

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEĞİŞİK KAYAÇ VE DİSK KESKİLERİN KAYAÇ KAZILABİLİRLİĞİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ
Deniz TUMAÇ**

Anabilim Dalı : Maden Mühendisliği

Programı : Maden Mühendisliği

EKİM 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEĞİŞİK KAYAÇ VE DİSK KESKİLERİN KAYAÇ KAZILABİLİRLİĞİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ
Deniz TUMAÇ
(505032002)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Haziran 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Ekim 2010**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cemal BALCI (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nuh BİLGİN (İTÜ)
Prof. Dr. Mustafa ERDOĞAN (İTÜ)
Prof. Dr. Nuri Ali AKÇIN (ZKÜ)
Doç. Dr. Hanifi ÇOPUR (İTÜ)**

EKİM 2010

Aileme...

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden Mühendisliği Programında doktora tezi olarak hazırlanan bu çalışma, değişik kayaç ve disk keskilerin kayaç kazılabilirliği üzerine etkisinin araştırılması ve İstanbul’da kullanılan bazı tünel açma makinelerinin performans değerlendirmesi hakkındadır.

Tezin hazırlanması sırasında yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen, daima yol gösterici olan ve doktora çalışmalarımı yönlendiren, tez danışmanım sayın hocam Doç. Dr. Cemal BALCI’ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında, tez izleme komitesi üyeleri olarak beni yönlendiren ve desteğini esirgemeyen sayın hocalarım Prof. Dr. Nuh BİLGİN ve Prof. Dr. Mustafa ERDOĞAN’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar deneyleri sırasında ve akademik çalışmalarında her zaman büyük yardımlarını gördüğüm sayın hocam Doç. Dr. Hanifi ÇOPUR’a ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Kayaçların petrografik analizlerini yapan sayın Prof. Dr. Yüksel ÖRGÜN ve Dr. Orhan YAVUZ’a teşekkür ederim.

Bu tezin yapılması sırasında yardımlarını aldığım, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü “Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi – Lisansüstü Tezlerini Destekleme Programı” çerçevesinde desteklenen “Zemin ve Kaya Formasyonlarda Kazı Yapan Tam Cepheli Tünel Açma Makinelerinin Performans ve Arıza Risklerinin Analizi” 32361 nolu proje ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Projesi çerçevesinde desteklenen “Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri (TBM) Performans tahmini ve Optimizasyonu” 106M298 nolu proje yönetici ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, yüklenici firma; Yapı Merkezi - Yüksel - Doğuş - Yenigün - Belen İnşaat Ortak Girişimi (Anadoluray) ve Gülermak-Doğuş Ortak girişimi gruplarına, işveren; İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü’ne, verdikleri desteklerden dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca bugüne kadar olan hayatımda bana sürekli maddi ve manevi destek olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan bu doktora çalışmasının; araştırmacılara ve endüstriye büyük faydalar ve önemli katkılar sağlamasını dilerim.

Ekim 2010

Deniz TUMAÇ

Maden Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
SEMBOL LİSTESİ	xxix
ÖZET	xxxi
SUMMARY	xxxiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1 Mekanize Kazı Yöntemleri	5
2.1.1 Tam cepheli tünel açma makineleri	7
2.1.2 Pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makineleri (EPB-TBM's)	10
2.1.3 Çamur basınçlı tam cepheli tünel açma makineleri (SPB-TBM's) ..	13
2.1.4 Kollu galeri açma makineleri	14
2.1.5 Darbeli kırıcılar	16
2.1.6 Mikro tünel açma makineleri	17
2.1.7 Sürekli yüzey kazıcıları	17
2.1.8 Sürekli yeraltı kazıcıları	18
2.2 Tünel Açma Makinelerinin Tarihçesi ve Tasarım Parametreleri	18
2.2.1 Tünel açma makinelerinin tarihçesi	18
2.2.2 Tünel açma makinelerinin tasarım parametreleri	23
2.2.2.1 Keskiler arası mesafe ve keski sayısı	23
2.2.2.2 Kesici kafa dönüş hızı (RPM)	24
2.2.2.3 Kesici kafa gücü ve tork gereksinimi	25
2.2.2.4 İtme kuvveti gereksinimi	25
2.3 Tünel Açma Makineleri İçin Geliştirilen Performans Tahmin Modelleri ..	26
2.3.1 Graham yaklaşımı	26
2.3.2 McFeat-Smith ve Tarkoy yaklaşımı	26
2.3.3 Farmer ve Glossop yaklaşımı	27
2.3.4 Cassinelli ve arkadaşları yaklaşımı	27
2.3.5 Bamford yaklaşımı	27
2.3.6 Hughes yaklaşımı	28
2.3.7 Trondheim Üniversitesi ve Norveç Teknoloji Enstitüsü yaklaşımı ..	29
2.3.8 Tony Peach yaklaşımı	29
2.3.9 CSM modeli	29
2.3.10 Nick Barton yaklaşımı	30
2.3.11 Wijk yaklaşımı	31
2.3.12 Saffet yaklaşımı	31
2.3.13 Rostami yaklaşımı	32
2.3.14 Hamidi ve arkadaşları yaklaşımı	32

2.4 Tünel Açma Makinelerinde Kullanılan Keskiler	33
2.4.1 Tungsten karbür butonlu keski	33
2.4.2 Çok sıralı keski	33
2.4.3 Disk keski (V tip, CCS tip)	34
2.5 Kesme Teorileri	36
2.5.1 Uç batma teorileri	36
2.5.2 Disk keski teorileri	52
2.6 Disk Keskilerde Sayısal (nümerik) Modelleme	65
2.7 Arazide TBM Keski Kuvvetlerinin Ölçülmesi	70
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	75
3.1 Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler ..	75
3.1.1 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi	77
3.1.2 Yoğunluk (Doğal birim hacim ağırlığı) tayini	78
3.1.3 Dolaylı (Brazilian) çekme dayanımı deneyi	78
3.1.4 Statik elastisite modülü ve poisson oranı	79
3.1.5 Akustik P ve S dalga hızları deneyi ile dinamik elastisite modülü ve poisson oranının belirlenmesi	80
3.1.6 Nokta yük deneyi	81
3.1.7 Geri tepmeli (Schmidt çekici) çekiç deneyi	82
3.1.8 Shore scleroscope sertlik deneyi	83
3.1.9 Koni delici sertlik deneyi	84
3.1.10 Cerchar aşındırıcılık deneyi	84
3.1.11 Petrografik analiz	85
3.2 Doğrusal Kesme Deneyleri	85
3.2.1 Tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM)	86
3.2.2 Taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM)	90
3.2.3 Disk keski için dinamometrenin kalibrasyonu	92
3.2.3.1 Mini V (130 mm) tip disk keski için PLCM dinamometresinin kalibrasyonu	93
3.2.3.2 13 inç (330 mm) çaplı CCS tip disk keski için LCM dinamometresinin kalibrasyonu	95
3.2.3.3 15 inç (380 mm) çaplı V tip disk keski için LCM dinamometresinin kalibrasyonu	98
3.2.3.4 17 inç çaplı (432 mm) CCS tip disk keski için LCM dinamometresinin kalibrasyonu	101
3.2.4 Deneysel yöntem ve parametrelerin tasarımı	104
3.3 Deneysel Sonuçlar	115
3.3.1 Fiziksel ve mekanik deneylerin sonuçları	115
3.3.2 Kesme deneyi sonuçları	122
3.3.2.1 Arkoz numunesinde yapılan doğrusal kesme deneylerinin sonuçları	122
3.3.2.2 Şeyl numunesinde yapılan doğrusal kesme deneylerinin sonuçları	134
3.3.2.3 Fosilli kireçtaşı numunesinde yapılan doğrusal kesme deneylerinin sonuçları	148
4. DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ VE TARTIŞMA	163
4.1 Keski Çapının Kesme Performansına Etkisi	163
4.1.1 Sabit kesit alanlı disk keski (CCS)	163
4.1.1.1 Arkoz numunesi için CCS tip disk keskiyle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması	164

4.1.1.2 Şeyl numunesi için CCS tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması	167
4.1.1.3 Fosilli kireçtaşı numunesi için CCS tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması	170
4.1.1.4 CCS tip disk keski laboratuvar deneylerinin sonuçları	173
4.1.2 V tip disk keski	176
4.1.2.1 Arkoz numunesi için V tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması	176
4.1.2.2 Şeyl numunesi için V tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması	178
4.1.2.3 Fosilli kireçtaşı numunesi için V tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması	179
4.1.2.4 V tip disk keski için kesme deneylerinin sonuçları	180
4.1.3 Mini V tip disk keski için CCS tip disk keskiye geçiş	184
4.2 Kayaç Tipinin Kesme Performansına Etkisi	189
4.2.1 13 inç CCS tip disk için kayaç tipinin kesme performansına etkisi ..	189
4.2.2 15 inç V tip disk için kayaç tipinin kesme performansına etkisi	191
4.2.3 17 inç CCS tip disk için kayaç tipinin kesme performansına etkisi ..	193
4.2.4 Kayaç tipinin kesme performansına etkisi için elde edilen sonuçlar..	195
4.3 Keski Kuvvetlerinin Teorik Keski Kuvvetleriyle Karşılaştırılması	196
4.3.1 CCS tip disk keski laboratuvar sonuçlarıyla CCS disk kesme teorisinin karşılaştırılması	196
4.3.2 V tip disk keski laboratuvar sonuçlarıyla V tip disk kesme teorisinin karşılaştırılması	200
5. DENEYSEL VE ARAZİ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRMASI	205
5.1 Tam Boyutlu Doğrusal Kazı Seti (LCM) Kesme Deneyleriyle TBM Performans Tahmini	206
5.1.1 Fosilli kireçtaşı için 15 inç V tip disk keski ile performans tahmini	206
5.1.2 Şeyl için 17 inç CCS tip disk keski ile performans tahmini	208
5.2 Taşınabilir Kazı Seti (PLCM) Kesme Deneyleriyle TBM Performans Tahmini	209
5.2.1 Fosilli kireçtaşı için mini V tip disk keski ile performans tahmini	209
5.2.2 Şeyl için mini V tip disk keski ile performans tahmini	210
5.3 TBM Arazi Verileri	211
5.3.1 Fosilli kireçtaşı için Otogar Bağcılar TBM verisi	211
5.3.2 Şeyl için Kadıköy Kartal TBM verisi	212
5.4 Laboratuvar Kesme Verileriyle TBM Arazi Verilerinin Karşılaştırması	214
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	217
KAYNAKLAR	223
EKLER	231
ÖZGEÇMİŞ	319

KISALTMALAR

TBM	: Tam Cepheli Tünel Açma Makinesi
EPB	: Pasa Basınçlı Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri
SPB	: Çamur Basınçlı Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri
LCM	: Tam Boyutlu Doğrusal Kazı Seti
PLCM	: Taşınabilir Doğrusal Kazı Seti
SE	: Spesifik Enerji
RQD	: Kaya Kalite Belirteci
RMR	: Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi
RMCİ	: Kaya Kütlesi Kazılabilirlik İndeksi
CAI	: Cerchar Aşındırıcılık İndeksi
TCR	: Toplam Karot Yüzdesi
CCS	: Sabit Kesit Alanlı Disk Keski
CLI	: Keski Ömrü İndeksi
PİK	: Pasa İrilik Katsayısı
LEFM	: Doğrusal Kırılma Mekanizması
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
ROP	: TBM İlerleme Oranı
AR	: TBM Günlük İlerleme Hızı
U	: Makineden Faydalanma Oranı
DPW	: Kayaç Süreksizlik Ve Frekans Eğrisinden Elde Edilen İndeks Değer
PSI	: Kayaç Kırılgenlik-Frekans Eğrisinden Elde Edilen Pik Eğilim İndeks Değeri
FPI	: TBM Arazi İlerleme İndeksi
ISRM	: Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği
ASTM	: Amerika Malzeme Tecrübeleri Kurumu

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Kazı makinelerinin performansını etkileyen parametreler	7
Çizelge 2.2 : Tam cepheli tünel açma makinelerinin sınıflandırması	9
Çizelge 2.3 : Kollu galeri açma makinelerinin ağırlıklarına göre sınıflandırılması	15
Çizelge 2.4 : Modelde kullanılan malzemelerin özellikleri	67
Çizelge 3.1 : Mini V tip disk keski için 9 derece eğim ile gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarının toplu sonuçları	94
Çizelge 3.2 : 13 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğim ile gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarının toplu sonuçları	95
Çizelge 3.3 : 13 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları	97
Çizelge 3.4 : 15 inç V tip disk keski için 15 derece eğim ile gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarının toplu sonuçları	98
Çizelge 3.5 : 15 inç V tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları	100
Çizelge 3.6 : 13 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğim ile gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarının toplu sonuçları	101
Çizelge 3.7 : 17 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları	103
Çizelge 3.8 : Deneysel parametreler/değişkenler	105
Çizelge 3.9 : Elek serisi ve pasa irilik indeksinin hesaplanması	113
Çizelge 3.10 : Arkoz numunesi için ince kesit analiz sonuçları	116
Çizelge 3.11 : Şeyl numunesi için ince kesit analiz sonuçları	119
Çizelge 3.12 : Fosilli kireçtaşı numunesi için ince kesit analiz sonuçları	121
Çizelge 3.13 : Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri	121
Çizelge 3.14 : 13 inç CCS tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu	123
Çizelge 3.15 : 13 inç CCS tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu	123
Çizelge 3.16 : 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu	126
Çizelge 3.17 : 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu	126
Çizelge 3.18 : 17 inç CCS tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu	129
Çizelge 3.19 : 17 inç CCS tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu	130
Çizelge 3.20 : Arkoz için mini V tip disk kesme sonuçları	133
Çizelge 3.21 : Arkoz için elek analizi sonuçları	134

Çizelge 3.22: 13 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu	135
Çizelge 3.23: 13 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu	135
Çizelge 3.24: 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu	140
Çizelge 3.25: 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu	140
Çizelge 3.26: 17 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu	143
Çizelge 3.27: 17 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu	144
Çizelge 3.28: Şeyl için mini V tip disk kesme sonuçları	147
Çizelge 3.29: Şeyl için elek analizi sonuçları	148
Çizelge 3.30: 13 inç CCS tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu	149
Çizelge 3.31: 13 inç CCS tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu	149
Çizelge 3.32: 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu	153
Çizelge 3.33: 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu	153
Çizelge 3.34: 17 inç CCS tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu	156
Çizelge 3.35: 17 inç CCS tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu	156
Çizelge 3.36: Fosilli kireçtaşı için mini V tip disk kesme sonuçları	161
Çizelge 3.37: Fosilli kireçtaşı için elek analizi sonuçları	162
Çizelge 4.1 : 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keski için normalize edilmiş yardımsız kesme deneylerinin sonuçları (arkoz numunesi)	164
Çizelge 4.2 : 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keski için normalize edilmiş yardımcı kesme deneylerinin sonuçları (arkoz numunesi)	165
Çizelge 4.3 : 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keski için normalize edilmiş yardımsız kesme deneylerinin sonuçları (şeyl numunesi)	167
Çizelge 4.4 : 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keski için normalize edilmiş yardımcı kesme deneylerinin sonuçları (şeyl numunesi)	168
Çizelge 4.5 : 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keski için normalize edilmiş yardımsız kesme deneylerinin sonuçları (fosilli kireçtaşı numunesi)	170
Çizelge 4.6 : 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keski için normalize edilmiş yardımcı kesme deneylerinin sonuçları (fosilli kireçtaşı numunesi)	171
Çizelge 4.7 : Masif ve klastik (arkoz) formasyon için yardımsız kesme koşullarında geçiş katsayısı hesabı	174
Çizelge 4.8 : Tabakalı (şeyl) formasyon için yardımsız kesme koşullarında geçiş katsayısı hesabı	175
Çizelge 4.9 : Fosilli ve (fosilli kireçtaşı) formasyon için yardımsız kesme koşullarında geçiş katsayısı hesabı	175

Çizelge 4.10 : 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımsız kesme deneyleri	177
Çizelge 4.11 : 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımcı kesme deneyleri	177
Çizelge 4.12 : Mini V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	177
Çizelge 4.13 : 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımsız kesme deneyleri	178
Çizelge 4.14 : 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımcı kesme deneyleri	178
Çizelge 4.15: Mini V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	178
Çizelge 4.16 : 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımsız kesme deneyleri	179
Çizelge 4.17 : 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımcı kesmedeneyleri	179
Çizelge 4.18 : Mini V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	179
Çizelge 4.19 : Yardımsız d=5 mm için LCM ve PLCM, V disk karşılaştırmaları özet tablosu	180
Çizelge 4.20 : PLCM’de mini V tip disk keski ile d=5 mm’de elde edilen indeks SE’nin LCM’de 15 inç V tip disk keski ile elde edilen optimum optimum SE ile karşılaştırılması	182
Çizelge 4.21: Yardımsız d=5 mm için LCM 17 inç CCS ve PLCM mini V disk karşılaştırmaları özet tablosu	184
Çizelge 4.22: Yardımsız d=5 mm için LCM 13 inç CCS ve PLCM mini V disk karşılaştırmaları özet tablosu	187
Çizelge 4.23: 13 inç CCS disk keski için laboratuvar ve teorik keski kuvvetleri ..	197
Çizelge 4.24: 17 inç CCS disk keski için laboratuvar ve teorik keski kuvvetleri ...	197
Çizelge 4.25: 15 inç V tip disk keski için laboratuvar ve teorik keski kuvvetleri ...	201
Çizelge 4.26: Mini V tip disk keski için laboratuvar ve teorik keski kuvvetleri	201
Çizelge 5.1 : Otogar-Bağcılar metro hattında kullanılan TBM’in teknik özellikleri	205
Çizelge 5.2 : Kartal Kadıköy metro hattında kullanılan TBM’in teknik özellikleri	206
Çizelge 5.3 : Fosilli kireçtaşı için Otogar-Bağcılar tünel açma makinesi çalışma parametrelerinin toplu verisi	212
Çizelge 5.4 : Şeyl için Kadıköy Kartal tünel açma makinesi çalışma parametrelerinin toplu verisi	213
Çizelge 5.5 : Laboratuvar kesme deneyleri ve TBM arazi verilerinin karşılaştırması	214
Çizelge A.1 : 13 inç CCS disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	232
Çizelge A.2 : 13 inç CCS disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri	233
Çizelge A.3 : 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	234
Çizelge A.4 : 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri	235

Çizelge A.5 : 17 inç CCS disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	236
Çizelge A.6 : 17 inç CCS disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri	237
Çizelge A.7 : 13 inç CCS disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	238
Çizelge A.8 : 13 inç CCS disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri	239
Çizelge A.9 : 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	240
Çizelge A.10: 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri	241
Çizelge A.11: 17 inç CCS disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	242
Çizelge A.12: 17 inç CCS disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri	243
Çizelge A.13: 13 inç CCS disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	244
Çizelge A.14: 13 inç CCS disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri	245
Çizelge A.15: 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	246
Çizelge A.16: 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri	247
Çizelge A.17: 17 inç CCS disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri	248
Çizelge A.18: 17 inç CCS disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri	249
Çizelge B.1 : Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=3mm)	251
Çizelge B.2 : Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	252
Çizelge B.3 : Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	253
Çizelge B.4 : Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=3mm)	254
Çizelge B.5 : Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=5mm)	255
Çizelge B.6 : Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=7mm)	256
Çizelge B.7 : Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm)	257
Çizelge B.8 : Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm)	258
Çizelge B.9 : Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=3mm) ..	259
Çizelge B.10 : Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=5mm) ...	260
Çizelge B.11 : Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7mm) ...	261
Çizelge B.12 : Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=3mm) ...	262
Çizelge B.13 : Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=5mm) ...	263
Çizelge B.14 : Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=7mm) ...	264

Çizelge B.15 : Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=9mm)	265
Çizelge B.16 : Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=3mm)	266
Çizelge B.17 : Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	267
Çizelge B.18 : Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	268
Çizelge B.19 : Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm)	269
Çizelge B.20 : Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=3mm)	270
Çizelge B.21: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm)	271
Çizelge B.22: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm)	272
Çizelge B.23: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=9mm)	273
Çizelge B.24: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	274
Çizelge B.25: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	275
Çizelge B.26: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm)	276
Çizelge B.27: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=4mm)	277
Çizelge B.28: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=6mm)	278
Çizelge B.29: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=8mm)	279
Çizelge B.30: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=5mm) ..	280
Çizelge B.31: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=7mm) ...	281
Çizelge B.32: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=9mm) ...	282
Çizelge B.33: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=5mm)	283
Çizelge B.34: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7mm)	284
Çizelge B.35: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=9mm)	285
Çizelge B.36: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=5mm)	286
Çizelge B.37: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=7mm)	287
Çizelge B.38: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=9mm)	288
Çizelge B.39: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm) ..	289
Çizelge B.40: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm) ..	290
Çizelge B.41: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm) ..	291
Çizelge B.42: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm)	292
Çizelge B.43: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm)	293
Çizelge B.44: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=9mm)	294
Çizelge B.45: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	295
Çizelge B.46: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	296
Çizelge B.47: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm)	297
Çizelge B.48: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=5mm)	298

Çizelge B.49: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=7mm)	299
Çizelge B.50: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=9mm)	300
Çizelge B.51: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=5mm)	301
Çizelge B.52: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski yardımsız d=7,5mm)	302
Çizelge B.53: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=10mm)	303
Çizelge B.54: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=12mm)	304
Çizelge B.55: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=5mm)	305
Çizelge B.56: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=7,5mm)	306
Çizelge B.57: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=10mm)	307
Çizelge B.58: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=12mm)	308
Çizelge B.59: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=15mm)	309
Çizelge B.60: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	310
Çizelge B.61: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	311
Çizelge B.62: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm)	312
Çizelge B.63: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=5mm)	313
Çizelge B.64: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=7mm)	314
Çizelge B.65: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=9mm)	315
Çizelge B.66: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=7mm)	316
Çizelge B.67: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=9mm)	317
Çizelge B.68: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=12mm)	318

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Spesifik enerji-parça boyutu arasındaki ilişki	5
Şekil 2.2 : Tünel uzunluğuna bağlı olarak kazı maliyetinin değişimi	6
Şekil 2.3 : Tam cepheli tünel açma makinesi (Robbins)	8
Şekil 2.4 : Kaya formasyon kazısı yapan tam cepheli tünel açma makinesi ve yedekleme sistemleri (Herrenknecht)	8
Şekil 2.5 : Pasa basınçlı tünel açma makinesi kesit görünümü (Herrenknecht).....	12
Şekil 2.6 : Çamur basınçlı tünel açma makinesi kesit görünümü (Herrenknecht)	13
Şekil 2.7 : Kollu galeri açma makinesi ve üniteleri	14
Şekil 2.8 : Darbeli kırıcı	16
Şekil 2.9 : Mikro tünel açma makinesinin kazı sistemi ve şematik görünümü	17
Şekil 2.10: Sürekli yüzey kazıcının ana parçaları	18
Şekil 2.11: Tamrock marka sürekli yeraltı kazıcısı	18
Şekil 2.12: Tam boyutlu kazı makinesi (1881 model)	19
Şekil 2.13: Sert kaya formasyonları için ilk başarılı TBM, 1956 model 131-106	20
Şekil 2.14: Sert kaya tünel açma makinesi ve üniteleri	21
Şekil 2.15: Tünel aynasından bant konveyöre kadar olan pasa naklinin görünümü	22
Şekil 2.16: Tek kalkanlı (şiltli) TBM	22
Şekil 2.17: Çift kalkanlı (şiltli) TBM	23
Şekil 2.18: Koni delici sertliği ile nokta yük dayanımına bağlı TBM performansı.....	26
Şekil 2.19: Tony Peach'e göre performans kestirimi	29
Şekil 2.20: Tam yüzeyli tungsten karbür butonlu döner keski	33
Şekil 2.21: (A)Çok sıralı tungsten karbür butonlu keski, (B)Çok sıralı disk keski	34
Şekil 2.22: Tek diskli keski	34
Şekil 2.23: Disk keskilerde ring profili: (a) V-tip, (b) CCS tip	35
Şekil 2.24: Farklı çaplardaki ring boyutları	35
Şekil 2.25: Kama keskilerde basitleştirilmiş kuvvet sistemi	37
Şekil 2.26: Kama keski altında kaya çatlak serisi ve kırılma formu	37
Şekil 2.27: Birincil eğim açıları	38
Şekil 2.28: Eğim açıları ve ana gerilim eğrileri	38
Şekil 2.29: Kesme gerilmesi eğrileri	39
Şekil 2.30: Keski altında üç boyuttaki stres eğrileri	40
Şekil 2.31: Pürüzsüz bir keski için kayma çizgileri alanı	41
Şekil 2.32: Pürüzlü bir keski için kayma çizgileri alanı	41

Şekil 2.33: Körelmiş bir keski için kayma çizgileri alanı	41
Şekil 2.34: Mohr – Coulomb eğrisi	42
Şekil 2.35: Keski ve kaya arasında sürtünme ile oluşan kayma hat alanları	42
Şekil 2.36: Reichmuth teorisi	45
Şekil 2.37: Kama uç altında oluşan çatlaklar	45
Şekil 2.38: Kama uç için fiziksel model	46
Şekil 2.39: Kama ucun matematiksel idealizasyonu	47
Şekil 2.40: Kuvvet ve kesme derinliği etkileşiminin grafiksel gösterimi	47
Şekil 2.41: Kuvvet-yer değiştirme diyagramı (a) ve birincil eğim (b)	49
Şekil 2.42: Lindqvist yaklaşımı	49
Şekil 2.43: Boşluk genişleme modeli	52
Şekil 2.44: Disk keski altındaki kırılma zonu	53
Şekil 2.45: Disk keski ile kaya kesme	53
Şekil 2.46: Disk keskiye gelen kuvvetlerin şematik gösterimi	54
Şekil 2.47: Disk ilerlemesinin geometrisi	55
Şekil 2.48: Disk keski ile kaya kesme	57
Şekil 2.49: Kaya ile disk için kontak alanı	58
Şekil 2.50: Spesifik enerji ile s/d oranının değişimi	59
Şekil 2.51: Sanio tarafından geliştirilen disk batma ve çip oluşumunun şematik gösterimi	60
Şekil 2.52: Dairesel boşlukta çatlak ilerlemesi	60
Şekil 2.53: Sanio'nun disk keski geometrisi	62
Şekil 2.54: Disk keski ile oluşan kuvvet dengesi	62
Şekil 2.55: Disk keski çevresi boyunca basınç dağılımı	65
Şekil 2.56: Diana modelindeki sonlu eleman ağları	66
Şekil 2.57: Disk keski altındaki kırılma zonu	66
Şekil 2.58: Çatlak ucundaki gerilmeler	68
Şekil 2.59: Disk keski için sayısal modelleme	68
Şekil 2.60: (a) Sünek ve (b) Kırılgan formda kaya kesme	69
Şekil 2.61: Kesici kafaya yerleştirilen dinamometrelerin konumları	73
Şekil 2.62: 12 ve 19 numaralı keski yapılındırılması	73
Şekil 3.1 : Blok numune kesme ve boyut küçültme makinesi	76
Şekil 3.2 : Karot alma makinesi	76
Şekil 3.3 : Karot numunelerin alt ve üst yüzeylerini düzeltme makinesi	77
Şekil 3.4 : Tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, statik elastisite ve poisson oranı tayini için kullanılan pres	78
Şekil 3.5 : Akustik P ve S dalga hızları tayini deney cihazı	81
Şekil 3.6 : Nokta yük deney aleti	82
Şekil 3.7 : Schmidt çekici deney aleti	83
Şekil 3.8 : Shore sclerscope (C-2 tip) deney aleti	83
Şekil 3.9 : Koni delici deney aleti	84
Şekil 3.10: Cerchar aşındırıcılık deney aleti	85
Şekil 3.11: Tam boyutlu kazı setinin genel görünümü	87
Şekil 3.12: Tam boyutlu kazı setinin şematik görünümü	87
Şekil 3.13: Disk keskiye etki eden kuvvetler ve tasarım parametreleri	88
Şekil 3.14: Kesme deneyi sonucunda ölçülen kuvvetler	89
Şekil 3.15: Taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM)	91
Şekil 3.16: Mini disk keski	92
Şekil 3.17: PLCM veri toplama sisteminin görünümü	92

Şekil 3.18: Hidrolik piston ile yapılan kalibrasyon çalışmaları (Mini V tip disk, 9 derece eğim ile yükleme)	93
Şekil 3.19: Mini V tip disk keski için kalibrasyon verilerine tipik bir örnek	94
Şekil 3.20: 13 inç CCS tip disk keski için kalibrasyon verilerine tipik bir örnek .	96
Şekil 3.21: Hidrolik piston ile yapılan kalibrasyon çalışmaları (13 inç CCS tip disk, 15 derece eğim ile yükleme)	96
Şekil 3.22: 13 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile kalibrasyon	97
Şekil 3.23: 15 inç V tip disk keski için kalibrasyon verilerine tipik bir örnek	99
Şekil 3.24: Hidrolik piston ile yapılan kalibrasyon çalışmaları (15 inç V tip disk, 15 derece eğim ile yükleme)	99
Şekil 3.25: 15 inç V tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile kalibrasyon	100
Şekil 3.26: 17 inç CCS tip disk keski için kalibrasyon verilerine tipik bir örnek .	102
Şekil 3.27: Hidrolik piston ile yapılan kalibrasyon çalışmaları (17 inç CCS tip disk, 15 derece eğim ile yükleme)	102
Şekil 3.28: 17 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile kalibrasyon	103
Şekil 3.29: Deneysel parametreler	105
Şekil 3.30: Deneysel yöntem şeması	106
Şekil 3.31: 13 inç CCS tip disk keski	107
Şekil 3.32: 15 inç V tip disk keski	108
Şekil 3.33: 17 inç CCS tip disk keski	108
Şekil 3.34: Mini V tip disk keski	109
Şekil 3.35: Kaya kesme deneylerinde yardımsız kesme	109
Şekil 3.36: Kaya kesme deneylerinde yardımcı kesme	110
Şekil 3.37: Keskiler arası mesafe ve kesme derinliğinin spesifik enerjiye etkisi	110
Şekil 3.38: Disk keskiye gelen kuvvetler	111
Şekil 3.39: Elek analizlerinde kullanılan titreşimli elek	112
Şekil 3.40: Numunenin hazırlanması ve betonlama işlemi	113
Şekil 3.41: Tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) için hazırlanmış örnek numune	114
Şekil 3.42: Taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM) için hazırlanmış örnek numune	114
Şekil 3.43: Arkoz numunesinin temsili görünümü	116
Şekil 3.44: Arkoz numunesi ince kesit fotoğrafı	117
Şekil 3.45: Şeyl numunesinin temsili görünümü	118
Şekil 3.46: Şeyl numunesi ince kesit fotoğrafı	118
Şekil 3.47: Fosilli kireçtaşı blok numunesini aldığı İkitelli-Sanayi istasyonu	120
Şekil 3.48: Fosilli kireçtaşı numunesi ince kesit fotoğrafı	120
Şekil 3.49: Arkoz numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi	123
Şekil 3.50: Arkoz numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	124
Şekil 3.51: Arkoz numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.....	124
Şekil 3.52: Arkoz numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski arası mesafe/ kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.....	125

Şekil 3.53: Arkoz numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	125
Şekil 3.54: Arkoz numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi	127
Şekil 3.55: Arkoz numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	127
Şekil 3.56: Arkoz numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için keski kesme arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi	128
Şekil 3.57: Arkoz numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için keski kesme arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi	128
Şekil 3.58: Arkoz numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	129
Şekil 3.59: Arkoz numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi	130
Şekil 3.60: Arkoz numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	131
Şekil 3.61: Arkoz numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski kesme arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi	131
Şekil 3.62: Arkoz numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski kesme arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi	132
Şekil 3.63: Arkoz numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	132
Şekil 3.64: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi	136
Şekil 3.65: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	136
Şekil 3.66: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski kesme arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi	137
Şekil 3.67: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski kesme arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi	137
Şekil 3.68: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	138
Şekil 3.69: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski kesme arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi	138
Şekil 3.70: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski kesme arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi	139
Şekil 3.71: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile kesme kuvvetleri ilişkisi	139
Şekil 3.72: Şeyl numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi	141
Şekil 3.73: Şeyl numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	141
Şekil 3.74: Şeyl numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için keski kesme arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi	142
Şekil 3.75: Şeyl numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için keski kesme arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi	142
Şekil 3.76: Şeyl numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği keski kuvvetleri ilişkisi	143

Şekil 3.77: Şeyl numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi	144
Şekil 3.78: Şeyl numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile kesme kuvvetleri ilişkisi	145
Şekil 3.79: Şeyl numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi	145
Şekil 3.80: Şeyl numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi	146
Şekil 3.81: Şeyl numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	146
Şekil 3.82: Fosilli kireçtaşı numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi	150
Şekil 3.83: Fosilli kireçtaşı numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	150
Şekil 3.84: Fosilli kireçtaşı numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi	151
Şekil 3.85: Fosilli kireçtaşı numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi	151
Şekil 3.86: Fosilli kireçtaşı numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	152
Şekil 3.87: Fosilli kireçtaşı numunesi, 15 inç V tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi	153
Şekil 3.88: Fosilli kireçtaşı numunesi, 15 inç V tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	154
Şekil 3.89: Fosilli kireçtaşı numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi	154
Şekil 3.90: Fosilli kireçtaşı numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi	155
Şekil 3.91: Fosilli kireçtaşı numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	155
Şekil 3.92: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi	157
Şekil 3.93: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	157
Şekil 3.94: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi	158
Şekil 3.95: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi	158
Şekil 3.96: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	159
Şekil 3.97: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi	159

Şekil 3.98: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi	160
Şekil 3.99 : Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi	160
Şekil 4.1 : Arkoz numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi	165
Şekil 4.2 : Arkoz numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi	166
Şekil 4.3 : Arkoz numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi	166
Şekil 4.4 : Arkoz numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen optimum keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi	167
Şekil 4.5 : Şeyl numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi	168
Şekil 4.6 : Şeyl numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi	169
Şekil 4.7 : Şeyl numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi	169
Şekil 4.8 : Şeyl numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen optimum keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi	170
Şekil 4.9 : Fosilli kireçtaşı numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi	171
Şekil 4.10 : Fosilli kireçtaşı numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi	172
Şekil 4.11 : Fosilli kireçtaşı numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi	172
Şekil 4.12 : Fosilli kireçtaşı numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen optimum keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi	173
Şekil 4.13 : 15 inç V tip disk keski ile mini V tip disk keski, normal kuvvet (FN) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme)	181
Şekil 4.14 : 15 inç V tip disk keski ile mini V tip disk keski, yuvarlanma kuvveti (FR) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme)	181
Şekil 4.15 : 15 inç V tip disk keski ile mini V tip disk keski, spesifik enerji (SE) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme)	182
Şekil 4.16 : Üç kayaç numunesi için PLCM d=5 mm SE indeks ile LCM 15 inç V tip disk keski SE opt arasındaki ilişki	183
Şekil 4.17 : Mini V tip disk keski ile 17 inç CCS disk keski, normal kuvvet (FN) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme)	185
Şekil 4.18 : Mini V tip disk keski ile 17 inç CCS disk keski, yuvarlanma kuvveti (FR) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme)	185
Şekil 4.19 : Mini V tip disk keski ile 17 inç CCS disk keski, spesifik enerji (SE) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme)	186

Şekil 4.20 : Mini V tip disk keski ile 13 inç CCS disk keski, normal kuvvet (FN) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme)	187
Şekil 4.21 : Mini V tip disk keski ile 13 inç CCS disk keski, yuvarlanma kuvvet (FR) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme)	188
Şekil 4.22 : Mini V tip disk keski ile 13 inç CCS disk keski, spesifik enerji (SE) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme)	188
Şekil 4.23 : 13 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin normal kuvvete (FN) etkisi	189
Şekil 4.24 : 13 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin yuvarlanma kuvvetine (FR) etkisi	190
Şekil 4.25 : 13 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin spesifik enerjiye (SE) etkisi	190
Şekil 4.26 : 15 inç V tip disk keski için kayaç tipinin normal kuvvete (FN) etkisi	191
Şekil 4.27 : 15 inç V tip disk keski için kayaç tipinin yuvarlanma kuvvetine (FR) etkisi	192
Şekil 4.28 : 15 inç V tip disk keski için kayaç tipinin spesifik enerjiye (SE) etkisi	192
Şekil 4.29 : 17 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin normal kuvvete (FN) etkisi	193
Şekil 4.30 : 17 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin yuvarlanma kuvvetine (FN) etkisi	194
Şekil 4.31 : 17 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin spesifik enerjiye (SE) etkisi	194
Şekil 4.32 : 13 inç CCS disk keski için laboratuvar FN ile teorik FN karşılaştırması	198
Şekil 4.33 : 13 inç CCS disk keski için laboratuvar FR ile teorik FR karşılaştırması	198
Şekil 4.34 : 17 inç CCS disk keski için laboratuvar FN ile teorik FN karşılaştırması	199
Şekil 4.35 : 17 inç CCS disk keski için laboratuvar FR ile teorik FR karşılaştırması	199
Şekil 4.36 : 15 inç V tip disk keski için laboratuvar FR ile teorik FR karşılaştırması	202
Şekil 4.37 : 15 inç V tip disk keski için laboratuvar FN ile teorik FN karşılaştırması	202
Şekil 4.38 : Mini V tip disk keski laboratuvar FR ile teorik FR karşılaştırması	203
Şekil 4.39 : Mini V tip disk keski laboratuvar FN ile teorik FN karşılaştırması	203
Şekil B.1 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=3mm)	251
Şekil B.2 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	252
Şekil B.3 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	253
Şekil B.4 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=3mm)	254
Şekil B.5 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=5mm)	255

Şekil B.6 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=7mm)	256
Şekil B.7 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm)	257
Şekil B.8 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm)	258
Şekil B.9 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=3mm)	259
Şekil B.10 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=5mm)	260
Şekil B.11 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7mm)	261
Şekil B.12 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=3mm)	262
Şekil B.13 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=5mm)	263
Şekil B.14 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=7mm)	264
Şekil B.15 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=9mm)	265
Şekil B.16 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=3mm)	266
Şekil B.17 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	267
Şekil B.18 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	268
Şekil B.19 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm)	269
Şekil B.20 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=3mm)	207
Şekil B.21 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm)	271
Şekil B.22 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm)	272
Şekil B.23 : Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=9mm)	273
Şekil B.24 : Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	274
Şekil B.25 : Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	275
Şekil B.26 : Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm)	276
Şekil B.27 : Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=4mm)	277
Şekil B.28 : Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=6mm)	278
Şekil B.29 : Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=8mm)	279
Şekil B.30 : Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=5mm)	280

Şekil B.31: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=7mm)	281
Şekil B.32: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=9mm)	282
Şekil B.33: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=5mm)	283
Şekil B.34: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7mm)	284
Şekil B.35: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=9mm)	285
Şekil B.36: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=5mm)	286
Şekil B.37: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=7mm)	287
Şekil B.38: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=9mm)	288
Şekil B.39: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	289
Şekil B.40: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	290
Şekil B.41: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm)	291
Şekil B.42: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm)	292
Şekil B.43: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm)	293
Şekil B.44: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=9mm)	294
Şekil B.45: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	295
Şekil B.46: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	296
Şekil B.47: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm)	297
Şekil B.48: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=5mm)	298
Şekil B.49: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=7mm)	299
Şekil B.50: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=9mm)	300
Şekil B.51: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=5mm)	301
Şekil B.52: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7,5mm)	302
Şekil B.53: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=10mm)	303
Şekil B.54: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=12mm)	304
Şekil B.55: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=5mm)	305

Şekil B.56: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=7,5mm)	306
Şekil B.57: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=10mm)	307
Şekil B.58: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=12mm)	308
Şekil B.59: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=15mm)	309
Şekil B.60: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm)	310
Şekil B.61: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm)	311
Şekil B.62: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm)	312
Şekil B.63: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=5mm)	313
Şekil B.64: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=7mm)	314
Şekil B.65: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=9mm)	315
Şekil B.66: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=7mm)	316
Şekil B.67: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=9mm)	317
Şekil B.68: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=12mm)	318

SEMBOL LİSTESİ

E_{sta}	: Statik Elastisite Modülü
E_{dyn}	: Dinamik Elastisite Modülü
ν_{sta}	: Statik Poission Oranı
ν_{dyn}	: Dinamik Poission Oranı
V_s	: S Dalgasının Yayılma Hızı
V_p	: P Dalgasının Yayılma Hızı
FC	: Kesme Kuvveti
FN	: Disk Keskiye Gelen Dikey Kuvvetlerin Ortalaması
$F'N$	: Disk Keskiye Gelen Maksimum Normal Kuvvetlerin Ortalaması
FR	: Disk Keskiye Gelen Yuvarlanma Kuvvetlerinin Ortalaması
$F'R$	: Disk Keskiye Gelen Maksimum Yuvarlanma Kuvvetlerin Ortalaması
FT	: Toplam İtme Kuvveti
γ	: Yoğunluk (Doğal Birim Hacim Ağırlık)
k	: Kesici Kafa Gücünün Aynaya İletilme Oranı
N_c	: Kesici Kafadaki Disk Keski Adedi
$N_{köşe}$	: Kesici Kafadaki Köşe Keski Sayısı
N_{eff}	: Efektif Keski Sayısı
N_t	: Toplam Keski Sayısı
V	: Seçilen Disk Çapına Göre Kabul Edilebilir Disk Keski Hızı
D_{TBM}	: Kesici Kafanın Çapı
f_L	: Sürtünme Kayıpları
P	: Kesici Kafa Gücü
Q	: Birim Kazı Mesafesinde Açığa Çıkan Pasa Hacmi
R	: Disk Keski Yarıçapı
RPM	: Kesici Kafanın Dakikadaki Devir Sayısı
SE	: Spesifik Enerji
SE_{opt}	: Optimum Spesifik Enerji
$UCS (\sigma_c)$	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı
$BTS (\sigma_t)$	: Brazilian Çekme Dayanımı
τ	: Kayacın Kesme Dayanımı
T	: Tork
D	: Disk Keski Çapı
d	: Kesme Derinliği
s	: Optimum Keskiler Arası Mesafe
s/d	: Keskiler Arası Mesafe/Kesme Derinliği
w	: Keski Genişliği
Ψ	: Kırılma Çatlağı İle Yüzey Arasındaki Açık
λ	: İçsel Sürtünme Açısı
θ	: Keski Tepe Açısı / 2
Φ_s	: Kayaç İle Keski Arasındaki Sürtünme Açısı
Φ	: Keski Uç Açısı

W_z	: Yük Deformasyon Eğrisi Altında Kalan Alan
K_d	: Keski apı İçin Düzeltme Faktörü
K_s	: Çatlak Sıklığı İçin Düzeltme Faktörü
P_b	: Ezilme Zonu Basıncı
θ	: Kutupsal Koordinatlar
F₁	: Pürüzsüz Keski İçin Gereken Kuvvet
F₂	: Pürüzlü Keski İçin Gereken Kuvvet
F₂	: Körelmiş Dairesel Uçlu Bir Keski İçin Gereken Kuvvet
σ₀	: Kayacın Sınırlanmamış Tek Eksenli Basıncı Dayanımı
ψ	: CCS Tip Keskiler İçin Katsayı
β	: Keski Uç Açısı
φ	: Kayacın İçsel Sürtünme Açısı
μ_B	: Keski Aşınma Katsayısı
a	: Punch Yarıçapı
F_{sw}	: Kama Keski İçin Normal Kuvvet
F_{sc}	: Konik Keski İçin Normal Kuvvet
ξ*	: Elasto-Plastik Sınır Yarıçapı
G	: Tünel Açma Makinesinin Toplam İtme Gücü

DEĞİŞİK KAYAÇ VE DİSK KESKİLERİN KAYAÇ KAZILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Tam cepheli tünel açma makinelerinin (TBM) günümüzde kullanımları maden ve inşaat sektöründe hızla artmaktadır. Bu makinelerin kullanılabilirlikleri jeoloji ve formasyonların özellikleri ile sınırlanmaktadır. TBM'lerin seçim kriterleri, tünel açma işlemleri için hayati önem taşımaktadır. Eğer uygun kazı makinesi seçilmezse, günlük ilerleme miktarı dramatik olarak düşer ve tünelcilik faaliyetleri etkilenir. Makine seçiminde yapılacak hata projenin bitim süresinin uzamasına ve maddi kayıplara yol açabilir. Bu yüzden makine seçimi ve performans tahmini, proje başlamadan önce yapılmalıdır. Tam boyutlu doğrusal kazı seti ve Trondheim Üniversitesinin geliştirdiği tam cepheli tünel açma makineleri performans modeli uluslararası alanda kabul görmüştür.

