.83
12	350	10.8	68	1	0.012	37.79	862.46	445.92
12	350	10.8	65	2	0.031	22.87	1557.42	710.53
12	350	10.8	62	2	0.025	32.72	1682.27	830.13
12	350	10.8	66	2	0.028	24.84	1287.18	706.42
12	150	10.8	60	3	0.047	21.99	2814.82	1039.01
12	350	10.8	67	3	0.044	21.41	2182.39	936.89
12	350	10.8	70	3	0.046	18.46	1909.10	852.66
12	350	10.8	54	3	0.055	17.97	1909.10	995.20
12	350	10.8	70	4	0.059	26.28	3015.85	1545.59
12	350	10.8	67	4	0.061	19.97	2502.73	1215.10
12	350	10.8	74	5	0.091	17.08	3718.49	1553.64
12	350	10.8	72	5	0.091	11.18	3089.61	1016.79
12	350	10.8	72	6	0.196	10.24	3769.41	2002.73
12	350	10.8	72	6	0.120	10.36	3818.34	1246.55

**Ek 2. Yeşil tuf numunesinin basit kama tipi keski ile yardımsız kesme deneylerinin tüm sonuçları**

Kesme Açısı (°)	Yükleme Hızı (N/s)	Keski Genişliği (mm)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
12	350	10.8	66	1	0.012	40.27	715.02	463.13
12	350	10.8	61	1	0.012	29.35	615.15	337.57
12	350	10.8	61	1	0.012	25.71	585.44	295.71
12	350	10.8	65	2	0.028	22.72	1105.90	625.76
12	350	10.8	65	2	0.024	25.17	954.26	597.21
12	350	10.8	67	2	0.026	21.94	1035.79	566.26
12	350	10.8	66	2	0.024	20.86	877.82	503.68
12	350	10.8	65	2	0.028	16.36	1044.98	450.59
12	200	10.8	71	3	0.044	13.94	1078.13	609.29
12	350	10.8	68	3	0.047	11.84	1258.84	562.03
12	350	10.8	68	3	0.045	13.41	1355.08	609.86
12	350	10.8	67	3	0.046	12.50	1416.59	574.01
12	350	10.8	68	4	0.066	12.39	1672.83	817.28
12	250	10.8	70	4	0.062	11.52	1604.00	710.72
12	350	10.8	41	4	0.075	9.47	1680.57	708.21
12	350	10.8	65	5	0.070	12.87	1684.56	897.72
12	350	10.8	68	5	0.104	7.66	1904.99	800.27
12	350	10.8	67	5	0.076	12.19	2294.11	922.66
12	350	10.8	58	6	0.112	8.43	2123.07	944.00
12	350	10.8	64	6	0.133	7.14	2175.14	947.72
12	350	10.8	65	6	0.107	9.12	2142.74	977.10
12	350	10.8	70	6	0.097	9.01	2288.37	870.47
12	350	10.8	72	6	0.127	6.68	2357.88	848.04
12	350	10.8	71	6	0.113	10.04	2525.66	1134.95

**Ek 3. Gri tuf numunesinin basit kama tipi keski ile yardimsiz kesme deneylerinin tum sonuclari**

Kesme Açısı (°)	Yükleme Hızı (N/s)	Keski Genişliği (mm)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
12	350	10.8	70	1	0.011	54.54	1042.91	594.44
12	350	10.8	73	1	0.012	43.65	909.83	533.62
12	350	10.8	65	1	0.011	38.38	757.22	418.33
12	350	10.8	64	2	0.029	19.38	1227.18	560.79
12	150	10.8	67	2	0.029	21.30	1357.56	623.80
12	150	10.8	76	2	0.024	28.63	1266.29	700.55
12	150	10.8	79	2	0.025	29.24	1470.06	740.19
12	150	10.8	75	3	0.051	19.83	1930.16	1015.57
12	350	10.8	64	3	0.056	12.75	1842.73	719.83
12	350	10.8	69	4	0.080	12.46	1945.04	995.49
12	350	10.8	70	4	0.079	10.51	1755.70	829.61
12	350	10.8	71	5	0.109	12.57	3706.14	1374.08
12	350	10.8	61	5	0.109	11.36	2995.59	1241.79
12	350	10.8	58	6	0.155	9.37	3099.02	1457.04
12	350	10.8	76	6	0.168	9.04	3517.68	1520.60
12	350	10.8	76	6	0.110	10.62	2827.11	1163.06

**Ek 4. Kahverengi vitrik tuf numunesinin basit kama tipi keski ile yardimsiz kesme deneylerinin tum sonuclari**

Kesme Açısı (°)	Yükleme Hızı (N/s)	Keski Genişliği (mm)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
12	350	10.8	71	1	0.011	67.74	1097.03	738.36
12	350	10.8	73	1	0.011	62.10	999.67	676.88
12	350	10.8	73	1	0.011	70.02	1161.04	763.17
12	350	10.8	74	1	0.013	51.72	979.55	651.50
12	350	10.8	70	1	0.011	55.08	923.53	600.37
12	350	10.8	69	2	0.023	38.09	1474.12	887.47
12	350	10.8	77	2	0.023	40.64	1484.50	916.77
12	350	10.8	65	2	0.024	33.21	1416.56	807.27
12	350	10.8	71	2	0.026	46.17	1829.66	1194.74
12	350	10.8	74	2	0.029	30.66	1577.02	887.87
12	350	10.8	67	2	0.026	33.98	1591.45	874.48
12	350	10.8	70	3	0.044	26.34	2200.95	1158.38
12	350	10.8	78	3	0.044	20.71	1797.19	915.77
12	350	10.8	72	3	0.046	26.08	2339.91	1195.71
12	350	10.8	76	4	0.075	16.93	2691.01	1267.34
12	350	10.8	78	4	0.076	17.52	2727.08	1339.14
12	350	10.8	70	5	0.105	13.19	2756.99	1386.41
12	350	10.8	65	5	0.105	13.56	2697.43	1425.79
12	350	10.8	50	5	0.105	11.49	3184.35	1206.30
12	350	10.8	70	6	0.086	17.03	3346.31	1463.03
12	350	10.8	65	6	0.106	15.51	4456.32	1647.86
12	350	10.8	50	6	0.110	14.71	4021.27	1616.58
12	350	10.8	50	6	0.108	16.44	4234.71	1771.85

**Ek 5. Sarı vitrik tuf numunesinin basit kama tipi keski ile yardımsız kesme deneylerinin tüm sonuçları**

Kesme Açısı (°)	Yükleme Hızı (N/s)	Keski Genişliği (mm)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
12	350	10.8	62	1	0.011	39.81	793.56	433.98
12	350	10.8	69	1	0.011	31.61	676.74	344.52
12	350	10.8	66	1	0.011	35.55	688.99	387.52
12	150	10.8	71	2	0.028	17.96	1024.69	495.42
12	150	10.8	74	2	0.029	18.49	1015.41	527.59
12	150	10.8	73	2	0.026	20.08	1013.97	524.37
12	350	10.8	68	2	0.029	16.21	981.63	471.26
12	350	10.8	78	2	0.030	18.84	1143.66	568.34
12	350	10.8	63	3	0.050	12.31	1280.60	610.53
12	350	10.8	70	4	0.079	8.37	1667.79	659.00
12	350	10.8	70	4	0.079	16.10	2598.92	1268.06
12	350	10.8	70	4	0.079	9.76	1860.82	768.96
12	350	10.8	71	5	0.082	13.08	2177.89	1072.64
12	350	10.8	67	5	0.105	8.99	2104.17	945.50
12	350	10.8	62	6	0.136	9.06	3108.14	1231.59
12	350	10.8	51	6	0.155	6.57	2759.29	1016.86
12	350	10.8	64	6	0.211	5.59	2743.22	1181.00

**Ek 6. Önceki çalışmadan kalan numunelerin karot kesme deneylerinin sonuçları**

Numune	Kesme Açısı (°)	Yükleme Hızı (N/s)	Keski Genişliği (mm)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Ortalama Kesme Kuvveti (N/mm)
Dolomitik Kireçtaşı	-5	350	12,7	50	5	35.80	622.77
Dolomitik Kireçtaşı	-5	350	12,7	50	5	31.62	545.51
Dolomitik Kireçtaşı	-5	350	12,7	50	5	56.77	852.74
Dolomitik Kireçtaşı	-5	350	12,7	65	5	44.64	732.07
Traverten	-5	350	12,7	71	5	20.74	339.02
Traverten	-5	350	12,7	72	5	25.85	437.96
Traverten	-5	350	12,7	54	5	24.65	350.29
Traverten	-5	350	12,7	61	5	21.77	373.86
Granadiyorit	-5	350	12,7	72	5	78.03	979.08
Fosilli Kumtaşı	-5	350	12,7	46	5	52.84	812.31
Fosilli Kumtaşı	-5	350	12,7	20	5	48.70	792.36
Litik Tüf	-5	350	12,7	65	5	32.84	359.36
Litik Tüf	-5	350	12,7	59	5	18.62	262.74
Litik Tüf	-5	350	12,7	62	5	21.89	333.76
Bakır Cevheri	-5	350	12,7	33	5	69.21	1196.26
Bakır Cevheri	-5	350	12,7	20	5	22.13	607.71
Bakır Cevheri	-5	350	12,7	30	5	25.03	523.55
Vitrik Tüf	-5	350	12,7	60	5	13.40	220.84
Vitrik Tüf	-5	350	12,7	35	5	15.40	223.63
Vitrik Tüf	-5	350	12,7	45	5	19.09	285.19