Bu çalışmada, Kurtköy Formasyonunu temsilen arkoz, Gözdağ Formasyonunu temsilen şeyl ve Kırklareli Formasyonunu temsilen fosilli kireçtaşı numuneleri kullanılmıştır. Bu kayaçların fiziksel ve mekanik testleri uluslararası standartlara uygun olarak (ISRM, ASTM) yapılmıştır. Fiziksel ve mekanik özellikleri belirlemeye yönelik olarak, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, Shore scleroscope sertliği, Schmidt çekici sertliği, statik elastisite modülü, akustik deneyler (dinamik elastisite modülü ve Poisson oranı), Cerchar aşındırıcılık deneyleri ve ince kesitlerin petrografik analizleri yapılmıştır. Bu üç kayaç numunesi üzerinde tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM) ile kesme deneyleri yapılmıştır. Farklı kesme derinliği ve keski arası mesafede tam boyutlu doğrusal kaya kesme deneyleri; 13 inç (330 mm), 17 inç (432 mm) CCS tip ve 15 inç (380 mm) V tip disk keski kullanılarak yapılmıştır. Kesme derinliği (d) 5 mm'de taşınabilir doğrusal kazı seti deneyleri; mini V (130 mm) tip disk keski ile yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri; itme kuvveti, yuvarlanma kuvveti ve spesifik enerji her bir kesme deneyi için hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler tünel açma makinesinin tasarım ve performans tahmininde, tork, itme gücü ve kazı hızının tespitinde kullanılmıştır.

Disk keski çapının ve değişik kayaç özelliklerinin kesme performansı üzerine etkisi araştırılmış ve elde edilen bulgular İstanbul'da kullanılan tam cepheli tünel açma makinelerinin arazi verileriyle irdelenmiştir. Disk keski çapının kesme performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Araştırmalar sonucunda, disk keski çapından keski kuvvetleri ve spesifik enerji değerlerine bir "k" katsayı ile geçiş yapılabileceği anlaşılmıştır. Ayrıca, kayaç tipinin kesme performansına olan etkisi detaylıca araştırılmıştır. Kayaç yapısal özelliklerinin kesme performansını doğrudan etkilediği belirlenmiştir.

Tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) yapılan kesme deneyleri sonucunda bir veri tabanı oluşturulmuş ve taşınabilir doğrusal kazı setinin (PLCM) performans tahmini için kullanılabilirliği irdelenmiştir. Yapılan bu çalışmalar, taşınabilir doğrusal kazı setinin mekanize kazı makinelerinin seçiminde ve performans tahmininde belirli bir istatistiksel doğrulukla kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Geliştirilen modellerin güvenilirliği ve daha geniş bir aralıkta sonuç verebilmesi için gelecekteki çalışmalarda farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip kayalarla deneyler yapılmalıdır ve kazı makinelerinin yerinde performansları ile ilişkilendirilmelidir.

INVESTIGATION INTO THE EFFECT OF DIFFERENT ROCKS AND DISC CUTTERS ON ROCK CUTTABILITY

SUMMARY

Usage of full face tunnel boring machines (TBM's) for mining and civil project are increasing enormously. The applications of these machines are limited due to the geology and geotechnical properties of the geological formations. The selection criteria of TBM's are vital for tunnelling activities. If the selected machine is not proper for the formations, daily advance rates which effect the whole tunnelling activities decrease dramatically. Selection of correct mechanized excavator for a given rock formation is very important for the success of the project. A great care must be taken for machine selection and performance prediction in the project design phase. Full scale linear rock cutting test and University of Trondheim performance prediction model are widely accepted on the international tunnelling society for the performance prediction of the full face tunnel boring machines.

In this study, the intact rock samples are obtained from Kurtkoy Formation (arcose), Gozdag Formation (shale) and Kirklareli Formation (fossilized sandy limestone) along the tunnel lines. The physical and mechanical properties of the rock samples are determined according to ISRM and ASTM standards. Physical and mechanical property tests include uniaxial compressive strength, tensile strength, Shore scleroscope hardness, Schmidt hammer rebound values, static elasticity modulus, acoustic velocity test (dynamic elasticity modulus, Poisson's ratio), Cerchar abrasivity index and petrographical analysis. Full scale linear rock cutting tests (LCM) and portable linear rock cutting tests (PLCM) are carried out on three different rock samples. The big rock samples are subjected to full scale linear rock cutting tests with different depth of cut and cutter spacing values using 13" (330 mm), 17" (432 mm) CCS and 15" (380 mm) V type disc cutters. And also, these rock samples are subjected to portable linear rock cutting tests using mini V (130 mm) type disc cutter in 5 mm depth of cut. Cutter forces, i.e., thrust forces, rolling forces and specific energy values are recorded for each cut. The results of the tests are used to calculate tunnel boring machine design and performance parameters such as torque and thrust requirements and cutting rates.

Effects of the different disc cutter diameter and rock types on rock cutting performance are investigated and these laboratory disc cutting results have compared with in-situ performance of full face tunnel boring machines used for tunnelling projects in Istanbul in different rock types. The important effect of the disc cutter diameter on rock cutting performance is determined. Disc forces and specific energy have been shown to vary by the square root of the ratio of cutter diameters. In this study, as a result of the research on disc diameter, decided to use a coefficient (k) between disc diameter, disc forces and specific energy.

Furthermore, the effect of the rock types on cutting performance is investigated in detailed and to determined that structured properties of rock are directly effect to rock cutting performance.

To understand the usage of portable linear cutting rig (PLCM) for performance prediction, a lot of rock cutting tests are carried out using full scale linear cutting test (LCM) and portable linear cutting test (PLCM). These studies indicated that portable linear cutting test can be used with a statistical reliability for selection of mechanical miners and prediction of their performance.

Developed models for rock cutting needs further development for better and more precise results. For further studies more rocks with different physical and mechanical properties must be utilized for cutting to extend the data set.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Tam cepheli tnel açma makineleri madencilik ve inşaat sektöründe geniş kullanımı alanı bulmuş bir kazı makinesidir. Madencilik sektöründe, cevhere ulaşmak için ana galerilerin açılması ve kazı maliyetlerinin azaltılabilmesi için kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe ise kara ve demiryolu tünelleri, metro, hidroelektrik, kanalizasyon, su ve diğeri altyapı tünel hizmetlerinin hızlı ve emniyetli bir şekilde aılmasında kullanılmaktadır. Mekanize olarak yapılan kazılar ilk olarak yeraltı ocaklarında kömür üretimi ile başlamış ve gelişimi hız kazanmıştır.

On dokuzuncu yüzyılın başlarında, malzeme bilimi alanındaki gelişmeler, özellikle yeni darbeli delicilerin ve kömür kazı makinelerinin yapılmasına neden olmuş ve bugünkü modern kazı makinelerinin tasarım temelleri atılmıştır. İnşaat sektöründeki ilk modern gelişme; 1881 yılında, Albay Beaumont tarafından geliştirilen 2,14 m çapındaki tam cepheli bir tünel açma makinesi ile başlamıştır [1]. On dokuzuncu yüzyılın ortalarında, kazı bilimindeki gelişmeler ile birlikte mekanize kazı yöntemleri madencilik ve inşaat sektörlerinde önemli bir yere sahip olmuştur. Tam cepheli tünel açma makinelerinin kullanımı daha çok inşaat sektöründe kendini göstermiştir. Özellikle kara ve demiryolu tünelleri, metrolar, kanalizasyon tünelleri gibi birçok alanda uygulama alanı bulmuş ve özellikle şehirleşmiş yerlerde klasik yöntem olan delme-patlatma yönteminin yerini almaya başlamıştır.

Günümüzde, gelişmekte olan ülkelerde, şehirleşmenin ve nüfus yoğunluğının giderek arttığı ve buna bağlı olarak da altyapı gereksiniminin son derece önem kazandığı bilinmektedir. Yeraltı yapılarının inşası çevreye en az rahatsızlık ve yerüstü yapıları ile topografyaya minimum derecede hasar verecek şekilde yapılmalıdır. Bütün bu gereksinimleri karşılamak için yeraltı yapılarının inşasında tünel açma makinelerinin kullanımı giderek artmaktadır. Tünellerin açılması sırasında, çevreye ve yerüstündeki yapılara zarar vermemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi son derece önemlidir. Her ne kadar ilk yatırım maliyetleri yüksek olsa da tam cepheli tünel açma makineleri tasman gibi istenilmeyen arazi deformasyonlarını nleme kabiliyeti, daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışması

nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir. Bununla beraber yeraltı formasyonlarındaki çeşitlilik, bu makinelerin prensipte aynı fakat ayrıntıda çeşitli yönlerden farklı olmasını gerektirmiştir. Sert, orta sert, yumuşak ve akıcı formasyonlar için kullanılacak kafa dizaynları ve keski tipleri, arazi basıncını dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri çeşitli yönlerden farklılıklar göstermektedir. Sonuçta açılacak yeraltı boşluğu boyunca geçilecek formasyonun önceden tespiti, kullanılacak makinenin seçiminde en önemli faktörlerden biri olmuştur.

Tünel açma projelerinde uygun kazı makinesi seçimi; kazı verimliliği, hızı ve maliyeti açısından önemlidir. Makinenin, tünel açılacak formasyonların özelliklerine göre seçilmeme durumunda, makinenin tünelden çıkarıldığı veya makine performansının çok düşük olmasından dolayı, yüklenici firma ile işveren arasında hukuki sorunların yaşandığı durumlara rastlanmaktadır.

Bugüne kadar kayaç özellikleri kullanılarak makine performansının tahmini için bir çok model geliştirilmiştir. Fakat, kayaç kazılabilirliğinin en gerçekçi tahmini, laboratuvar kesme deneyleri ile yapılabilmektedir. Günümüzde uluslararası alanda kabul görmüş deney setleri, tam boyutlu doğrusal kazı seti ve küçük boyutlu doğrusal kazı setidir. Laboratuvar kesme deneylerinde metodoloji, kayacı özellikleri bilinen keski veya gerçek bir keski ile belirli kesme profilleri (kesme derinliği, keski arası mesafe) yaratacak şekilde kesmek ve bu esnada kesimde oluşan kuvvetleri dinamometre ile ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Bu deneylerle, elde edilen kesme kuvvetleri ve kesme hattı boyunca çıkan pasa hacmi ile birim hacimdeki kayayı kesmek için harcanan enerji (spesifik enerji) bulunur. Kesme kuvvetleri ve spesifik enerji kullanılarak, mevcut bir makine için kazılan formasyondaki optimum çalışma parametreleri veya deney yapılan formasyon için optimum kesici kafa dizaynı ve çalışma parametrelerini bulmak mümkündür.

Bu çalışmanın ana amacı, disk keski çapının ve değişik kayaç özelliklerinin kesme performansı üzerine etkisinin araştırılması ve elde edilen bulguların İstanbul'da kullanılan tam cepheli tünel açma makinelerinin arazi verileriyle ve disk keski teorileriyle irdelenmesidir. Diğer bir amaç ise, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü tarafından, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), MİSAG-274 projesi kapsamında geliştirilen taşınabilir doğrusal kazı setinin (PLCM) performans tahmini için kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır [2].

Çalışmanın amacına yönelik olarak, tünel açma makinelerinin arazide kazısını gerçekleştirdiği üç farklı formasyondan kayaç numuneleri alınmıştır (arkoz, şeyl, fosilli kireçtaşı). Arkoz numunesi, masif ve klastik yapıya; şeyl numunesi tabakalı yapıya ve fosilli kireçtaşı ise boşluklu ve fosilli yapıya sahiptir. Bu üç kayaç numunesi hem tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) hem de taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Tam boyutlu doğrusal kazı setinde 13 inç (330 mm) ve 17 inç (432 mm) aplarında sabit kesit alanlı (CCS) ve 15 inç (380 mm) apında V tip disk keski kullanılmıştır. Taşınabilir doğrusal kazı setinde ise mini V (130 mm çapında) tip disk keski kullanılmıştır.

CCS tip disk keski için disk keski çapının kesme performansına etkisini anlayabilmek için üç kayaç numunesinin doğrusal kesme deneylerinden elde edilen kesme deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda disk keski çapından keski kuvvetleri ve spesifik enerji değerlerine bir “k” katsayı ile geçiş yapılabileceği ortaya konulmuştur.

Taşınabilir doğrusal kazı setinin (PLCM) performans tahmininde kullanılabilirliğini belirlemek için bir seri kesme deneyi yapılmıştır. Taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) mini V tip disk keski ile yapılan kesme deneylerinden, tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 15 in V tip, 17 in CCS tip disk keski ile yapılan kesme deneylerine yüksek belirlilik kat sayısı (R^2) ile geçiş yapılabildiği görülmüştür. Bu sonuçlar; taşınabilir doğrusal kazı setinin, tam cepheli tünel açma makineleri için keski kuvvetlerinin ve spesifik enerji değerlerinin belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Kayaç tipinin kesme performansı üzerine etkisinin araştırılmasında, aynı tip disk keski (rneğin 13 in CCS tip disk keski) için üç farklı kayaç numunesinden (arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı) elde edilen kesme verileri karşılaştırılmıştır. Kayacın yapısal özelliklerinin kesme performansı üzerinde baskın etkisinin olduğu belirlenmiştir. Örneğin tabakalı yapıya sahip şeyl numunesi üç farklı disk keski içinde en düşük keski kuvvetlerini ve spesifik enerji değerini vermiştir.

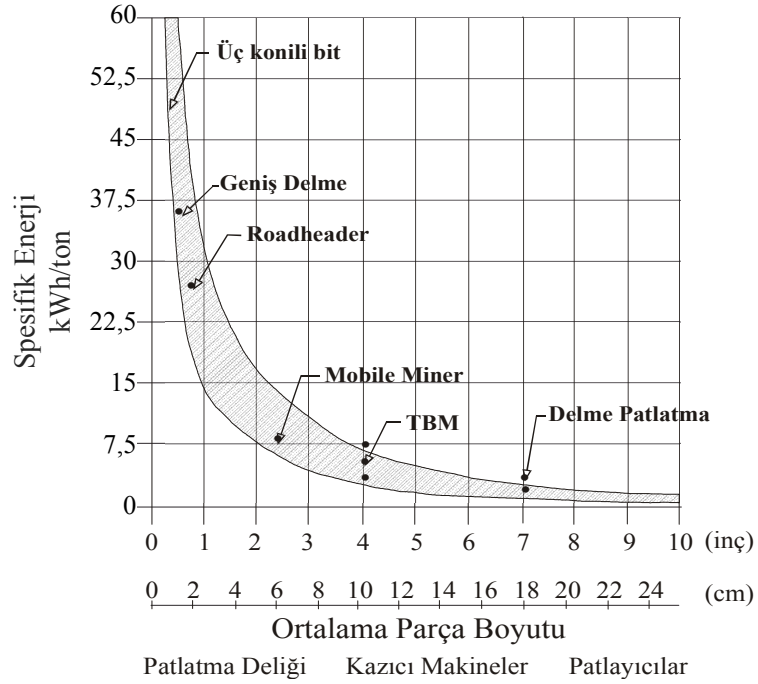
Deneysel sonuçların doğrulaması için tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM) ile yapılan performans tahminleri tam cepheli tünel açma makinelerinin (TBM) gerçek arazi performans verileriyle karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra, laboratuarda elde edilen 13 inç (330 mm) ve 17

inç (432 mm) CCS disk keski kuvvetleri Rostami ve Ozdemir tarafından geliştirilen CCS disk keski teorisiyle, mini V (130 mm) disk ve 15 inç (380 mm) V disk keski kuvvetleriye Roxborough ve Philips tarafından geliştirilen V disk teorisiyle karşılaştırılmıştır [3-5].

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Mekanize Kazı Yöntemleri

Mekanize kazı kayaç ortamının makineler aracılığı ile kazılması işlemi olarak tanımlanabilir. Yeraltı madenciliğinde kazı işlemleri, klasik kazı ve mekanize kazı olmak üzere ikiye ayrılır. Laboratuvar ve arazi çalışmaları uzun zamandır süren fakat endüstriye geçirilememiş olan, termal parçalama, füzyon, buharlaştırma ve kimyasal parçalama gibi kazı yöntemleri de bulunmaktadır. Kazının ekonomikliğini kazı sonrası oluşan parça boyutu ve spesifik enerji doğrudan etkilemektedir. Ortalama parça boyutu ile spesifik enerji arasındaki ilişki Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1: Spesifik enerji-parça boyutu arasındaki ilişki [6].

Delme patlatma sonrasında oluşan parça boyutunun büyük olması bu yöntemi verimli olarak tarif etmektedir. Fakat ilerleme hızının sınırlı oluşu delme patlatma yönteminin uygulanışını sınırlamaktadır. Mekanize kazı yönteminin delme patlatma yöntemine olan üstünlükleri şu şekilde özetlenebilir [7]:

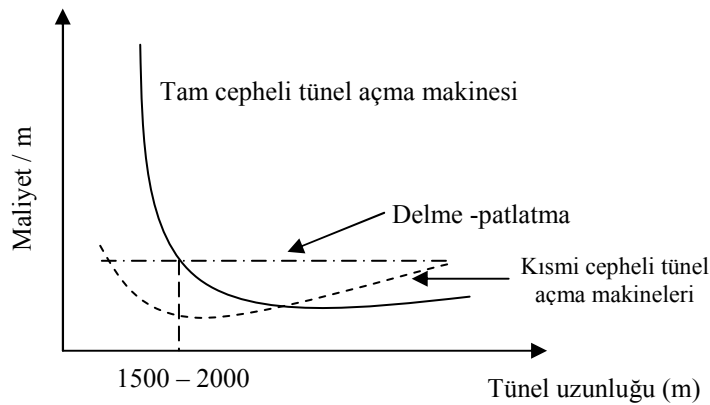
- Kazı esnasında arazi kontrolü sağlandığından, yeryüzü oturmaları daha azdır.

- İstenilen kazı profilinin oluşturulması daha kolaydır.
- Patlayıcı madde kullanılmadığı için iş ve işçi güvenliği daha fazladır ve iş kazası oranı daha azdır.
- Düz ve kalifiye işçi sayısı daha azdır.
- Pasa nakliyatı daha kolaydır.
- Havalandırma ihtiyacı daha azdır.
- Otomasyon uygulamaları ile kazı hızı arttırılabilir.
- Cevher kazılarında üretim miktarının artmasını sağlar.

Mekanize kazı yönteminin bu avantajlarının yanında bir takım dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajları da şu şekilde sıralanabilir:

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Yeraltında kullanılan makinelerin montaj ve demontaj süreleri uzundur.
- Tecrübeli eleman gereksinimi vardır.
- Özel dizayn edilmiş makine için gerekli ekipman temini uzun süre alabilir.

Bütün bu faktörler göz önünde tutulduğunda, uzun boylu tünel ve galeri uygulamalarında tam cepheli ya da kısmi cepheli galeri açma makinelerinin kullanılmasının, maliyetler açısından daha uygun olduğu belirlenmiştir. Tünel uzunluğuna bağlı olarak oluşan kazı maliyetlerinin değişimi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2: Tünel uzunluğuna bağlı olarak kazı maliyetinin değişimi [8].

Makine ile kazı yapılacak ise en uygun mekanize kazı yönteminin seçimini ve makine performansını etkileyen faktörleri iki ana grupta toplanabilir. Birincisi, kullanılacak olan kazı makinesinin özelliklerine bağlıdır. İkincisi, kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerine ve formasyonun kütleli özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1: Kazı makinelerinin performansını etkileyen parametreler [9].

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

2.1.1 Tam cepheli tünel açma makineleri

Tam cepheli tünel açma makineleri günümüzde 2 ile 15,4 m çaplarındaki ayna yüzeylerini, belirli kesme derinliğinde bir defada kazabilen makinelerdir (Şekil 2.3). Tüm donanım uzunluğu 120-150 m kadardır. Çok kısa olan tam cepheli makinelerle 10-12 m yarıçapında dönemeçler dönülebilmekte, hali hazırdaki tam cepheli makinelerle 125-150 m yarıçapında dönemeçler dönülebilmektedir [10].

Tam cepheli tünel açma makineleri, kazı işlemi, pasa nakliyatı ve tahkimatı yapabilen tek birimde birleştirilmiş mekanik ve elektrik parçalar birliğidir. Bu makineler; tam hizalama, pasa nakliyatı, hayati hizmet sağlama sistemi (hava, su, enerji) ve tahkimat gibi alt yapı sistemlerini içine alan geniş kapsamlı mekanize kazı sisteminin bir parçasıdır. Yedekleme alt sistemi bileşenlerinin çoğu tam cepheli makinenin arkasında çekilmekte olan kızak ya da platformlar üzerine kurulmuştur. Şekil 2.4 kaya formasyon kazısı yapan tam cepheli tünel açma makinesi ve yedekleme sistemlerini göstermektedir. Yapısal olarak şiltli (kalkanlı) ve şiltsiz (kalkansız) olabilirler. Kalkansız makineler stabil kaya ortamlarında kullanılmaktadır. Kalkanlı makineler ise kalkanların varlığı nedeniyle kırıklı çatlaklı formasyonlarda kazı yapabilme özelliğine sahiptirler.



Şekil 2.3: Tam cepheli tünel açma makinesi (Robbins).



Şekil 2.4: Kaya formasyon kazısı yapan tam cepheli tünel açma makinesi ve yedekleme sistemleri (Herrenknecht).

Bu makinelerin çalışma yöntemi ise şu şekildedir: Tam cepheli makinelerin önünde sertleştirilmiş çelikten yapılmış disk kesicilerle donatılmış kesici kafa vardır. Yüksek randımanlı ve güçlü elektrik motorları kesici kafayı yavaşça döndürür. Kesici kafanın en gerisinde, makinenin kesici kafasının tünel duvarına yüksek basınç uygulamasını

sağlayan, hidrolik presler bulunur. Disk keskinin yüksek basıncı altında, kaya küçük parçalara ayrılır. Bu makineler kısa adımlarla ilerler; her ring kazısından sonra bütün makine ileri çekilerek pozisyonu desteklenir ve tüm bu işler tekrar edilir.

Kesici kafanın tam arkası, çalışanları korumak amacıyla kaya civatalar kullanılarak sağlamlaştırılır. Kayacın kalitesine bağlı olarak, buna ilaveten çelik bağlar veya diğer güvenlik önlemleri alınır. Robot kollarla püskürtme beton döşenir. Gunit olarak da bilinen bu malzeme kemerin içini kaplar ve tünel için çok gerekli olan koruyucu kalkanı oluşturur.

Tam cepheli tünel açma makinelerinin arka tarafına yerleştirilen konveyör ile kazılan malzeme taşınır. Malzeme buradan demiryolu veya bantlarla tünelin girişine taşınarak tampon bir siloyla yükleme noktasına götürülür [10].

Tam cepheli tünel açma makineleri, jeolojik ve jeoteknik koşullara göre açık TBM'ler ve şiltli (kalkanlı) TBM'ler olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Tam cepheli tünel açma makinelerin sınıflandırması Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2: Tam cepheli tünel açma makinelerinin sınıflandırması [11].

Açık TBM'ler (Open TBM's)	Altan destekli bir çift pabuçlu - önden motorlu - TBM'ler (Main Beam)	
	Altan desteksiz (askıda) bir çift pabuçlu - önden motorlu - TBM'ler (Open Gripper)	
	İki çift pabuçlu - arkadan motorlu - TBM'ler (Kelly Beam)	
Şiltli TBM'ler (Shielded TBM's)	Şiltli Sert Kaya TBM'leri	Tek Şiltli TBM'ler
		Teleskopik Şiltli TBM'ler
		Sadece Kesici Kafa Bölgesi Şiltli TBM'ler (Gripper Shield)
	Şiltli Yumuşak Zemin TBM'leri (Ayna Basıncılı)	Çamur Basıncılı TBM'ler (Slurry Pressure Balance)
		Pasa Basıncılı TBM'ler (Earth Pressure Balance)
		Hava Basıncılı TBM'ler (Compressed Air Balance)
		Kombine TBM'ler (Mixshield)
		Özel TBM'ler

Açık TBM'ler çok sert, aşındırıcı, az su geliri olan masif veya az kırıklı çatlaklı kaya koşullarda kullanılmaktadır (RMR=80-100). Açık TBM'ler, alttan destekli bir çift pabuçlu önden motorlu (Main Beam), alttan desteksiz bir çift pabuçlu önden motorlu

(Open Gripper) ve iki çift pabuçlu arkadan motorlu (Kelly Beam) TBM'ler olmak üzere üçe ayrılır.

Şiltli TBM'ler ise şiltli sert kaya TBM'leri ve şiltli yumuşak zemin TBM'leri olmak üzere ikiye ayrılır. Şiltli sert kaya TBM'leri kırıklı çatlaklı, bloklu, kuru veya az su geliri olan kaya koşulları ve orta derecede sıkışan kil formasyonlarda kullanılmaktadır (RMR=30-80). Şiltli sert kaya TBM'leri jeolojik ve jeoteknik özelliklere bağlı olarak tek şiltli TBM'ler, teleskopik şiltli TBM'ler ve sadece kesici kafa bölgesi şiltli (Gripper Shield) TBM'ler olmak üzere üç alt gruba ayrılır. Şiltli yumuşak zemin TBM'leri; çamur basınçlı TBM'ler (Slurry TBM's), pasa basınçlı TBM'ler (EPBM's), hava basınçlı TBM'ler (Compressed Air Balance TBM's), kombine TBM'ler (Mixshield) ve özel TBM'ler olmak üzere dört alt gruba ayrılır. Hangi tip şiltli yumuşak zemin TBM'inin kullanılacağını jeolojik ve jeoteknik koşullar sınırlamaktadır. Yer altı suyunun fazla olduğu çakıl, iri ve orta taneli kum formasyon koşullarında çamur basınçlı TBM'ler; yer altı suyunun fazla olduğu ince taneli kum, kil ve silt formasyon koşullarında pasa basınçlı TBM'ler; yer altı suyunun fazla olduğu stabil kumlu formasyon koşullarında hava basınçlı TBM'ler; her türlü yumuşak zemin ve sert kaya koşullarında kombine TBM'ler kullanılmaktadır [11].

2.1.2 Pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makineleri (EPB-TBM's)

Arazi basıncını dengeleme esasına göre çalışan (EPB) makineler ilk olarak Japonya'da 1960-70'li yıllarda görülmeye başlamıştır. Yapışkan olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminlerde ilerlemeler sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Genellikle bu gibi alanlarda ve kendini kısa süreli bile tutamayan kayaların kazısında bu makineden faydalanılır. Temel çalışma prensibi su gelirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması, "bizzat arazi ve içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkan verilmesi" diye tanımlanabilir. Bir başka deyişle amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve tüm yüzeyi desteklemesidir. Bu destekleme basıncının tünel üzerindeki doğal arazi basıncını karşılayacak bir değerde ayarlanması gerekir. Bu makineler 5 bar'a kadar ulaşan basınç altında çalışabilecek şekilde imal edilebilirler. En iyi çalışma koşulları arazi nemlilik oranının % 10-15 veya daha az olduğu

durumlardır. EPB makinesi çok sert kayalardan (diskli) çok yumuşak olanlarına (kalem kesikli) kadar, değişik kayaç ve zemin formasyonlarında kullanılmak üzere tasarımılandırılabilirler. Çalışmalarındaki basitlik ve uygulama alanlarının genişliğinden dolayı, giderek çamur makinelerinin (slurry shield) yerini almaktadırlar.

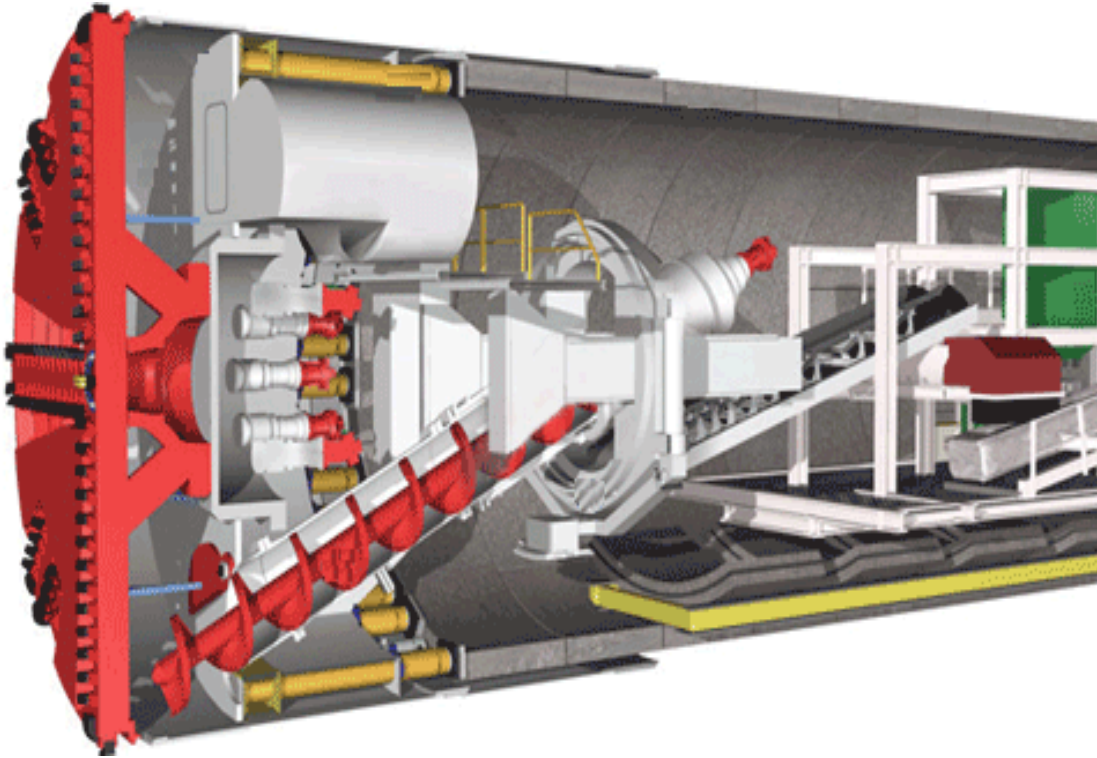
EPB'ler çoğu defa çok amaçlı kullanılabilecek şekilde imal edilmektedirler. İstenildiğinde tek veya çift kalkanlı (şilt) olarak kullanılabilmektedirler. Arazinin durumuna bağlı olarak kapalı (basınç altında) veya açık (atmosfer basıncında) çalışabilecek duruma da kolayca getirilebilmektedirler. Böylece, derin bir deniz altında çalışan bir makine, basınçlı bir damar veya fay zonuna rastlamadığı sürece; çift kalkanlı, açık bir konumda çalışabilmektedir. Gerektiğinde de çok çabuk olarak kapanabilmekte ve gerçek bir EPB makinesi olarak çalışmaya başlamaktadır.

EPB makinesinde kazılan malzeme bir vida konveyör vasıtası ile kesici kafa haznesinden çıkarılır. Kazı bölgesindeki arazi basıncı azalmalarını ve bu yüzden oluşacak oturmaları engellemek için malzeme aktarımının kontrollü bir şekilde yapılması gereklidir. Bu yüzden vida konveyörün hızı malzeme çıkış hızını kontrol etmek için ayarlanabilir. İstenilen şekilde vida hızı ayarlaması bilgisayarlı bir monitörden izleme sistemiyle yapılabilir. Dengeli ve güvenli bir kazı yapabilmek için malzeme çıkış hızının makine ilerleme hızına eşit olması gerekir. Böylece zemin oturmalarına yol açabilecek fazla malzeme çıkışına izin verilmez. Eğer ortamda bulunan suyun basıncı atmosfer basıncının üzerine çok fazla çıkarsa bazı basınç kilitleri gerekli olabilir. Basınç kilitleri vidanın bir yanından diğerine doğru bir patlamayı önlemek için gereklidir ve vidanın çıkış kapısında konumlandırılır.

EPB makinelerinde diğer metotların aksine, ikincil bir destekleme metodu (sıkıştırılmış hava, süspansiyon) kullanılmaz. Akıcı formasyon kesici kafadaki kesikler tarafından kazılır. İtme kuvveti, aynaya kazı haznesinin doldurulmasıyla meydana getirilen basınç duvarı yoluyla transfer edilir. Böylece kazı bölgesinde kontrolden çıkmış bir şekilde malzeme akışı engellenmiş olur. Kazı bölgesindeki formasyon uygulanan itme kuvveti nedeniyle daha fazla yük alamadığı anda denge sağlanmış olur. Arazi destekleme basıncı, sağlanan dengenin üzerine çıkarılırsa kazı bölgesindeki akıcı formasyon çok daha sağlam bir hale gelir. Eğer açılan tünel yeryüzüne yakınsa çok fazla uygulanan ayna basıncı sebebiyle yeryüzünde kabarmalar meydana gelebilir. Pasa nakli tünel boyunca bant konveyörlerle,

vagonlarla, damperli kamyonlarla ya da borular içerisine taşınmayı kolaylaştıran bir katkı maddesi ekledikten sonra katı taşıma pompaları yardımıyla yapılabilir. EPB'ler çalışma prensiplerine bağlı olarak çeşitli isimler alır: Malzeme hapsedici şiltleri (soil confinement shields), su basıncını destekleme şiltleri (water pressure balance shields), yüksek yoğunluktaki çamur şiltleri (high density slurry shields) ve çamur şiltleri (mud shields).

EPB makinesinin kazı anında çalışma aşamaları da şu şekilde gerçekleşmektedir: Şekil 2.5'te elemanları görülen bir EPB makinesinin öncelikle kesici kafanın döndürme motorları ile döndürülmesi ve kesici kafaya itme silindirleri ile araziye destekleyecek kadar ya da biraz daha fazla kuvvet verilmesiyle akıcı alüvyal zemin kazı haznesine dolmaya başlar. Kazı haznesi tamamen dolduktan sonra istenilen destekleme ortamı yaratılır ve kazılan malzeme vida konveyör yardımıyla normal basınçtaki bölgeye alınmaya başlar. Burada vida konveyörün en önemli görevi aynada oluşturulan basıncın kademeli olarak düşürülmesi ve normal basınca indirilerek düzenli bir malzeme çıkışının sağlanmasıdır. Vida konveyörün çıkış kapısından bant konveyöre boşalan malzeme kuyruk bölümünde bekleyen vagonlara ulaşır ve buradan da kuyu ağzına gönderilir [12].

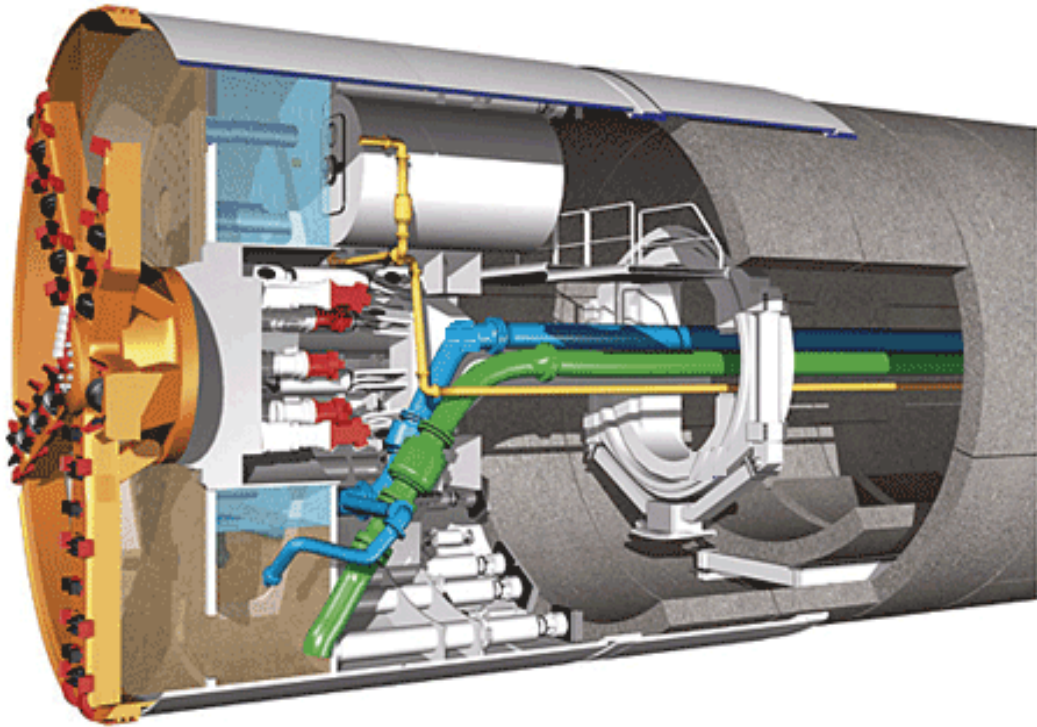


Şekil 2.5: Pasa basınçlı tünel açma makinesi kesit görünümü (Herrenknecht) [13].

2.1.3 Çamur basınçlı tam cepheli tünel açma makineleri (SPB-TBM's)

İlk olarak 1959 yılında kanalizasyon tünel inşası için kullanılan 3,35 m çapındaki çamur basınçlı tam cepheli tünel açma makinesi (Slurry TBM's) Gardener tarafından tasarlanmıştır. Bu makinede ayna basıncı sorunları yaşandığından, tünel aynasının stabilizasyonunun sağlanması için bentonit çamuru kullanımı 1960 yılında Prof. Lorenz tarafından önerilmiştir. Bu proses İngiliz, Alman ve Japon makine üreticileri tarafından uygulanmaya başlanmıştır. 1967 yılında, Mitsubishi firması 3,10 m çapındaki ilk çamur basınçlı TBM'in üretimini yapmıştır. 1970 yılında ise 7,20 m çapındaki çamur basınçlı TBM ile ilk büyük çaplı makine üretimini gerçekleştirmiştir [1]. Şekil 2.6'da çamur basınçlı tam cepheli tünel açma makinesi görülmektedir.

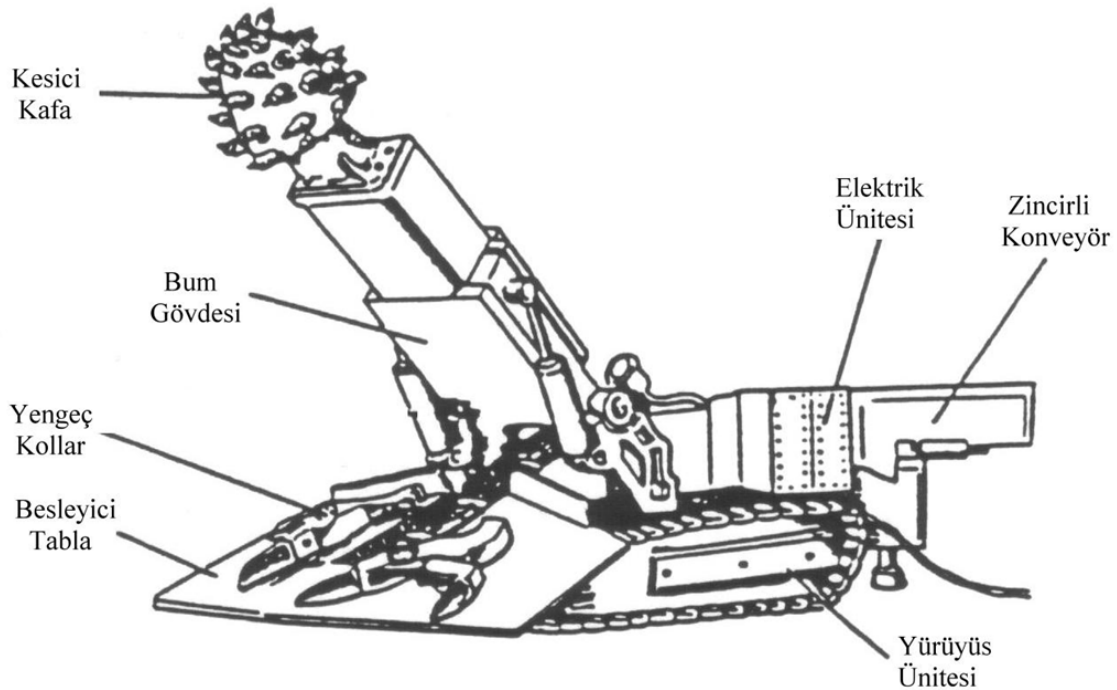
Çamur basınçlı makineler yer altı suyunun fazla olduğu çakıl, iri ve orta taneli kum formasyon koşullarında kullanılmaktadır. Temel çalışma prensibi su gelirini ve arazi akmasını kontrol etmek amacıyla aynanın bentonit çamuru ile dengelenmesidir. Kazılan malzeme kesici kafadan kademeli olarak alınarak yeryüzündeki malzeme ayrıştırma tesisine nakledilir. Burada bentonit çamuru ve pasa ayrıştırılır, geri dönüşümle kazanılan bentonit yeniden hazırlanarak tünel aynasına uygulanabilir [14].



Şekil 2.6: Çamur basınçlı tünel açma makinesi kesit görünümü (Herrenknecht) [13].