**Ek 7. Magmatik kayalar üzerinde gerçekleştirilen karot kesme deneylerinin sonuçları**

Numune	Kesme Açısı (°)	Yükleme Hızı (N/s)	Keski Genişliği (mm)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
Kırmızı Andezit	-5	350	12.7	70	5	15.81	1436.43
Kırmızı Andezit	-5	350	12.7	65	5	15.23	1589.50
Kırmızı Andezit	-5	350	12.7	67	5	15.69	1637.07
Gri Andezit	-5	350	12.7	71	5	39.41	3325.57
Gri Andezit	-5	350	12.7	72	5	29.46	3514.28
Gri Andezit	-5	350	12.7	72	5	33.42	3640.23
Yeşil Tüf	-5	350	12.7	71	5	14.46	1304.06
Yeşil Tüf	-5	350	12.7	74	5	13.65	1258.50
Yeşil Tüf	-5	350	12.7	73	5	11.62	1234.91
Gri Tüf	-5	350	12.7	70	5	17.77	1459.13
Gri Tüf	-5	350	12.7	71	5	15.40	2057.28
Gri Tüf	-5	350	12.7	80	5	14.01	1882.27
Kahverengi Vitrik Tüf	-5	350	12.7	83	5	17.77	1677.28
Kahverengi Vitrik Tüf	-5	350	12.7	73	5	14.99	1406.02
Kahverengi Vitrik Tüf	-5	350	12.7	80	5	18.95	2333.74
Sarı Vitrik Tüf	-5	350	12.7	77	5	10.59	1108.79
Sarı Vitrik Tüf	-5	350	12.7	76	5	12.43	1241.10
Sarı Vitrik Tüf	-5	350	12.7	84	5	11.41	1270.46



**Ek 8. Kırmızı andezit numunesinin konik kesmeler ile yardımsız kesme deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar**

Koni Açısı (°)	Hücum Açısı (°)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
80	48	78	1	0.0022	142.89	751.40	320.14
80	48	77	1	0.0020	163.53	860.64	319.60
80	48	71	1	0.0022	141.46	737.22	309.49
80	48	74	3	0.0213	49.20	2338.15	1045.63
80	48	77	3	0.0249	52.59	2890.09	1309.58
80	48	71	3	0.0260	44.71	2562.24	1161.63
80	48	74	5	0.0689	31.39	5290.04	2162.08
80	48	73	5	0.0598	39.32	4742.48	2353.36
80	48	73	5	0.0598	35.03	4523.68	2096.32
80	48	70	7	0.1023	23.26	5801.34	2378.93
80	48	75	7	0.0906	28.96	5627.03	2624.27
80	48	75	7	0.1068	18.78	5983.95	2006.15
80	48	85	9	0.1108	24.08	5536.35	2667.84
80	48	72	9	0.1399	20.74	7287.15	2902.02
80	48	70	9	0.1956	16.11	6400.12	3150.13

**Ek 9. Gri andezit numunesinin konik kesmeler ile yardımsız kesme deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar**

Koni Açısı (°)	Hücum Açısı (°)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
80	48	90	1	0.0083	164.50	3209.57	1368.85
80	48	75	1	0.0078	168.59	3209.57	1307.17
80	48	77	1	0.0080	139.26	2940.72	1115.41
80	48	75	3	0.0341	82.19	7635.18	2799.95
80	48	73	3	0.0317	97.35	8153.28	3084.14
80	48	76	3	0.0333	97.41	7008.70	3246.55
80	48	75	5	0.0505	101.49	10411.59	5126.79
80	48	75	5	0.0508	94.21	10031.93	4786.64
80	48	75	5	0.0511	90.52	9654.57	4625.53
80	48	74	7	0.0964	53.58	13157.35	5166.99
80	48	74	7	0.0872	71.35	15074.75	6222.47
80	48	77	7	0.0907	74.04	15661.51	6714.11
80	48	75	9	0.2109	34.02	19754.38	7173.18
80	48	72	9	0.1661	50.92	21872.95	8458.63
80	48	70	9	0.2410	28.56	18009.39	6883.93