2.1.4 Kollu galeri açma makineleri

Kollu galeri açma makinelerinin mekanize kazı uygulamalarında önemli bir yeri bulunmaktadır. Genellikle yumuşak ve orta sert olan kayaçların kazısı için kullanılan bu makineler madencilik sektöründe üretim amaçlı; tünelcilik sektöründe kazı amaçlı olarak kullanılır. Bu makinelerle aynanın tamamında aynı anda kazı yapılamadığından, bu makineler kısmi cepheli makineler olarak adlandırılırlar. Kollu galeri açma makinelerinin kayaç kazabilirlikleri başlıca iki parametre göz önüne alınarak açıklanabilir. Bunlar jeolojik süreksizlikler ve basınç dayanımıdır. Bu makineler formasyonun RQD değerinin %50'den büyük olması durumunda basınç dayanımları 70 MPa altında olan kayaçlarda, RQD değerinin %50'den küçük olması durumunda ise basınç dayanımları 120-130 MPa olan kayaçlarda başarı ile uygulanabilmektedir. Kazılabilirliği güç olan kayaçlarda, daha güçlü ve ağır kollu makineler kullanılır. Bir kollu galeri açma makinesi; bum ünitesi, yürüyüş ünitesi, malzeme yükleme ünitesi, malzeme aktarma ünitesi, hidrolik ve elektrik olmak üzere beş genel bölümden oluşmaktadır [15]. Şekil 2.7'de kollu galeri açma makinesi ve üniteleri görülmektedir.



Şekil 2.7: Kollu galeri açma makinesi ve üniteleri [15].

Kollu galeri açma makinelerinde genellikle formasyon özelliklerine bağlı olarak ek donanımlara ihtiyaç duyulur. Bunlar kesme kafasında tozu bastırmak ve keskinlikte sürtünmeden kaynaklanan ısınmaları önlemek amacıyla kullanılan su püskürtme

düzenekleri, kırıklı çatlaklı formasyonlarda kullanılan kalkanlar veya tavan saplama tertibatları olarak açıklanabilir.

Kollu galeri açma makinelerinin çalışma prensibi, dalma ve kesme olmak üzere iki periyoda ayrılır. Kesme periyodunun en zor işi olarak adlandırılan dalma işlemi, kesici kafanın aynaya dayanması ve dönmeye başlaması ile başlar. Kazı yüzeyi masif ve süreksizlik içermiyorsa kesici kafaya etki eden kuvvetler yüksektir. Kesme işlemi ise kazı yüzeyinde oluşan derinliğin tüm kazı yüzeyi boyunca genişletilmesidir. Kesme işleminde harcanan enerji, dalma işleminde harcanan enerjiden daha azdır. Bunun nedeni dalma işlemi ile aynada serbest bir yüzeyin oluşmuş olmasıdır [15].

Kollu galeri açma makineleri makine ağırlığına ve kesici kafa tipine göre iki ana grupta sınıflandırılırlar. Bu iki ana grup da kendi içinde yapısal sınıflara ayrılır.

Kollu galeri açma makinelerinin sınıflandırmasında en çok kullanılan sistem, makine ağırlığına göre sınıflandırma sistemidir. Üretici firmalar tarafından makine ağırlığına göre yapılmış en bilinen sınıflandırma Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3: Kollu galeri açma makinelerinin ağırlıklarına göre sınıflandırılması [15].

Sınıf	Ağırlık (ton)	
0	20	Hafif
I	20 - 30	
II	30 - 50	Orta
III	50 - 75	
IV	75+	Ağır

Kollu galeri açma makineleri kesici kafa tipine göre ikiye ayrılır. Bunlar; dönme eksenini eksenine paralel olan kesici kafalı kollu makineler (aksiyel) ve dönme eksenini eksenine dik olan kesici kafalı kollu makineler (travers)’dir. Arına dik tip kollu makinelerde eksen ucunda 1 adet kesici kafa, arına paralel tip kollu makinelerde ise 2 adet kesici kafa bulunmaktadır. Arına paralel kesici kafalı makinelerle, 130 MPa’a kadar basınç dayanımına sahip kayalar kazılabilirken; arına dik kesici kafalı makinelerle daha yumuşak kayalar kazılabilir ve daha düzgün tünel yüzeyleri ortaya çıkarılabilmektedir. İki tip kollu galeri açma makinesi arasında genel bir mukayese yapılacak olursa % 20-25 oranında daha hafif olan arına paralel kesici kafalı kollu galeri açma makineleri ile % 30 oranında daha verimli kazı yapılabileceği söylenebilir [15].

2.1.5 Darbeli kırıcılar

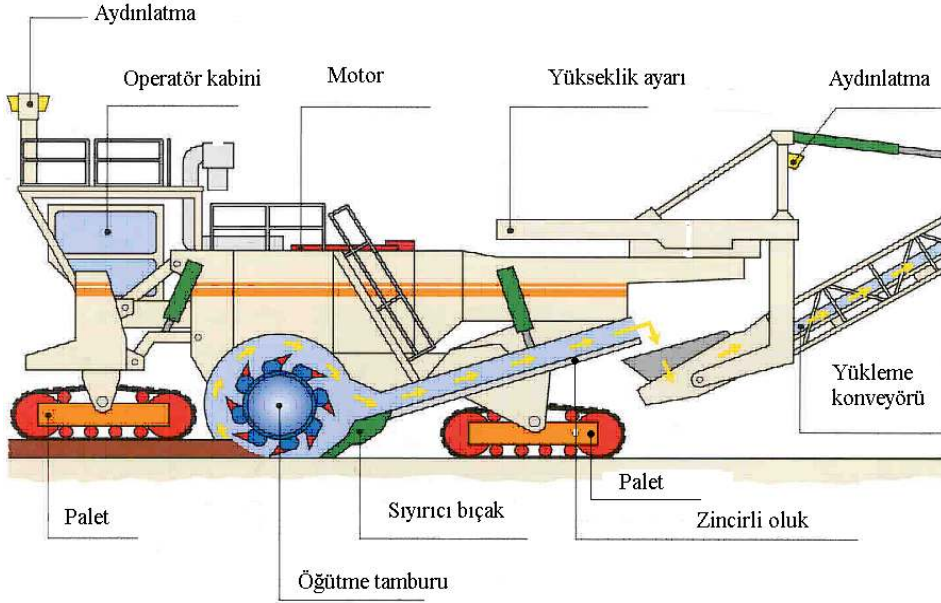
Yumuşak ve orta sert formasyonların kazısında başarı ile kullanılması, ilk yatırım maliyetlerinin düşük oluşu ve bakım onarım masraflarının daha az olması nedeni ile diğer kazı makinelerine kıyasla kendilerine geniş kullanım alanı bulmuşlardır. Bu avantajlar sayesinde darbeli kırıcılar inşaat ve madencilik sektörlerinde başarı ile kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe kullanılan ITC-420 model bir darbeli kırıcı Şekil 2.8’de görülmektedir. Darbeli kırıcılar inşaat sektöründe galeri ya da tünel açım işlerinde kullanılmaktadır bu tip kırıcılar genellikle basınç dayanımı 100 MPa’ın altında olan kırıklı çatlaklı formasyonların kazısında kullanılırlar. Madencilik sektöründe ise iri parçalı üretimin yapılmasında kullanılabilirler.

Darbeli kırıcının kazı performansını arttırabilmek için kazı işlemi sırasında jeolojik süreksizliklerden yararlanarak kazı yapılmalı ve kırıcı gaga aynaya dik şekilde tatbik edilmelidir. Bu kırıcıların performansları masif kayalarda düşük olmaktadır. Kazı sırasında ayna önünde oluşan pasanın uzaklaştırılması için geçen zaman nedeni ile kazı performansı olumsuz yönde etkilenmektedir.

Darbeli kırıcının performansını artırabilmek için kırıcı ile boş darbe yapılmamalı, kırıcı çalışırken bum oynatılmamalı, kırıcı uç aynı noktaya 30 sn’den fazla vurmamalıdır. Tavsiye edilen yağlama süresine uyulmalı, vuruş adedinde düşme olursa veya basınç hortumları anormal derecede titremeye başlarsa kırıcı hemen durdurulmalıdır. Kırıcı dik olarak ve bum ile bastırılarak kullanılmalıdır [10].



Şekil 2.8: Darbeli kırıcı.



Şekil 2.10: Sürekli yüzey kazıcının ana parçaları [18].

2.1.8 Sürekli yeraltı kazıcıları

Yeraltı kömür madenciliğinde, toz ve gürültü problemlerini engelleyebilmek için geliştirilmiş mekanize kazı yapabilen makinelerdir. Özellikle kömür, fosfat ve potas cevherlerinin kazısında kullanılmaktadırlar. Sürekli yeraltı kazıcıları yapısal olarak kollu galeri açma makinelerine benzetilmektedir [14]. Şekil 2.11 Tamrock marka sürekli yeraltı kazıcısını göstermektedir.



Şekil 2.11: Tamrock marka sürekli yeraltı kazıcısı.

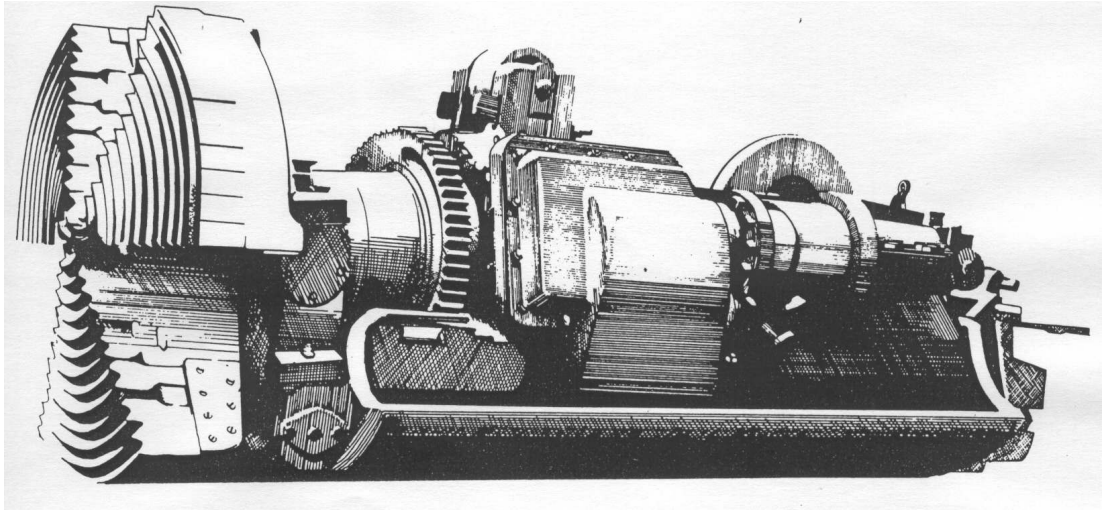
2.2 Tünel Açma Makinelerinin Tarihçesi ve Tasarım Parametreleri

2.2.1 Tünel açma makinelerinin tarihçesi

1851 yılında, Amerikalı mühendis Charles Wilson tarafından geliştirilen tünel açma makinesi, ilk başarılı sürekli kaya kazısı yapan makine olarak dikkat çekmiştir. 1881 yılında, Albay Beaumont tarafından geliştirilen basınçlı hava tünel açma makinesi

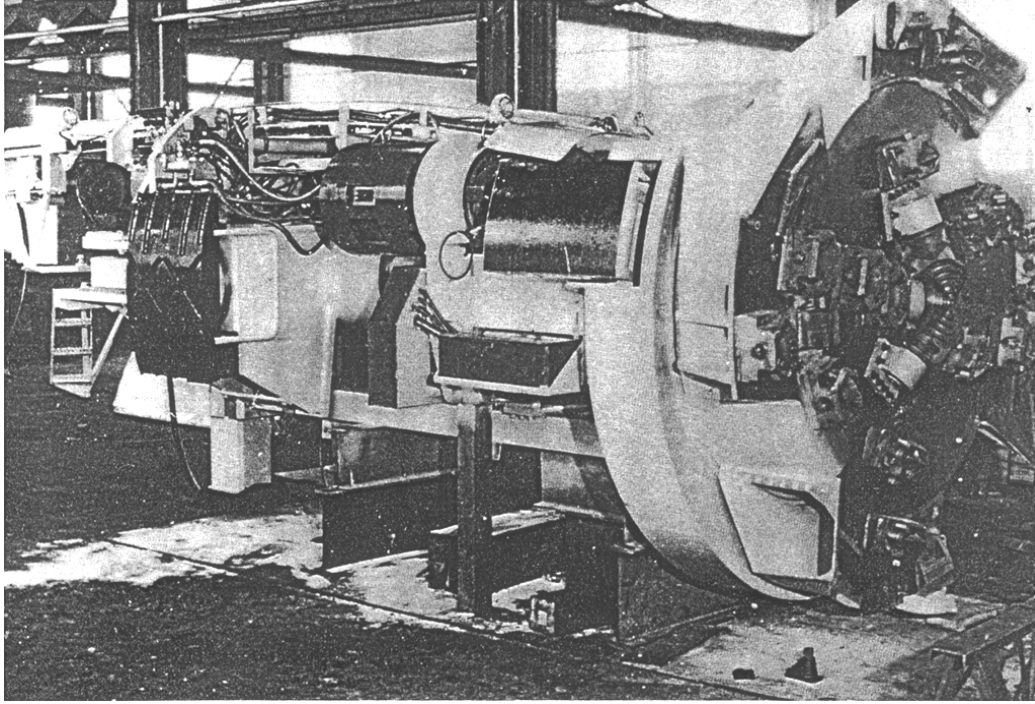
(TBM) İngiliz kanalının altında keşif amaçlı kullanılmıştır (Şekil 2.12). Bu TBM, kayayı toz boyutuna kadar parçalayan kesikleri, sabit bir kesici kafada barındıran bir makine olarak tasarlanmıştır. 2 metre çapındaki bu makine, projenin İngiltere kısmında 1,8 km'den fazla kazı yapmıştır ve günde 24,5 metrelik ilerlemelere ulaşmıştır. İngiltere'deki politik baskılardan ötürü çalışmalar 1882 yılında durdurulmuştur [1].

Güney Dokato'daki Ohae Barajı'nın 1952'deki inşasına kadar James Robbins'in tasarladığı TBM'den başka teknoloji tasarlamada ciddi bir girişimde bulunulmamıştır. James Robbins'in tasarladığı TBM 7,85 m çapında ve makinenin kesici kafası radyal olarak tasarlanmıştır. Kesici kafa tungsten karbit kama uçlu kesikler ve paralel sıralı serbest disk kesiklerle donatılmıştır. TBM'in gücü 150 kW, yaklaşık ağırlığı 126 ton'dur ve 49 m'lik günlük ilerleme ile yumuşak şeyl kazısını tamamlamıştır [1].



Şekil 2.12: Tam boyutlu kazı makinesi (1881 model) [1].

İlk başarılı sert kaya TBM'leri (Şekil 2.13) 1956 yılında yapılmış ve Kanada'nın Toronto vilayetindeki Humber atık su projesinde kullanılmıştır. 3,33 m çapındaki Robbins marka TBM (model 131-106) yaklaşık 4,5 km uzunluğundaki kumtaşı, şeyl ve kristalize kireçtaşı formasyonlarını kesmek için tasarlanmıştır. Bu TBM kama uçlu kesikler ve disk kesikler ile donatılmıştır. İlk kazı esnasında aşınması fazla olan kama uçlu kesiklerin çıkarılmasına karar verilmiş ve kesici kafada sadece disk kesikler bırakılmıştır. Bu tecrübe başarıyı getirmiş ve sert kaya formasyonlarda disk keski kullanım fikrinin oluşmasını sağlamıştır [1,19].



Şekil 2.13: Sert kaya formasyonları için ilk başarılı TBM, 1956 Model 131-106 [1].

1950'lerin ortalarından bu güne TBM'lerdeki gelişmeler, kaya kütlesi ve sağlam kaya özellikleri dikkate alınarak iki yönden ilerleme kaydetmiştir.

- Stabil olmayan zeminlerde kazı yapabilmesi için kalkanlı (şiltli) TBM'ler.
- Masif sert ve aşındırıcı kayalarda, açık tip TBM'ler ile kazı. Bunun anlamı ise makinede daha fazla güç ve itme kapasitesidir.

TBM dairesel hareket eden kesici kafasına monte edilmiş olan sıralı disk keskinin hareketiyle kayayı parçalar. Disk keskinin kaya yüzeyine doğru ilerlerken kesici kafa döner, bu şekilde her bir kafa dönüşünden sonra keski yeni kaya yüzeyini keser. Bu ilerleme mm/devir olarak ilerleme hızının tarifidir.

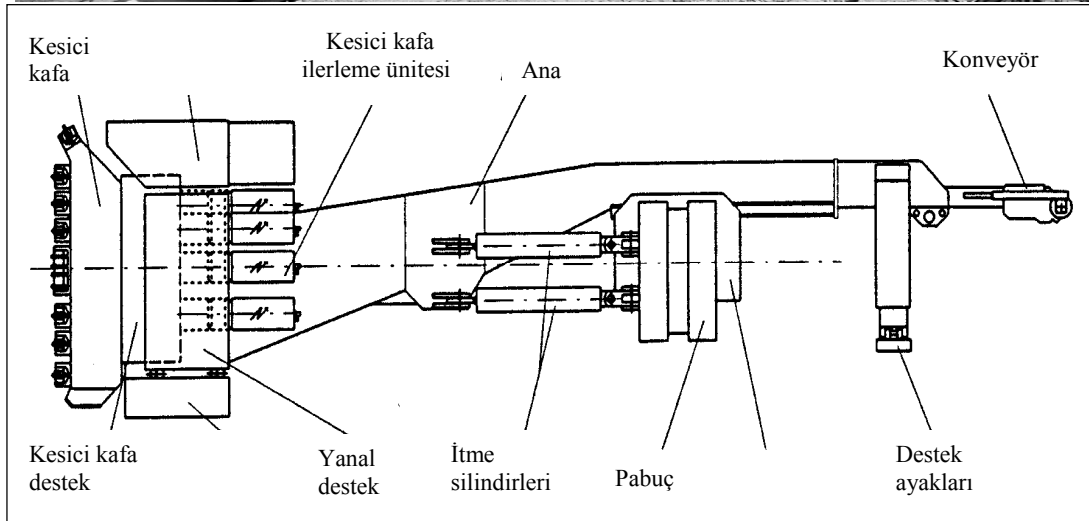
Şekil 2.14 sert kaya TBM'nin tipik bir gösterimidir. Pabuçlar TBM'in kazı sırasında sabitlenmesini sağlayan bir ünedir, itme kuvvetini aynaya iletir ve kazı sırasında duvarlardan torka karşı reaksiyonu sağlar, bunun yanında makine ağırlığını taşıyan bir ünedir. Pabuçların duvara baskı kuvveti, toplam ileri itme kuvvetinin yaklaşık 2,5-3 katı kadardır. TBM kazısında, titreşimlerden kaynaklanacak olan stabilize sorunun çözümünde de önemli rol oynar.

Kazı esnasında oluşan malzeme kesici kafadaki kovalara düşürülerek toplanır. Pasalar makine konveyörüne aktarılana kadar kovalarda bekletilir (Şekil 2.15). TBM kesici kafadan malzemeyi alıp, makinenin arkasındaki ana gövdeye kadar ulaşmasını

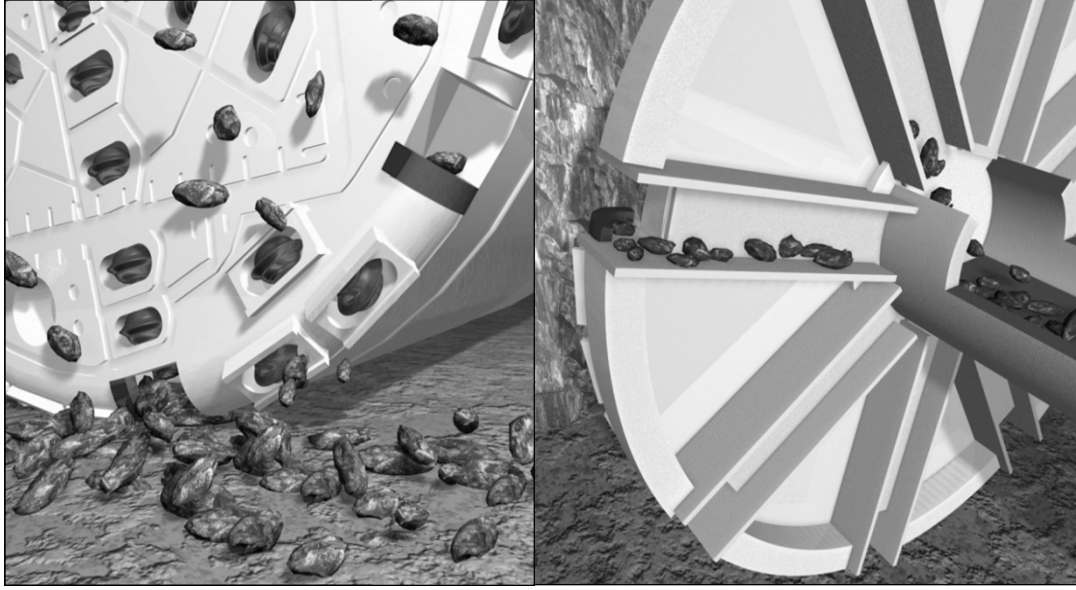
sağlayan bir bant konveyör ile donatılmıştır. Bu noktadan itibaren kazılan malzeme, tünel boyunca maden arabaları veya bant konveyörler ile taşınır.

Geçilecek olan formasyonlar, açık tip TBM'ler için uygun olmadığında, yani kendisini tutamayan kırıklı çatlaklı formasyonların kazısında, kalkanlı TBM'ler kullanılır. Kazı gerçekleştirildikten sonra ise destekleme üniteleri kullanılarak tünelin stabilizesi sağlanır. İki çeşit kalkanlı TBM tasarımı vardır. Bunlar; Tek kalkanlı TBM'ler ve iki kalkanlı TBM'lerdir.

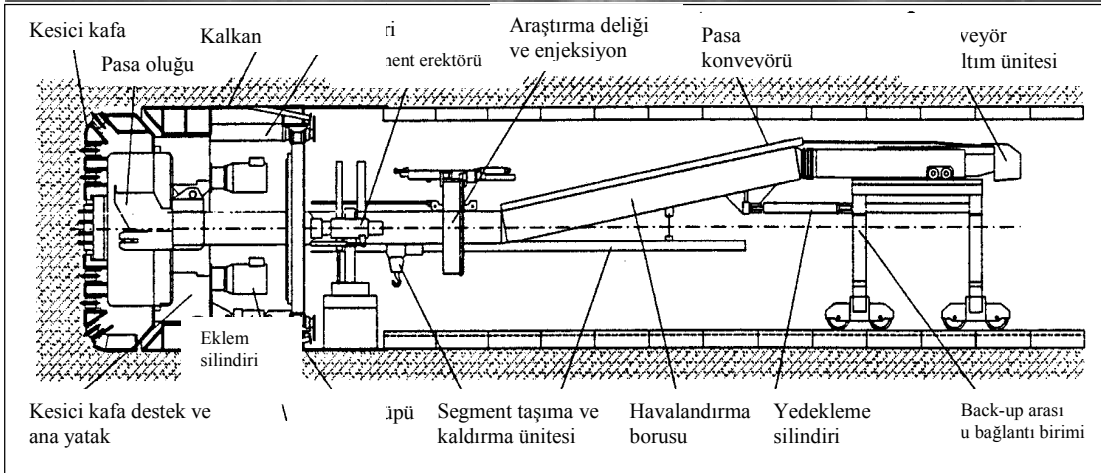
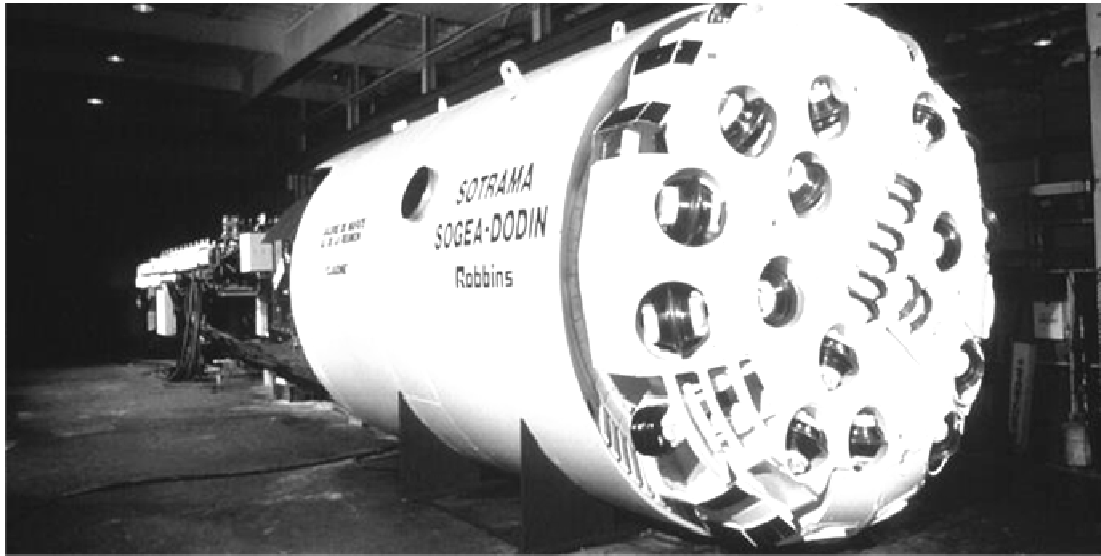
Kazı ve destekleme sistemlerinin art arda yerleştirildiği tek kalkanlı bir TBM'in görünümü Şekil 2.16'da verilmiştir. Bu sistemde bir ringlik kazı ilerlemesinden sonra makine durdurulur ve pistonlar çekilerek segment erektörleri aracılığıyla segmentlerin montajı yapılır. Montajı yapılan segmentler şildin içindedir ve makine kazı yaparak ilerlemesine devam ettiğinde segmentler şildin dışında kalır.



Şekil 2.14: Sert kaya tünel açma makinesi ve üniteleri [20].

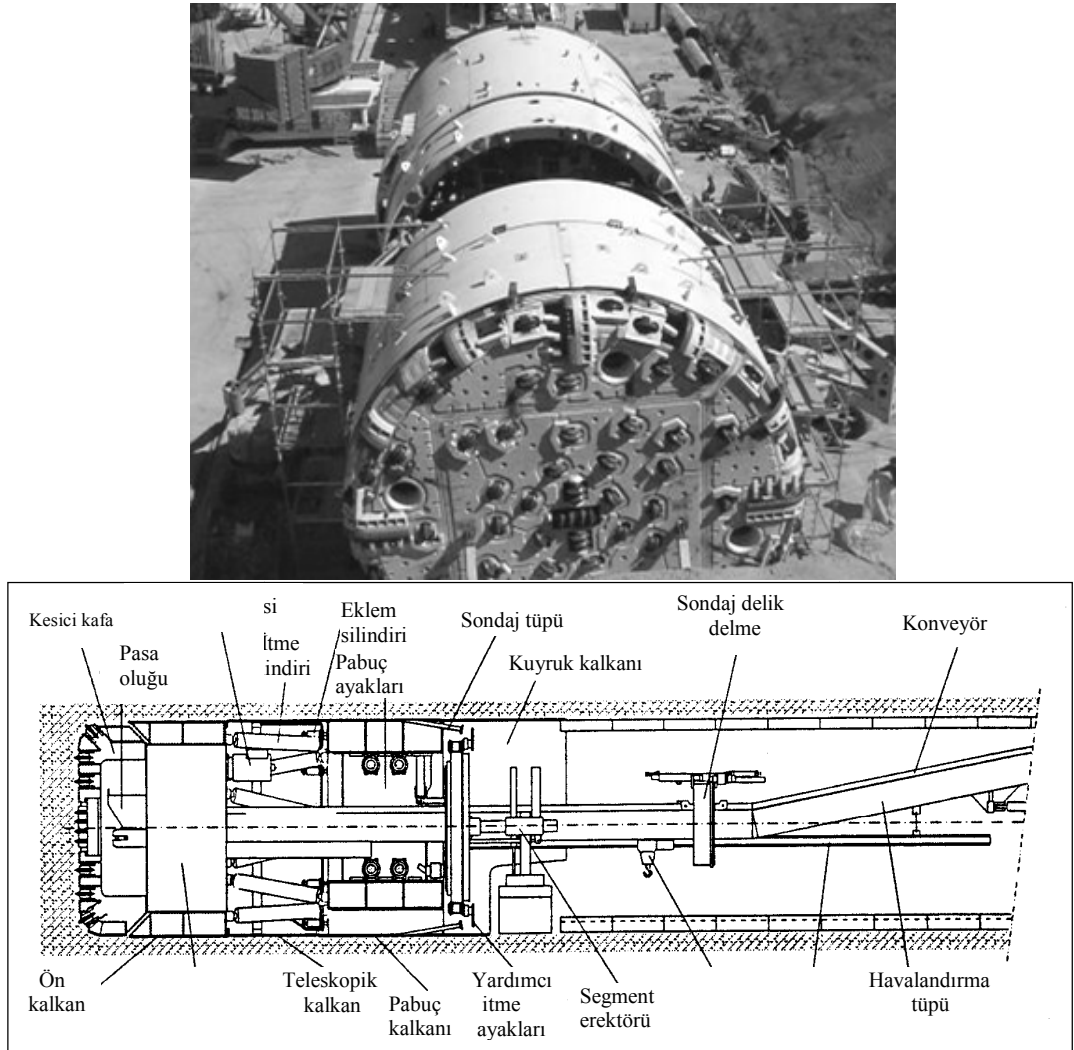


Şekil 2.15: Tünel aynasından bant konveyöre kadar olan pasa naklinin görünümü.



Şekil 2.16: Tek kalkanlı (şiltli) TBM [20].

Diğer bir kalkanlı makine olan, iki kalkanlı TBM Şekil 2.17’de görülmektedir. Sert kaya formasyonlarda, öndeki kalkana yerleştirilmiş olan pabuçlara ilerleme silindirleri basmaktadır aynı zaman diliminde eğer gerekli ise arkadaki şilde yeni ring montajı uygulanabilir. Bu sistem operasyonun sürekliliğini sağlar. Eğer tünel duvarı pabuçların basıncını kaldıramıyorsa, örneğin stabil olmayan formasyonlarda, makine tünel duvarı yerine bir önceki ringlere basar. Bu sisteme geçiş yapılırsa makine tek kalkanlı TBM’ler gibi çalışmaya başlar.



Şekil 2.17: Çift kalkanlı (şiltli) TBM [20].

2.2.2 Tünel açma makinelerinin tasarım parametreleri

2.2.2.1 Keskiler arası mesafe ve keski sayısı

Karşılaşılan kaya formasyonda, keskiler arası mesafe düşürüldüğünde belirli bir kesme derinliğine ulaşmak için gerekli olan itme kuvveti azalacaktır. Çok sert

formasyonlarda her bir keskinin yatak kapasitesi artırılabilir ve keskiler arası mesafe azaltılıp daha yüksek ilerleme hızları elde edilebilir. Fakat bu uygulamadan ötürü makinenin toplam itme gücü gereksinimi artar ve çıkan pasa boyutları da çok küçülmüş olur. Oluşan küçük çipler nedeniyle birim hacimdeki kayayı kesmek için daha çok spesifik enerji sarfıyatına sebep olunur ve kazı prosesinin ekonomikliğı azalır. Büyük boyutlu çiplerin elde edilebilmesi için kesici kafa parametrelerinin optimize edilmesine çalışılmalıdır. Birim hacimdeki kayayı belirli keskiler arası mesafede kesebilmek için harcanan enerjiler karşılaştırıldığında her bir kaya için optimum bir keskiler arası mesafe olduğu belirlenmiştir. Bu keskiler arası mesafeyi esas olarak formasyonun jeolojisi etkilemektedir.

Aynı jeolojik ortamda, keskiler arası mesafeler karşılaştırıldığında, kesici kafanın çapı ile kullanılacak olan keski miktarının lineer olarak arttığı belirlenmiştir. Bir TBM'in ne kadar keskiye gereksinimi olduğu eşitlik **2.1** ile hesaplanabilir [21].

$$N_c = \frac{D_{TBM}}{2.S} + N_{köşe} \quad (2.1)$$

Burada;

D_{TBM} : Kesici kafanın çapı, mm

S : Optimum çip boyutuna ulaşmak için ortalama keskiler arası mesafe, mm

$N_{köşe}$: Kesici kafadaki ekstra köşe keski sayısı (5 – 10)

2.2.2.2 Kesici kafa dönüş hızı (RPM)

Disk keskilerin yataklarının ve yatak tutucularının kapasiteleri kafanın çevresel dönüş hızını belirlemektedir. Disk keski üreticileri tarafından önerilen köşe keskilerin dönüş hızları disk keski çapına dayanmaktadır. Örneğin; bugünün disk keski teknolojileri ile 17 inç'lik bir keski için tavsiye edilen köşe keski hızı 152 m/dak'dır. Bu bilgi göz önüne alındığında kesici kafanın dönüş hızı (RPM), kesici kafanın çapı ve tavsiye edilen disk keski köşe hızının bir fonksiyonu olarak **2.2** eşitliği kullanılarak hesaplanabilir [21].

$$RPM = \frac{V}{\pi.D_{TBM}} \quad (2.2)$$

Burada;

V : Kabul edilebilir disk keski hızı, m/dak

D_{TBM} : Kesici kafanın çapı, m

2.2.2.3 Kesici kafa gücü ve tork gereksinimi

Kesici kafaya monte edilmiş olan bütün keskinlerin kazı işlemine karşı göstermiş oldukları direnç, gerekli olan torkun ve makine gücünün belirlenmesini sağlar. Kesici kafanın arkasına yerleştirilen elektrik motorları yardımıyla da kesici kafanın hareketi sağlanır.

Torku veya gücü hesaplarken kullanılan formül; kaya formasyonunun, disk keskinin ve kesici kafa çapının bir fonksiyonudur. Eşitlik 2.3 sert kaya formasyonlarında kullanılan TBM'lerin tork gereksinimlerinin hesaplanabilmesi için kullanılmaktadır [21].

$$T = \frac{N_c \cdot F_R \cdot D_{TBM} \cdot (0,54) \cdot f_L}{2} \quad (2.3)$$

Burada;

N_c : Disk sayısı

F_R : Keski başına ortalama yuvarlanma kuvveti, kN

D_{TBM} : Kesici kafa çapı, m

0,54 : Ortalama kuvvet moment kolu

f_L : Sürtünme kayıpları

Gerekli olan tork ve kesici kafa dönüş hızı (RPM) bilindiği takdirde, gerekli olan makine gücü eşitlik 2.4 ile hesaplanabilir [21].

$$P = 2\pi \times RPM \times T \quad (2.4)$$

Burada;

P : Makine gücü, kW

T : Tork, kNm

RPM : Kesici kafanın bir dakikadaki dönüş hızı, devir/dak

2.2.2.4 İtme kuvveti gereksinimi

Sert kaya formasyonlarında kullanılan TBM'lerin itme kuvveti gereksinimlerinin hesaplanabilmesi için eşitlik 2.5 kullanılmaktadır [21].

$$FT = N_c \times F_N \times f_L \quad (2.5)$$

Burada;

FT : Toplam itme kuvveti, kN

N_c : Disk sayısı

F_N : Keski başına ortalama itme kuvveti, kN

f_L : Sürtünme kayıpları

2.3 Tünel Açma Makineleri İçin Geliştirilen Performans Tahmin Modelleri

2.3.1 Graham yaklaşımı

Graham, kayacın basınç dayanımını dikkate alarak Robbins marka tam cepheli tünel açma makineleri üzerinde çalışmıştır ve kendi adını taşıyan bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yaklaşım ile performans tahmini için 2.6 kullanılmaktadır [22].

$$P = 3940x \frac{F_C}{\sigma_b} \quad (2.6)$$

Burada;

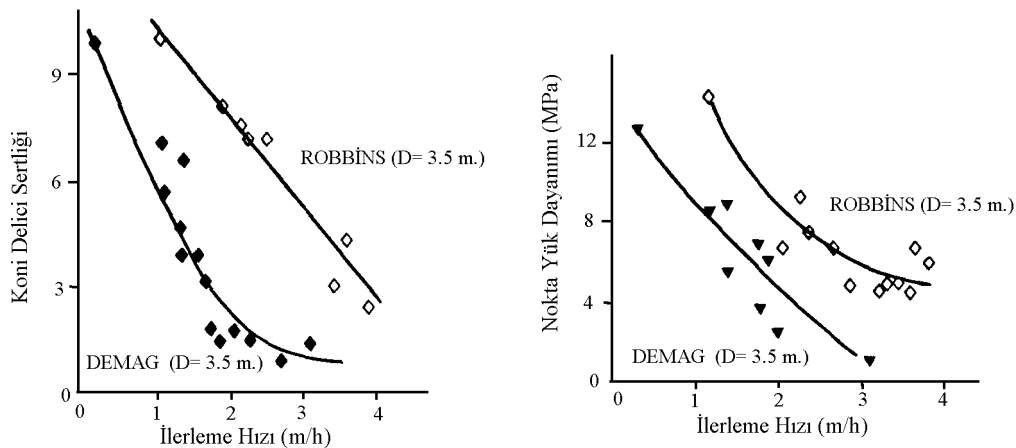
F_c : Ortalama kesme kuvveti, kN

P : Bir devirdeki ilerleme, mm/devir

σ_b : Kayacın basınç dayanımı, kPa

2.3.2 McFeat-Smith ve Tarkoy yaklaşımı

Bu yaklaşımda iki tip tam cepheli tünel açma makinesinin, standart koni delici ve nokta yük deneyi kullanılarak ilerleme hızı ile arasındaki ilişki araştırılmıştır (Şekil 2.18) [23].



Şekil 2.18: Koni delici sertliği ile nokta yük dayanımına bağlı TBM performansı [23].

2.3.3 Farmer ve Glossop yaklaşımı

Farmer ve Glossop yaklaşımı tam cepheli tünel açma makineleri için geçerlidir ve ortalama kesme kuvveti, bir devirdeki ilerleme ve kayacın çekme basınç dayanımını dikkate alarak geliştirilmiştir [24]. Bu yaklaşım ile performans tahmini için eşitlik 2.7 kullanılmaktadır.

$$P = 624 \times \frac{F_c}{\sigma_t} \quad (2.7)$$

Burada;

- F_c : Ortalama kesme kuvveti, kN
 P : Bir devirdeki ilerleme, mm/devir
 σ_t : Kayacın çekme dayanımı, kPa

2.3.4 Cassinelli ve arkadaşları yaklaşımı

Cassinelli ve arkadaşları tarafından geliştirilen bu yaklaşımda; tam cepheli tünel açma makinelerinin ilerleme hızı, kaya tahkimat sınıflandırma sistemine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Net ilerleme hızı eşitlik 2.8 yardımı ile hesaplanmaktadır [25].

$$ICR = -0,0059RMR + 1,59 \quad (2.8)$$

Burada;

- ICR : Kazı hızı, m/h
 RMR : Kaya kütle puanı

2.3.5 Bamford yaklaşımı

Bu yaklaşım Bamford tarafından yerinde toplanan makine ve kaya özelliklerine bağlı olarak geliştirilmiştir. Net ilerleme hızı ve keski tüketimini yüksek korelasyon katsayısı ile tahmin edebilmektedir. Eşitlik 2.9 yardımıyla net ilerleme hızı hesaplanmaktadır [26-27].

$$ICR = 0,535S - 8,49 - 0,00344T - 0,000823N + 0,0137\Phi \quad (2.9)$$

Burada;

- ICR : Kazı hızı, m/h
 S : Schmidt çekici değeri

- T : Makine itme kuvveti, kN
N : Koni delici indeksi, N/mm
 Φ : İçsel sürtünme açısı, derece

Ayrıca Bamford tarafından geliştirilen bu yaklaşımda, eşitlik **2.10** kullanılarak keski tüketimi hesaplanmaktadır.

$$Keski\ tüketimi(keski/km)= 1,73S-8,3+0,0259T-0,0319RIHN+0,0344\ \Phi \quad (2.10)$$

Burada;

- RIHN : Darbe dayanımı indeksi
 Φ : İçsel sürtünme açısı, derece
S : Schmidt çekici değeri
T : Makine itme kuvveti, kN

2.3.6 Hughes yaklaşımı

Hughes, yaklaşımında kayaçların basınç dayanımı ve makine özelliklerini dikkate almaktadır. Ayrıca tam cepheli tünel açma makinelerinin kesme gücünü makine çapına bağlı olarak tahmin etmektedir. Eşitlik **2.11** yarımıyla net ilerleme hızı hesaplanmaktadır [26,28].

$$V = \frac{6xP^{1,2}xNxn}{\sigma_c^{1,2}xr^{0,6}} \quad (2.11)$$

Burada;

- V : Kazı hızı, m/h
P : Keski başına itme kuvveti, kN
N : Kesici kafa dönüş hızı, devir/sn
n : Disk sayısı
 σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, kg/cm²
r : Disk yarıçapı, m

Ayrıca tünel makinelerinin gücü eşitlik **2.12** ile hesaplanmaktadır.

$$Makine\ gücü(kW)=28,45xD+9,07xD^2 \quad (2.12)$$

Burada;

- D : Makine çapı, m

2.3.7 Trondheim Üniversitesi ve Norveç Teknoloji Enstitüsü yaklaşımı

Bu yaklaşım; kayaçların dayanımı, kırılgenlik, aşındırıcılık ve çatlak yapısı ile makine özelliklerinden bir keskiye gelen kuvvet, keski yapısı, keski çapı, keskiler arası mesafe, tork ve devir sayısını dikkate almaktadır [29]. Bu yaklaşım ile performans tahmini için eşitlik **2.13** kullanılmaktadır.

$$P = i_b \times K_s \times K_d \quad (2.13)$$

Burada;

P : Bir devirdeki ilerleme, mm/devir

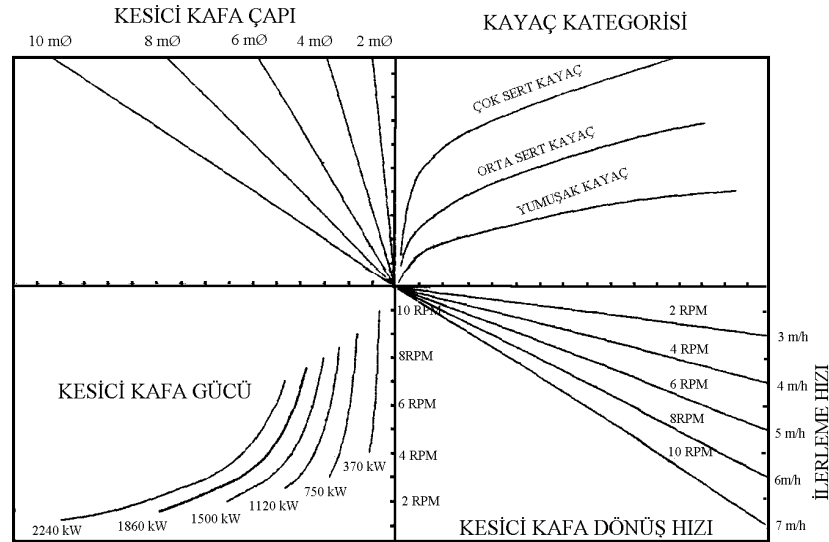
i_b : Keski başına düşen kuvvet

K_d : Keski çapı için düzeltme faktörü

K_s : Çatlak sıklığı için düzeltme faktörü

2.3.8 Tony Peach yaklaşımı

Tony Peach makine özellikleri; kesici kafa çapı, gücü, devir sayısı ile kayaç özelliklerini dikkate alan bir namogram geliştirmiştir. Bu namogramda (Şekil 2.19) değişik koşullar göz önüne alınarak tam cepheli kazı makinelerinin performansı kestirilebilmektedir [30].



Şekil 2.19: Tony Peach'e göre performans kestirimi [30].

2.3.9 CSM modeli

Colorado School of Mines'da Özdemir'in başkanlığında geliştirilen bu yöntemin amacı gerçek boyutlu bir keski ile kaya bloğunun kesilmesi ve gerekli spesifik

enerjinin hesaplanması esasına dayanmaktadır. Teorik olarak, net ilerleme hızı, makina kesme gücü ve spesifik enerji arasında eşitlik **2.14** mevcuttur [3,6].

$$ICR = kx \frac{P}{SE_{opt}} \quad (2.14)$$

Burada;

ICR : Kazı miktarı, m³/h

P : Kesici kafa gücü, kW

SE_{opt} : Optimum spesifik enerji, kWh/m³

k : Kesici kafa gücünü kayaca iletme katsayısı (0,85-0,90)

2.3.10 Nick Barton yaklaşımı

Bu yöntem delme + patlatma yöntemi ile açılan tüneller için geliştirilen Q sınıflama sistemine kayaç ile makine özelliklerini de katarak Q_{TBM} (2.15) diye anılan bir sistem geliştirmiş ve tam cepheli tünel açma makinelerinin performansını kestirmek için kullanılmaktadır [31].

$$Q_{TBM} = \frac{RQD}{J_n} x \frac{J_r}{J_a} x \frac{J_w}{SRF} x \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} x \frac{20}{CLI} x \frac{q}{20} x \frac{\sigma_\theta}{5} \quad (2.15)$$

Burada;

RQD : Kayaç kalite oranı, %

J_r, J_n, J_a, J_w, SRF: Eklem özelliklerine bağlı parametreler

SIGMA : Kayaç kütlesi dayanımı

CLI : Keski ömrü indeksi

q : Kuvars yüzdesi, %

F : Ortalama keski yükü

σ_θ : Tek yönlü gerilme

Q_{TBM} formülü kullanılarak makinenin ilerleme hızı eşitlik **2.16** yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$\text{İlerleme Hızı (m/h)} = 5 \times (Q_{TBM})^{-0.2} \times T^m \quad (2.16)$$

2.3.11 Wijk yaklaşımı

Wijk, tam cepheli tünel açma makinelerinin performans tahmini için matematiksel bir model geliştirmiştir. Bu model yardımıyla tünel açma makinelerini performans kestirimi yapılabilmektedir. Bu yaklaşım ile performans tahmini için **2.17**, **2.18**, **2.19**, **2.20** ve **2.21** eşitlikleri kullanılmaktadır [32].

$$FT = 3.(w + x.\tan(\theta)).\sigma_c.\sqrt{x.d} \quad (2.17)$$

$$FR = 3.\sigma_c.x.(w + 2.x.\tan(\theta)/3) \quad (2.18)$$

- FT : İtme kuvveti, N
FR : Yuvarlanma kuvveti, N
w : Disk keski uç genişliği, m
x : Kesme derinliği, m
d : Disk keski çapı, m
 σ_c : Kayacın basınç dayanımı, Pa
 θ : Disk keski uç açısı / 2, derece

$$\mu = FR/FT \quad (2.19)$$

$$G = N.FT \quad (2.20)$$

$$T = \mu.G.D.(N + 1)/(4.N) \quad (2.21)$$

- μ : Sürtünme kayıpları
G : Tünel açma makinesinin toplam itme gücü, N
D : Tünel çapı, m
N : Disk keski sayısı

2.3.12 Saffet yaklaşımı

Bu modelinde, kaya kütle özellikleri ve makine spesifik özellikleri arasında istatistiksel çalışmalar ile bir ampirik yaklaşım elde edilmiştir. Geliştirilen ampirik yaklaşım ile TBM'lerin performans tahmini yapılabilmektedir. Bu yaklaşım ile performans tahmini için eşitlik **2.22** kullanılmaktadır [33].

$$ROP = 1,093 + 0,029.PSI - 0,003.UCS + 0,437.Log(\alpha) - 0,219.DPW \quad (2.22)$$

- ROP : TBM ilerleme hızı, m/h
UCS : Kayacın tek eksenli basınç dayanımı, MPa
 α : Süreksizliklerin tünel eksenine ile oluşturduğu açı, derece

- PSI : Kayaç kırılgenlik ve frekans eğrisinden elde edilen pik eğilim indeksi, kN/mm
- DPW : Kayaç süreksizlik ve frekans eğrisinden elde edilen indeks değeri, m

2.3.13 Rostami yaklaşımı

Bu yaklaşım; makine kesici kafa gücü, itme kuvveti, kesme kuvveti gibi makine parametrelerinin, performans tahmini için basit simülasyon modellerinin kullanılmasıyla geliştirilmiştir. 2.23 ve 2.24 eşitlikleri ile makine performansı tahmin edilebilir. Bu modelin geliştirilmesinde tünel açma makinelerinin tasarım parametreleri detaylıca kullanılmıştır [34].

$$ROP = p.RPM \cdot \frac{60}{1000} \quad (2.23)$$

$$AR = ROP \cdot U \cdot 24 \quad (2.24)$$

- ROP : TBM ilerleme hızı, m/h
- p : Kesici kafanın dönüşünde elde edilen kesme derinliği, mm/devir
- RPM : Kesici kafa dönüş hızı, devir/dak
- AR : Günlük ilerleme hızı, m/gün
- U : Makineden faydalanma oranı

2.3.14 Hamidi ve arkadaşları yaklaşımı

Bu yaklaşımda, kaya kütlesi sınıflama sistemi (RMR) kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen eşitliklerle sert kaya formasyonlarda kazı yapan tam cepheli tünel açma makinelerinin performansları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen lineer regresyon modeli eşitlik 2.25' te ve lineer olmayan regresyon modeli ise eşitlik 2.26' da verilmiştir [35].

$$FPI = 4,161 + 0,091.UCS + 0,077.RQD + 0,117.JC + 1,077.Log(\alpha) \quad (2.25)$$

$$FPI = 9,401 + 0,397.Log(\alpha) + 0,011.JC^2 + 1,14.E - 5.RQD^3 + 1,32.E - 8.UCS^4 \quad (2.26)$$

- FPI : TBM arazi ilerleme hızı, m/h
- UCS : Kayacın tek eksenli basınç dayanımı, MPa
- RQD : Kaya kalite belirteci
- JC : Kaya kütlesi çatlak koşulu indeksi
- α : Süreksizliklerin tünel eksenine ile oluşturduğu açı, derece

2.4 Tünel Açma Makinelerinde Kullanılan Keskiler

Tam cepheli tünel açma makineleriyle en verimli kazıyı yapabilmek için uzun yıllardır çeşitli keskinin geliştirilmesine çalışılmış ve birçok uygulama başarıyla hayata geçirilmiştir.

2.4.1 Tungsten karbür butonlu keskiner

Tungsten karbür butonlu keskinerde, butonlar keski üzerinde çok yakın aralıklarla yerleştirildiği için kayayı çok küçük parçalara ayırırlar ve bu sebepten birim hacim kayayı kesmek için çok yüksek spesifik enerji gereksinimi ortaya çıkar. Bunun yanı sıra kesilen parçacıklar keski yüzeyindeki butonların aralarına sıvanarak kesme verimi düşmektedir. Bunlara ilave olarak, bu tip keskinerin şekillerinden ötürü yatak kapasiteleri bütün keski kesitinde sabit değildir; bu da her noktadan sabit yük alma imkanını ortadan kaldırmaktadır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20: Tam yüzeyli tungsten karbür butonlu döner keski [36].

2.4.2 Çok sıralı keskiner

Çok sıralı keskiner, bir kaç sıra halinde yerleştirilmiş tungsten karbür butonlu keskiner veya çok sıralı diskli keskiner olarak adlandırılırlar. Bu tipteki keskiner tam yüzeyli karbürü butonlu keskinere oranla daha etkili kazı yaparlar fakat yapısalıkları ve yatak kapasiteleri bir turluk kesici kafa hareketinde aynı problemlerle karşı karşıya kalmaktadır. Ayrıca bu özel keskinerde, bir turluk tam dönme hareketi makinede sadece bir yarıçap dönüşüyle gerçekleşir, diğer yerlerde kesici savrulmaları oluşur, bu da karbitlerin aşırı yıpranmasına sebep olur, dönme sürtünmeleri artar ve sonuç olarak daha fazla makine torkuna ihtiyaç duyulur. Yüksek spesifik enerji gereksinimi, kısıtlı ilerleme oranları, aşınma oranları göz önüne alındığında çok sıralı

tungsten karbür butonlu ve çok sıralı disk keskilerin TBM’lerde kullanımına gerek duyulmamaktadır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21: (A)Çok sıralı tungsten karbür butonlu keski,(B)Çok sıralı disk keski [36].

2.4.3 Disk keskiler (V tip, CCS tip)

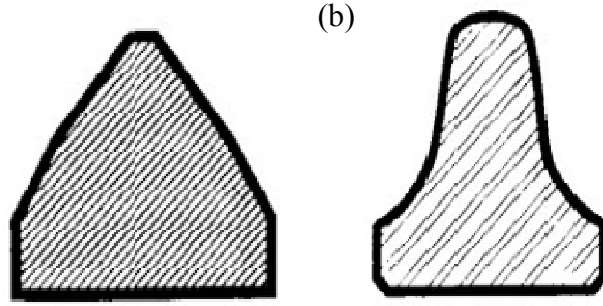
Disk keskiler diğer döner keskilere oranla birbirini sıralı olarak takip eden kazı sistemleriyle yüksek kazı verimi sağlar (Şekil 2.22). Tek noktadan yükü aldıkları için yüksek yatak kapasiteleri sayesinde daha derin kesme derinliklerine ulaşırlar ve bu keskiler TBM kafasının istenilen bölgesine yerleştirilebilirler. Pahalı olmalarına karşın en önemli avantajlarından birisi ise keskinin üzerinde kesmeyi gerçekleştiren ring’in aşındıktan sonra yenilenebilmesidir. Bu sayede TBM tünelciliğindeki keski maliyetlerinin düşürülmesine olanak sağlanmıştır.



Şekil 2.22: Tek diskli keski [36].

Tek diskli keskilerin geometrisini keskilerin çapları ve kesme profilleri belirler. Bu tür keskilerle donatılmış bir kesici kafanın bir turluk dönüşü ile elde edilen keskiler arası mesafe ve kesme derinliği kesme prosesini oluşturur. Yaklaşık 20 yıl öncesine kadar, TBM’lerde kullanılan disk keskilerin uç açıları 60°’den 120°’ye kadar

değişmekteydi ve bu keskilere V tipli keskiller denilmekteydi (Şekil 2.23a). Yeni olan V tipli keskillerle yüksek ilerlemelere ulaşılsa da, uç açıları keskin olduklarından çabuk aşındıkları fark edilmiştir. Bu aşınmalarında ilerleme oranlarını zamanla düşürdüğü anlaşılmıştır. Yüksek kesme performansına ulaşabilmek ve aşınmaları azaltmak için ucu küt olan sabit kesitli (CCS) keskiller geliştirilmiştir (Şekil 2.23b). Böylelikle hızlı keski aşınmaları yüzünden makine performansının düşmesinin önüne geçilmiştir. Bu avantajları sayesinde CCS tip keskiller TBM endüstrisinde bir standart olarak kabul görmüştür.



Şekil 2.23: Disk keskillerde ring profili: (a) V-tip, (b) CCS tip.

Disk keskillerin performansını etkileyen diğer bir değişken ise ring in geometrisidir. Endüstriye ilk sunulduklarından bu yana, disk keskillerin çapları 12 inç'ten 19 inç'e kadar geliştirilmiştir (Şekil 2.24). Büyük boyuttaki keskilere yüksek itme kuvvetleri uygulandığında daha fazla ilerleme beklenmemelidir; bunun nedeni ise kaya ile temas ettikleri yüzeyin genişliğidir. Fakat bunun yanında daha yüksek yatak kapasiteleri ile daha fazla yük alabilirler, böylelikle de daha az arıza ve daha iyi performans verileri elde edilebilir. Bunlara ilaveten, büyük keskiller kesici kafanın bir dakikalık dönüşünde daha yavaş dönerler ve daha az ısı yayılımı olur. Büyük keskillerin yüzey alanları küçük keskilere oranla daha büyük olduğundan, kesici kafanın bir turluk dönüşünde daha az aşınmaya maruz kalırlar.



Şekil 2.24: Farklı çaplardaki ring boyutları [20].

2.5 Kesme Teorileri

Teorik kesme modellerinin başlangıcı, keskinin kaya yüzeyine girmesiyle başlayan fiziksel kırılma prosesi ve daha sonra belirtilen kırılma zonlarının matematiksel modellerinin önerilmesiyle olmuştur. Modelleme çalışmalarında deneysel sonuçlar da yapılan önermeyi doğrulamak amacıyla yapılmaktadır. Fakat kesme işleminin çok karmaşık olması, kesme model oluşumunu önemli ölçüde etkilemektedir.

2.5.1 Uç batma teorileri

Fairhurst ve Lacabanne, döner ve darbeli sondaj tekniklerinin üzerinde çalışıp, keski açısının yüzey çip formasyonu üzerindeki etkilerini belirlemeye çalışmışlardır ve keskinin kayaca temasını 3 ana gruba ayırmışlardır [37]:

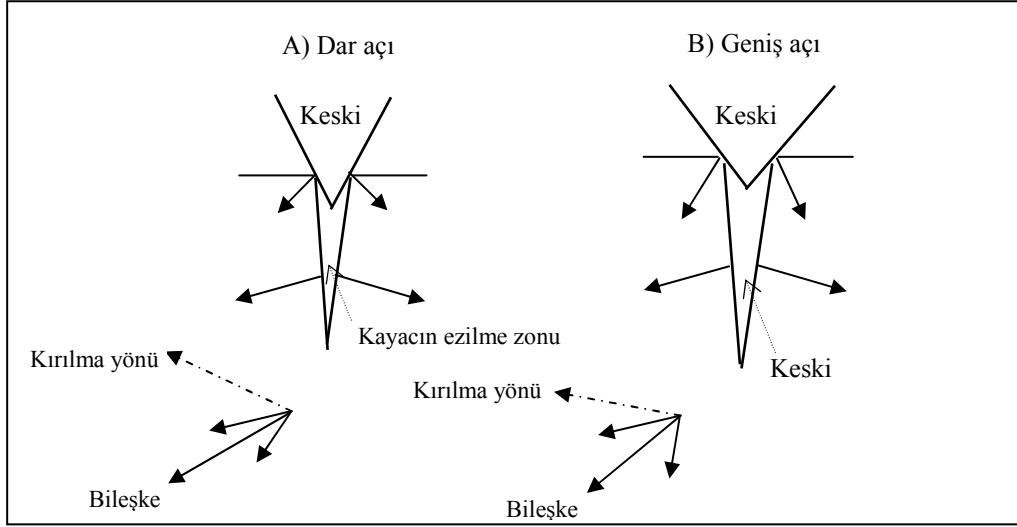
- Yüzey düzensizliklerinin kırılarak kayaya temas edilmesi
- Kayanın elastik deformasyonu
- Kayaca doğrudan temas

Keskinin kayaya temas ettiği bölgede bir hidrostatik gerilim oluştuğunu söylemişlerdir. Bu hidrostatik gerilim, kırıklı zon üzerinden aktararak yüzey boyunca ani bir kırılma oluşturmaktadır. Bu kırık yayılması, serbest yüzeye ulaştığında çip oluşmaktadır (Şekil 2.25). Kırılmış bölge ve ana kayaç arasındaki tek eksenli basınç dayanımı azalmaktadır. Aynı zamanda, ana kayaç ve kırık zon arasındaki tek eksenli basınç dayanımı bileşenleri de aşağıya inmektedir. Keski açısının büyümesiyle, daha büyük bir kırılma zonu meydana gelmektedir. Daha keskin bir keskinde, bu gerilim bileşenleri daha büyüktür ve serbest yüzeye daha küçük bir açıyla daha fazla yaklaşmaktadır. Bu yolla var olan enerji kırılmış kayayı geçip yüzeye intikal etmekten çok, çip oluşturma için kullanılmış olur [37].

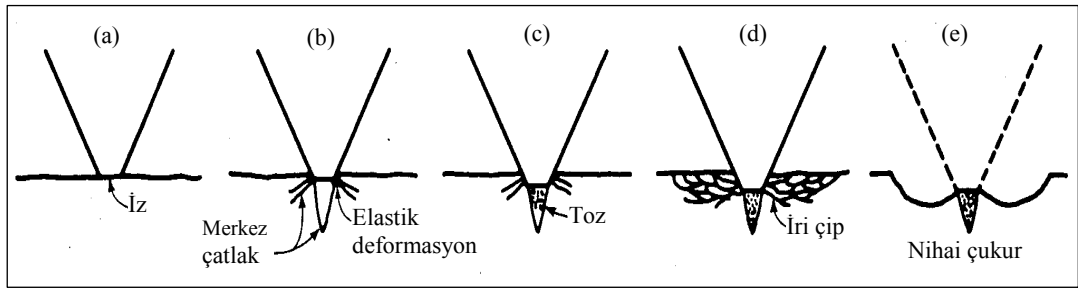
Hartman, keski açısının küçülmesiyle oluşan daha büyük çiplerin deneysel incelemelerini yapmıştır. Kama keski ile kesmede gerçekleşen olayları aşağıdaki gibi belirlemiş ve Şekil 2.26'daki grafikte özetlemiştir [38].

- Keskinin kayayla teması esnasında kırılan kaya yüzey düzensizlikleri
- Kayanın, keski yükleri altında gösterdiği elastik deformasyon
- Kayanın merkez bölgesinin kırılması
- Kırılan bölgeden yüzeye doğru dairesel çatlakların oluşması

- Kırılan bölgenin dağılması ve keskinin yüzeyle temasa devam etmesi



Şekil 2.25: Kama keskinin basitleştirilmiş kuvvet sistemi [37].



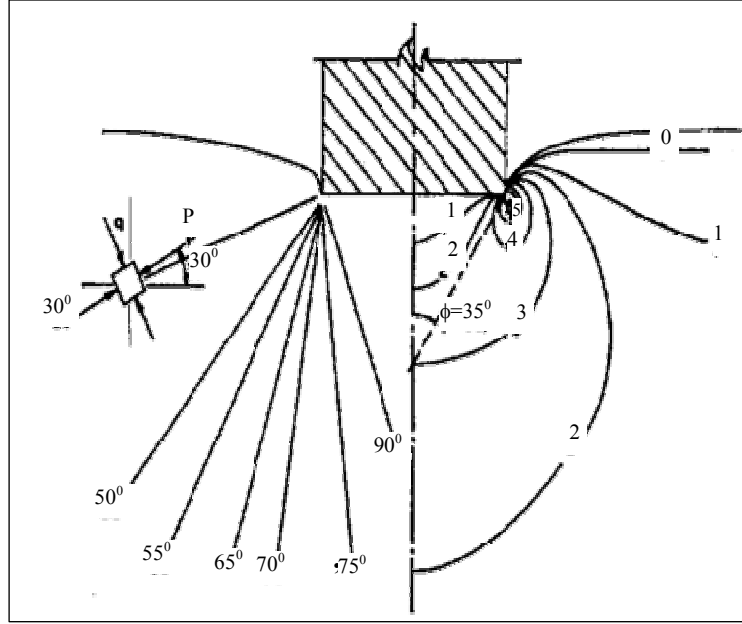
Şekil 2.26: Kama keski altında kaya çatlak serisi ve kırılma formu [38].

Tandanand ve Hartman, kama şekilli çentiklerin statik kuvvet altında stres dağılımlarını farklı keski açılarıyla analiz etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda elde ettikleri bulguları aşağıdaki gibi özetlemişlerdir [39].

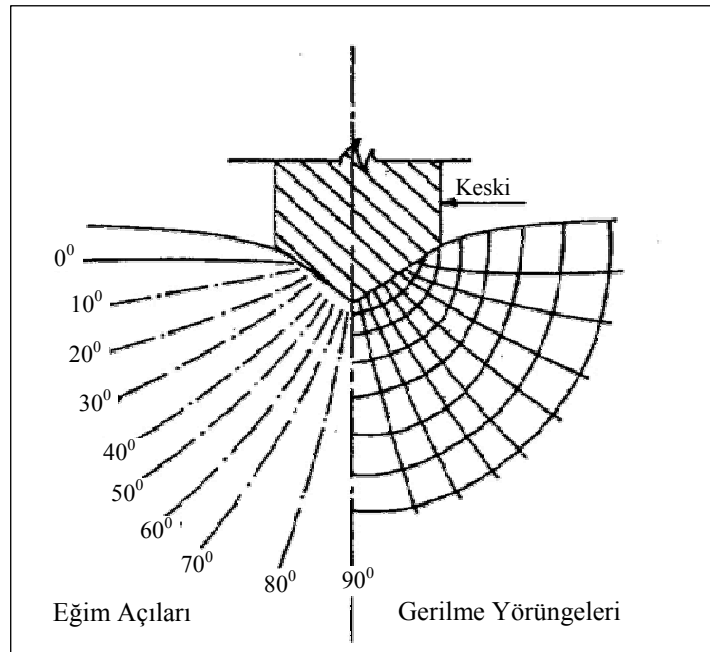
- İlk yük verildiğinde, baskı, keskinin kenarlarında toplanır ve ilk bu bölgede kırılmalara yol açar
- Yük arttırıldığında, gerilme kuvveti keskinin merkez kısmına geçer ve burada açılma kuvvetle birleşip en yüksek kesme gerilmesini oluşturur
- Eğer uygulanan kuvvet malzemenin yükleme altındaki kesme gerilmesi dayanımından daha yüksek bir kesme gerilmesi oluşturuyorsa, büyük bir açılma kırılma ve yüzeyde bunu takip eden kesme gerilmesi eğrisi boyunca yukarıya doğru oluşan kırılmalar başlatır (Şekil 2.27-29). Ana kırılmanın boyutu ve kesme kırılmalarının nitelikleri; uygulanan kuvvetin büyüklüğüne,

kamanın şekline, malzemenin özelliklerine ve sınır koşullarına göre değişmektedir

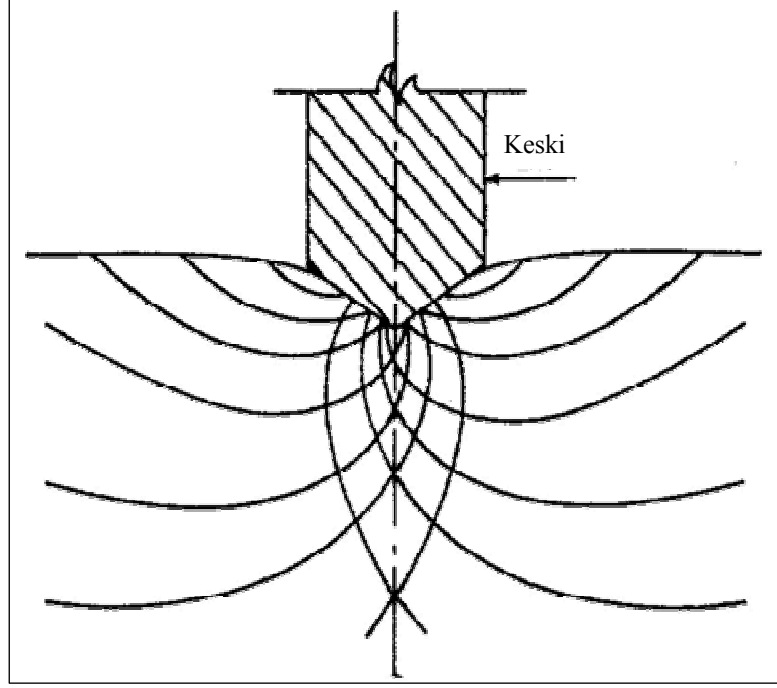
- Keskinin altında, art arda oluşan kırılmalara bağlı olarak yeni kırıklar oluşur. Kırıkların yönü, keskinin kenarlarından geçen eğrileri aşağıya doğru takip etmektedir
- Kesme sonucu oluşan yüzeyin geometrisi keskinin açısına ve uygulanan kuvvetin büyüklüğüne bağlıdır



Şekil 2.27: Birincil eğim açıları [39].



Şekil 2.28: Eğim açıları ve ana gerilim eğrileri [39].



Şekil 2.29: Kesme gerilmesi eğrileri [39].

Frocht ve Hetenyi, iki boyutlu analizlerde, X ve Y doğrultularındaki başlıca gerilmelerin büyüklüklerini, kesme farkı metodunu kullanarak belirlemişlerdir. **2.17** ve **2.18** gerilme değerlerini hesaplamak için elde etmişlerdir. σ_x ve σ_y değerleri yani X ve Y doğrultularına paralel stresleri her keski için saptanmışlardır ve ana gerilmeler olan p ve q belirlenmiştir [40,41].

$$\sigma_y = \sigma_x - \sqrt{(p - q)^2 - 4\tau_{xy}^2} \quad (2.17)$$

$$\tau_{xy} = \frac{p - q}{2} \sin 2\theta \quad (2.18)$$

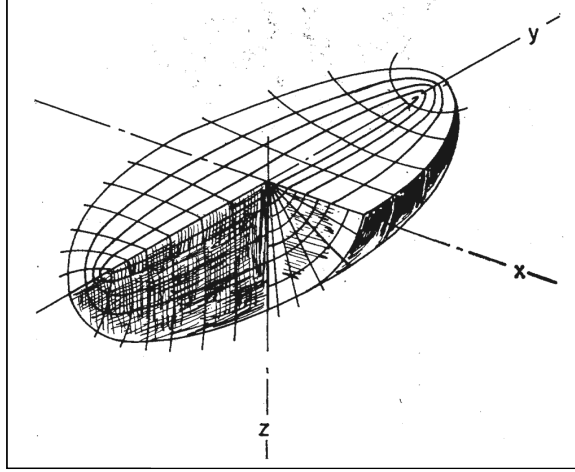
Burada;

σ_x, σ_y : Doğrultulara paralel basınç dayanımları, kg/cm^2

p, q : Ana gerilmeler

θ : Kutupsal koordinatlar, derece

Tandanand ve Hartman ise gerilim eğrileri izometrik formda üç boyutlu olarak çizmişlerdir. Ana gerilmelerin büyüklüklerinin belirlenmesi 2-D’de olduğu gibi elipsoit şeklin X,Y,Z doğrultuları boyunca ayrılmalardan elde edilmiştir (Şekil 2.30) [39].



Şekil 2.30: Keski altında üç boyuttaki stres eğrileri [39].

Cheatham, Coulomb kriterine bağlı kalarak, keskinin kayaca girmesi için kayma çizgilerinin olduğunu farz etmiştir. Farklı keski profillerinde çalışıp pürüzlü, pürüzsüz ve kör keskilerle “h” kadar ilerlemek için gereken kuvveti **2.19**, **2.20** ve **2.21** eşitlikleriyle önermiştir. Şekil 2.31’den 2.33’e kadar, bu çalışmada kullanılan kayma çizgilerinin alanlarını göstermektedir [42].

$$F_1 = \frac{h \cdot \sigma_0 \cdot \tan \beta}{\sin \phi} \left[(1 + \sin \phi) e^{2\beta \tan \phi} - (1 - \sin \phi) \right] \quad (2.19)$$

$$F_2 = \frac{h \cdot \sigma_0 \cdot (1 - \sin \phi)}{\cos \phi} \left[\left(1 + \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \right) (1 + \sin \phi) e^{2\zeta \tan \phi} - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \right] \quad (2.20)$$

$$F_3 = F_2 + 2r \sigma_0 [1 - \sin \beta + (1 + \beta) \cos \beta] \quad (2.21)$$

Burada;

F_1 : Pürüzsüz keski için gereken kuvvet (Şekil 2.31)

F_2 : Pürüzlü keski için gereken kuvvet (Şekil 2.32)

F_3 : Körelmiş dairesel uçlu bir keski için gereken kuvvet (Şekil 2.33)

h : Keskinin batma mesafesi

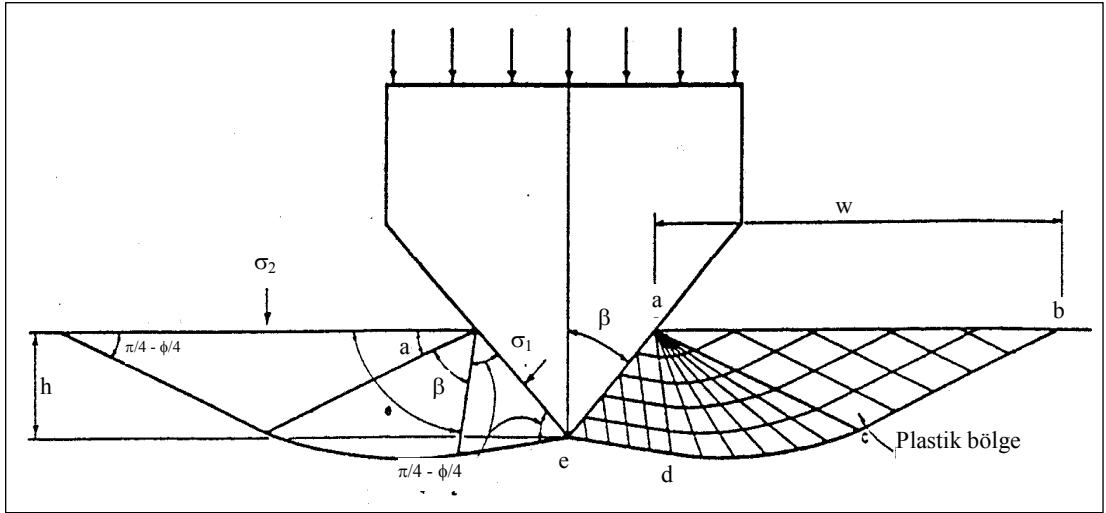
σ_0 : Kayacın sınırlanmamış tek eksenli basınç dayanımı

2β : Keskinin açısı

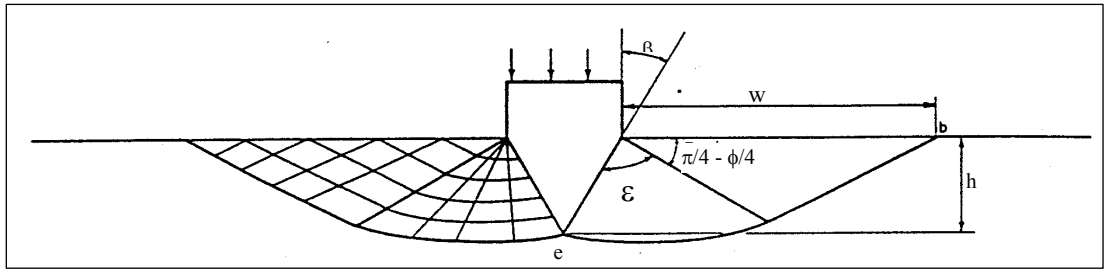
ϕ : Kayacın içsel sürtünme açısı

$$\zeta = \beta + \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right]$$

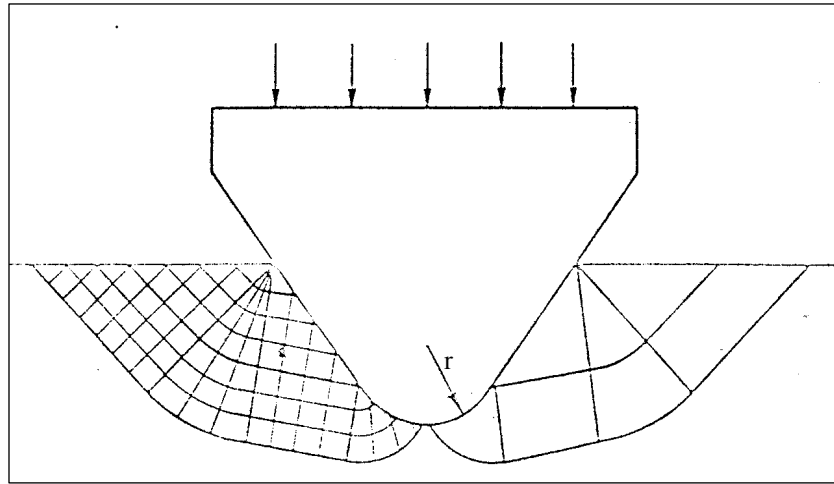
r : Körelmiş dairesel bir uçlu keskinin yarıçapı



Şekil 2.31: Pürüzsüz bir keski için kayma çizgileri alanı [42].



Şekil 2.32: Pürüzlü bir keski için kayma çizgileri alanı [42].



Şekil 2.33: Körelmiş bir keski için kayma çizgileri alanı [42].

Cheatham, kaya ve keski arasındaki sürtünme katsayısını da hesaba katarak keskinin kayaya girmesi için gerekli kuvveti hesaplamıştır. Bu da deneysel ve teorik sonuçlar arasında daha iyi bir uyum sağlamıştır. Eşitlik 2.22, kama tipli keskinin gösterildiği Şekil 2.34 ve 2.35'ten faydalanılarak yazılmıştır [43].

$$F = 2.b.h.\sigma'_n(f + \tan \beta) \quad (2.22)$$

Burada;

F : Baskı kuvveti

b : Keski uç genişliği

h : Kesme derinliği

f : Keski ve kaya arasındaki sürtünme

β : Temas açısı

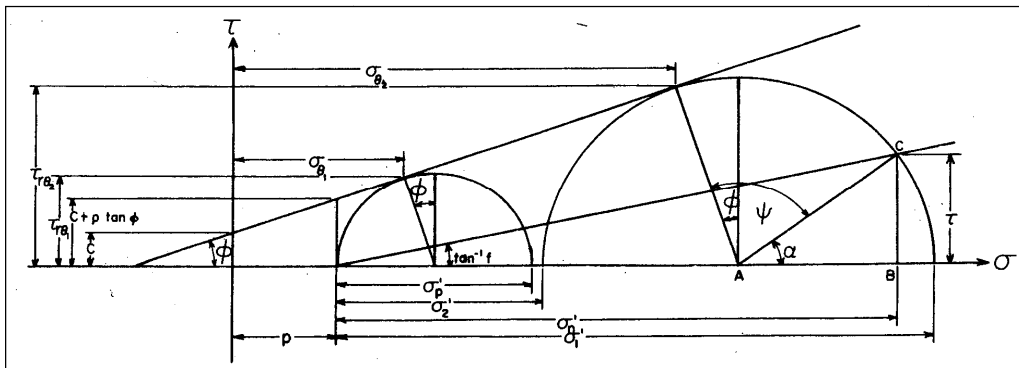
σ'_n : Kaya ve keski arasındaki normal gerilme

$$\sigma'_n = \frac{1}{2(1+f^2)} \left[\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sqrt{(\sigma'_1 + \sigma'_2)^2 - 4(1+f^2)\sigma'_1\sigma'_2} \right]$$

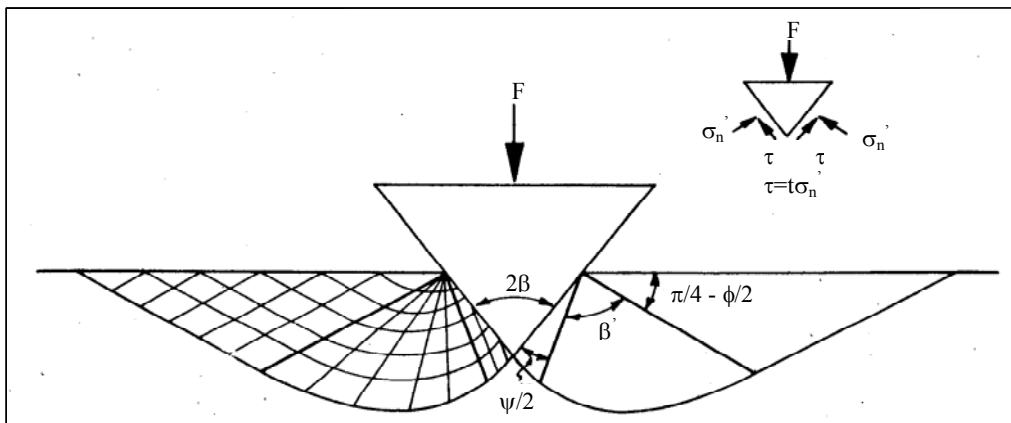
σ'_1 ve σ'_2 : Ana gerilme

$$\sigma'_2 = \frac{\sigma'_p(1 - \sin \phi)}{2 \sin \phi} \left[e^{2\beta' \tan \phi} - 1 \right]$$

$$\sigma'_1 = \frac{\sigma'_p}{2 \sin \phi} \left[(1 + \sin \phi) e^{2\beta' \tan \phi} - (1 - \sin \phi) \right]$$



Şekil 2.34: Mohr – Coulomb eğrisi [43].



Şekil 2.35: Keski ve kaya arasında sürtünme ile oluşan kayma hat alanları [43].

Pariseau ve Fairhurst, Cheatham'ın sınırlı deneysel veriye sahip modeli ve uzantılarını incelemişlerdir. Kama ucun kayaç üzerindeki ilerlemesini ve buna bağlı olarak kuvvet-yer değiştirme karakteristiklerini belirlemişlerdir. Eşitlik 2.23, 2.24 ve 2.25 ile kama, kaba ve kör bitler için kuvvet denklemlerini oluşturmuşlardır [44] .

$$F_1 = \frac{b.h.\sigma_0.\tan\beta}{\tan\phi.\tan\mu} [e^{2\beta\tan\phi} - \tan(\mu)^2] \quad (2.23)$$

Burada;

$$0 \leq \beta \leq \mu$$

$$\mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$$

ξ : Temas açısı ($\xi=\beta$)

b : Keski uç genişliği

h : Kesme derinliği

ϕ : İçsel sürtünme açısı

σ_0 : Kaya- keski arasındaki normal gerilme

$$F_2 = \frac{b.h.\sigma_0.\tan\beta}{\tan\phi.\tan\mu} \{ [1 + \sin\phi(\cot\beta.\tan\mu - 1)] e^{2\xi\tan\phi} - \tan(\mu)^2 \} \quad (2.24)$$

Burada;

$$0 \leq \beta \leq \mu$$

$$\xi = \frac{\pi}{2} - \pi + \beta$$

$$F_2 = \frac{b.h.\sigma_0.\tan\beta}{\tan\phi.\tan\mu} [e^{2\xi\tan\phi} - \tan(\mu)] \quad (2.25)$$

Burada;

$$0 \leq \beta \leq \pi/2$$

$$\xi = \frac{\pi}{2}$$

Reichmuth, kama keskinin kaya yüzeyine girişi esnasında üç aşamanın olduğunu varsaymıştır (Şekil 2.36 ve 37). Bunları, (1) ilk kırılmadan önce, (2) ilk ve ikinci kırılma arasında ve (3) ikinci kırılmadan sonra olarak tanımlamıştır. Aşağıda verilen eşitlikler ile stres ve strain tahmininin yapılabileceğini öngörmüştür [45].

$$\sigma_R = \frac{2P}{\pi.t} \left(\frac{\cos \alpha}{R} \right) \quad (2.26a)$$

$$\sigma_\alpha = 0 \quad (2.26b)$$

$$\tau_{R\alpha} = 0 \quad (2.26c)$$

$$\varepsilon_R = \frac{2P}{E.\pi.t} \left(\frac{\cos \alpha}{R} \right) \quad (2.27a)$$

$$\varepsilon_\alpha = \frac{-2\nu P}{E.\pi.t} \left(\frac{\cos \alpha}{R} \right) \quad (2.27b)$$

Şekil 2.36’da görüldüğü üzere, birinci kırık keskinin kazı yüzeyini geçerkenki var olan çekme gerilmesinin aşılmasıyla meydana gelmektedir. Bu kırık, çatlak tipinin şekline göre gerekli çekme gerilmesinin aşılmasıyla aşağıya doğru ilerlemektedir ve ikincil kırıklar oluşmaktadır. Bu birincil kırıktan sonra, çevre çatlakları çeyrek boşluklar olarak ikiye ayrılmaktadır. Gerilme ve çekme için denklemler 2.28’deki gibi elde edilmiştir [45].

$$\sigma_R = \frac{4P}{R.t} \left[\frac{N_Z \cos \left\{ \alpha - \left(\frac{\pi}{4} \right) \right\}}{\pi + 2} + \frac{N_X \sin \left\{ \alpha - \left(\frac{\pi}{4} \right) \right\}}{\pi - 2} \right] \quad (2.28a)$$

$$\sigma_\alpha = 0 \quad (2.28b)$$

$$\tau_{R\alpha} = 0 \quad (2.28c)$$

$$\tan \beta \leq \frac{\pi - 2\mu_B}{2 + \pi.\mu_B}$$

$$N_Z = \frac{\sqrt{2}}{4} \left(\frac{1 - \mu_B \tan \beta}{\tan \beta + \mu_B} + 1 \right)$$

$$N_X = \frac{\sqrt{2}}{4} \left(\frac{1 - \mu_B \tan \beta}{\tan \beta + \mu_B} - 1 \right)$$

$$\tan \beta > \frac{\pi - 2\mu_B}{2 + \pi.\mu_B}$$

$$N_Z = \frac{\sqrt{2}}{4} \left(\frac{2 + \pi}{\pi} \right)$$

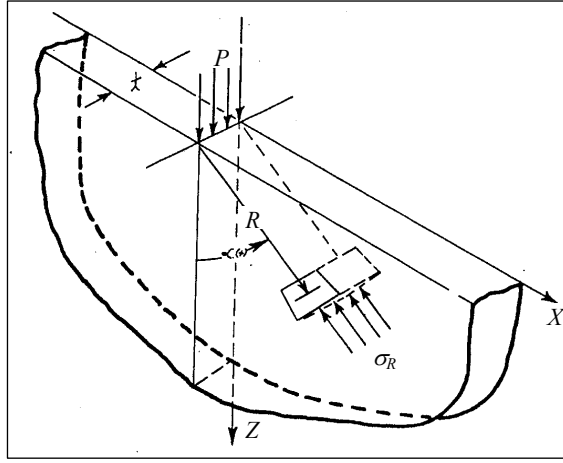
$$N_X = \frac{\sqrt{2}}{4} \left(\frac{2 - \pi}{\pi} \right)$$

μ_B : Keski aşınma katsayısı

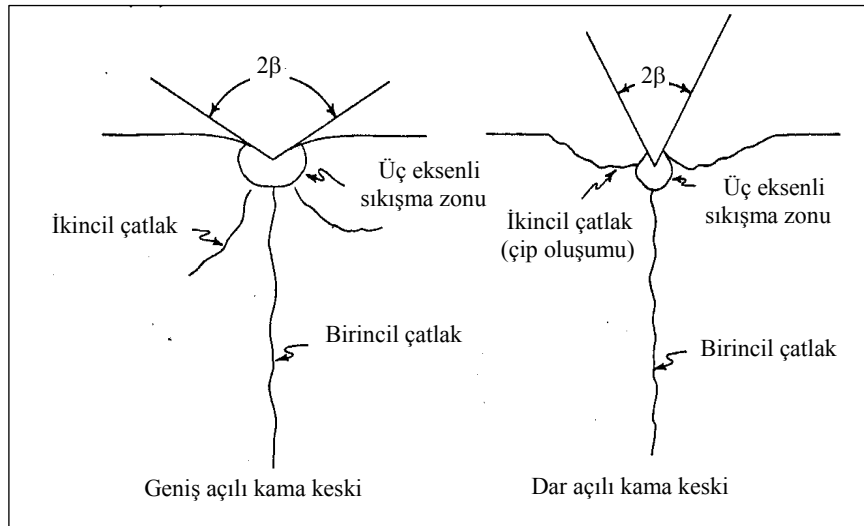
$$\varepsilon_R = \frac{2P}{E \cdot \pi \cdot t} \cdot \left(\frac{\cos \alpha}{R} \right) \quad (2.28d)$$

$$\varepsilon_\alpha = \frac{-2\nu P}{E \cdot \pi \cdot t} \cdot \left(\frac{\cos \alpha}{R} \right) \quad (2.28e)$$

İkincil kırıklar ise şu şekilde oluşmaktadır. Çekme gerilmeleri boş yüzeylere doğru ilerlerken çipler oluşur ve bu da stres ve strain oluşumunda sınır durumları değiştirir. Bu durumun matematiksel olarak formülasyonunun zorluğundan ötürü, çentiğin son aşamasındaki stres ve strain'in tahmini için 2.27a ve 2.28a'nın kullanımı Reichmuth tarafından önerilmiştir [45].