**Ek 10. Yeşil tuf numunesinin konik kesimler ile yardımsız kesme deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar**

Koni Açısı (°)	Hücum Açısı (°)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
80	48	75	1	0.0041	43.52	361.95	178.98
80	48	75	1	0.0037	58.42	449.30	218.40
80	48	75	1	0.0044	45.44	424.40	198.18
80	48	71	3	0.0431	17.60	1681.22	758.56
80	48	73	3	0.0419	25.52	2045.13	1068.19
80	48	75	3	0.0424	20.45	1435.90	866.60
80	48	78	5	0.0581	29.74	3084.39	1728.26
80	48	76	5	0.0756	18.05	3222.89	1365.41
80	48	74	5	0.0796	20.68	3609.67	1645.24
80	48	80	7	0.1183	13.12	3202.64	1552.24
80	48	76	7	0.1054	16.03	3660.70	1689.87
80	48	76	7	0.1217	16.75	4016.63	2038.64
80	48	71	9	0.1757	12.89	5040.27	2264.51
80	48	74	9	0.1746	13.71	6173.35	2394.05
80	48	69	9	0.1571	15.86	5131.61	2491.32

**Ek 11. Gri tuf numunesinin konik kesmeler ile yardımsız kesme deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar**

Koni Açısı (°)	Hücum Açısı (°)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
80	48	81	1	0.0061	63.28	847.38	383.33
80	48	84	1	0.0067	56.41	923.88	376.59
80	48	71	1	0.0079	59.93	966.28	473.32
80	48	81	3	0.0231	41.31	2038.07	955.71
80	48	83	3	0.0287	39.32	2485.09	1129.13
80	48	83	3	0.0248	38.84	2172.13	962.10
80	48	76	5	0.0615	32.29	3979.06	1985.67
80	48	78	5	0.0569	24.42	3233.47	1389.65
80	48	79	5	0.0686	22.59	3740.72	1549.96
80	48	85	7	0.1185	18.94	5380.20	2244.23
80	48	78	7	0.1255	18.28	5534.65	2294.35
80	48	75	7	0.1109	20.22	5259.01	2241.95
80	48	74	9	0.1945	15.23	6041.50	2961.77
80	48	78	9	0.1594	14.80	5615.53	2358.33
80	48	65	9	0.1425	21.21	7067.95	3022.05

**Ek 12. Kahverengi vitrik tuf numunesinin konik kesmeler ile yardımsız kesme deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar**

Koni Açısı (°)	Hücum Açısı (°)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
80	48	71	1	0.0056	82.09	1250.94	455.63
80	48	61	1	0.0057	75.47	1141.96	426.62
80	48	55	1	0.0049	83.95	1011.95	413.52
80	48	67	3	0.0283	44.33	2541.79	1254.75
80	48	50	3	0.0246	41.60	1996.00	1024.59
80	48	70	3	0.0306	43.63	2439.87	1335.65
80	48	65	5	0.0743	29.88	4466.05	2219.29
80	48	76	5	0.0804	22.56	4906.34	1813.05
80	48	74	5	0.0566	37.79	5112.20	2138.03
80	48	85	7	0.139	24.87	7731.02	3459.49
80	48	87	7	0.1158	27.54	7021.89	3188.10
80	48	85	7	0.1423	24.39	8129.62	3470.73
80	48	80	9	0.2220	21.26	10570.02	4719.28
80	48	75	9	0.1715	25.97	9052.07	4455.80
80	48	80	9	0.1718	23.62	8178.43	4058.30

**Ek 13. Sarı vitrik tuf numunesinin konik kesmeler ile yardımsız kesme deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar**

Koni Açısı (°)	Hücum Açısı (°)	Kesme Uzunluğu (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Pasa (m <sup>3</sup> /km)	Spesifik Enerji (MJ/m <sup>3</sup> )	Maksimum Kesme Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Kuvveti (N)
80	48	85	1	0.0052	54.50	631.97	282.85
80	48	82	1	0.0054	57.11	595.06	307.25
80	48	82	1	0.0043	74.23	613.74	319.51
80	48	82	3	0.0337	27.61	1871.80	931.00
80	48	78	3	0.0313	26.99	1931.25	844.62
80	48	78	3	0.0253	34.38	1623.92	868.65
80	48	72	5	0.0842	18.45	3456.52	1552.80
80	48	76	5	0.0975	16.17	3211.07	1577.22
80	48	74	5	0.0930	19.53	4112.14	1815.95
80	48	70	7	0.1261	15.56	4550.86	1961.61
80	48	78	7	0.1595	12.53	4124.69	1997.78
80	48	75	7	0.1067	18.93	4777.24	2019.58
80	48	80	9	0.2007	12.94	4550.86	2597.76
80	48	80	9	0.1940	16.31	7480.01	3164.25
80	48	90	9	0.1789	17.52	6979.89	3133.65