Şekil 2.36: Reichmuth teorisi [45].



Şekil 2.37: Kama uç altında oluşan çatlaklar [45].

Paul ve Sikarskie, kama uçların kırılmalara malzemeye doğru ilerlerkenki durumlarını modellemişlerdir. Bu teoremin nitel tanımlaması Şekil 2.38'de verilmiştir. Kama uç

Bu modelde, Şekil 2.39’da gösterilen matematiksel modellemeyi elde edebilmek için birçok basitleştirme yapılmıştır. Çip formunun oluşumunun bir hat boyunca kama uçtan serbest yüzeylere doğru ψ açısallığı ile yayıldığı öne sürülmüş ve çip düzlemi boyunca her yerde Mohr-Coulomb kriteri göz önünde tutulmuştur. Şekil 2.40’ta gösterildiği üzere d_i^* ve d_{i+1}^* , i inci ve $i+1$ inci çipin şekil aldığı (oluştugu) yerde penetrasyonu göstermektedir. d_i^* ve d_{i+1}^* ’e kadar olan penetrasyona $i+1$ inci döngü olarak gösterilmiş ve kırma prosesi olarak tanımlanmıştır. d_{i+1}^* penetrasyon seviyesine ulaşıldığında, Mohr-Colomb yenilme kriterinde bir gerilim alanına ulaşılmakta ve kayaç arzulanan yönde (ψ) çatlamaktadır. Bu varsayım temel alındığında, birim hacimdeki kayaç kazısında, enerji ve çip oluşumu için elde edilecek kuvvetler eşitlik **2.29**, **2.30** ve **2.31** ile ifade edilebilir [46].

$$d_{i+n}^* = \left(\frac{k}{k-K} \right)^n d_i^* \quad (2.30)$$

$$\bar{E} = \frac{k K}{2(2k - K)} \tan \psi \quad (2.31)$$

Burada;

K : Maksimum kuvvet noktalarını birleştiren doğrunun eğimi, %

k : Kırma esnasında kuvvet-penetrasyon eğrisinin eğimi, %

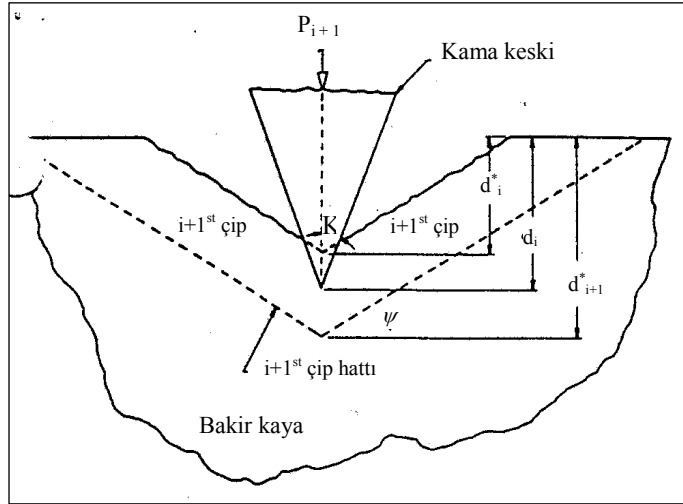
n : Döngü sayısı

$\bar{E}$: Kazılan kayacın birim hacim ağırlığı, N/m²

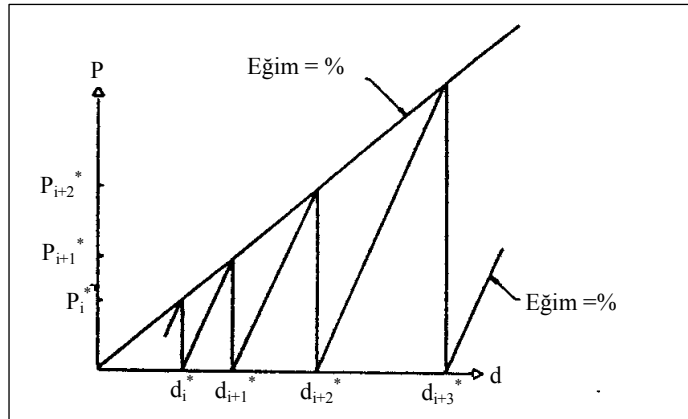
θ : Keski uç açısının yarısı, derece

ϕ : Kayanın içsel sürtünme açısı

ψ : Kırılma açısı = $45^\circ - \frac{\theta + \phi}{2}$



Şekil 2.39: Kama ucun matematiksel idealizasyonu [46].



Şekil 2.40: Kuvvet ve kesme derinliği etkileşiminin grafiksel gösterimi [46].

Ayrıca Paul ve Sikarskie, eğer $\theta + \phi < 0$ ise belli bir kama açısından sonra çip oluşmayacağını tahmin etmişlerdir. Kayaçların içsel sürtünme açıları 15° ’den 60° ’ye kadar değişiyorsa, maksimum kama uç açıları 60° ’den 150° ’ye ulaşacağı söylenebilir.

Miller ve Sikarskie, Paul ve Sikarskie tarafından geliştirilen teoriyi 1968 yılında daha da geliştirmişlerdir. Bunu yaparken koni, küre ve piramit şekilleri ile üç boyutlu çalışmışlardır. Keski ucundaki kuvvetin, ilerleme uzunluğundaki alan boyunca orantılı olduğunu ve gerçek çip oluşumları arasındaki ilişkinin lineer olmamasından ötürü, spesifik enerjinin ilerlemenin bir fonksiyonu olabileceğinin sonucuna varmışlardır [47].

Benjumea ve Sikarskie ise yaptıkları çalışmalarda, yataklanma düzlemleri ve kaya malzemesindeki tabakalanma etkisini anlayabilmek için “wedge penetration theory” yi geliştirmişlerdir. Anizotropik ortamlarda teoriyi geliştirmek için Mohr-Coulomb kırılma kriterine Jaeger modifikasyonunu kullanmışlardır [48-50]. Deneysel çalışmalarının sonuçları daha enteresan sonuçlar ortaya koymuştur; bu tür malzemelerdeki dik yöndeki spesifik enerji değerleri, uygun malzeme özelliklerinden daha farklı sonuçlar vermiştir.

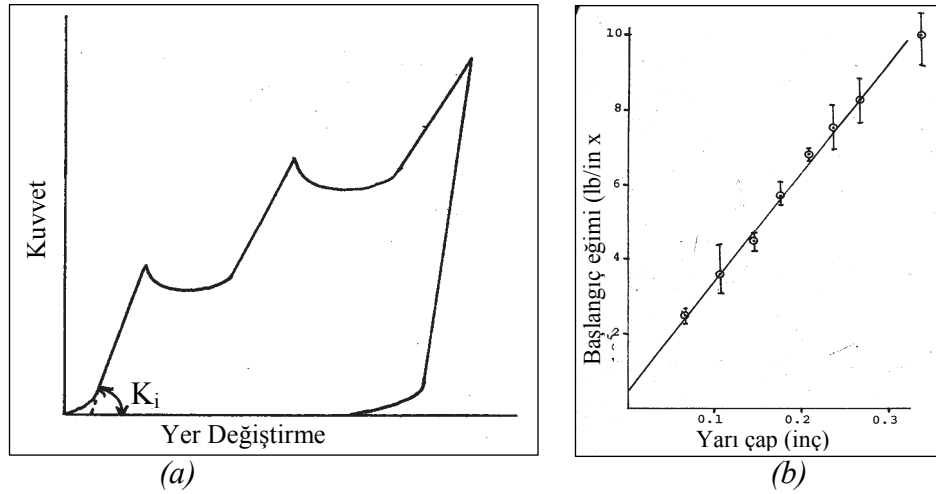
Dutta ise Paul ve Sikarskie teorisini kullanarak, kırılma zonu ve çip oluşumunu analiz etmiştir. Ezilme fazındayken, keskinin kaya ile temasında, kaya toz halinde ezilmeye başlamaktadır ve artan kuvvetler altında kompaktlaşmaktadır. Bu zonun boyutu keskinin geometrisinin, batma derinliğinin ve kayacın içsel sürtünme açısının bir fonksiyonudur [51].

Lundberg ise; Paul ve Sikarskie, Miller ve Sikarskie, Benjumea ve Sikarskie tarafından önerilen kesme modellerini kullanmıştır. Bunun amacı kama ucun altındaki kayanın davranışının ve Paul-Sikarskie tarafından önerilen kama uç açısı ilişkisinin deneysel olarak doğrulanarak incelenmesidir. Deneysel çalışmalarının sonucu; kama açısının 120° ’nin üzerinde olduğunda çip oluşumu sağladığı ve 120° ’nin üzerine çıkıldığında ise çip oluşumu aşarak kayacın pudra kıvamına geldiği şeklinde özetlenebilir. Bu sonuçtan yola çıkılarak, sivri keskilerle çiplerin daha etkin bir şekilde oluşabileceği söylenebilir [52].

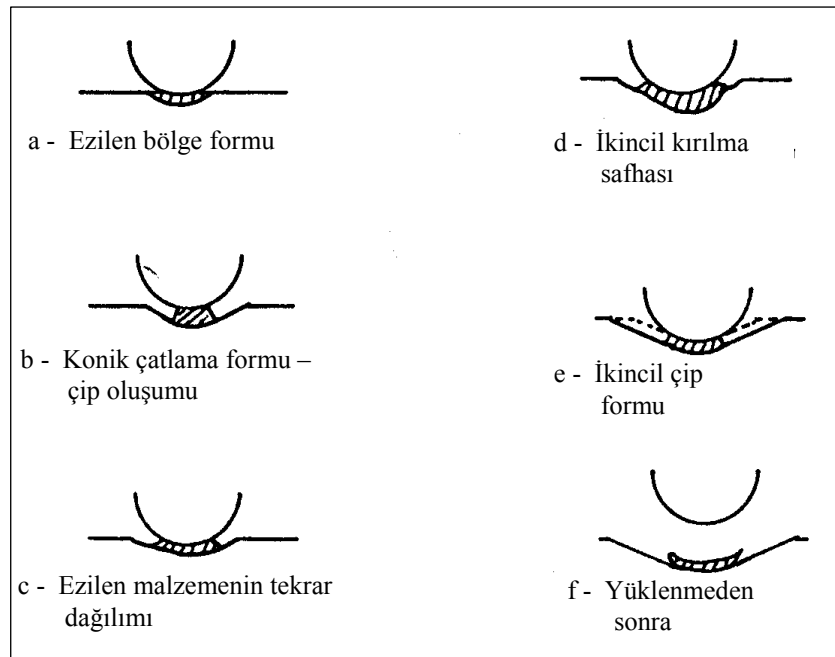
Lundqvist, tek bir keskinin ortalama kuvvet değişim eğrilerinin yarıçapla orantılı olduğunu varsayarak, kesme esnasında hilal şeklinde yeniden kompaktlaşan bir yapının tanımlamasını yapmıştır. Şekil 2.41 granitte 8 farklı keski için anlık

eğimlenmelerin deneysel sonuçlarını göstermektedir. Bunun yanı sıra çoklu keski sistemi için kuvvet yer değiştirmelerinin, tek bir keski için olanların toplamı olarak ifade etmiştir [53].

Lindqvist ve Lai ise plastisite teorisini kullanarak elastik olmayan zonların tanımlamasını, ezilme zonlarının davranışını çalışarak ortaya koymaya çalışmışlardır. Lai, hidrostatik gerilme tarafından sıkıştırılan ve keski ile kaya yüzeyi arasında oluşan kaya tozlarının kompaktlaşarak oluşturduğu yeni malzemenin özelliklerinin sağlam kaya özelliklerine benzer olduğunu ileri sürmüşlerdir [54]. Lindqvist ise benzer tanımlama ile aynı örneği onaylamıştır. Şekil 2.42’de bu bilim adamlarının incelemeleri görülmektedir [54].



Şekil 2.41: Kuvvet-yer değiştirme diyagramı (a) ve birincil eğim (b) [53].



Şekil 2.42: Lindqvist yaklaşımı [54].

Lai ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri farklı bir çalışmada, ezilme zonlarının bütünleşmesi hakkında daha fazla çalışmalar yapmışlardır. Kompaktlaşarak oluşmuş yapının daha az enerji emmesine rağmen; ezilmiş kayanın sıkışma testlerinden sonra, yeniden kompaktlaşmış kırıntıların, kırıntı oluşumu işleminde negatif etkisi olduğunu belirlemişlerdir. Lindqvist ve Lai, kırılğan kayada laboratuvar testlerindeki öngörülerine dayanarak aşağıdaki sonuçlara dikkat çekmişlerdir [54].

- Sıkıştırılıp kırılmış kayanın mikro sertlik testi, ezik-kırık taşların tozunun plastik davranışını göstermektedir. Bir bit altında bu tarz kayaların elastik olmayan deformasyonlarını plastiklik teorisi altında ele alınmaktadır.
- Granit ve kumtaşının kırılmış materyalinin deformasyon özellikleri gevrek yapıdadır. Korunmuş tane iç içe kilitlenmesi, tanelerin şekli (orijinal ve çatlamış) ve çevrenme derecesi bu bağlamda önemli faktörlerdir.
- Kırılmış kayaç tozu, bir sondaj butonu veya disk kesici altındaki temas basıncından daha düşük basınçlarda birleşebilir. Kompaktlanmış hilaller çevrenmiş durum ve mevcut sondaj bitinin basıncından kolayca açıklanabilir.
- Gevrek kayaçların elastik olmayan bölgesi, alet-elastik olmayan bölge, elastik olmayan bölge-elastik matris arasındaki sürtünme ve iç sürtünme ile kısmen yerinde tutulur. Eğer bir kimyasal ajan tarafından bu sürtünme azaltılabilirse elastik olmayan bölge belki dışarı doğru sıkıştırılabilir. Kesikler arası elastik olmayan bölgenin ayrıştırılması sonrası penetrasyon artacaktır.

Cook, Hood ve Tsai, sert kayalarda keski yükü altındaki çatlak büyümesini tahmin edebilmek için bir seri laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kaya yüzeyinden ne kadar derine ilerlenebileceği hakkında gerekli olan gerilmenin tahmini için bir eşitlik önermişlerdir [55]. Bu denklem ve fonksiyonları eşitlik 2.32’de verilmiştir.

$$\sigma = \frac{E.p}{0,54.(1 - \nu^2).a} \quad (2.32)$$

Burada;

σ : Normal gerilme

E : Kayacın elastik modülü

- p : Ortalama yer değiştirme
v : Poission oranı
a : Punch yarıçapı

Bunun yanı sıra, punch yükünün en yüksek punch yükünün %45'ini aştığında kayada küçük hasarların meydana geleceğini ortaya çıkarmışlardır. Bu noktadan sonra, punch köşelerinde hertzian çatlaklar başlamaktadır. Yük artarken, bu çatlak stabil pozisyona kadar ilerlemekte ve mikro çatlaklar oluşmaktadır. En yüksek kuvvetlere ulaşılıncaya kadar mikro çatlak bölgesi genişlemektedir. Mikro atlak bölgesinin birleşiminde hacimsel bir genişleme olmakta ve bu genişlemiş bölgenin sonuçları çekme gerilme alanıyla birleşmektedir.

Pang, Goldsmith ve Hoo ise; kama uçlar için kırılma fazında kuvvet ilerleme ilişkisinin lineer fonksiyonu ve konik uçlar içinse ikinci dereceden fonksiyonu olarak tanımlanabileceğini göstermişlerdir. Bu alışma; Paul ve Sikarskie, Miller ve Sikarskie, Benjumea ve Sikarskie, Dutta, Lundberg tarafından yapılan çalışmaların geliştirilmişidir. Bu model, keskinin kaya ile temas alanına dayanmaktadır [56]. Kama tip ve konik tip keskiler için kuvvet gereksinimleri eşitlik 2.33 ve 2.34 ile hesaplanabilir.

$$F_{sw} = \sigma_o (\sin \theta + \mu \cos \theta) \left(\frac{2wx}{\cos \theta} \right) \quad (2.33)$$

$$F_{sc} = \left[\sigma_o (\sin \theta + \mu \cos \theta) \left(\frac{\pi \tan \theta}{\cos \theta} \right) \right] x^2 \quad (2.34)$$

Burada;

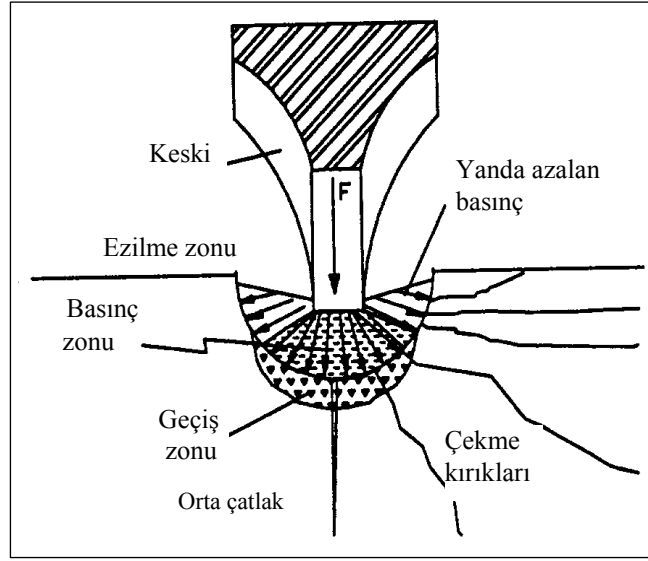
- F_{sw} : Kama keski için normal kuvvet
 F_{sc} : Konik keski için normal kuvvet
 σ_o : Kırılma zonundaki sabit stres
 θ : Koniklik açısının yarısı
w : Keskinin genişliği
x : Batma mesafesi

Alehossein, Detournay ve Huang, temeli boşluk genişleme modeline dayanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Burada kör keskiler tarafından kayalarda oluşan çentikleri analiz etmişlerdir. Bu model üç farklı zonun varlığı tarafından karakterize edilmiştir.

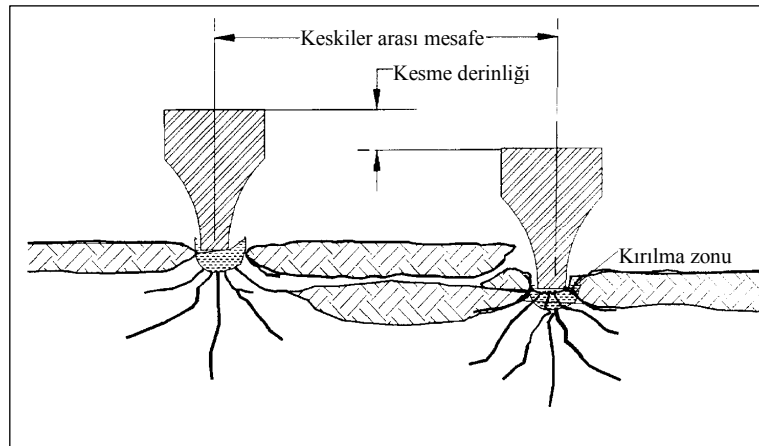
$$p = \frac{\sigma_c}{K_p - 1} \left[\frac{K_p(n+1)}{K_p + n} \xi_*^{\frac{n(K_p-1)}{K_p}} - 1 \right] \quad (2.35)$$

52

durmuşlardır [58-60]. Şekil 2.44-45 parçalanmış bölge oluşumunu göstermektedir. Disk keskinin geometrisinden dolayı, uygulanan dikey kuvvet (F kuvveti) keskinin ucunda yoğunlaşmaktadır. Bu, kayaçtaki ilk kırılmanın uygulanan kuvvet yoğunluğundan ötürü keskinin altında kalan bölgede olacağını tanımlamaktadır. Bunun anlamı; enerjinin büyük bir kısmının keskinin altındaki bölgeyi parçalamaya, kırmaya ve kayacı toz haline getirmek için harcanmasıdır. Enerjinin kalan kısmı ise iki keski arasındaki köprünün (çip) oluşumuna harcanmaktadır (Şekil 2.45).



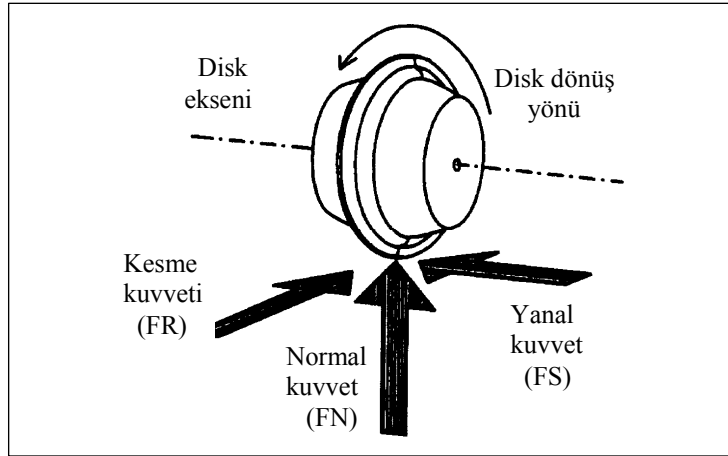
Şekil 2.44: Disk keski altındaki kırılma zonu [58].



Şekil 2.45: Disk keski ile kaya kesme [58].

Günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından disk keskilere gelen kuvvetler araştırılmıştır. Disk keskiye gelen kuvvetlerin şematik gösterimi Şekil 2.46'da görülmektedir. Bu kuvvetler (normal, yanal ve yuvarlanma kuvveti), tünel açma makinesinin kesici kafa tasarımı, optimizasyonu ve makine dizaynında

kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, bu kuvvetler kesici makinenin işletimi ve performansının tahmininde de kullanılmaktadır. Bu bilgiler, kaya koşullarında kazı yapacak makinelerin mekanik kazı sistemlerinin fizibilite çalışmalarında da önemli yer tutmaktadır. Normal kuvvetler, disk keskinin kayaya bastırması işleminde ilerlemeyi sağlayabilmek için gerekli olan itme kuvvetinin belirlenmesinde hesaba katılır. Yuvarlanma kuvvetleri, kesici kafanın dönüşü esnasında gerekli olan tork ve güç gereksinimini ifade eder. Yanal kuvvetler ise genellikle makine kesici kafanın balansında titreşimleri en aza indirmek için kullanılmaktadır.



Şekil 2.46: Disk keskiye gelen kuvvetlerin şematik gösterimi [58].

V tipli disk keskinin için Roxborough ve Phillips normal ve yanal kuvvetlerin hesabında bir model geliştirmişlerdir. Teorilerinin temeli disk keskinin normal kuvvetinin (F_N , kN) bulunmasıdır. Bu sonuca, kayacın basınç dayanımı (σ_c , MPa) ve disk keskinin kayaya temas yüzeyi A (mm^2)'nin çarpımından ulaşılmaktadır [5].

Şekil 2.47'de görüldüğü üzere, disk keskinin uç açısı (ϕ , derece) ve çapı (D , mm) kullanılarak, kesme derinliğinde (d , mm) kayaya bastırıldığında belirli bir F_N kuvveti altında iken keskinin ilerlemesi sağlanırsa, bir kesme hattı boyunca kesme uzunluğu (l) eşitlik 2.37 ile belirlenebilmektedir.

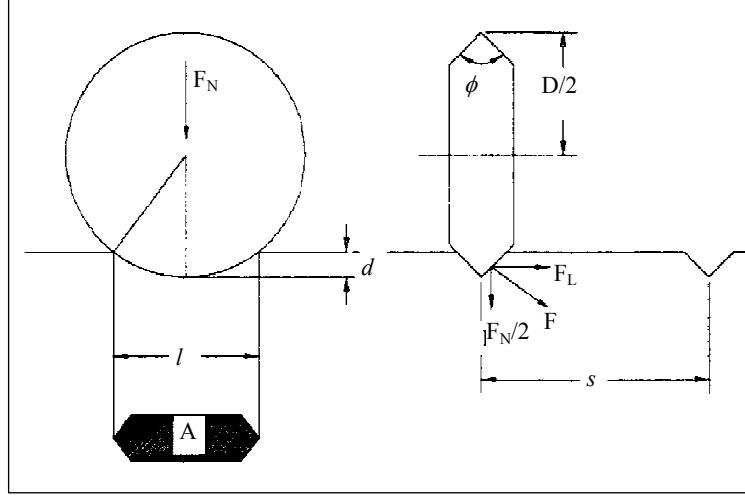
$$l = 2\sqrt{D \cdot d - d^2} \quad (2.37)$$

Böylelikle de disk keskinin kaya ile temas alanının hesabına (A) geçişi eşitlik 2.38 ile ifade etmişlerdir.

$$A = 2 \cdot d \cdot l \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.38)$$

Yukarıda tarif edilen eşitliklerden yola çıkarak normal itme kuvveti (F_N , kN) eşitlik 2.39 ile belirlenebilmektedir [5].

$$F_N = 4\sigma_c.d.\tan\frac{\phi}{2}\sqrt{Dd-d^2} \quad (2.39)$$



Şekil 2.47: Disk ilerlemesinin geometrisi [5].

Diske gelen yuvarlanma kuvvetinin hesabında ise F_N ile F_R arasındaki ilişkiler irdelenerek 2.40 eşitliği elde edilmiştir.

$$\frac{F_N}{F_R} = \sqrt{\frac{D-d}{d}} \quad (2.40)$$

2.39 no'lu eşitlik 2.40 no'lu eşitlikte yerine konularak, 2.41 no'lu eşitlikteki yuvarlanma kuvveti (F_R , kN) bulunmuştur.

$$F_R = 4.\sigma_c.d^2.\tan\frac{\phi}{2} \quad (2.41)$$

Roxborough ve Phillips, deneysel incelemelerinde, keskiler arası mesafenin (s) etkisi üzerinde çalışmalar yapmışlar ve keskiler arasında optimum bir mesafenin olması gerektiğini belirlemişlerdir. Eğer keskiler arası mesafe çok fazla artırılırsa yüksek kesme kuvvetleri elde edilir. V tipli keskiler için optimum keskiler arası mesafeyi 40-45 mm olarak belirlemişlerdir. Optimum s değerinde çalışılırsa, kesme hatları boyunca oluşacak etkileşimin de önüne geçileceğini ileri sürmüşlerdir. Örneğin; 42,5 mm keskiler arası mesafede 6 mm'lik kesme derinliğinde kazı yapılırsa s/d oranı yaklaşık 7 olur. s/d oranı kabaca 3 ile 7 arasında olduğunda, dilimler halinde çipler elde edilecektir. Çalışmalarında minimum 100 mm (3,9 inç) ve maksimum 200 mm (7,9 inç)'lik disk keskiler kullanmışlardır ve bu keskilerin hepsinde V tip'tir.

Roxborough ve Phillips, s ve d arasındaki ilişkiyi σ_c ve τ ile birleştirip eşitlik 2.42'yi ön görmüşlerdir [5].

$$\frac{s}{d} = \frac{\sigma_c}{\tau} \quad (2.42)$$

Burada;

τ : Kayacın kesme dayanımı, MPa

σ_c : Kayacın basınç dayanımı, MPa

Phillips, Bilgin ve Price; Roxborough ve Phillips'in modelini geliştirerek, çalışmalarında keski uç açısının etkisini incelemişlerdir. Kuvvetlerin tahmininde uç açısının etkisini belirleyerek 2.43 ve 2.44'teki eşitliklerde görüldüğü gibi çarpan olarak kullanmışlardır [61].

$$F_{Nr} = F_N . e^{Ar} \quad (2.43)$$

$$F_{Rr} = F_R . e^{Br} \quad (2.44)$$

Burada,

F_{Nr} : Normal kuvvet, kN

F_{Rr} : Yuvarlanma kuvveti, kN

r : Keski uç yarıçapı, mm

A, B : Her bir ilerleme seviyesi için sabitler

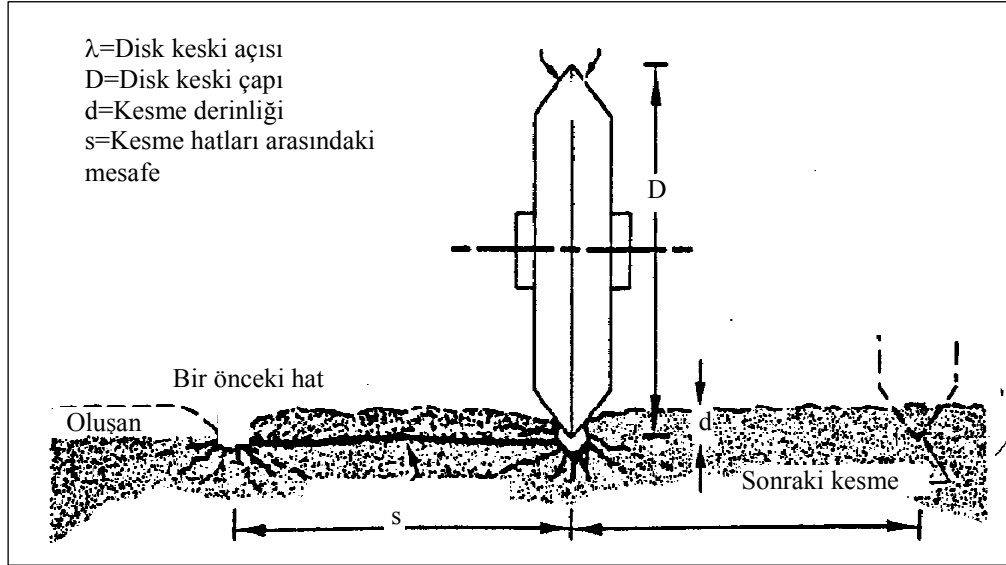
$$A = 0,0354 + \frac{0,6554}{p} \quad (r = 0,98)$$

$$B = 0,060 + \frac{0,383}{p} \quad (r = 0,87)$$

Phillips, Bilgin ve Price; farklı kaya tipleri üzerinde bir çok test yaparak A ve B'nin kaya tipinin bir fonksiyonu olduğunu tanımlamışlardır ve deneysel çalışmalarında test ettikleri kaya tiplerinde A ve B'nin bağımsız olduğunu göstermişlerdir.

Wang ve Ozdemir, çalışmalarında kayacın basınç dayanımı ve disk kontak alanının normal kuvvet ile orantılı olduğu sonucuna varmışlardır. Bunun yanı sıra keski mesafesi arasında mesafenin önemi üzerinde de durmuşlardır. Keski mesafesi, disk keski çapı, disk keskinin uç açısı, kesme derinliği, basınç dayanımı ve çekme dayanımını göz önünde bulundurarak yeni ve aşınmış keski üzerindeki çalışmaları sonunda

elde ettikleri veri tabanını kullanarak bir denklem formüle etmişlerdir. Şekil 2.48’de ise disk keski ile ideal bir kesme sistemi görülmektedir, ayrıca bu şekilde disk keski teorisini oluşturan parametreler de görülmektedir. Eşitlik 2.45, itme kuvvetinin teorik olarak tahminini sağlamaktadır [58].



Şekil 2.48: Disk keski ile kaya kesme [58].

$$F_N = D^{0.5} d^{1.5} \left[\frac{4}{3} \sigma_c + 2\sigma_s \left(\frac{s}{d} - 2 \tan \frac{\phi}{2} \right) \right] \tan \frac{\phi}{2} \quad (2.45)$$

Burada;

- F_N : İtme kuvveti, kN
- σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, MPa
- σ_s : Kesme dayanımı, MPa
- ϕ : Disk uç açısı, derece
- D : Disk çapı, mm
- s : Kesimler arası mesafe, mm
- d : Kesme derinliği, mm

Yuvarlanma kuvveti, eşitlik 2.45’teki geliştirilmiş normal kuvvet eşitliği ile sabit değerin çarpılmasından elde edilir. Sabit değerde bu iki kuvvet bileşeninin geometrik ilişkisinin ifadesidir. Bu sabitten genellikle kesme katsayısı eşitlik 2.46’da gösterildiği gibi (CC) kesme oranı olarak söz edilir (Şekil 2.49).

$$CC = \frac{(1 - \cos \gamma)^2}{(\gamma - \sin \gamma \cos \gamma)} \quad (2.46)$$

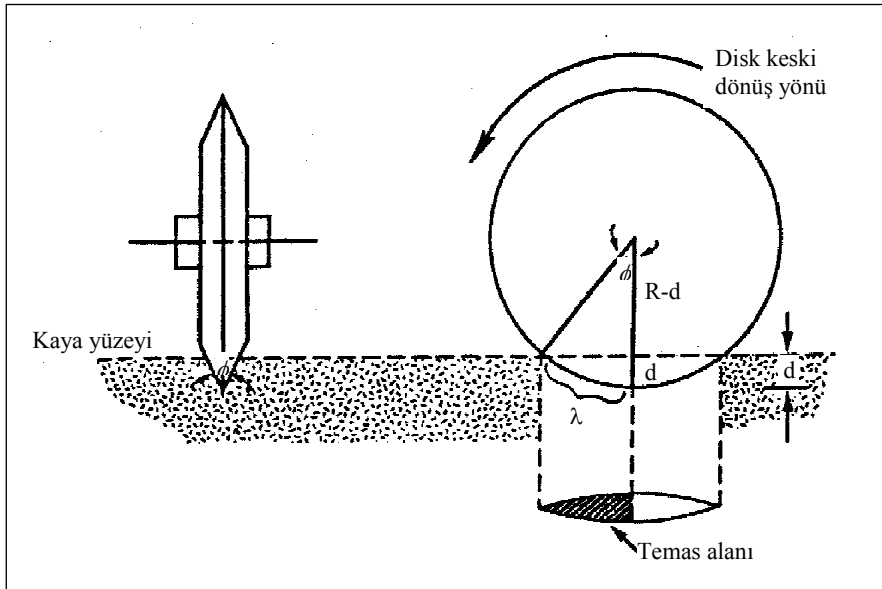
Burada;

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{R-d}{R}\right), \text{ kaya ile disk temas açısı, derece}$$

$R = D/2$, disk yarıçapı, mm

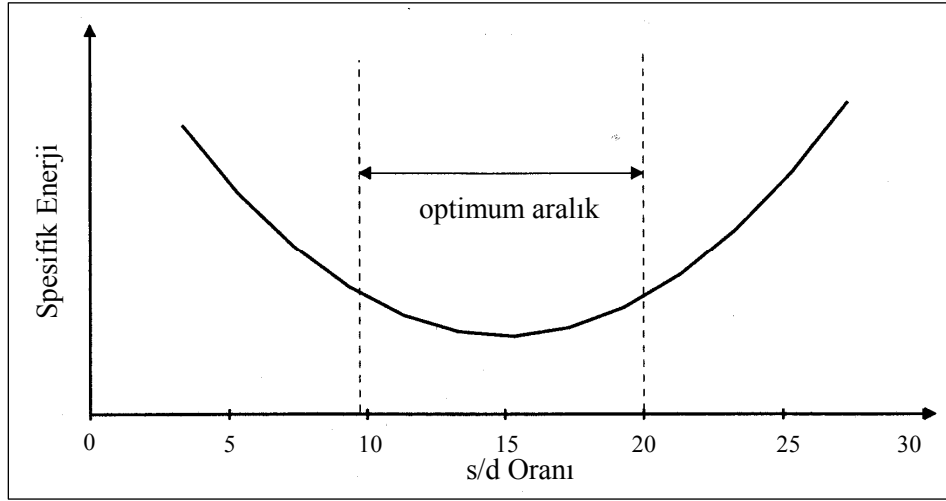
$FR=FN.CC$ olarak tarif edildiğinde, önceden belirlenen FN ve CC değerleri yerine konulduğunda, 2.47 eşitliği ile yuvarlanma kuvveti bulunabilir.

$$F_R = \left[\sigma_c d^2 + \frac{4\sigma_s \left(s - 2d \tan \frac{\phi}{2} \right)}{D(\gamma - \sin \gamma \cos \lambda)} \right] \tan \frac{\phi}{2} \quad (2.47)$$



Şekil 2.49: Kaya ile disk için kontak alanı [58].

Bunun yanı sıra, Ozdemir, optimum s/d oranı üzerinde de çalışmıştır. Eğer disk keskinler çok yakın yerleştirilirse çok küçük çipler elde edilir. Bu da yüksek spesifik enerji değeri demektir. Keskinler arası mesafe artırıldığında, çip boyutu yükselir ve spesifik enerji düşer. Fakat keskinler arası mesafe artmaya devam ederse, keskinler arası etkileşim azalmaya başlar ve spesifik enerji yükselmeye başlar. Sonuç olarak, keskinler arasındaki etkileşim durur. Bu durumda her bir keskin birbirinden izole bir biçimde kesme yapar. Bu çalışmalar sonucunda s/d oranının 10 ile 20 arasında olduğu bulunmuştur. Eğer kayaç, yumuşak ve kırılgansa, s/d oranı 10'a daha yakındır; sert ve kırılgan kayaç için ise s/d oranı 20 civarındadır. Bazen ise bu oranın 20'yi geçtiği gözlenmiştir. Şekil 2.50, optimum s/d ile spesifik enerji arasındaki ilişkiyi şematik olarak göstermektedir [58].



Şekil 2.50: Spesifik enerji ile s/d oranının değişimi.

Sanio, Roxborough tarafından türetilen eşitliklere karşılık olarak başka bir eşitlik önermiştir. Denklemin türetilmesinde, disk keskilerde çip oluşum mekanizmasına baskın bir şekilde sebep olan çekme çatlaklarını esas almıştır (Şekil 2.51). Bu ana yaklaşım, çiplerin üzerindeki çekme çatlaklarının incelenmesiyle tatmin edici sonuçlara ulaşmıştır ve diğer tatmin edici konu ise kayacın çekme dayanımının deneysel sonuçlar ile çok iyi korele edilebiliyor olmasıdır. Sanio'nun diğer bir önerisi ise keski altında parçalanmış zonun şeklinin dairesel olduğudur ve bunun yarıçapı da “d” kesme derinliğinde “q” sabiti olarak belirlenmiştir (Şekil 2.52). Kırılmış bölge basıncı, kayanın bir karakteristiğidir ve keski geometrisine bağlı değildir. Disk keski ile kaya arasında kalan temas alanının, bu kırılmış zon basıncı ile çarpılmasıyla belli kesme derinliği için eşitlik **2.48**'deki normal kuvvete ulaşmıştır [59].

$$F_N = 2.d \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \sigma_0 \quad (2.48)$$

Burada;

d : Kesme derinliği, mm

ϕ : Disk keskinin uç açısı, derece

σ_0 : Kırılmış zondaki hidrostatik basınç, kg/cm^2

σ_0 basıncını tahmin etmek için Ouchterlony tarafından önerilen teoriyi kullanmıştır. Eşitlik **2.49** ise çatlağın boyu, boşluğun yarıçapı ve σ_0 basıncı arasındaki ilişkiyi vermektedir [62].

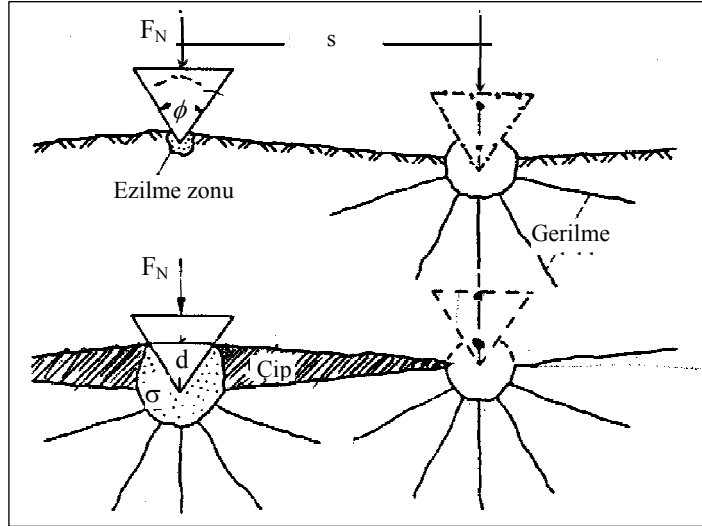
$$2.\sigma_0.r = k.c^{0.5} \quad (2.49)$$

Burada;

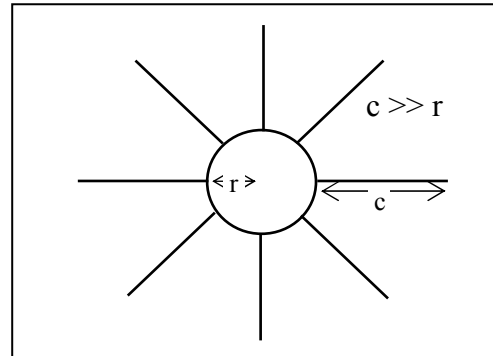
r : Boşluğun yarıçapı, cm

k : Kritik stres yoğunluk faktörü, kaya ve çatlak sayısına bağlı olarak

c : Çatlağın boyu, cm



Şekil 2.51: Sanio tarafından geliştirilen disk batma ve çip oluşumunun şematik gösterimi [59].



Şekil 2.52: Dairesel boşlukta çatlak ilerlemesi [59].

2.48 ve 2.49 numaralı eşitlikler birleştirildiğinde disk keskinlerdeki normal kuvvetlerin tayini için **2.50**'de gösterilen yeni bir eşitlik elde edilmiş olur.

$$F_N = \frac{k}{q} \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot c^{0.5} \quad (2.50)$$

Disk keskinin itme kuvveti (F_N), disk keskiye etki eden kuvvetlerin denge denklem entegrasyonu yapılarak eşitlik **2.51**'deki gibi yeniden yazılabilmektedir.

$$F_N = \frac{k}{q} \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \int_0^{(D \cdot p - p^2)^{0.5}} c(x) dx \quad (2.51)$$

Sanio, “c” parametresini eşitlik 2.50’de disk çapı (D), kesme derinliği (d) ve keskiler arası mesafe (s)’nin bir fonksiyonu olarak vermiştir, bu da Şekil 2.53’te görülmektedir. Şekil 2.54’te görüldüğü üzere 1. noktadan 2. noktaya giderken, çatlak boyunun da arttığı varsayılmaktadır. Diğer bir deyişle, bitişik kesme hattında çatlak büyümektedir. Bu varsayım esas alındığında, keskiler arasında artan çatlak boyu için **2.52** eşitliğini önermiştir. Entegrasyondan sonra, belirli bir kesme derinliğinde kaya üzerinde dönen disk için normal kuvvetin **2.53**’te ki eşitlik ile tahmin edilebileceğini savunmuştur [59].

$$c(x) \cong \frac{s}{(D \cdot d - d^2)^{0.5}} \cdot x \quad (2.52)$$

$$F_N = \frac{2 \cdot k}{3 \cdot q} \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot (d \cdot p - p^2) s^{0.5} \quad (2.53)$$

Şekil 2.54’te gösterildiği üzere, eğer keski yatağındaki sürtünme göz ardı edilirse, oluşan normal ve yuvarlanma kuvvetleri merkezden geçer. Eğer $D \cdot p \gg p^2$ ve $S_k = 2 \cdot k / 3 \cdot q$ (kesme sabitleri) ise F_N ve F_R eşitlik **2.54** ve **2.55**’te ki gibi türetilebilir [59].

$$F_N = S_k \cdot (D \cdot d \cdot s)^{0.5} \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.54)$$

$$F_R = \frac{4}{5} \cdot \left(\frac{p}{D}\right)^{0.5} \cdot F_N \quad (2.55)$$

Eşitlik 2.56’daki kesme sabiti S_k , stres yoğunluk faktörünün boyutudur ve bu da kuvvet/boy^{1,5}’tir. Sanio, S_k değerinin teorik olarak tanımlanamayacağı sonucuna varmış ve bu değer kayacın basınç dayanımına, radyal kırık sayısına ve kırık zonun geometrisine bağlı olduğunu belirtmiştir. Sanio, farklı kaya tiplerinde S_k ’yı tahmin edebilmek için doğrusal kesme testleri yapmıştır. Deney sonuçlarına göre S_k ’yı **2.56**’daki eşitlikle tanımlamıştır. Sanio’ya göre, S_k , kesme derinliğinden ve keskiler arası mesafeden çabucak etkilenen düzgün malzeme verisidir [59].

$$S_k = \frac{FN_{ort}}{\sqrt{D.s.d} \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (2.56)$$

Burada;

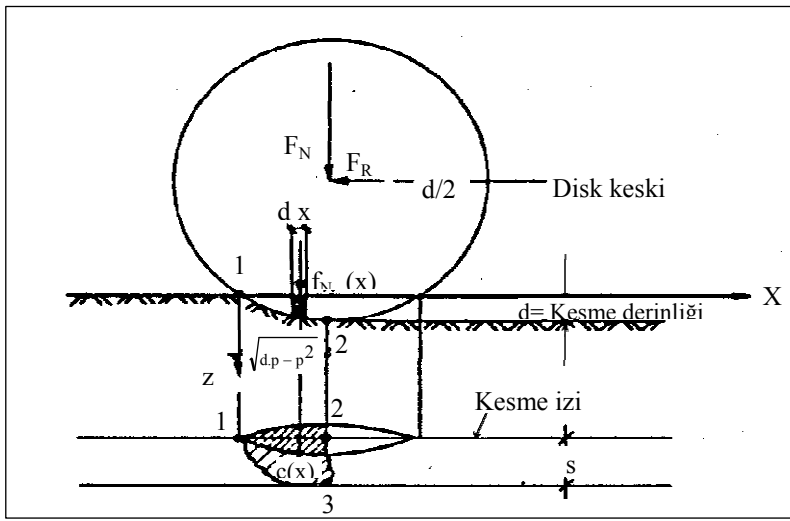
S_k : Ortalama kesme sabiti, $\text{kN/mm}^{1,5}$

FN_{ort} : Doğrusal kazı setinden elde edilen ortalama normal kuvvet, kN

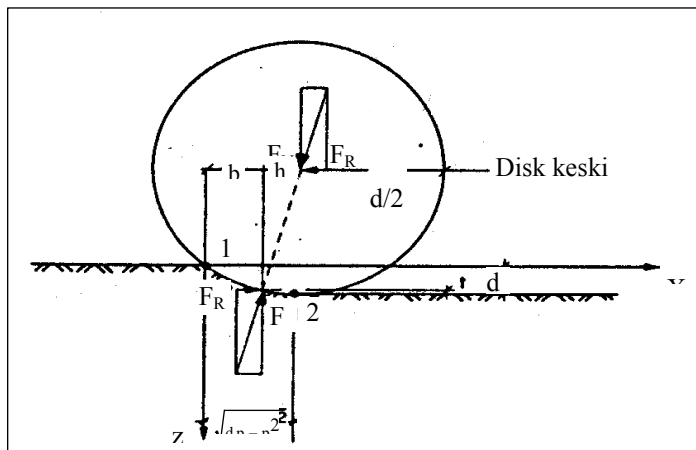
D : Disk çapı, mm

s : Keskiler arası mesafe, mm

d : Kesme derinliği, mm



Şekil 2.53: Sanio'nun disk keski geometrisi [59].



Şekil 2.54: Disk keskinde oluşan kuvvet dengesi [59].

Sato, masif kayanın elastik ve kırılma özelliklerini kullanarak FN ve FR kuvvetlerini tahmin edebilmek için bir model geliştirmiştir. Bu model laboratuvar sonuçları

kullanılarak yapılmış bir regresyon analizinden oluşmaktadır. Disk keskilerdeki FN ve FR kuvvetlerini tahmin etmek için türetilen bu ampirik eşitlikler **2.57** ve **2.58**'de verilmiştir [63].

$$F_N = A.P^m \quad (2.57)$$

$$F_R = B.P^n \quad (2.58)$$

Burada;

F_N : Normal kuvvet, kN

F_R : Yuvarlanma kuvveti, kN

Normal disk keski için A ve B katsayıları eşitlik **2.59** ve **2.60** ile hesaplanmaktadır.

$$A = K_T \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2} + \alpha\right) \cdot D^{1/2} \cdot S^{1/2} \quad (2.59)$$

$$B = K_R \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2} + \alpha\right) \cdot S^{1/2} \quad (2.60)$$

Burada;

D : Disk çapı, mm

ϕ : Disk açısı, derece

α : Disk dalma açısı, derece

Eşitlik **2.61** ve **2.62**'deki K_T ve K_R birer sabittir. Bu sabitler, laboratuvar deneylerinde kullanılan yedi farklı numune ve kesme verilerinden elde edilmiştir.

$$K_T [kN / mm^{3/2}] = 0,13 \cdot E^{0,36} \cdot K_{CB}^{0,23} \quad (2.61)$$

$$K_R [kN / mm^{3/2}] = 0,11 \cdot E^{0,40} \cdot K_{CB}^{0,28} \quad (2.62)$$

Burada;

E : Young Modülü, GPa

K_{CB} : Kırılma dayanıklılığı, MN/mm^{3/2}

Rostami ve Ozdemir, Şekil 2.55'te gösterildiği üzere, disk keski altında kalan kırılma basıncını hesaba katarak, bu keski için bir teori geliştirmiştir. Bu çalışması günümüzde TBM'lerde sıkça kullanılan sabit kesit alanlı (CCS) disk keski içindir. FN ve FR kuvvetleri, toplam FT ve kesme katsayısı kullanılarak eşitlik **2.63**'teki gibi tanımlanmıştır [3,60].

$$F_T = \frac{P.R.T.\gamma}{\psi + 1} \quad (2.63)$$

Burada;

P : Yüzeye uygulanan basınç, MPa

R : Disk keski yarıçapı, mm

T : Keski ucu kalınlığı, mm

ψ : CCS tip keski için ψ değeri sıfıra yakındır ve artan keski ağzı genişliği ile azalır. V tip keski için bu değer 1 civarındadır.

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{R-d}{R}\right)$$

R : Disk keski yarıçapı, mm

d : Kesme derinliği, mm

Bu eşitliklerde, P dışındaki bütün değişkenler bilinmektedir. P ise kesme geometrisi (keskiler arası mesafe ve kesme derinliği) ve kaya özelliklerinin (basınç ve çekme dayanımı) bir fonksiyonudur. Ezilme zonu için genel bir çözüm bulunamamış ve sadece doğrusal kazı seti kullanılarak tanımlamaları yapılabilmektedir. Rostami ve Ozdemir disk keski altındaki temel basıncı tahmin etmek için 2.64 eşitliğini önermiştir. Bu çalışma laboratuardaki tam boyutlu doğrusal kazı seti veri bankasındaki değerlerden elde edilmiştir. Disk keski altında kalan basıncın bilinmesiyle, eşitlik 2.65 ve 2.66 kullanılarak, disk keskiye gelen FN ve FR kuvvetleri hesaplanabilir.

$$P = C \sqrt[3]{\frac{s \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_t}{\gamma \cdot \sqrt{R \cdot T}}} \quad (2.64)$$

Burada;

C : Birimler arası dönüşüm katsayı $\approx 2,12$

s : Keskiler arası mesafe, mm

σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, MPa

σ_t : Kayacın çekme dayanımı, MPa

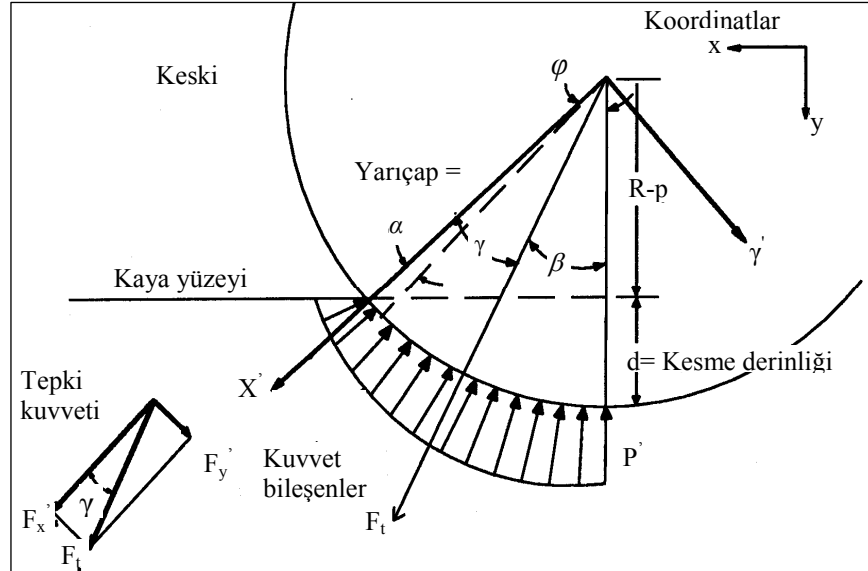
$$F_N = F_T \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (2.65)$$

$$F_R = F_T \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (2.66)$$

Burada;

F_N : Normal kuvvet, N

F_R : Yuvarlanma kuvveti, N



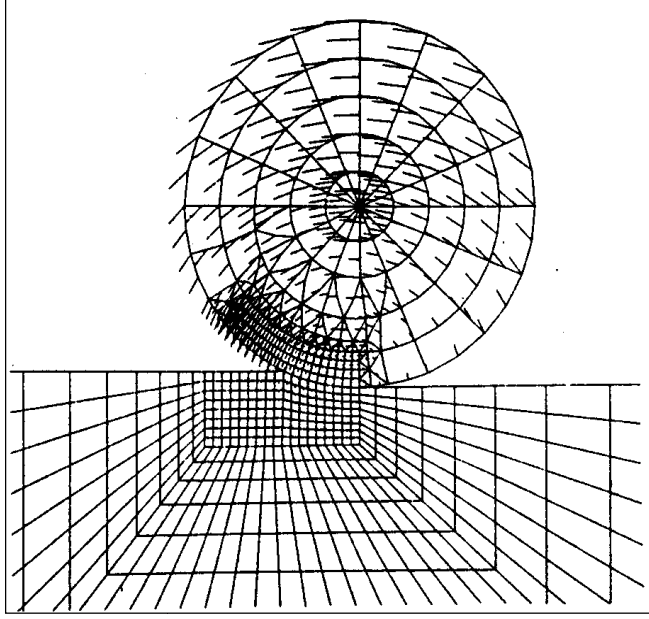
Şekil 2.55: Disk keski çevresi boyunca basınç dağılımı [3].

2.6 Disk Keskilerde Sayısal (nümerik) Modelleme

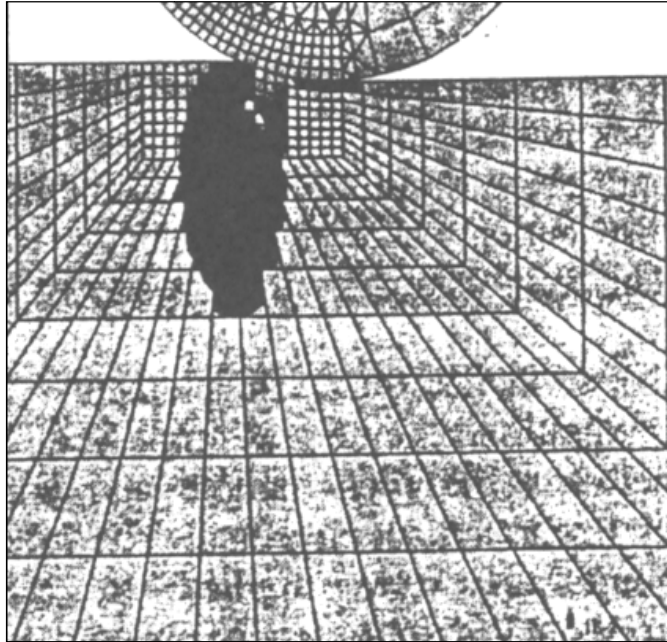
Problemin karmaşasından ötürü analitik çözümün olası olmadığı durumlarda mühendislik problemlerinin çözümünde en iyi yöntem sayısal metotlardır. Disk keski ile kaya kesme işlemleri çok karmaşıktır ve en iyi şekilde sayısal metotlarla modellenebilir. Uygulanan itme kuvveti disk keskinin kayaya çentik atmasına ve keskinin altında kalan parçalanmış zonun çevresindeki radyal çatlakların genişlemesine sebep olur. Disk keski bitişik keski ile etkileşim halindedir ve bir önceki kazı hattının izlerini takip ederek kesme işlemini gerçekleştirir. Bu radyal çatlaklar bitişik keskinin oluşturduğu çatlaklarla buluştuğunda çipler oluşur. Çip formu, keskiye uygulanan itme kuvvetinin, keski arası mesafenin ve kaya kütle özelliklerinin bir fonksiyonudur.

Korinets ve arkadaşları, DIANA sonlu eleman kodunu kullanarak tek bir disk keskinin yuvarlanmasını analiz etmişlerdir. Şekil 2.56, analizler için kullandıkları sonlu eleman ağlarını göstermektedir [64]. Sınır koşulları iki düşey yanda sıfır yatay yer değiştirme ve ağ edilmiş kayaç ortamın altında sıfır düşey yer değiştirme olarak uygulanmıştır. Ayrıca diskin merkezinde düşey doğrultuda sabitlenmiştir. Diskin ve

kaya malzemesinin homojen olduğu varsayılmıştır. Kaya kütlesi yenilme kriteri olarak Mohr-Coulomb yenilme kriteri kullanılmıştır. Disk ve kaya için malzeme özellikleri Çizelge 2.4’te görölmektedir. Kaya ve çelik etkileşimi için sürtünme katsayısının 0,54 olduğu varsayılmıştır. DIANA sayısal analizi şunu göstermiştir ki; kırılma zon düzlemi, onu üreten düşey baskı kuvveti ve kırılma bölgesindeki yuvarlanma kuvveti istikametinde ileriye doğru olur. Buna ilaveten, çip oluşumu sadece yan taraflarında değil, diskin önünde de oluştuğu tarif edilmiştir (Şekil 2.57).



Şekil 2.56: Diana modelindeki sonlu eleman ağırları [64].



Şekil 2.57: Disk keski altındaki kırılma zonu [64].

Çizelge 2.4: Modelde kullanılan malzemelerin özellikleri [64].

Malzeme Özellikleri	Kaya	Disk
Young modülü (MPa)	44600	200000
Poisson oranı	0,2	0,3
Kohezyon (MPa)	20	-
Sürtünme açısı (derece)	55	-
Genişleme açısı (derece)	10	-

Guan, doğrusal kırılma mekanizmaları (LEFM) ile donatılmış FRANC2D sonlu eleman modelini kullanarak, disk keskiler ve düz gerilme tahmini üzerinde çalışmıştır. Burada, kayada kırılma yayılım yönlerini tanımlama için genellikle üçlü LEFM ölçütü kullanılır [65]. Bunlar;

- Maksimum kesme gerilmesi ($\sigma_{\theta\theta\max}$) [66]
- Maksimum gerilme enerjisi yoğunluğu (S_{min}) [67]
- Maksimum gerilme enerjisi boşalması (G_{maks}) [68-69]

Guan, FRANC2D ile yaptığı sayısal analizde maksimum teğetsel gerilme ($\sigma_{\theta\theta\max}$) kriterini kullanmıştır. Kırılma yüzeyindeki çekme kırıklarının, disk keskilerdeki çip olumunda baskın kırık tipleri olduğu kanısına varmıştır. Şekil 2.58 kırık tipinin dikdörtgen biçimde ve birbirine zıt koordinatlardaki gerilmeleri göstermektedir. Bir çatlak çevresindeki gerilim, kutupsal koordinatlarda eşitlik 2.67, 2.68 ve 2.69 gibi tarif edilmiştir [65].

$$\sigma_{rr} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\frac{3}{2} \sin(\theta) - 2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] \quad (2.67)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\frac{3}{2} \sin(\theta)\right] \quad (2.68)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) [\sin(\theta)] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) [3 \cos(\theta) - 1] \quad (2.69)$$

Burada;

r : Çatlak ucunun yarıçapa mesafesi, cm

K_I : Mod I, gerilim yoğunluk faktörü

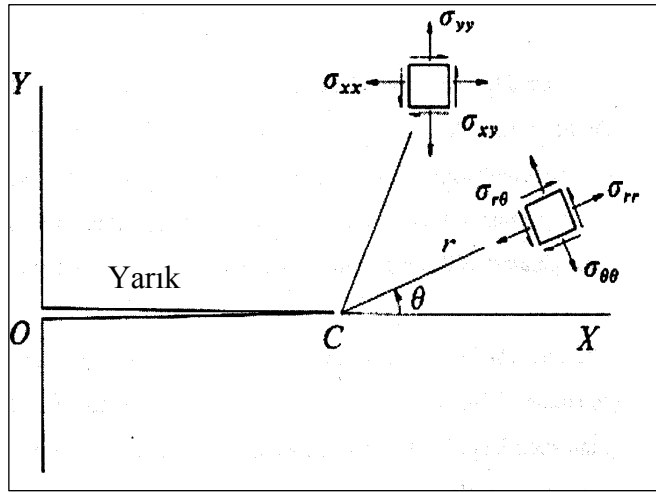
K_{II} : Mod II, gerilim yoğunluk faktörü

θ : Çatlak ucunun yarıçap mesafesi ile oluşturduğu açı, derece

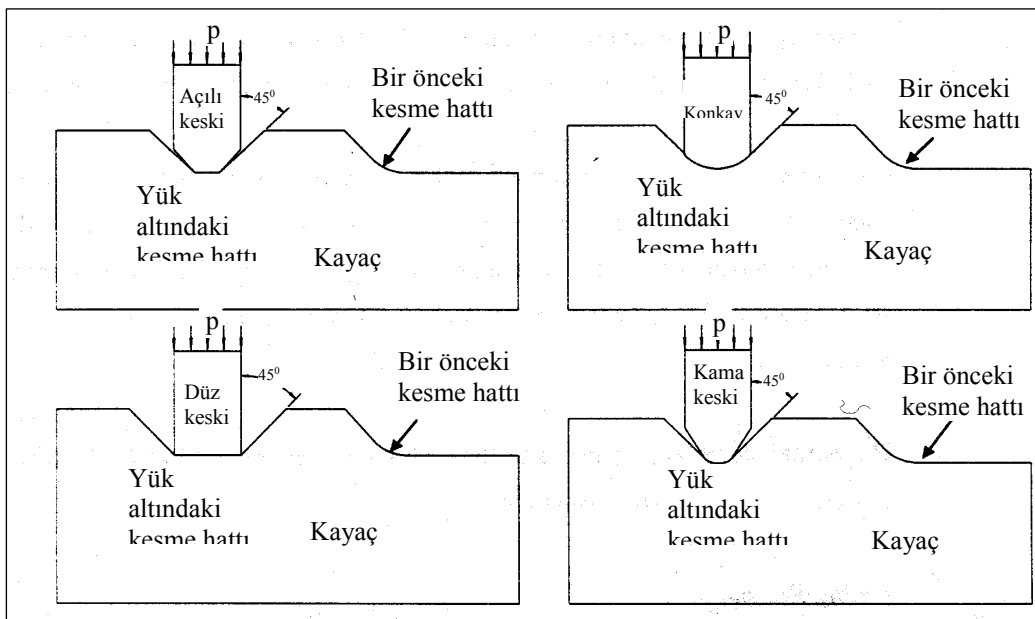
Maksimum teğetsel gerilim teorisi, çatlak ilerlemesi çatlak ucundan θ olarak ifade edilen (Şekil 2.58) radyal yöne doğru başlar ve eğer teğetsel gerilme ($\sigma_{\theta\theta\max}$) kritik

bir materyal sabiti olan değere ulaşırsa en büyük gerilme yönüne dik olan bir yüzeyde ilerler. Bu materyal sabiti materyalin bir çatlak dayanıklılığı olabilir.

Disk keskilerle, keskiler arası etkileşimi modelleme amacıyla sayısal analiz modeline iki kesme hattı eklenir. Sadece bir hat disk keski pozisyonunun gösterimi için yüklenir. Diğer bitişik hat için herhangi bir yükleme uygulanmaz. Böylece kırık bir önceki kesmeye doğru ilerleyebilir. Bu benzer model Guan'ın çalışmasında her bir disk keski için de kullanılmıştır. Şekil 2.59, keskilerin üst kenarlarına uygulanan yükü göstermektedir. Keski ile kaya arasındaki temas, boşluk elementleri, ara yüz elementleri, kohezyon ve yük dağılımı kullanılarak sunulmaktadır. Bu sunulanların tanımlamasının zorluğundan ötürü, sonuçları karşılaştırmak için sayısal çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 2.58: Çatlak ucundaki gerilmeler [65].

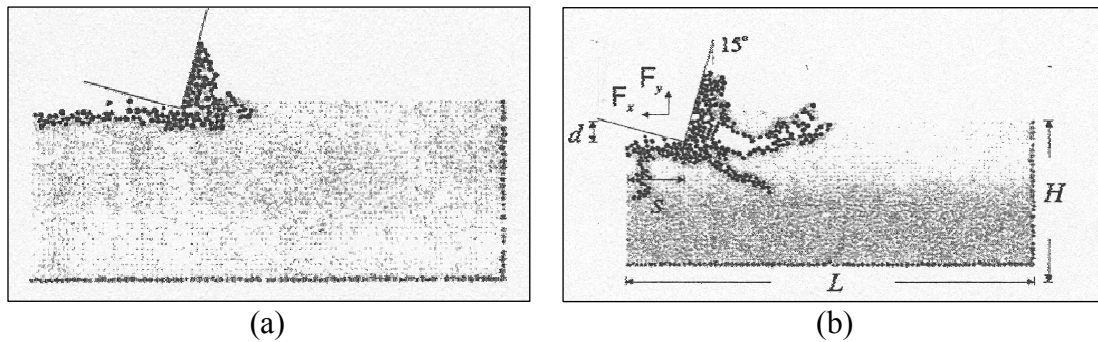


Şekil 2.59: Disk keskiler için sayısal modelleme [65].

Guan'ın sayısal analiz çalışmaları şu şekilde özetlenebilir;

- Kayadaki gerilme dağılımı, modellerde sunulan ara yüz tipindeki kadar hassas değildir. Boşluk elementi, ara yüz elementi, kohezif temas veya yayılan yükün keski ve kaya arasındaki etkileşimi simule etmede kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Keski kenarına yakın gerilmeler, kesme hattı merkezine yakın olanlardan daha yüksektir.
- Farklı keski tipleri, farklı gerilmeler oluşturur ve hatta keski tipi çatlak tipindeki gerilme yoğunluk faktörünü etkiler. Yoğunluk faktörü keskin keskinlerde daha yüksektir.
- Bir önceki kesme izi, o an kesilen hattaki çatlak ilerlemelerine etki eder. Çatlaklar bir önce kesilmiş olan hatta doğru kolayca ilerler.

Huang ve arkadaşları, kazı esnasındaki sünek ve kırılğan yenilme koşullarında, kaya malzemesinin mikro ve makro özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemek için DEM metodunu (ayrık elemanlar metodu) kullanmışlardır. Şekil 2.60'ta görüldüğü üzere; bu çalışmada, keskinler ya konik ya da radyal keskinler olarak seçilip kullanılmıştır. Rijitlik, kayma koşulları ve sınır modeller aracılığıyla parça etkileşim karakteristiği makro ölçekte hem kırılmanın hem de plastisitenin modellenmesi için temel oluşturmaktadır. Boyut faktörünü tahmin etmek veya fiziksel testini yaparak üzerinde çalışmak için tanımlanmış bir teori olmadığından, bu çalışmada malzemenin mikro ve makro özellikleri arasındaki ilişki DEM aracılığıyla oluşturulmuştur [70].



Şekil 2.60: (a) Sünek ve (b) Kırılğan formda kaya kesme [70].

Spesifik enerji oranı (ortalama kuvvet ve kesme derinliğinden elde edilen) ile basınç dayanımı arasındaki ilişki, laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlara yakın bulunmuştur. DEM analizinde, aşağıda takip eden mikro parametreler kullanılmıştır.

Bu değerler kumtaşına benzer makro özellikleri tanımlamaktadır ($\nu=0,11$ - $E=15,7$ GPa- $\sigma_c=49, 63, 73$ MPa ve $\sigma_t=20,5$ MPa).

2.7 Arazide TBM Keski Kuvvetlerinin  l  lmesi

Günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından laboratuvar kesme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerdeki asıl amaç keskiye gelen kuvvetlerin belirlenmesidir. Bu deneyler sonucunda, kesme kuvveti veri tabanı birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiş ve disk keskinin normal ve yuvarlanma istikametindeki ortalama kesme kuvvetlerini hesap etmek için kullanılmıştır. Belirli kaya kütle koşullarında ve TBM kesici kafasındaki keski arası mesafe esas alınarak, laboratuvar kesme deneyleri kullanarak geliştirilmiş olan yarı teorik denklemler yardımıyla, bağımsız kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu laboratuvar kesme deneylerinin kısıtlaması, kırıklar ve çatlaklar gibi jeolojik parametrelerin hesaba katılamıyor olmasıdır. Kesme yüzeyindeki eklem ve çatlakların var oluşu her zaman karşılaşılan bir durum değildir [71-76].

Kesme kuvvetlerinin tahmini ve geçilen jeolojik koşullarda, gerekli makine itme kuvvetini ve gücünü tahmin etmek için ampirik denklemler oluşturulmuştur. Fakat bu denklemler masif kaya formasyonları hesaba katarak oluşturulmuştur [75-76]. Kaya kütlesindeki değişimler, tünel açma makinesinin ilerleme hızını doğrudan etkilemektedir. Bilgisayar sistemine bağlı olan data kaydedici sistemler vasıtasıyla, makineden veri toplama yapılabilir. Bu da ampirik performans modellerinin doğruluğunun artmasını sağlayabilir. Bu datalar; kesici kafa itme kuvveti, g  , ilerleme hızı olarak özetlenebilir. Basınç dönüştürücü, itme silindiriindeki basınç ölçer ve uygulanan kuvveti hesaplamak için bu basınç değerini silindirin kesit alanı ile çarpar. Basınç dönüştürücü, gerçekte itme silindiriindeki basın a bağlı olarak,  ıktıları voltaj cinsinden verir. Bu basınç dönüştürücü, basın a karşı voltaj olarak kalibre edildiğinden, uygulanan kuvvet değerleri veri dosyasında basınç veya yük biriminde depolanır. Hatta başlı başına kesme kuvveti, kesici kafadaki keski sayısının toplam itme kuvveti değerine bölünmesiyle bulunabilir. Kesici kafa itme kuvvetini belirlemek için toplam itme kuvvetinden TBM'i boşta çalıştırmak için gerekli olan kuvvet çıkarılmalıdır [77]. Uygulanan itme basıncında, kesici kafayı döndüren elektrik motorlarının amper olarak  ıktıları, kalibrasyonu yapılan dönüştürücüler ile de bulunabilir. Aynı anda birbiri ile bağlantılı olarak çalışan kesici

kafa motorlarının sayısının bilinmesi, uygulanan itme basıncında, motor eğrisi kullanılarak kesici kafanın gücünün hesaplanmasını sağlayabilir. İlerleme verisi aynı zamandaki itme silindirinin pozisyonudur. Diğer bir ifadeyle, itme silindirinin ne kadar açıldığını gösterir. Başlangıç ve sondaki ilerleme miktarları arasındaki fark, ne kadar uzunlukta tünel kazısı yapıldığı fikrini verir. Veri dijital olarak toplandığında, her bir ilerleme için toplanan veriler (örneğin; her 60 saniyede bir) gerçekte bir ring kazısını bitirmek için geçen zamanı verir. Kazılan tünel uzunluğu ve bunun için geçen zaman bilindiğinde, kazı uzunluğunun geçen zamana bölünmesiyle ilerleme hızı hesaplanabilir (m/sa). Dijital olarak makineden veri toplamının ilk örneği, Atlas Copco Mk 27 TBM ile İsveç Caledonians'taki 6,5 metre çapındaki tünel projelerinde yapılmıştır. 20 saniyelik aralarla bir ring ilerleme için 4 farklı parametre (tork, kesici kafa dönüş hızı, ilerleme, itme kuvveti) kayıt altına alınmıştır. Kazı sırasında bilgisayar yazılımındaki arızalar ve jeolojik zorluklarla karşılaşıldığından, 11 km uzunluğundaki tünelden sadece 500 metrelik bir bölümün verisi alınmıştır [78].

Queens su tüneli no 3, safha 2, ise makine verilerinin toplanması bakımından diğer bir örnektir. Veriler Earth Mechanics Institute (EMI), Colorado School of Mines (CSM)'da analiz edilmiştir [78]. Bu verileri indirgemenin asıl amacı keski yüklerinin hesaplanmasıdır. Bu çalışma incelendiğinde makinenin maksimum kapasite ile çalıştığı sonucu çıkarılabilir. Tünelin tamamı için keski yükü ve ilerleme oranı dağılımı, masif ve kaya kütlesi özellikleri arasındaki ilişkiyi kontrol etmek için hesaba katılmıştır. Bu projede kullanılan TBM'in disk keskinin çapı 19 inç'tir ve kesici kafada 50 adet disk keski bulunmaktadır. Kaya kütlesi ve sağlam kaya özellikleri ile TBM kazı performansını dijital veriler ile kontrol etmek mümkündür.

Data aktarma sistemi ile kaydedilen makine performans verilerinden, keski yüklerini hesaplamakta üç ayrı yöntem bulunmaktadır (Eşitlik **2.70-2.72**). Keski yükü, net kesici kafa itme kuvvetinin efektif keski sayısına bölünmesiyle hesaplanır. Net kesici kafa itme kuvveti, TBM'de kesici kafa tarafından harcanan gerçek itme kuvveti olarak tanımlanır. Bu da sürtünme kayıpları ve TBM tarafından üretilen fakat kullanılmayan toplam yüklerin çıkarılmasıyla tarif edilir. Efektif keski sayısı ise, makinede kullanılan toplam keski sayısından köşe keski sayının çıkarılması ile elde edilir. Köşe keskilere çıkarılmasının sebebi çok küçük parçacık kazısı yapmaları merkez keskilere oranla daha az itme kuvveti almaları olarak açıklanabilir. Genel kural olarak Queens makinesindeki efektif keski sayısı toplam keski sayısının

%90'ıdır. Queens TBM'i için efektif keski sayısı, keski yük tanımlaması kullanılarak 45 adet bulunmuştur. Yukarıda bahsedilenlerden yola çıkarak, metot 1, 2 ve 3 için keski yükleri aşağıdaki gibi tarif edilebilir [77,79].

$$\text{Metot 1: } CL = \frac{TT - (0,05.TT) - 15}{N_{eff}} \quad (2.70)$$

$$\text{Metot 2: } CL = \frac{TT - 120 - 15}{N_{eff}} \quad (2.71)$$

$$\text{Metot 3: } CL = \frac{TT}{N_t} \quad (2.72)$$

Burada;

CL : Keski yükü

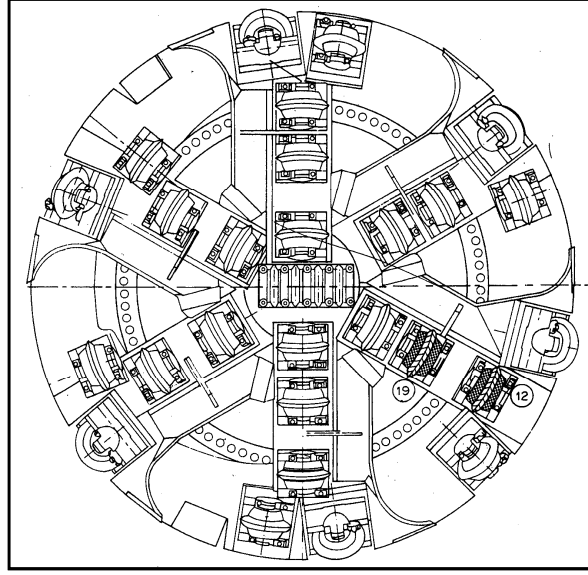
TT : Toplam itme kuvveti

N_{eff} : Efektif keski sayısı

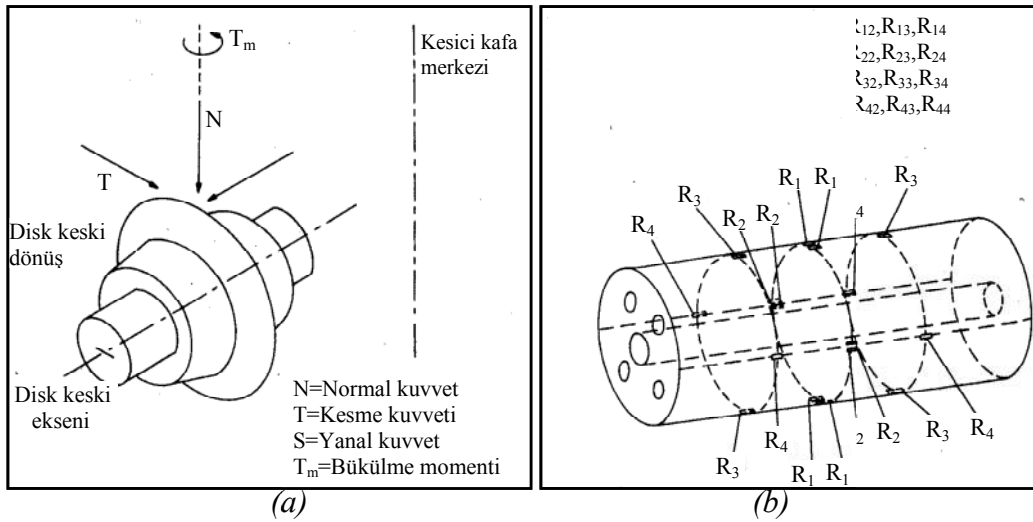
N_t : Toplam keski sayısı

“Manapouri Second Tailrace” Tüneli için makine data indirgemesi, Queens su tüneli no 3 safha 2’de kine benzerdir. Manapouri TBM’i otomatik data aktarım sistemi ile dizayn edilmiştir böylece çeşitli işletim parametrelerini ölçülüp kayıt altına alınmıştır (itme kuvveti basıncı, rpm, ilerleme oranı, motor amperi, aynı anda çalışan motor sayısı). Bu makine içinde bağımsız bir keski için hesaplanan yükler Queens tüneli için hesaplananlara benzemektedir [79].

Avustralya Melbourne yakınlarında bazaltta açılan tüneller sırasında Samuel ve Seow, tam cepheli tünel açma makinesinin ölçme sistemini kurmuşlardır (Şekil 2.61). Sadece 12 ve 19 numaralı iki disk keski verilerini ölçmüşlerdir. Şekil 2.62a disk keskiye gelen kuvvet bileşenlerini göstermektedir. Şekil 2.62b ise dinamometreler için kullanılan birim yük ölçerlerin yerleşiminin şematik gösterimidir. Bütün dinamometreler makineye yerleştirilmeden önce laboratuarda kalibre edilmiştir. Bu sistem ile dinamometreler ve veri toplayıcı arasında doğrudan bir bağlantı kurulmuştur [80].



Şekil 2.61: Kesici kafaya yerleştirilen dinamometrelerin konumları [80].



Şekil 2.62: 12 ve 19 numaralı keskilerin yapılandırılması [80].

Samuel ve Seow, arazi çalışmalarından elde ettikleri sonuçları şu şekilde özetlemişlerdir [80]: Disk keski dönüş hızı ve çip oluşumu arasında kesin bir ilişkiye rastlanmamıştır. Ortalama normal kuvvetlerin, makine ilerleme basıncıyla yükseldiği bulunmuş ve yükselmenin doğrusal olmadığı belirlenmiştir. Kesme kuvvetleri, kesici kafanın bir dönüşündeki ilerleme ile iyi bir korelasyon vermiştir. Yüksek itme kuvvetinde makine çalıştırılırsa, yüksek ilerleme hızlarına ulaşılabilir. Keski kuvvetleri, keski dönüş hızından bağımsızdır. Kaya kütlesi içindeki boşlukların keski kuvvetleri üzerinde önemli etkisinin olduğu belirlenmiştir. Bu öneriye bazalt formasyonları ile gözenekli yapıya sahip bazalt formasyonlarının kazısı esnasında ölçme sistemlerinden elde edilen kesme kuvvet verilerinden yola

ıkararak ulaşılmıştır. Hidrolik pistonlardan disk keskilere aktarılan yüzdesel itme kuvveti değeri (itme kuvveti verimliliği) gözenekli olmayan bazaltta %62,8- 89,6 gözenekli bazaltta %28-57,8 arasında olduğu belirlenmiştir.

Zhang, Kou ve Lindqvist; arazide disk keskileri lme sistemiyle donatmışlardır. lme sistemlerinin tasarımında birim yük ölçerler kullanılmışlardır. Uzaktan lme metoduyla keski kuvvetleri kayıt altına alınmıştır. Bütün bu alışmalar İsveç Aspo' da gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kazı makinesinin modeli Boretac DS 1.6 TBM olarak bilinmektedir [81]. Bu çalışmalarda, laboratuarda kalibrasyonu yapılmış birim yük ölçerlerle donatılmış bir n ve bir köşe keski kullanılmıştır.

alışmalar neticesinde şu sonuçlara varmışlardır: Aynaya doğrudan temas eden öndeki keskiye gelen kuvvetler, köşe keskiye gelen kuvvetlerden oldukça fazladır. Makinenin kesici kafa dönüş hızı sabit tutulurken, makinenin ilerleme oranı itme kuvveti arttıkça artmaktadır. Bu çalışmada, sert kaya formasyonunda kazı yapan kuyu açma makinesi kullanılmıştır. Bu sistemin sert kaya TBM'leri içinde kullanılabileceğini önermişlerdir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada kullanılan kayaçlar İstanbul'da Tünel Açma Makinelerinin kullanıldığı, Kartal-Kadıköy ve Başakşehir-İkitelli Metro projelerinden sağlanmıştır. Bu formasyonlardan alınan blok numuneler üzerinde tam boyutlu doğrusal (LCM) ve taşınabilir doğrusal (PLCM) kazı setlerinde farklı disk keski kullılarak kazılabilirlikleri araştırılmıştır.

Kartal-Kadıköy Metrosu'ndan Kurtköy Formasyonu'nu temsilen “arkoz” kayaç numunesi, Gözdağı Formasyonu'nu temsilen “şeyl” kayaç numunesi alınmıştır. Başakşehir-İkitelli Metrosu'ndan Kırklareli Formasyonunu temsilen “fosilli kireçtaşı” numunesi alınmıştır. Alınan kaya blokları üzerinde fiziksel ve mekanik özelliklerin tayini için yoğunluk ölçümü, petrografik analiz, tek eksenli basınç dayanımı, statik elastisite modülü ve Poisson oranı, dolaylı çekme dayanımı, akustik dalga hızları (dinamik elastisite modülü ve Poisson oranı), Cerchar aşındırıcılık, Schmidt çekici (L-9 tip), Shore scleroscope (C-2 tip), nokta yük indeksi ve koni delici deneyleri yapılmıştır.

Laboratuarda yapılan doğrusal kesme deneylerinde 4 farklı disk keski kullanılmıştır. Tam boyutlu doğrusal kazı setinde 13 inç CCS tip (330 mm) disk keski, 15 inç V tip (380 mm) disk keski ve 17 inç CCS tip (432 mm) disk keski kullanılmıştır. Taşınabilir doğrusal kazı setinde mini V tip (130 mm) disk keski kullanılmıştır. Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri disk keski ile farklı kesme derinlikleri (d) ve keski arası mesafede (s) kesilerek keskilere gelen kuvvetler ve kesme işlemi için harcanan spesifik enerji değerleri belirlenmiştir. Böylelikle aynı numune için dört farklı kesimde oluşan keski kuvvetleri belirlenmiş ve keski tipine göre kuvvet ve spesifik enerji değişimleri ortaya konulmuştur.

3.1 Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler

Kayaçların kazılabilirlik tayininde en önemli parametrelerden biri olan kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri üzerinde yapılmıştır. Deneyler, Amerikan standart ve test metotları (ASTM) ve uluslararası

kaya mekaniği birliğinin (ISRM) belirlediği standartlara göre yapılmıştır [82,83]. Tünel güzergahından getirilen şekilsiz kaya blokları, testlerin gerçekleştirilebilmesi için numune kesme düzeneğinde kesilerek dörtgen prizma şekline getirilmiştir (şekil 3.1). Düzeltilmiş bloklar üzerinden NX tipi (54 mm çaplı) karotlar alınmıştır. Karot alma işlemlerinin gerçekleştirildiği karot alma makinesi şekil 3.2’de görülmektedir.