**Ek 14. Basit kama tipi keskiler için Nishimatsu (1972) teorisi için kullanılan parametreler ve hesaplanan kuvvet değerleri**

Kesme Derinliği (mm)	Keski Genişliği (mm)	Kesme Açısı (°)	Dolaylı Çekme Dayanımı (MPa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Kesme Dayanımı (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Gerilme Dağılım Faktörü	Sürtünme Açısı (°)	Maksimum Kesme Kuvveti (N)
<b>Kırmızı Andezit</b>									
1	10,8	12	6,33	72,85	14,62	46,27	9,14	26,74	166,14
2	10,8	12	6,33	72,85	14,62	46,27	9,14	26,74	332,27
3	10,8	12	6,33	72,85	14,62	46,27	9,14	26,74	498,41
4	10,8	12	6,33	72,85	14,62	46,27	9,14	26,74	664,55
5	10,8	12	6,33	72,85	14,62	46,27	9,14	26,74	830,68
6	10,8	12	6,33	72,85	14,62	46,27	9,14	26,74	996,82
<b>Yeşil Tüf</b>									
1	10,8	12	4,67	51,65	10,68	45,05	9,14	26,74	114,72
2	10,8	12	4,67	51,65	10,68	45,05	9,14	26,74	229,43
3	10,8	12	4,67	51,65	10,68	45,05	9,14	26,74	344,15
4	10,8	12	4,67	51,65	10,68	45,05	9,14	26,74	458,86
5	10,8	12	4,67	51,65	10,68	45,05	9,14	26,74	573,58
6	10,8	12	4,67	51,65	10,68	45,05	9,14	26,74	688,30
<b>Gri Tüf</b>									
1	10,8	12	5,66	62,63	12,95	45,06	9,14	26,74	139,14
2	10,8	12	5,66	62,63	12,95	45,06	9,14	26,74	278,27
3	10,8	12	5,66	62,63	12,95	45,06	9,14	26,74	417,41
4	10,8	12	5,66	62,63	12,95	45,06	9,14	26,74	556,55
5	10,8	12	5,66	62,63	12,95	45,06	9,14	26,74	695,68
6	10,8	12	5,66	62,63	12,95	45,06	9,14	26,74	834,82
<b>Kahverengi Vitrik Tüf</b>									
1	10,8	12	6,7	88,15	16,07	49,93	9,14	26,74	222,16
2	10,8	12	6,7	88,15	16,07	49,93	9,14	26,74	444,33
3	10,8	12	6,7	88,15	16,07	49,93	9,14	26,74	666,49
4	10,8	12	6,7	88,15	16,07	49,93	9,14	26,74	888,66
5	10,8	12	6,7	88,15	16,07	49,93	9,14	26,74	1110,82
6	10,8	12	6,7	88,15	16,07	49,93	9,14	26,74	222,16
<b>Sarı Vitrik Tüf</b>									
1	10,8	12	4,38	62,48	10,76	51,98	9,14	26,74	168,11
2	10,8	12	4,38	62,48	10,76	51,98	9,14	26,74	336,22
3	10,8	12	4,38	62,48	10,76	51,98	9,14	26,74	504,33
4	10,8	12	4,38	62,48	10,76	51,98	9,14	26,74	672,45
5	10,8	12	4,38	62,48	10,76	51,98	9,14	26,74	840,56
6	10,8	12	4,38	62,48	10,76	51,98	9,14	26,74	1008,67

**Ek 15. Basit kama tipi kesmeler için Evans (1958) teorisi için kullanılan parametreler ve hesaplanan kuvvet değerleri**

Kesme Derinliği (mm)	Keski Genişliği (mm)	Kesme Açısı (°)	Direkt Çekme Dayanımı (MPa)	Maksimum Kesme Kuvveti ( $\psi = 0$ )	Maksimum Kesme Kuvveti ( $\psi = 10$ )	Maksimum Kesme Kuvveti ( $\psi = 20$ )	Maksimum Kesme Kuvveti ( $\psi = 30$ )
<b>Kırmızı Andezit</b>							
1	10,8	12	6,33	232,13	420,68	820,53	1921,82
2	10,8	12	6,33	464,26	841,37	1641,06	3843,64
3	10,8	12	6,33	696,39	1262,05	2461,60	5765,47
4	10,8	12	6,33	928,52	1682,74	3282,13	7687,29
5	10,8	12	6,33	1160,65	2103,42	4102,66	9609,11
6	10,8	12	6,33	1392,78	2524,11	4923,19	11530,93
<b>Yeşil Tüf</b>							
1	10,8	12	4,67	171,26	310,36	605,35	1417,84
2	10,8	12	4,67	342,51	620,73	1210,71	2835,67
3	10,8	12	4,67	513,77	931,09	1816,06	4253,51
4	10,8	12	4,67	685,02	1241,45	2421,41	5671,35
5	10,8	12	4,67	856,28	1551,81	3026,76	7089,18
6	10,8	12	4,67	1027,53	1862,18	3632,12	8507,02
<b>Gri Tüf</b>							
1	10,8	12	5,66	207,56	376,16	733,68	1718,41
2	10,8	12	5,66	415,12	752,31	1467,36	3436,81
3	10,8	12	5,66	622,68	1128,47	2201,05	5155,22
4	10,8	12	5,66	830,24	1504,63	2934,73	6873,62
5	10,8	12	5,66	1037,80	1880,79	3668,41	8592,03
6	10,8	12	5,66	1245,36	2256,94	4402,09	10310,44
<b>Kahverengi Vitrik Tüf</b>							
1	10,8	12	6,7	245,70	445,27	868,49	2034,16
2	10,8	12	6,7	491,40	890,55	1736,99	4068,31
3	10,8	12	6,7	737,09	1335,82	2605,48	6102,47
4	10,8	12	6,7	982,79	1781,10	3473,97	8136,62
5	10,8	12	6,7	1228,49	2226,37	4342,47	10170,78
6	10,8	12	6,7	1474,19	2671,65	5210,96	12204,93
<b>Sarı Vitrik Tüf</b>							
1	10,8	12	4,38	160,62	291,09	567,76	1329,79
2	10,8	12	4,38	321,24	582,18	1135,52	2659,58
3	10,8	12	4,38	481,86	873,27	1703,28	3989,37
4	10,8	12	4,38	642,48	1164,36	2271,05	5319,17
5	10,8	12	4,38	803,10	1455,45	2838,81	6648,96
6	10,8	12	4,38	963,72	1746,54	3406,57	7978,75



**Ek 16. Negatif kesme açılı keski için yapılan teorik tahmin çalışmalarının sonuçları (d= 5 mm)**

<b>Evans (1965)</b>				
Numune	Keski Genişliği (mm)	Kesme Açısı (°)	Direkt Çekme Dayanımı (MPa)	Maksimum Kesme Kuvveti ( $\psi = 15$ )
Kırmızı Andezit	12,7	-5	6,33	6311,02
Gri Andezit	12,7	-5	6,67	6650,00
Yeşil Tüf	12,7	-5	4,67	4655,99
Gri Tüf	12,7	-5	5,66	5643,03
Kahverengi Vitrik Tüf	12,7	-5	6,7	6679,91
Sarı Vitrik Tüf	12,7	-5	4,38	4366,87

<b>Nishimatsu (1972)</b>									
Numune	Keski Genişliği (mm)	Kesme Açısı (°)	Dolaylı Çekme Dayanımı (MPa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Kesme Dayanımı (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Gerilme Dağılım Faktörü	Sürtünme Açısı (°)	Maksimum Kesme Kuvveti (N)
Kırmızı Andezit	12,7	-5	7,91	72,85	14,62	46,27	12,2	21,3	1898,04
Gri Andezit	12,7	-5	8,34	99,92	16,67	53,09	12,2	21,3	5051,03
Yeşil Tüf	12,7	-5	5,84	51,65	10,68	45,05	12,2	21,3	1239,69
Gri Tüf	12,7	-5	7,08	62,63	12,95	45,06	12,2	21,3	1504,33
Kahverengi Vitrik Tüf	12,7	-5	8,38	88,15	16,07	49,93	12,2	21,3	3105,14
Sarı Vitrik Tüf	12,7	-5	5,47	62,48	10,76	51,98	12,2	21,3	2743,09