şekil 3.1: Blok numune kesme ve boyut küçültme makinesi.



şekil 3.2: Karot alma makinesi.

Standartlara uygun olarak karot numunelerin alt ve üst yüzeylerinin düzeltilmesi gerekmektedir. Şekil 3.3'te karotların alt ve üst yüzeylerinin kesilerek düzeltildiği kesme düzeneği görülmektedir.



Şekil 3.3: Karot numunelerin alt ve üst yüzeylerini düzeltme makinesi.

3.1.1 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi

Bu deney yönteminde amaç, düzgün geometrik biçimli kaya numunelerinin tek eksenli basınç dayanımını ölçmektir. Kayaçların basınç dayanımı, kayaç kütlelerinin tanımlanması ve dayanım sınıflaması için kullanılmaktadır [84]. Deneylerde yükseklik/çap oranı yaklaşık 2,5 olup, çapı NX (54 mm) olan karot numuneler kullanılmıştır. Deney esnasında karot üzerine sürekli olarak 0,5 kN/sn sabit bir yükleme hızında kuvvet uygulanmıştır. Deney düzeneği olarak Ele firmasına ait Autotest 3000 model test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.4).

Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, kırılma anındaki kuvvetin numunenin ilk kesit alanına bölünmesi ile **3.1** eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır [82].

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Burada;

σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, MPa

F : Kırılma yükü, N

A : Silindirik numunenin kesit alanı, mm²



Şekil 3.4: Tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, statik elastisite ve poisson oranı tayini için kullanılan pres.

3.1.2 Yoğunluk (Doğal birim hacim ağırlığı) tayini

Tek eksenli basınç deneyinde kullanılmak üzere hazırlanan kaya numuneleri hassas terazide tartılarak numunelerin ağırlıkları bulunmuştur. Numunelerin hacimleri hesaplanmış ve buradan kayaçların yoğunlukları (doğal birim hacim ağırlığı) bulunmuştur.

3.1.3 Dolaylı (Brazilian) çekme dayanımı deneyi

Bu deney, kayaçların tek eksenli çekme dayanımlarını, dolaylı olarak Brazilian deneyi ile belirlemek amacıyla tasarlanmıştır. Deney için yükseklik/çap oranı yaklaşık 0,5 ve çapı NX (54 mm) olan karot numuneler kullanılmıştır. Deney esnasında karot üzerine sürekli olarak 0,2 kN/sn olarak sabit bir yükleme hızında kuvvet uygulanmıştır. Kayaçların çekme dayanımı değerleri 3.2 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır [82]. Deney düzeneği olarak Ele firmasına ait Autotest 3000 model test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.4).

$$\sigma_t = \frac{2.F}{\pi.L.D} \quad (3.2)$$

Burada;

σ_t : Dolaylı çekme dayanımı, MPa

F : Kırılma yükü, N

L : Silindirik numunenin boyu, mm

D : Silindirik numunenin çapı, mm

3.1.4 Statik elastisite modülü ve poisson oranı

Bu deneyde, tek eksenli basınç dayanımı deneyi için hazırlanan karot numuneler kullanılmıştır. Yükleme koşulunda “gerilim-birim deformasyon” eğrilerinin çizilmesi ve elastisite modülü ile poisson oranının tayini amacıyla yapılır [82].

Karot numunelerde oluşan deformasyonları ölçebilmek için çapsal deformasyon ve eksenel deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Karot numuneler, 0,5 kN/sn sabit yükleme hızında kuvvet uygulayan Ele firmasına ait Autotest 3000 model test cihazı ile test edilmiştir (Şekil 3.4). Numunede oluşan çapsal ve eksenel deformasyonlar ESAM firmasına ait “traveller programı” tarafından sayısallaştırılmıştır. 3.3 ve 3.4 eşitlikleri çapsal ve eksenel deformasyon hesabını göstermektedir [82].

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta_l}{l_0} \quad (3.3)$$

Burada;

ε_a : Eksenel birim deformasyon, mm

Δ_l : Karotun eksen boyunda uzunluktaki değişim, mm

l_0 : Karotun deney öncesindeki boyu, mm

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta D}{D_0} \quad (3.4)$$

Burada;

ε_d : Çapsal birim deformasyon, mm

ΔD : Çaptaki değişim, mm

D_0 : Karotun deney öncesindeki çapı, mm

Elastisite modülü, eksenel gerilimin, gerilim değişiminin neden olduğu eksenel birim deformasyona oranı olup çeşitli yöntemlerle hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, statik elastisite modülü (E_a , GPa), kayacın tek eksenli sıkışma dayanımının %50’si gibi

sabit bir gerilim değeri için σ - ϵ_a eğrisine teğet olan doğrunun eğimi çizilerek bulunmuştur. Statik poisson oranı (ν) ise eksenel yükleme koşulunda **3.5** eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır [82].

$$\nu = \frac{\epsilon_d}{-\epsilon_a} \quad (3.5)$$

3.1.5 Akustik P ve S dalga hızları deneyi ile dinamik elastisite modülü ve poisson oranının belirlenmesi

P ve S dalgalarının ölçümünde kayaçlar için geliştirilmiş, dijital göstergeli CNS elektronik şirketi tarafından üretilen PUNDIT laboratuvar deney aleti kullanılmıştır [85-86]. Bu deneylerde, tek eksenli basınç dayanımı deneyi için hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Numuneler sinyal üreten alıcı ve vericinin arasına konulmuştur. Kaya ile sinyal üreticisinin arasına 0,0038 cm kalınlığında kurşun folyo konularak temas yüzeyinin daha sağlam olması sağlanmıştır. Hazırlanan bu set, eksenel yükü sabit verebilen bir presin arasına konularak yaklaşık 200 kg'lık sabit yükle yüklenmiştir. Çıkan sinyaller iki kanallı osiloskop yardımı ile görüntülenmiştir. Hangi tip dalga hızı (P veya S) ölçülecekse anahtar yardımı ile seçilmiş ve dalganın numune boyunca geçiş zamanı dijital göstergeden okunmuştur [11,87]. Dinamik elastisite modülü (E_{dyn}) ve poisson oranı (ν_{dyn}) **3.6** ve **3.7** eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 3.5'te P ve S dalga hızları tayini için kullanılan deney cihazı görülmektedir.

$$E_{dyn} = \rho V_s \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3.6)$$

$$\nu_{dyn} = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3.7)$$

Burada;

E_{dyn} : Dinamik elastisite modülü, Pa

ν_{dyn} : Dinamik poisson oranı

V_s : S dalgasının yayılma hızı, m/sn

V_p : P dalgasının yayılma hızı, m/sn

ρ : Kayacın doğal birim hacim ağırlığı, kg/m³



Şekil 3.5: Akustik P ve S dalga hızları tayini deney cihazı.

3.1.6 Nokta yük deneyi

Nokta yük dayanım indeksi, tek eksenli basınç ve çekme dayanımı gibi diğer dayanım parametrelerinin dolaylı olarak belirlenmesinde ve bazı kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde kayaç malzemesinin dayanım parametresi olarak kullanılmaktadır [84]. Nokta yükleme deneyinde karot örnekler (eksenel deney için) hazırlanmıştır. Nokta yük dayanım tayini için 3.8 ve 3.9 eşitlikleri kullanılmıştır [83].

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (3.8)$$

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45} \quad (3.9)$$

D_e^2 : Eksenel deney için, $4A/\pi$ (konik başlıkların temas noktalarından geçen örneğin kesit alanı), mm^2

P : Kırılma yükü, N

I_s : Nokta yük dayanım indeksi, MPa

$I_{s(50)}$: Düzeltilmiş nokta yük dayanım indeksi

Tahmin edilen nokta yük dayanım indeksinden dolayı basınç dayanımı hesaplanabilmektedir. Bu deneyin ucuz ve pratik olması yanında arazide yapılabilir ve şekilsiz numunelere de uygulanabilir olması, deneyi devamlı uygulanabilir bir deney haline getirmiştir [88]. Deneylerde kullanılan nokta yük deney aleti Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6: Nokta yük deney aleti.

3.1.7 Geri tepmeli (Schmidt çekiçi) çekiç deneyi

Bu yöntem, kayaların sertliklerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Yöntemin kullanım alanı çok zayıf ve çok sert kayalarla sınırlıdır [84]. Silindirik kapalı bir kutu içinde bulunan, yay, çekiç, ve çekici kurma düzeneğinden oluşan cihaz geri tepmeli (Schmidt çekiçi) çekiç olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.7). Ölçme sırasında alet gövdesi kayaç yüzeyine dik olarak bastırılır. Yay vasıtasıyla hareket kazanan çekiç, darbeyi kayaca ileten uca çarpar ve geri zıplar. Zıplama mesafesi yüzeyin sertliğine bağlı olarak alet üstünde yer alan ibreden okunur. Ölçmenin yapılacağı yüzey pürüzsüz, kuru ve temiz olmalıdır [11]. Deneyler blok numuneler üzerinde L-9 tipi geri tepmeli çekiç kullanılarak yapılmıştır. Deney prosedürü olarak blok numune üzerinde 10 farklı noktada okuma yapılmış ve üç set olarak tekrarlanmıştır.



Şekil 3.7: Schmidt çekici deney aleti.

3.1.8 Shore scleroscope sertlik deneyi

Shore scleroscope deneyi, kayaçların sertliğinin ölçülmesinde kullanılan kolay ve ekonomik bir yöntemdir. Elmas uçlu bir ağırlık önceden hazırlanmış kayaç yüzeyi üzerine düşürülür. Ağırlık sıkalalı cam tüp içinde serbestçe gidip gelebilmektedir. Elmas uçlu ağırlığın zıplama yüksekliği Shore sertliğini verir. Her zıplamadan sonra yüzey kompaktlaştığından, sertlik değeri belirli bir zıplama sayısına kadar yükselir ve sabit kalır [11,89]. Deneyler blok numuneler üzerinde C-2 tipi Shore scleroscope kullanılarak yapılmıştır. Deney prosedürü olarak blok numune üzerinde 10 farklı noktada okuma yapılmış ve üç set olarak tekrarlanmıştır. Deneylerde kullanılan C-2 tipi Shore scleroscope deney aleti Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8: Shore sclerscope (C-2 tip) deney aleti.

3.1.9 Koni delici sertlik deneyi

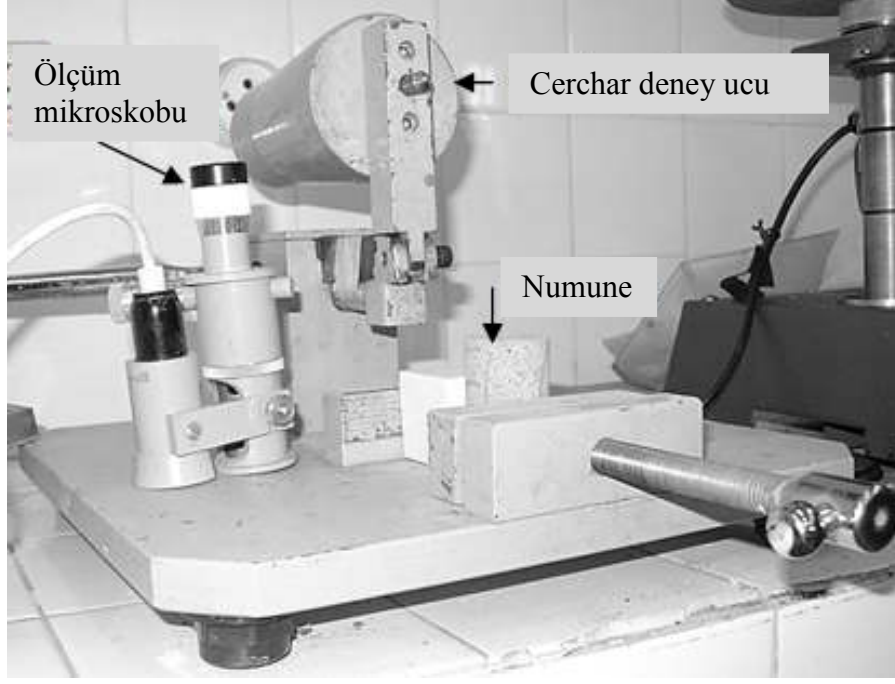
İngiliz Kömür İdaresi Laboratuvarları'nda geliştirilmiş bir deney aletidir (Şekil 3.9). Uç açısı 60° olan tungsten karbit uç, 25 x 25 x 6 mm boyutlarındaki numuneye belli kuvvet altında batırılır ve batma derinliği ölçülür [90]. Batma derinliği kayacın sertliğini verir. İri taneli kayaçlarda kullanılması doğru sonuçlar vermeyebilir. Koni delici değeri ile kayacın tek eksenli basınç dayanımı arasında bağıntı vardır. Deneylerde, İngiliz Kömür İdaresinin önerdiği prosedür uygulanmıştır [90].



Şekil 3.9: Koni delici deney aleti.

3.1.10 Cerchar aşındırıcılık deneyi

Bu test, Fransız Kömür Enstitüsü'nde tünel açma makinelerinin imalatı ve verimliliği için kayaç aşındırıcılığının değerlendirilmesinde oldukça yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu deneyde yeni kırılmış taze kayaç yüzeyi, ucu 90 derece konik, çekme dayanımı 2000 N/mm^2 olan keskiyle ve 70 N'luk baskı kuvvetiyle 10 mm çizilmiştir. Keski ucunda meydana gelen aşınma yüzeyinin çapı aşınma indeksi olarak belirlenmiştir [7,91]. Bu deney yöntemi, kayaçların aşındırıcılığını belirten, keski tüketimi ve maliyetleri hakkında bilgi veren indeks bir testtir (Şekil 3.10) .



Şekil 3.10: Cerchar aşındırıcılık deney aleti.

3.1.11 Petrografik analiz

Petrografik analiz, formasyonların özelliklerinin daha iyi tanınmasında; gözle, fiziksel ve mekanik testler yardımı ile tayin edilemeyen kayaç özelliklerinin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Kayaçların mineral bileşimi ve % oranlarının bulunması, mineral tane boyu analizi, çimentolanma derecesi, dokusal ve petrografik özelliklerinin saptanması kazılacak formasyonların daha iyi tanımlanmasına yardımcı olmaktadır. Kayaçların petrografik özelliklerinin tanımlanması, kayaçlarının mekanik özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır [11]. Petrografik analiz için kayaç örneğinden ince kesit hazırlanır, daha sonra mikroskop altında inceleme yapılır.

3.2 Doğrusal Kesme Deneyleri

Kartal-Kadıköy Metrosu'ndan alınan arkoz ve şeyl numuneleri ile Başakşehir-İkitelli Metrosu'ndan alınan fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM) ile kaya kesme deneyleri yapılmıştır. Kaya kesme deneyleri için bağımlı, bağımsız ve sabit değişkenler belirlenerek deney planlaması yapılmıştır.

Tam boyutlu doğrusal kazı setinde 13 inç (330 mm) CCS tip, 15 inç (380 mm) V tip ve 17 inç (432 mm) CCS tip disk keskinin; taşınabilir doğrusal kazı setinde ise mini

V tip (130 mm) disk keskinin kullanılması ön görülmüştür. Kesme deneylerine başlamadan önce, yukarıda belirtilen bu disk keskinin için dinamometre kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyonların yapılma amacı, ölçme sistemlerinden milivolt (mV) cinsinden alınan kesme verilerini kilogram kuvvete (kgf) çevrilebilmek için dönüşüm kat sayılarının belirlenmesidir.

Kaya kesme deneylerine başlayabilmek için numune hazırlama işlemleri yapılmıştır. Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşlarının, disk keskinin ile tam boyutlu doğrusal kazı setinde kesilebilmesi için, tünel güzergahlarından getirilen büyük kaya blokları deney kasalarına yerleştirilmiş ve betonlanmıştır. Yine bu üç kayacı, taşınabilir doğrusal kazı setinde disk keskinin ile kesebilmek için tünel güzergahlarından getirilen küçük kaya blokları, her numune için üçer örnek olmak üzere küçük deney kasalarına yerleştirilmiş ve betonlanmıştır. Deneysel ekipmanların seçimi, deney koşullarının belirlenmesi ve numune hazırlama işlemlerinin ardından kaya kesme deneylerine geçilmiştir.

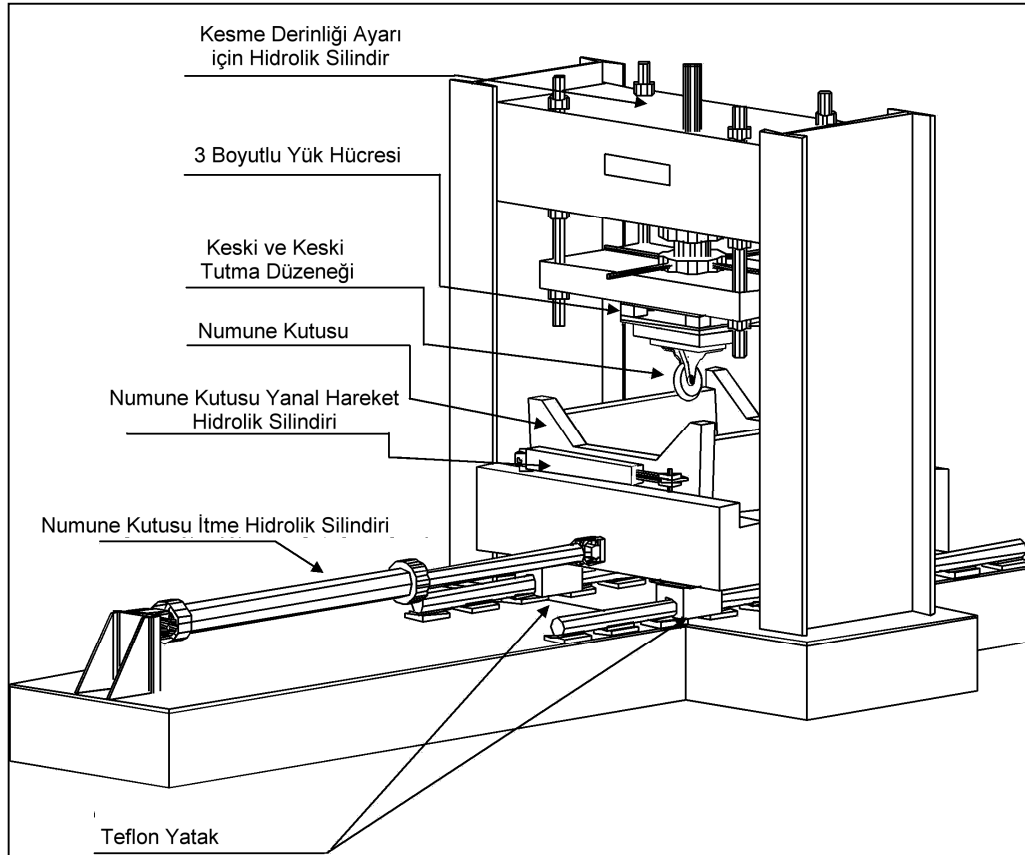
3.2.1 Tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM)

Tam boyutlu doğrusal kaya kesme deney seti, İ.T.Ü Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde, Türkiye'deki mekanize tünel açma yöntemlerinin geliştirilmesi amacıyla NATO-TU projesi çerçevesinde kurulmuştur [92]. Şekil 3.11 ve 3.12'de tam boyutlu doğrusal kazı setinin genel ve şematik görünümü verilmiştir. Bu kazı seti; tam cepheli tünel açma makineleri (TBM), kısmi kesitli tünel açma makineleri (roadheader), kesici yükleyiciler (shearer-loader), sürekli kazıcılar (continuous miner) gibi mekanize kazı makinelerinin performansını tahmin etmek amacı ile kullanılmaktadır. Yukarıda belirtilen makinelerin kazacakları formasyonlara göre performanslarını önceden belirleyebilmek için gerçek keskinin (disk keskinin, radyal keskinin, kalem uçlu keskinin v.b.) ile büyük kaya bloklarında kazı deneyleri yapılmaktadır [93,94].

Tam boyutlu kaya kesme deneylerinin yapılabilmesi için, kaya ortamını temsil eden yaklaşık 70×70×100 cm boyutlarına kadar kayaç numunesinin tünel güzergahından alınması esastır. Alınan büyük kaya blokları üzerinde deneylere başlayabilmek için numuneler deney kasalarına yerleştirilir ve betonlanarak sabitlenir. Hidrolik silindirler vasıtasıyla kaya bloğu yatay ve keskinin tutucu dikey olarak hareket ettirilebilmektedir.



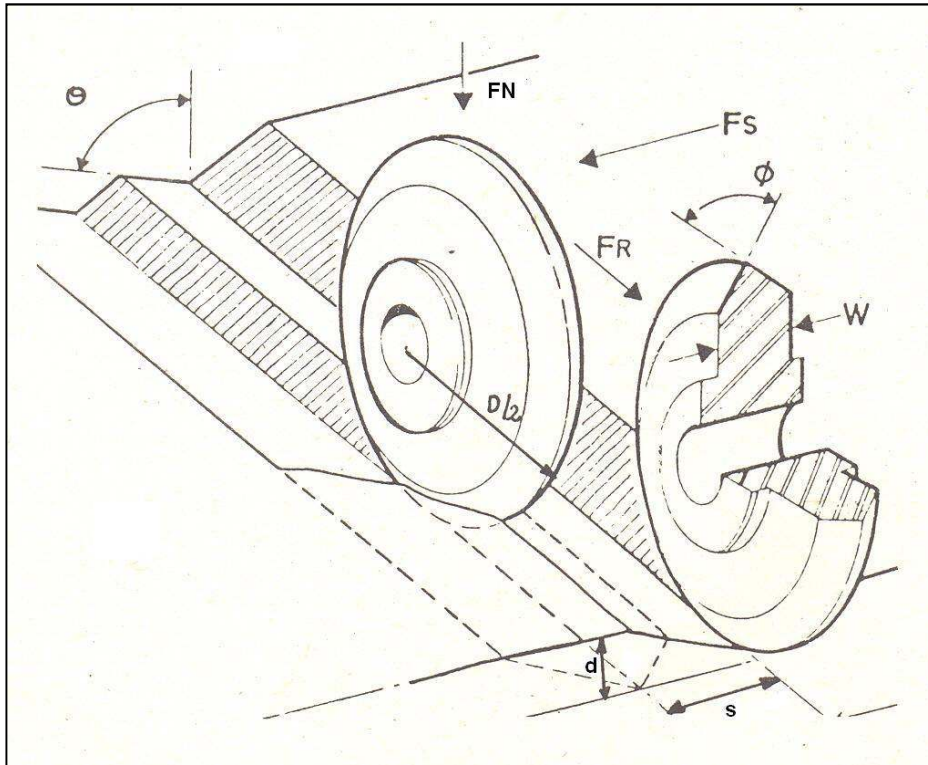
Şekil 3.11: Tam boyutlu kazı setinin genel görünümü.



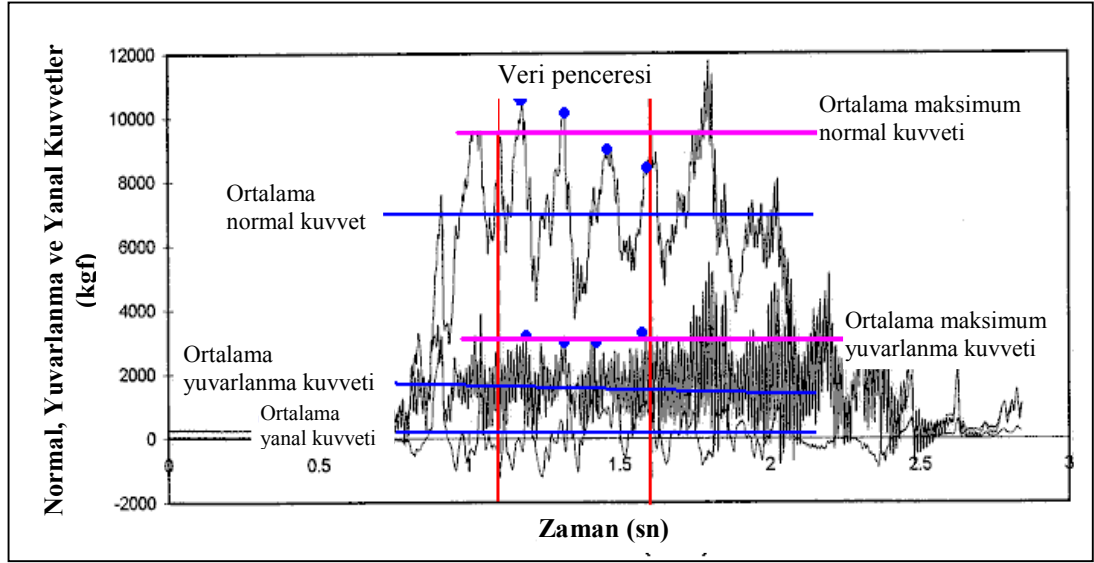
Şekil 3.12: Tam boyutlu kazı setinin şematik görünümü [95].

Gerçek boyuttaki keskilerle farklı kesme derinliklerinde keskiler arası mesafeler değiştirilmekte, bu sayede bu değerler için normal kuvvetler, kesme kuvvetleri, yanal kuvvetler ve spesifik enerji değerleri bulunabilmektedir. Belirli bir kesme derinliğinde, keskiye, kesme hattı boyunca yuvarlanma yönünde etki eden kuvvete yuvarlanma kuvveti (FR), dik olarak etki eden kuvvete normal kuvvet (FN) ve yanal olarak etki eden kuvvete ise yanal kuvvet (FS) denilmektedir. Belirli keskiler arası mesafe ve kesme derinliğinde gerçekleştirilen kesme deneyi sonucunda elde edilen birim hacimdeki kayayı kesmek için gerekli olan enerji ise spesifik enerji (SE) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.13 disk keskiye etki eden kuvvetleri ve tasarım parametrelerini göstermektedir.

Tam boyutlu kesme deney seti veri toplama sistemi donanım olarak; analog / dijital dönüştürücü kart olan bir bilgisayar, gerilim ölçerlere (strain gauge) akım besleyen ve köprülerdeki gerilimi dengeye getiren amplifikatör, sinyal koşullayıcı ve gerilim ölçerlerden (strain gauge) oluşmaktadır. Veri alma sistemi ile her bir saniyede 2000 veri alınabilmekte ve özel yapım bir alüminyum dinamometre yardımı ile 50 ton'a kadar keski kuvvetleri ölçülebilmektedir. Kaya kesme işlemi sonucunda kayıt altına alınan keski kuvvetlerinin zamana (veya kesme mesafesine) bağlı değişimi Şekil 3.14'te görülmektedir.



Şekil 3.13: Disk keskiye etki eden kuvvetler ve tasarım parametreleri [95].



Şekil 3.14: Kesme deneyi sonucunda ölçülen kuvvetler.

Kayıt altına alınan kuvvetler ham veri dosyası olarak adlandırılmaktadır, bunun anlamı deney esnasında kuvvetlerin milivolt (mV) cinsinden kaydedilmesidir. Bu kuvvetleri kilogram kuvvete çevirebilmek için, deney öncesinde gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmaları sonucunda elde edilen kalibrasyon katsayıları (kgf/mV) kullanılmaktadır. Disk keskiler için dinamometre kalibrasyonu Bölüm 3.2.3'te detaylı olarak anlatılmıştır. Kesme deneyi esnasında, keskinin kayayı kestiği zaman aralığında oluşan kuvvetler Şekil 3.14'teki veri penceresinden görülerek ayıklanır ve bir Microsoft Excel® dosyasına yerleştirilerek her bir kuvvetin (FN, FR, FS) maksimum, minimum ve ortalama değerleri ile standart sapmaları bu dosya içerisinde hesaplanır. Daha sonra ise birim hacimdeki kayayı kesebilmek için gerekli olan spesifik enerji (SE) değeri **3.10** eşitliği kullanılarak hesaplanır [94].

$$SE = \frac{FR}{Q} \quad (3.10)$$

Burada;

SE : Spesifik enerji, MJ/m³

FR : Ortalama kesme (yuvarlanma) kuvveti, kN

Q : Birim kesme mesafesine açığa çıkan pasa miktarı, m³/km

Tam boyutlu doğrusal kazı setinde, gerçek boyutlu bir keski ile kaya bloğunun kesilmesi ve gerekli spesifik enerjinin hesaplanmasının ardından, bir tünel açma makinesinin net kazı hızı **3.11** eşitliği ile hesaplanmaktadır [95,96].

$$ICR = kx \frac{P}{SE_{opt}} \quad (3.11)$$

Burada;

ICR : Kazı hızı, m³/h

P : Kesici kafa gücü, kW

SE_{opt} : Optimum spesifik enerji, kWh/m³

k : Kesici kafa gücünü kayaca iletme katsayısı (0,85-0,90)

3.2.2 Taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM)

Tam boyutlu doğrusal kazı seti ile kesme deneylerinin gerçekleştirilmesinde, büyük kaya bloklarına, uzun zamana, yüksek maliyetlere ve uzmanlığa gerek duyulmaktadır. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), MİSAG-274 projesi kapsamında daha pratik olan taşınabilir doğrusal kazı seti geliştirilmiştir (Şekil 3.15) [2].

Bu kazı seti, mekanize kazı makinelerinin performansını tahmin etmek amacı ile kullanılmaktadır. Özellikle tam cepheli tünel açma makinelerinin, kazacakları formasyonlara göre performanslarını önceden belirleyebilmek için mini V tip disk keski ile kesme deneyleri yapılır ve deneylerden indeks bir değer elde edilerek performans tahminine geçilebilmektedir.

Taşınabilir doğrusal kazı setinde kaya kesme deneylerinin yapılabilmesi için, kaya ortamını temsil eden yaklaşık 15×15×20 cm boyutlarında kayaç numunesinin tünel güzergahından alınması esastır. Alınan bu küçük kaya blokları üzerinde deneylere başlayabilmek için numuneler deney kasalarına yerleştirilir ve betonlanarak sabitlenir. Deney esnasında keski pozisyonu sabittir, kesme derinliği numune kasaya yerleştirilirken ayarlanır. Deney aletinde kayayı keskiye doğru hareket ettirmek için bir hidrolik piston bulunmaktadır. Hidrolik sistemde bir elektrik motoru ve yağın sıkıştırıldığı bir akü vardır. Temel prensip, akünün belirli bir basınca kadar doldurulması ve depolanan bu enerjinin kayayı keskiye doğru itmesi olarak ifade edilebilir. 70° uç açılı, 130 mm çapında, HRC 56 takım çeliğinden imal edilen mini V tip disk keski (Şekil 3.16) ile tek bir kesme hattı boyunca kesme işlemi gerçekleştirilir; bu sayede keskiye gelen normal kuvvetler (FN), kesme kuvvetleri (FR), yanıl kuvvetler (FS) ve spesifik enerji (SE) değerleri bulunabilmektedir.



Şekil 3.15: Taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM).

Taşınabilir doğrusal kazı setinde, mini diskin kayayı kesmesi sırasında oluşan 3 yöndeki kuvvetlerin, istenilen hassaslıkta ve güvenilir olarak ölçülebilmesi için gerilim ölçerler (strain gauge) kullanılarak bir dinamometre tasarlanmıştır. Keskiye gelebilecek maksimum 10 tonluk kuvvetler bu dinamometre sayesinde ölçülebilmektedir. Gerilim ölçerlerden gelen sinyali dijital ortama aktarmak için ESAM firmasının Traveller 1 ölçme sistemi kullanılmıştır. Veri aktarma istemi USB bağlantı portu kullanılarak bilgisayara bağlanmaktadır. Dinamometredeki wheatstone köprülerinden gelen analog sinyal 2000 Hz'lik bir frekans ile örneklenerek sayısallaştırılmaktadır. Veri toplama sistemi Şekil 3.17'de görülmektedir. Kazı sonrasında, ESAM firmasına ait “traveller programı” tarafından milivolt (mV) cinsinden sayısallaştırılan kesme deneyi sonuçları (FN, FR, FS), tam boyutlu doğrusal kazı setinin anlatıldığı Bölüm 3.2.1’de tarif edildiği şekilde hesaplanmaktadır.



Şekil 3.16: Mini disk keskiler.



Şekil 3.17: PLCM veri toplama sisteminin görünümü.

3.2.3 Disk keski için dinamometre kalibrasyonu

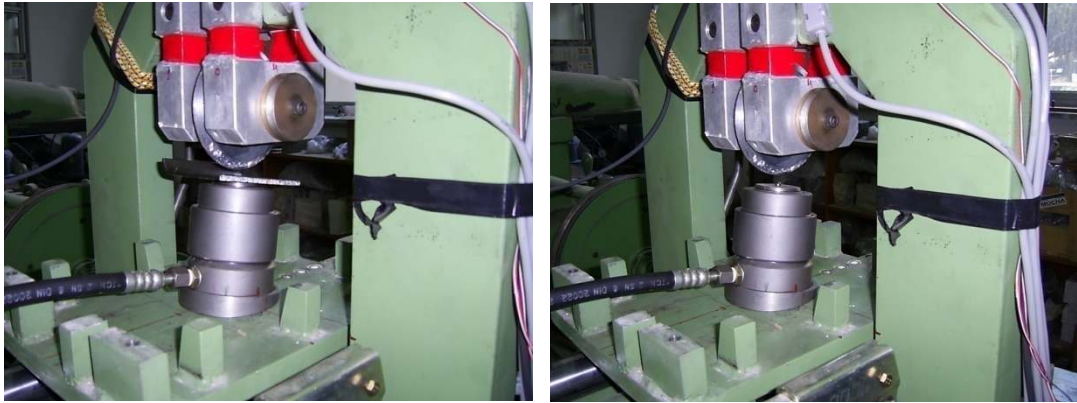
Kalibrasyon çalışmalarının amacı dinamometrenin uygulanan kuvvet altındaki cevap karakteristiğinin ortaya konulmasıdır. Kaya kesme deneylerine başlamadan önce tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) kullanılan her bir disk keski için dinamometre kalibrasyonu yapılmıştır.

Tam boyutlu doğrusal kazı setinde, 13 inç (330 mm) CCS tip, 15 inç (380 mm) V tip ve 17 inç (432 mm) CCS tip disk keskiyle kesme deneylerinin yapılması planladığından dolayı bu üç tip gerçek boyutlu keski için kalibrasyon yapılmıştır. Taşınabilir doğrusal kazı setinde ise kesme deneylerinin gerçekleştirildiği mini V tip (130 mm) disk keski için kalibrasyon yapılmıştır.

3.2.3.1 Mini V (130 mm) tip disk keski için PLCM dinamometresinin kalibrasyonu

TÜBİTAK projesi kapsamında geliştirilen taşınabilir doğrusal kazı setinin kalibrasyonu hususunda en önemli ilke belirli koşullarda ölçülen değerlerin tekrar edilebilmesi ve sonuçların güvenilir olmasıdır [2]. Bu nedenle yeni tasarımılandırılan dinamometrenin güvenilirliğini test etmek için aynı şartlarda ölçümler en az 10'ar defa tekrar edilmiş, uygulanan kuvvet ve çıkış sinyalleri arasındaki ilişkilerin doğrusal olup olmadığı kontrol edilmiştir.

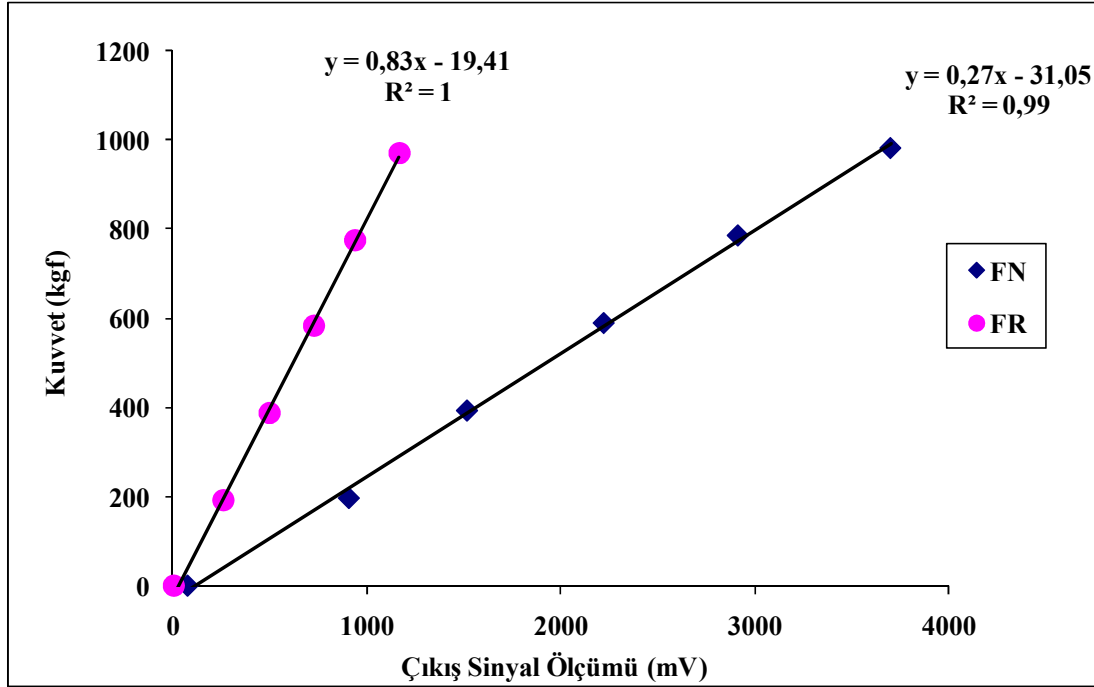
Yüklemelerde 9 derece eğimli ve 90 derecede (dik yükleme), kesit alanı $19,6 \text{ cm}^2$ olan hidrolik piston kullanılmıştır. Pistona ilk on yüklemde 10, 20, 30, 40, 50 bar basınç uygulanmış ve veri toplama sistemi ile dinamometre ayaklarındaki gerilim ölçerlerde oluşan mili voltlar mertebesindeki sinyaller kaydedilmiştir. 9 derecelik eğimde kuvvetler bileşenlere ayrılarak hem yatay hem düşey kuvvetlerin kalibrasyon katsayıları elde edilmiştir. 90 derecelik yüklemde sadece normal kuvvetleri temsil eden ölçü ayaklarından sinyal alınması gerekirken, yuvarlanma kuvvetlerini temsil eden ayaklarda da sinyal alınmıştır. Buna rağmen etkileşim %1,5 civarında olduğu için sonuçların kabul edilebilir seviyede olduğu kabul edilmiştir. Şekil 3.18'de dinamometre kalibrasyon çalışmaları görülmektedir. Kuvvet ve çıkış sinyalleri arasındaki tipik bir ilişki Şekil 3.19'da görülmektedir.



Şekil 3.18: Hidrolik piston ile yapılan kalibrasyon çalışmaları (Mini V tip disk, 9 derece eğim ile yükleme).

Yüklemde dinamometrede oluşan düşey kuvvet (FN), 4 ölçü ayağındaki sinyallerin toplamı ile bulunmaktadır. Yatay kuvvet (FR) ise 2 ön ölçüm ayaklarındaki sinyallerin toplamlarının 2 arka ölçüm ayaklarındaki sinyallerin toplamından

çıkarılması ile hesaplanmaktadır. Çizelge 3.1’de 9 derece eğim ile yapılan kalibrasyon çalışmalarının toplu sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.19: Mini V tip disk keski için kalibrasyon verilerine tipik bir örnek.

Çizelge 3.1: Mini V tip disk keski için 9 derece eğim ile gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarının toplu sonuçları.

Kalibrasyon no	Kalibrasyon katsayısı	
	FN (kg/mV)	FR (kg/mV)
1	0,27	0,13
2	0,27	0,13
3	0,27	0,12
4	0,27	0,13
5	0,27	0,13
6	0,27	0,12
7	0,27	0,13
8	0,29	0,14
9	0,27	0,12
10	0,27	0,14
11	0,26	0,18
12	0,26	0,19
13	0,26	0,20
14	0,26	0,21
15	0,26	0,15
16	0,26	0,16
17	0,26	0,16
18	0,26	0,16
19	0,26	0,16
20	0,26	0,17
ortalama	0,27	0,15

Kalibrasyon alışmaları sonucunda kalibrasyon katsayıları olarak; FN için 0,27 kgf/mV ve FR için 0,15 kgf/mV kullanılabileceğine karar verilmiştir. Yukarıdaki sonuçlardan da grldğu gibi, sonuçlar tekrarlanabilir niteliktedir, lme köprüleri arasındaki etkileşim kabul edilebilir seviyededir.

3.2.3.2 13 inç (330 mm) aplı CCS tip disk keski için LCM dinamometresinin kalibrasyonu

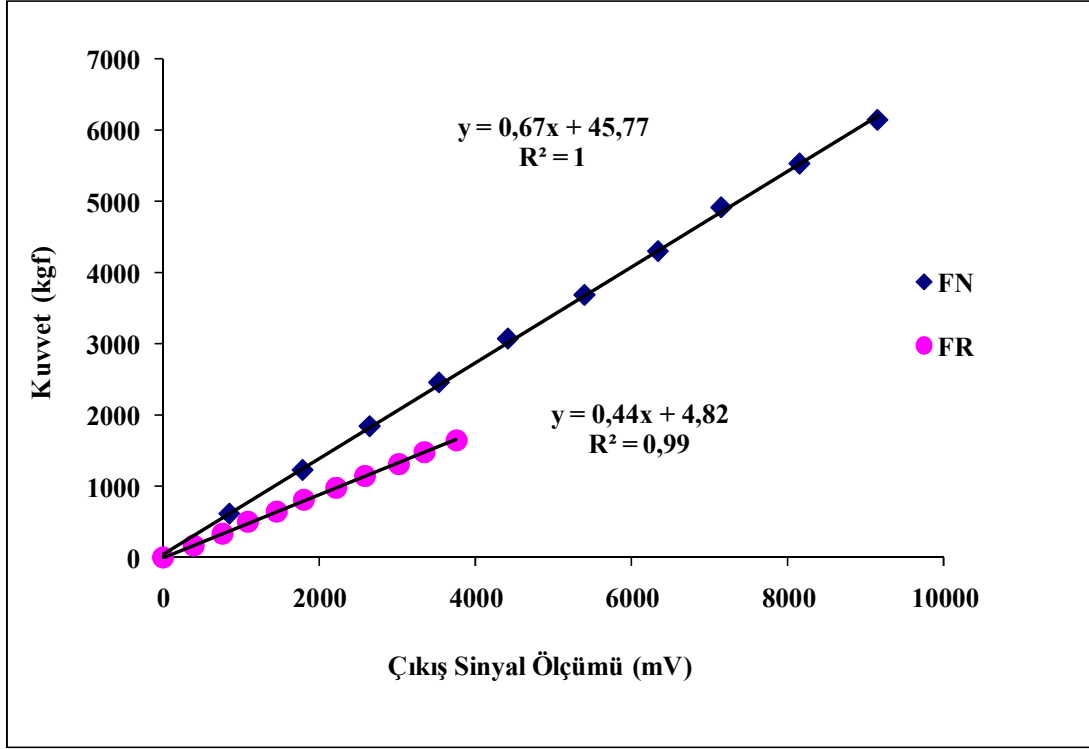
Kartal-Kadıköy Metro hattından getirilen arkoz ve şeyl numuneleri ile Başakşehir-İkitelli Metro hattından getirilen fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde 13 in CCS tip disk keski ile kesme deneylerine başlamadan önce bu keski için LCM dinamometresinin kalibrasyonu yapılmıştır. Sonuçların güvenilirliği için tekrarlanabilir olması kriterinden yola çıkarak, kalibrasyon ölümü 3 kez tekrarlanmıştır.