**Ek 17. Konik keskiler için yapılan teorik tahmin çalışmalarının sonuçları**

Kesme Derinliği (mm)	Direkt Çekme Dayanımı (MPa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Uç Açısı (°)	Sürtünme Açısı (°)	Kesme Açısı (°)	Evans (1984) (N)	Roxborough ve Liu (1995) (N)	Göktan (1997) (N)	Göktan ve Güneş (2005) (N)
<b>Kırmızı Andezit</b>									
1	6,33	72,85	80	30	2	47,11	70,20	205,37	799,98
3	6,33	72,85	80	30	2	424,02	631,77	1848,32	7199,83
5	6,33	72,85	80	30	2	1177,82	1754,93	5134,21	19999,54
7	6,33	72,85	80	30	2	2308,53	3439,66	10063,05	39199,10
9	6,33	72,85	80	30	2	3816,14	5685,96	16634,84	64798,51
<b>Gri Andezit</b>									
1	6,67	99,92	80	30	2	38,14	64,89	216,40	842,95
3	6,67	99,92	80	30	2	343,24	583,97	1947,59	7586,56
5	6,67	99,92	80	30	2	953,46	1622,15	5409,98	21073,77
7	6,67	99,92	80	30	2	1868,78	3179,42	10603,56	41304,58
9	6,67	99,92	80	30	2	3089,20	5255,77	17528,34	68279,00
<b>Yeşil Tüf</b>									
1	4,67	51,65	80	30	2	36,17	52,70	151,51	590,19
3	4,67	51,65	80	30	2	325,51	474,29	1363,61	5311,73
5	4,67	51,65	80	30	2	904,20	1317,47	3787,80	14754,80
7	4,67	51,65	80	30	2	1772,24	2582,24	7424,08	28919,40
9	4,67	51,65	80	30	2	2929,61	4268,60	12272,46	47805,54
<b>Gri Tüf</b>									
1	5,66	62,63	80	30	2	43,81	63,86	183,63	715,31
3	5,66	62,63	80	30	2	394,33	574,71	1652,68	6437,77
5	5,66	62,63	80	30	2	1095,35	1596,42	4590,78	17882,69
7	5,66	62,63	80	30	2	2146,88	3128,99	8997,92	35050,07
9	5,66	62,63	80	30	2	3548,93	5172,42	14874,12	57939,90
<b>Kahverengi Vitrik Tüf</b>									
1	6,7	88,15	80	30	2	43,62	69,75	217,37	846,74
3	6,7	88,15	80	30	2	392,58	627,73	1956,35	7620,68
5	6,7	88,15	80	30	2	1090,51	1743,70	5434,31	21168,55
7	6,7	88,15	80	30	2	2137,40	3417,65	10651,25	41490,36
9	6,7	88,15	80	30	2	3533,25	5649,58	17607,17	68586,10
<b>Sarı Vitrik Tüf</b>									
1	4,38	62,48	80	30	2	26,30	43,74	142,10	553,54
3	4,38	62,48	80	30	2	236,71	393,69	1278,93	4981,88
5	4,38	62,48	80	30	2	657,52	1093,58	3552,58	13838,55
7	4,38	62,48	80	30	2	1288,74	2143,41	6963,06	27123,55
9	4,38	62,48	80	30	2	2130,37	3543,19	11510,36	44836,89

## Ek 18. Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin tüm sonuçları

Numune	Deney no	Deney sonucu (MPa)
Kırmızı andezit	1	50,81
	2	77,50
	3	66,90
	4	89,64
	5	79,41
	Ortalama: 72,50 / Standart sapma: 13,17	
Gri andezit	1	97,46
	2	101,33
	3	111,83
	4	84,96
	5	104,01
	Ortalama: 99,92 / Standart sapma: 8,84	
Yeşil tuf	1	42,85
	2	43,19
	3	63,36
	4	52,91
	5	55,94
	Ortalama: 52,65 / Standart sapma: 10,84	
Gri tuf	1	57,30
	2	50,99
	3	68,07
	4	68,87
	5	67,92
	Ortalama: 62,63 / Standart sapma: 7,22	
Kahverengi vitrik tuf	1	60,24
	2	115,83
	3	104,95
	4	86,18
	5	73,56
	Ortalama: 88,15 / Standart sapma: 20,22	
Sarı vitrik tuf	1	51,26
	2	54,44
	3	67,44
	4	58,64
	5	80,60
	Ortalama: 62,45 / Standart sapma: 10,57	
Volkanik kumtaşı	1	15,13
	2	13,69
	3	8,19
	Ortalama: 12,34 / Standart sapma: 2,99	
Kristal tuf	1	2,67
	2	2,39
	3	1,89
	4	2,75
	5	2,49
	Ortalama: 2,44 / Standart sapma: 0,30	

**Ek 19. Dolaylı çekme dayanımı deneylerinin tüm sonuçları**

Numune	Deney no	Deney sonucu (MPa)	Deney no	Deney sonucu (MPa)
Kırmızı andezit	1	7,84	6	6,85
	2	7,05	7	7,87
	3	8,87	8	9,36
	4	6,70	9	7,47
	5	9,74	10	7,31
	Ortalama: 7,91		Standart Sapma: 1,01	
Gri andezit	1	9,05	6	8,32
	2	8,28	7	7,36
	3	8,59	8	8,14
	4	9,69	9	7,89
	5	8,75	10	7,87
	Ortalama: 8,34		Standart Sapma: 0,63	
Yeşil tuf	1	3,10	6	5,88
	2	5,78	7	5,15
	3	6,18	8	6,56
	4	6,47	9	8,86
	5	5,26	10	5,19
	Ortalama: 5,84		Standart Sapma: 1,37	
Gri tuf	1	5,85	6	6,33
	2	6,80	7	8,49
	3	6,09	8	8,06
	4	6,83	9	7,20
	5	7,52	10	7,60
	Ortalama: 7,08		Standart Sapma: 0,81	
Kahverengi vitrik tuf	1	8,60	6	8,38
	2	7,05	7	7,50
	3	9,30	8	8,97
	4	8,94	9	8,84
	5	7,95	10	8,29
	Ortalama: 8,38		Standart Sapma: 0,70	
Sarı vitrik tuf	1	5,74	6	6,55
	2	5,72	7	4,92
	3	5,62	8	4,71
	4	4,77	9	4,57
	5	7,77	10	4,31
	Ortalama: 5,47		Standart Sapma: 1,01	
Volkanik kumtaşı	1	0,99	6	1,36
	2	1,06	7	1,53
	3	1,30	8	2,00
	4	1,45	9	1,24
	5	1,06		
	Ortalama: 1,33		Standart Sapma: 0,29	
Kristal tuf	1	0,44	6	0,76
	2	0,39	7	0,69
	3	0,76	8	0,97
	4	0,87	9	0,96
	5	0,81	10	0,72
	Ortalama: 0,74		Standart Sapma: 0,18	

## ÖZGEÇMİŞ

Serdar YAŞAR, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında mezun olmuştur. 2010 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2012 Ağustos'unda Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) ile Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atanmıştır ve yüksek lisans eğitimini 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamlamıştır. Yazar, lisans eğitiminden bu yana tam cepheli tünel açma makineleri, kollu galeri açma makineleri, kazı makinelerinin performans kestirimi, teorik kazı mekaniği ve kaya kesme deneyleri gibi konular üzerine çalışmaktadır. Bugüne kadar beşi uluslararası indeksli makale olmak üzere 30'a yakın ulusal/uluslararası makale ve tebliğin yazarlığını yapmıştır. Yazar, K.T.Ü. Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Anabilim Dalı'nda araştırma görevliliğine devam etmektedir. Yazar evli ve çok iyi derecede İngilizce ve başlangıç seviyesinde Almanca bilmektedir.

### **Doktora Tezinden Yapılan Yayınlar:**

#### **1. SCI ve SCI-Exp İndekslerine Giren Dergilerde Yayımlanan Makaleler**

- Yaşar, S., ve Yılmaz, A.O., 2017. A Novel Mobile Testing Equipment for Rock Cuttability Assessment: Vertical Rock Cutting Rig (VRCR). Rock Mechanics and Rock Engineering, 50, 4, 587-869.
- Yaşar, S., ve Yılmaz, A.O., 2017. Vertical Rock Cutting Rig (VRCR) Suggested for Performance Prediction of Roadheaders. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, DOI: 10.1080/17480930.2017.1363482.
- Yaşar, S., ve Yılmaz, A.O., 2017. Rock Cutting Tests with a Simple-Shaped Chisel Pick to Provide Some Useful Data. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50, 12, 3261-3269. (Teknik Not).

## 2. Proje, Patent ve Tasarım

Kayaç Kesilebilirliğinin Tayini için Düşey Kayaç Kesme Setinin Geliştirilmesi, BAP Doktora, FDK-2015-5382, Araştırmacı.

Türk Patent ve Marka Kurumu, 2016. Kayaç kesilebilirliğinin tayini için düşey kayaç kesme aparatı, Faydalı Model Patenti, Belge No: TR 2015 15819 Y.