Yüklemelerde 15 derece eğimli, kesit alanı 63,62 cm² olan hidrolik piston kullanılmıştır. 13 in CCS tip disk keskiye piston vasıtasıyla 0'dan 100 bara kadar basınç uygulanmıştır ve her 10 bar birimlik basınçta veri toplama sistemi ile dinamometre ayaklarındaki gerilim ölçerlerde oluşan milivoltlar mertebesindeki sinyaller kaydedilmiştir. 15 derecelik eğimde kuvvetler bileşenlere ayrılarak hem yatay hem düşey kuvvetlerin kalibrasyon katsayıları elde edilmiştir. Kuvvetler ve çıkış sinyalleri arasındaki tipik bir ilişki şekil 3.20'de gösterilmektedir. şekil 3.21'de dinamometre kalibrasyon çalışmaları görülmektedir.

Yüklemede dinamometrede oluşan düşey kuvvet (FN), 4 l ayağındaki sinyallerin toplamı ile bulunmaktadır. Yatay kuvvet (FR) ise 2 n ölçü ayaklarındaki sinyallerin toplamlarının 2 arka ölçü ayaklarındaki sinyallerin toplamından çıkarılması ile hesaplanmaktadır. Çizelge 3.2'de 15 derece eğim ile yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları görülmektedir.

Çizelge 3.2: 13 in CCS tip disk keski için 15 derece eğim ile gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarının toplu sonuçları.

Kalibrasyon no	Kalibrasyon katsayısı	
	FN (kg/mV)	FR (kg/mV)
1	0,69	0,44
2	0,68	0,44
3	0,68	0,40
ortalama	0,68	0,43



Şekil 3.20: 13 inç CCS tip disk keski için kalibrasyon verilerine tipik bir örnek.



Şekil 3.21: Hidrolik piston ile yapılan kalibrasyon çalışmaları (13 inç CCS tip disk, 15 derece eğim ile yükleme).

Bulunan bu katsayıların güvenilirliğini arttırmak ve elde edilen bu değerlerin kullanılabilirliğini onaylamak için 15 derece eğimde disk keskiye yanal olarak yükleme yapılmıştır. Bu çalışma Şekil 3.22’de görülmektedir. Bu çalışmada da disk keskiye 0’dan 100 bara kadar basınç uygulanmıştır ve her 10 bar birimlik basınçta veri toplama sistemi ile dinamometre ayaklarındaki gerilim ölçerlerde oluşan mili voltlar mertebesindeki sinyaller kaydedilmiştir. Sonuçların güvenilirliği için tekrarlanabilir olması kriterinden yola çıkarak, kalibrasyon ölçümü 3 kez tekrarlanmıştır. Çizelge 3.3’te 15 derece eğim ile yanal yükleme yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.22: 13 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile kalibrasyon.

Çizelge 3.3: 13 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları.

Kalibrasyon no	Kalibrasyon katsayısı	
	FN (kg/mV)	FR (kg/mV)
1	0,68	0,50
2	0,70	0,53
3	0,68	0,38
ortalama	0,68	0,47

Yanal yükleme ile yapılan kalibrasyon çalışmasının sonuçlarının 15 derece eğimle yapılan dik yükleme sonuçlarını desteklediği görülmektedir. Kalibrasyon katsayıları olarak; FN için 0,68 kgf/mV ve FR için 0,43 kgf/mV kullanılabileceğine karar verilmiştir.

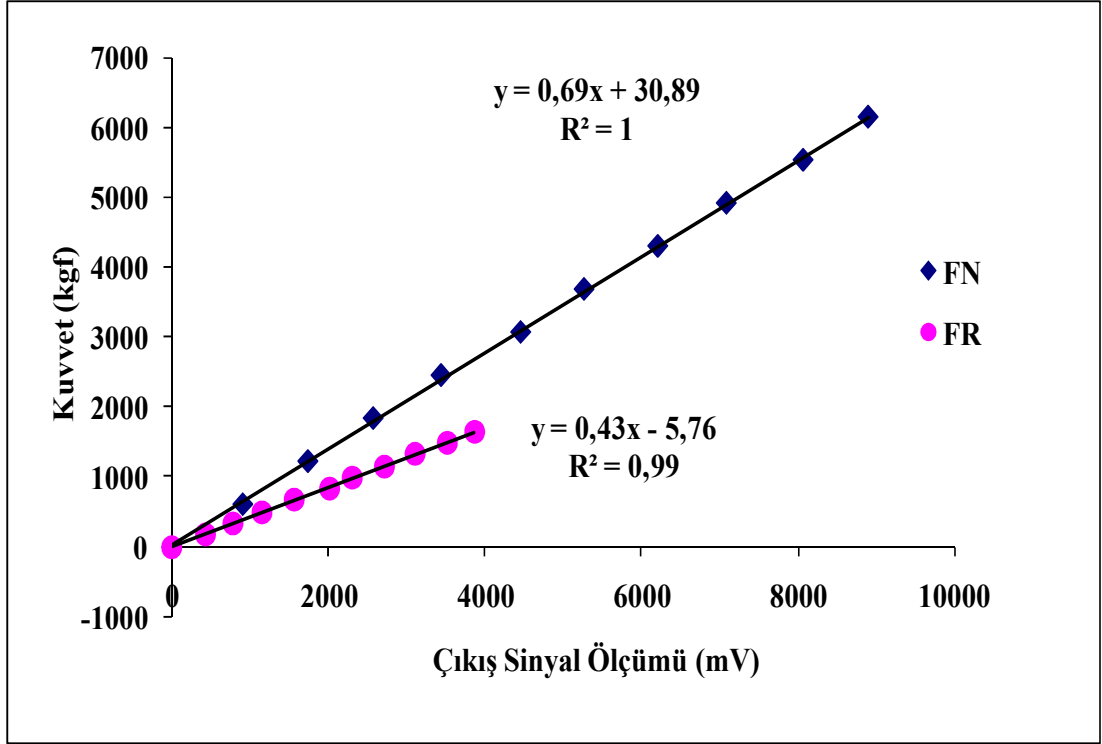
3.2.3.3 15 inç (380 mm) çaplı V tip disk keski için LCM dinamometresinin kalibrasyonu

Kartal-Kadıköy Metro hattından getirilen arkoz ve şeyl numuneleri ile Başakşehir-İkitelli Metro hattından getirilen fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde 15 inç V tip disk keski ile kesme deneylerine başlamadan bu keski için LCM dinamometresinin kalibrasyonu yapılmıştır. Sonuçların güvenilirliği için tekrarlanabilir olması kriterinden yola çıkarak, kalibrasyon ölçümü 3 kez tekrarlanmıştır.

Yüklemelerde 15 derece eğimli, kesit alanı $63,62 \text{ cm}^2$ olan hidrolik piston kullanılmıştır. 15 inç V tip disk keskiye piston vasıtasıyla 0'dan 100 bara kadar basınç uygulanmıştır ve her 10 bar birimlik basınçta veri toplama sistemi ile dinamometre ayaklarındaki gerilim ölçerlerde oluşan milivoltlar mertebesindeki sinyaller kaydedilmiştir. 15 derecelik eğimde kuvvetler bileşenlere ayrılarak hem yatay hem düşey kuvvetlerin kalibrasyon katsayıları elde edilmiştir. Kuvvetler ve çıkış sinyalleri arasındaki tipik bir ilişki Şekil 3.23'te görülmektedir. Şekil 3.24 dinamometre kalibrasyon çalışmaları görülmektedir. Çizelge 3.4'te 15 derece eğim ile yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları görülmektedir.

Çizelge 3.4: 15 inç V tip disk keski için 15 derece eğim ile gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarının toplu sonuçları.

Kalibrasyon no	Kalibrasyon katsayısı	
	FN (kg/mV)	FR (kg/mV)
1	0,69	0,42
2	0,70	0,43
3	0,70	0,42
ortalama	0,70	0,42

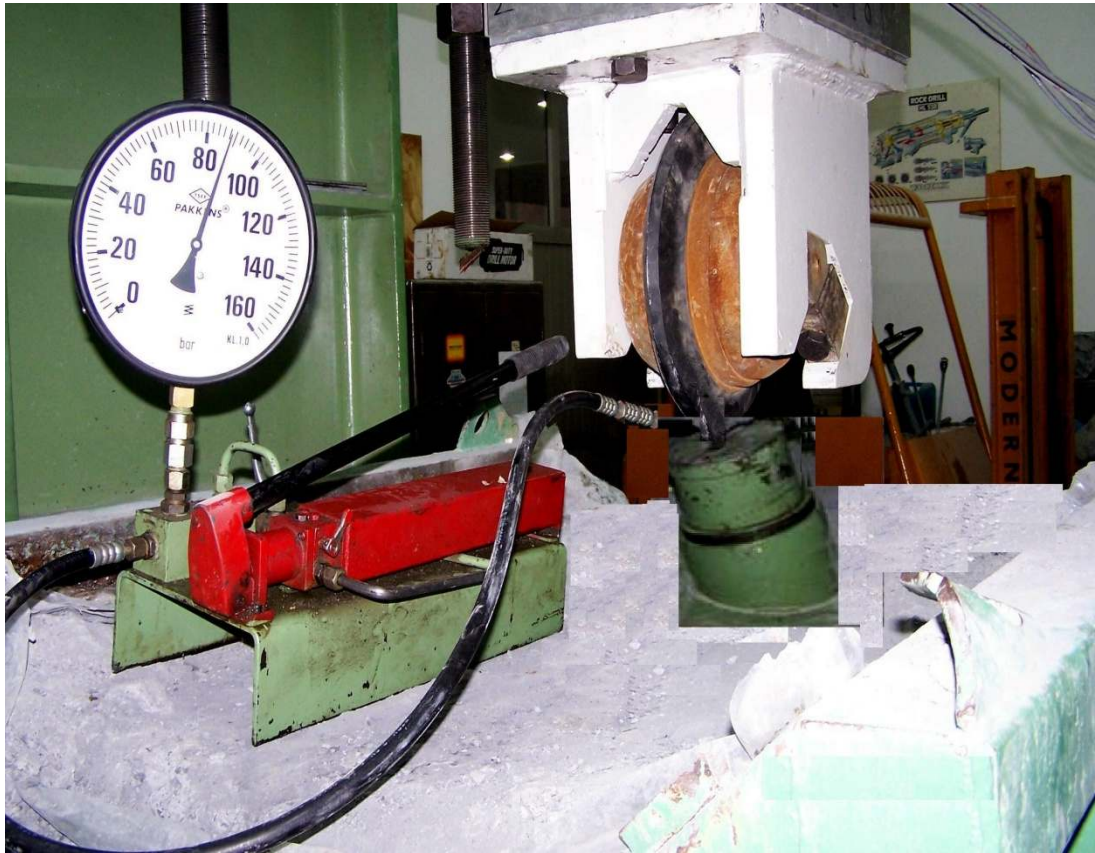


Şekil 3.23: 15 inç V tip disk keski için kalibrasyon verilerine tipik bir örnek.



Şekil 3.24: Hidrolik piston ile yapılan kalibrasyon çalışmaları (15 inç V tip disk, 15 derece eğim ile yükleme).

Bulunan bu katsayıların güvenilirliğini arttırmak ve elde edilen bu değerlerin kullanılabilirliğini onaylamak için 15 derece eğimde disk keskiye yanal olarak yükleme yapılmıştır. Bu çalışma Şekil 3.25'te görülmektedir. Bu çalışmada da disk keskiye 0'dan 100 bara kadar basınç uygulanmıştır ve her 10 bar birimlik basınçta veri toplama sistemi ile dinamometre ayaklarındaki gerilim ölçerlerde oluşan milivoltlar mertebesindeki sinyaller kaydedilmiştir. Sonuçların güvenilirliği için tekrarlanabilir olması kriterinden yola çıkarak, kalibrasyon ölçümü 3 kez tekrarlanmıştır. Çizelge 3.5'te 15 derece eğim ile yanal yükleme yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.25: 15 inç V tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile kalibrasyon.

Çizelge 3.5: 15 inç V tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları.

Kalibrasyon no	Kalibrasyon katsayısı	
	FN (kg/mV)	FR (kg/mV)
1	0,68	0,38
2	0,71	0,32
3	0,69	0,37
ortalama	0,70	0,36

Yanal yükleme ile yapılan kalibrasyon çalışmasının sonuçlarının 15 derece eğimle yapılan dik yükleme sonuçlarını desteklediği görülmektedir. Kalibrasyon katsayıları olarak; FN için 0,70 kgf/mV ve FR için 0,42 kgf/mV kullanılabileceğine karar verilmiştir.

3.2.3.4 17 inç çaplı (432 mm) CCS tip disk keski için LCM dinamometresinin kalibrasyonu

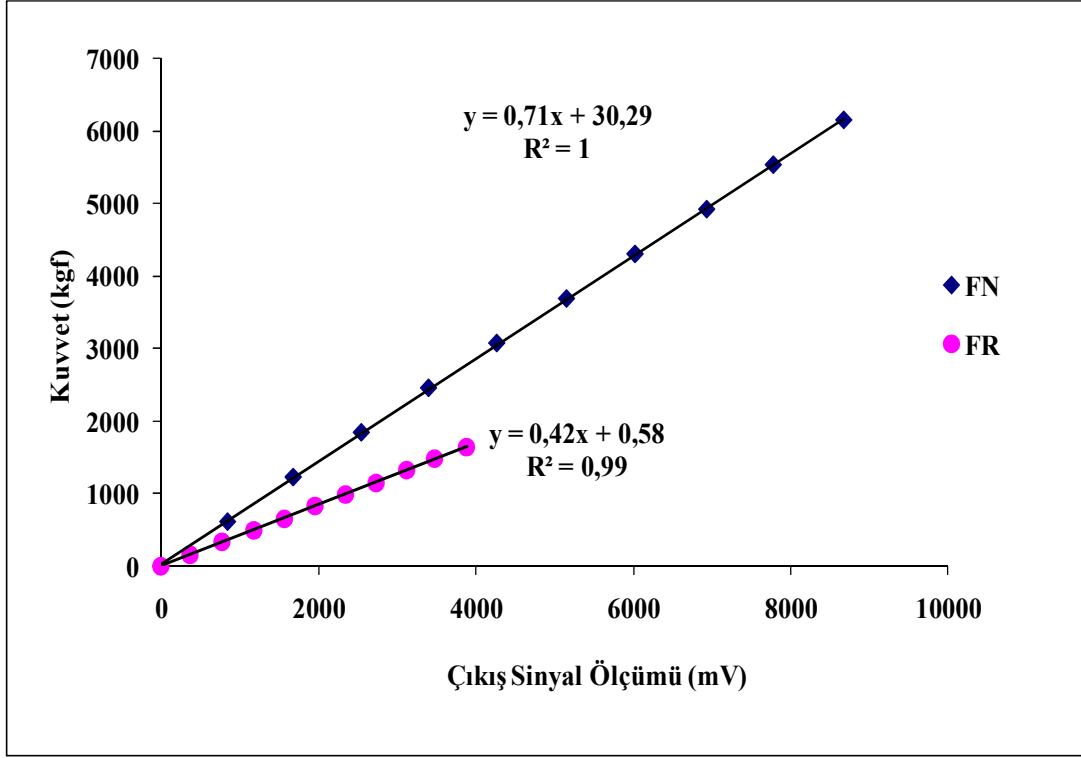
Kartal-Kadıköy Metro hattından getirilen arkoz ve şeyl numuneleri ile Başakşehir-İkitelli Metro hattından getirilen fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde 17 inç CCS tip disk keski ile kesme deneylerine başlamadan önce bu keski için LCM dinamometresinin kalibrasyonu yapılmıştır. Sonuçların güvenilirliği için tekrarlanabilir olması kriterinden yola çıkarak, kalibrasyon ölçümü 3 kez tekrarlanmıştır.

Yüklemelerde 15 derece eğimli, kesit alanı 63,62 cm² olan hidrolik piston kullanılmıştır. 17 inç CCS tip disk keskiye piston vasıtasıyla 0'dan 100 bara kadar basınç uygulanmıştır ve her 10 bar birimlik basınçta veri toplama sistemi ile dinamometre ayaklarındaki gerilim ölçerlerde oluşan milivoltlar mertebesindeki sinyaller kaydedilmiştir. 15 derecelik eğimde kuvvetler bileşenlere ayrılarak hem yatay hem düşey kuvvetlerin kalibrasyon katsayıları elde edilmiştir. Kuvvetler ve çıkış sinyalleri arasındaki tipik bir ilişki Şekil 3.26'da gösterilmektedir. Şekil 3.27'de dinamometre kalibrasyon çalışmaları görülmektedir.

Yüklemede dinamometrede oluşan düşey kuvvet (FN), 4 ölçü ayağındaki sinyallerin toplamı ile bulunmaktadır. Yatay kuvvet (FR) ise 2 ön ölçüm ayaklarındaki sinyallerin toplamının 2 arka ölçüm ayaklarındaki sinyallerin toplamından çıkarılması ile hesaplanmaktadır. Çizelge 3.6'da 15 derece eğim ile yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları görülmektedir.

Çizelge 3.6: 13 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğim ile gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarının toplu sonuçları.

Kalibrasyon no	Kalibrasyon katsayısı	
	FN (kg/mV)	FR (kg/mV)
1	0,71	0,40
2	0,74	0,44
3	0,71	0,42
ortalama	0,72	0,42



Şekil 3.26: 17 inç CCS tip disk keski için kalibrasyon verilerine tipik bir örnek.



Şekil 3.27: Hidrolik piston ile yapılan kalibrasyon çalışmaları (17 inç CCS tip disk, 15 derece eğim ile yükleme).

Bulunan bu katsayıların güvenilirliğini arttırmak ve elde edilen bu değerlerin kullanılabilirliğini onaylamak için 15 derece eğimde disk keskiye yanal olarak yükleme yapılmıştır. Bu çalışma Şekil 3.28’de görülmektedir. Bu çalışmada da disk keskiye 0’dan 100 bara kadar basınç uygulanmıştır ve her 10 bar birimlik basınçta veri toplama sistemi ile dinamometre ayaklarındaki gerilim ölçerlerde oluşan milivoltlar mertebesindeki sinyaller kaydedilmiştir. Sonuçların güvenilirliği için tekrarlanabilir olması kriterinden yola çıkarak, kalibrasyon ölçümü 3 kez tekrarlanmıştır. Çizelge 3.7’de 15 derece eğim ile yanal yükleme yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.28: 17 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile kalibrasyon.

Çizelge 3.7: 17 inç CCS tip disk keski için 15 derece eğimde yanal yükleme ile yapılan 3 kalibrasyon çalışmasının sonuçları.

Kalibrasyon no	Kalibrasyon katsayısı	
	FN (kg/mV)	FR (kg/mV)
1	0,70	0,30
2	0,69	0,26
3	0,70	0,28
ortalama	0,70	0,28

17 inç CCS tip disk keski ile yapılan dikey ve yanal kalibrasyon çalışmalarında normal kuvvetlerde (FN) yakın kalibrasyon katsayıları elde edilmiştir fakat yuvarlanma kuvvetlerinde (FR) farklı kalibrasyon katsayıları elde edilmiştir. Bunun sebebi yanal yükleme esnasında hatalar gösterilebilir. Gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmaları sonucunda, kalibrasyon katsayıları olarak; FN için 0,72 kgf/mV ve FR için 0,42 kgf/mV kullanılabileceğine karar verilmiştir.

3.2.4 Deneysel yöntem ve parametrelerin tasarımı

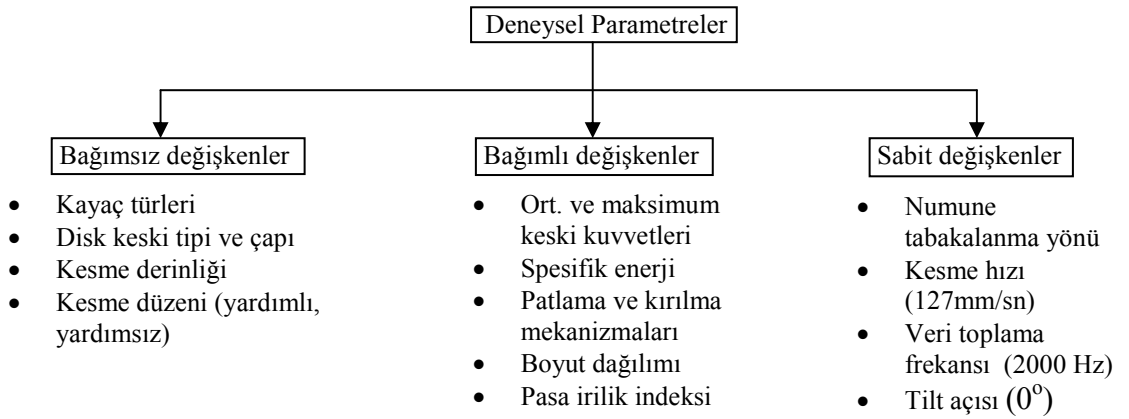
Bu çalışmada, tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) gerçekleştirilen kesme deneyleri ile ilgili deneysel parametreler/değişkenler Çizelge 3.8’de özetlenmiştir.

Doğrusal kesme deney programında deneysel parametreleri üç ana grupta toplayabiliriz. Bunlar; bağımsız değişkenler, bağımlı değişkenler ve sabit tutulan değişkenlerdir.

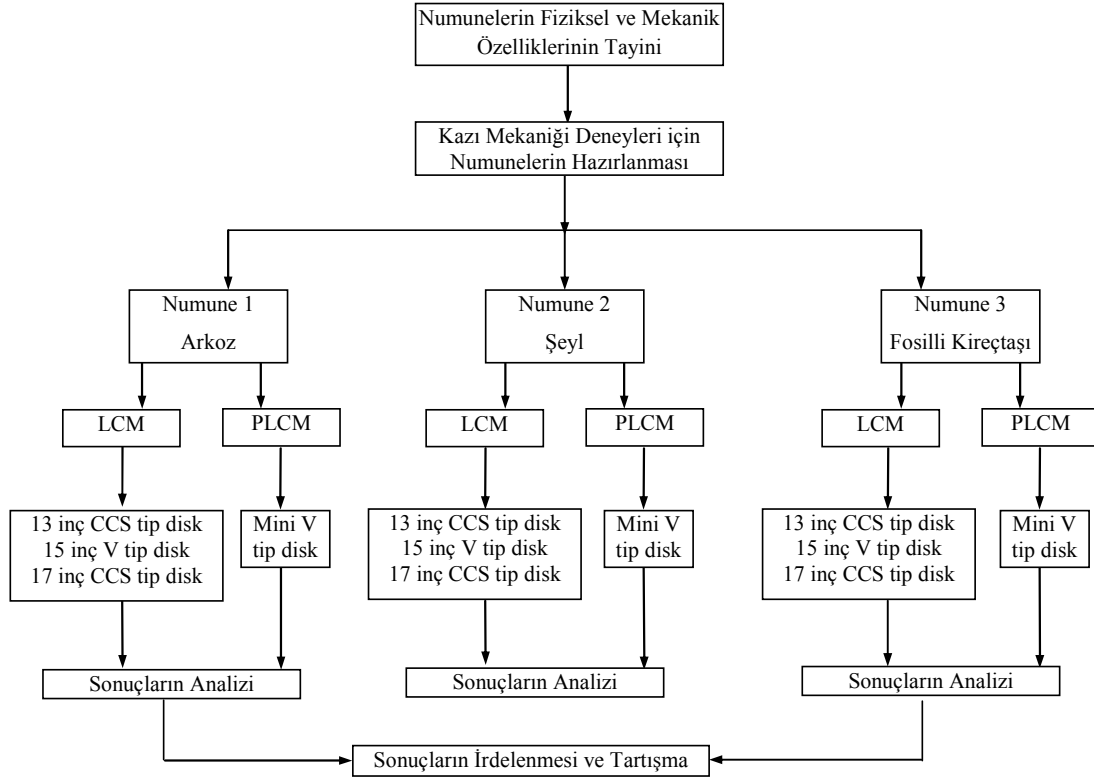
Bağımsız değişkenler: Kayaç çeşidi, disk keski tipi (V tip, mini V tip ve 2 değişik çapta CCS tip), kesme derinliği ve kesme düzeni (yardımlı, yardımsız). Bağımlı değişkenler (ölçülen veya hesaplanan): Ortalama ve maksimum keski kuvvetleri (normal ve yuvarlanma kuvveti), spesifik enerji (pasa ağırlığı, kesme uzunluğu ve kesme kuvvetinin fonksiyonu), patlama ve kırılma mekanizmaları (hesap ve gözlemlere dayanarak) ve kesme sonucu oluşan pasanın boyut dağılımı ile pasa irilik indeksleridir. Deneylerdeki sabit tutulan parametreler: Numune tabakalanma yönü (kesme yönüne dik), kesme hızı (~127 mm/sn), tilt açısı (0°) veri toplama frekansı (2000 Hz) olarak belirlenmiştir. Deney tekrar sayısı en az üçtür. Deneysel parametreler Şekil 3.29’da ve deneylerde izlenen yöntem Şekil 3.30’da özetlenmiştir.

Çizelge 3.8: Deneysel parametreler/değişkenler.

Numune adı	Keski tipi	Kes me derinliği (mm)	LCM							PLCM
			yardımsız	s=40mm	s=70mm	s=75mm	s=80mm	s=90mm	s=100mm	yardımsız
ARKOZ	13" CCS tip	3	X		X					
		5	X		X		X			
		7	X		X		X			
	15" V tip	3	X	X						
		5	X	X						
		7	X	X						
		9		X						
	17" CCS tip	3	X				X			
		5	X				X			
		7	X				X			
		9	X				X			
	Mini V	5								X
ŞEYL	13" CCS tip	4					X			
		5	X						X	
		6					X			
		7	X						X	
		8					X			
	15" V tip	9	X						X	
		5	X							
		7	X				X			
		9	X				X			
	17" CCS tip	12					X			
		5	X				X			
		7	X				X			
		9	X				X			
	Mini V									X
FOSİLLİ- KUMLU KİREÇ TAŞI	13" CCS tip	5	X			X				
		7	X			X				
		9	X			X				
	15" V tip	5	X			X				
		7,5	X			X				
		10	X			X				
		12	X			X				
		15				X				
	17" CCS tip	5	X			X				
		7	X			X		X		
		9	X			X		X		
		12						X		
	Mini V									X



Şekil 3.29: Deneysel parametreler.



Şekil 3.30: Deneysel yöntem şeması.

Deneysel Parametrelerin Açıklaması:

Kayaç türleri: Bu çalışmada 3 farklı kayaç numunesi kullanılmıştır. Kurtköy Formasyonunu temsilen arkoz ve Gözdağ Formasyonunu temsilen şeyl numuneleri Kartal-Kadıköy Metro hattından alınmıştır. Kırklareli Formasyonunu temsilen ise fosilli kireçtaşı numunesi Başakşehir-İkitelli Metro hattından alınmıştır.

Veri toplama hızı: Veri toplama ünitesi üç eksenli yük hücresi, amplifikatör ve kişisel bilgisayardan oluşur. Ticari bir program yardımıyla veri istenilen genlikte ve veri toplama hızında kaydedilir. Amplifikatörün besleme voltajı 10 V' tur. Birim deformasyon ölçer (Wheatstone) köprülerinden geçen elektrik, sistemden çıkan analog voltaj değerini dijitalle çeviren ve bilgisayara bağlı olan bir (Analog/Digital) kart vasıtası ile dijital olarak bilgisayarda depolanır. Veri toplama frekansı 50000 Hz'e kadar ayarlanabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında saniyede 2000 kesme verisi alınmıştır.

Keski tipi: Kesme deneylerinde farklı uç yapısına ve disk çapına sahip dört tip disk keski kullanılmıştır. Bunlar; 13 inç (330 mm) CCS tip, 15 inç (380 mm) V tip, 17 inç (432 mm) CCS tip ve mini V tip (130 mm) disk keskilidir.

Bu üç kayacın, tam boyutlu doğrusal (LCM) ve taşınabilir doğrusal (PLCM) kazı setlerindeki kesme işlemleri için kullanılan 13 inç CCS tip, 15 inç V tip, 17 inç CCS tip disk ve mini V tip disk keski Şekil 3.31-34'te görülmektedir. CCS tip disk keski sabit kesit alanlı disk keski olarak adlandırılırlar. Bu keski aşındıkça uç kesit alanının özelliğini kaybetmezler ve bu özelliklerinden ötürü günümüzde TBM'lerde en çok tercih edilen keskidir. V tip disk keski ise keski uçları V şeklinde sivri olduklarından bu isimle adlandırılırlar. Sert formasyonlarda çabuk aşınmaktadırlar ve bu sebepten ötürü günümüzde daha az tercih edilmektedirler. Kaya kesme deneylerinde kullanılan sabit kesit alanlı 13 inç disk keski; 330 mm disk çapına ve 12 mm uç genişliğine sahiptir. 17 inç disk keski ise; 432 mm disk çapına ve 18 mm uç genişliğine sahiptir. Kaya kesme deneylerinde kullanılan 15 inç V tip disk keski 380 mm disk çapına, 1,4 mm uç genişliğine ve 90° uç açısına sahiptir. Mini V disk keski ise 130 mm disk çapına, 1 mm uç genişliğine ve 70° uç açısına sahiptir.



Şekil 3.31: 13 inç CCS tip disk keski.



Şekil 3.32: 15 inç V tip disk keski.



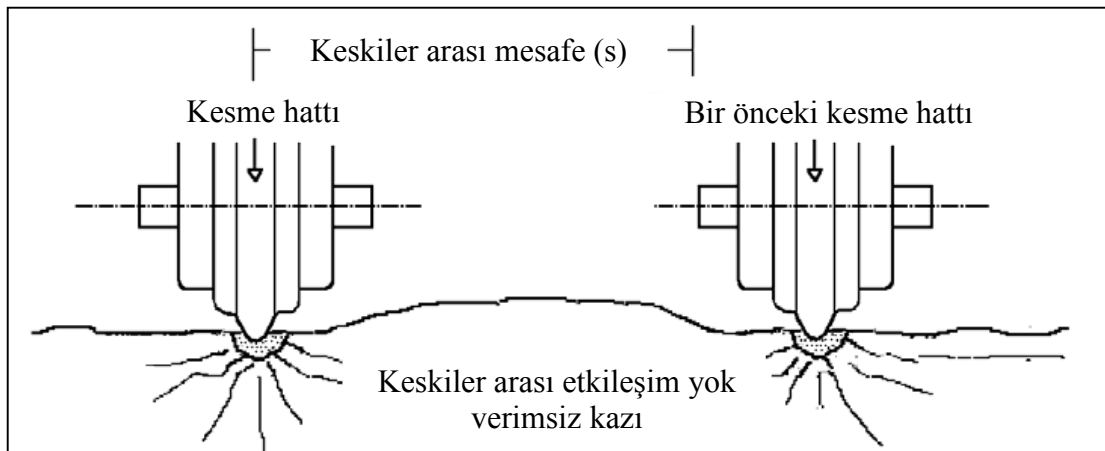
Şekil 3.33: 17 inç CCS tip disk keski.



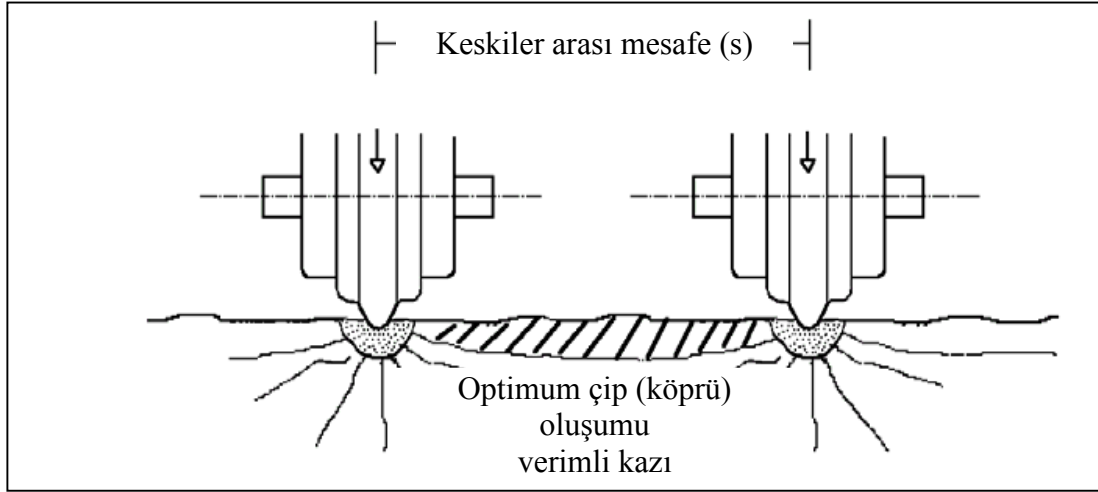
Şekil 3.34: Mini V tip disk keski.

Kesme derinliği: Her numunenin kırılma mekanizması göz önüne alınarak farklı kesme derinliklerinde (3 ile 12 mm aralığında) kaya kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Kesme düzeni: Yardımsız kesme; bir kesme hattının bir sonraki kesme hattıyla etkileşmeden kazı işleminin yapılmasıdır (Şekil 3.35). Buradaki amaç, keskiye etkileyen maksimum kuvvetlerin belirlenmesidir. Yardımlı kesme; yan yana kesilen iki hattın birbiri ile etkileşimine izin verilmesidir (Şekil 3.36). Buradaki amaç ise optimum s/d oranının belirlenmesidir.

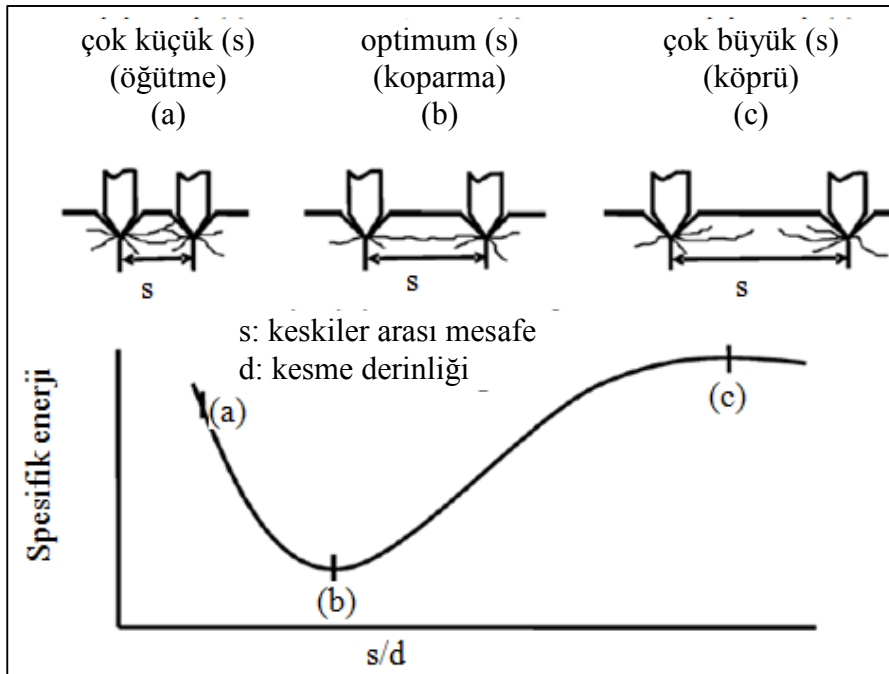


Şekil 3.35: Kaya kesme deneylerinde yardımsız kesme [11].



Şekil 3.36: Kaya kesme deneylerinde yardımcı kesme [11].

Spesifik enerji: Birim hacimdeki kayayı kesmek için gerekli olan enerjidir. Kazı mekaniği prensiplerine bağlı olarak yapılan kesme deneylerinde, optimum keskiler arası mesafe/kesme derinliği (s/d) oranı değerinde, spesifik enerji minimum olmaktadır. Bu değer SE ile ifade edilmektedir ve birimi kWh/m^3 veya MJ/m^3 ile gösterilmektedir. Optimum keskiler arası mesafe, kesme derinliğine bağlı olduğundan, boyutsuz olan s/d oranı optimum çalışma şartlarını vermektedir (Şekil 3.37).



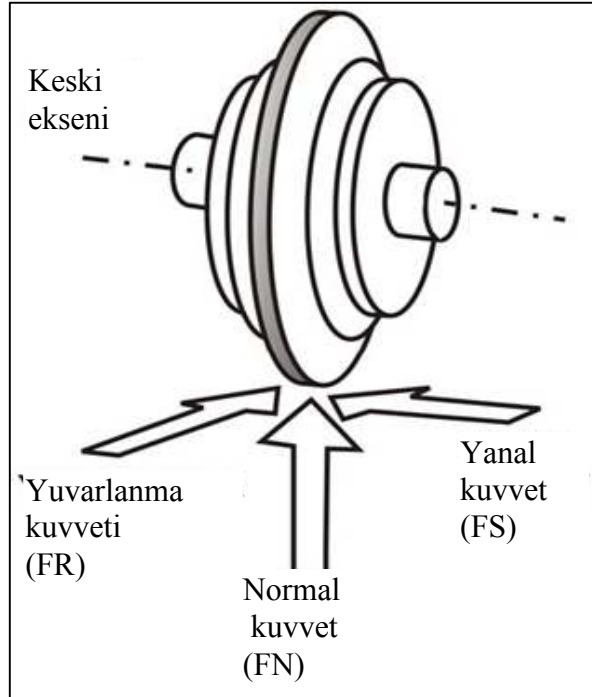
Şekil 3.37: Keskiler arası mesafe ve kesme derinliğinin spesifik enerjiye etkisi [11].

Şekil 3.37(a) ile gösterilen kesme koşulu, keskiler arası mesafenin birbirine çok yakın olduğunu ifade etmektedir ve kesme işleminde iki hat arasından pasa

öğütülmüş olarak alınır, bunun anlamı çok yüksek spesifik enerji değeridir ve verimsiz kesme işlemi olarak adlandırılır. Şekil 3.37(b) ile gösterilen kesme koşulu, optimum keskiler arası mesafeyi göstermektedir, böylece iki kesme hattı arasından iri parçalar kopartılabilir ve optimum spesifik enerji değerlerine ulaşılır. Şekil 3.37(c) ile gösterilen kesme koşulu ise, keskiler arası mesafenin birbirine çok uzak olduğunu ifade etmektedir ve kesme hatlarının birbiri ile etkileşimi gerçekleşmediğinden çok yüksek spesifik enerji değeri elde edilir ve verimsiz kesme işlemi olarak adlandırılır.

Numune tabakalanma yönü: Tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) yapılan deneylerde gerekli karşılaştırmaları yapabilmek için kasalara numune yerleştirmede aynı standartlar uygulanmıştır. Arkoz ve fosilli kireçtaşıda tabakalanma yoktur. Şeyl numunesi tabakalanmaya paralel kesilmiştir.

Keski kuvvetleri: Kesme esnasında keskiye gelen kuvvetler normal (FN), yuvarlanma (FR) ve yanal (FS) olarak üçe ayrılır (Şekil 3.38). Deneyler yapılırken disk keskiye gelen kuvvetler dinamometre yardımı ile ölçülmektedir.



Şekil 3.38: Disk keskiye gelen kuvvetler [97].

Boyut dağılımı ve pasa irilik indeksi: Tünel açma makineleriyle gerçekleştirilen kazıların verimli olup olmadığı, laboratuvar kesme deneylerinin yanı sıra, kazıdan çıkan pasaların incelenmesiyle de anlaşılabilir. Kazı sonrası çıkan pasanın parça boyut dağılımının kesme verimiyle doğrudan orantılı olduğu ve kazı prosesi - kaya

parçalama mekanizması hakkında bizlere bilgi verdiği araştırmalar sonucunda ortaya konmuştur [98]. Roxborough, kesilmiş kayaçların boyut dağılımını “pasa irilik katsayısı (PİK)” olarak tanımlamıştır [99]. PİK, kullanılan eleklerin her birinin elek üstünde kalan malzemelerin kümülatif toplamı olarak bulunmaktadır. Roxborough tarafından yapılan bu çalışmada spesifik enerji ile PİK arasındaki ilişki ters eğilimli olarak bulunmuştur. Yüksek PİK değerlerinin, düşük spesifik enerji değerlerine karşılık geldiğini belirtmiştir [99].

Bu çalışmada, yapılan bütün kesme deneyleri sonrası oluşan pasalar toplanmıştır. Kesme deneylerinden elde edilen pasalar elek serisine boşaltıldıktan sonra, titreşimli elek üzerine yerleştirilip 10 dakika boyunca aynı sarsıntı frekansında elenmiştir (Şekil 3.39). Her bir elek üzerinde kalan pasa ağırlığı hassas bir terazi ile ölçülmüştür. Daha sonra kümülatif elek üstü yüzdelerinin toplamı olarak adlandırılan “pasa irilik katsayısı” değeri hesaplanmıştır. Çizelge 3.9’da, kullanılan elek açıklarını ve kesme deneyleri sonucu oluşan pasaların elek analizini gösteren bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.39: Elek analizlerinde kullanılan titreşimli elek.

Çizelge 3.9: Elek serisi ve pasa irilik indeksinin hesaplanması.

Proje: Kartal-Kadıköy			Kayaç: Arköz		Tarih:06.05.2008	
s (mm): Yardımsız			d (mm): 3			
No	Elek boyutu (mm)	Pasa ağırlığı (gr)	Yüzde elek üstü (%)	Kümülatif elek üstü Ağırlık (gr)	Elek üstü (%)	Pasa irilik katsayısı
1	+25	0	0	0	0	397
2	-25+8	103,0	35,7	103,0	35,7	
3	-8+2	111,5	38,6	214,5	74,3	
4	-2+0,5	44,5	15,4	259,0	89,7	
5	-0,5+0,125	20,4	7,1	279,4	96,8	
6	-0,125	9,2	3,2	288,6	100,0	

Numune hazırlama:

Tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 13 inç CCS tip, 15 inç V tip ve 17 inç CCS tip disk kesimler kullanılarak kesme deneyi yapabilmek için kaya ortamını temsil eden yaklaşık 70×70×100 cm boyutlarına kadar kayaç numuneleri (arköz, şeyl, fosilli kireçtaşı) Kartal-Kadıköy ve Başakşehir-İkitelli tünel güzergahlarından alınarak İTÜ Maden Fakültesi laboratuvarlarına getirilmiştir. Her bir numune, deney kasalarına yerleştirilmiş ve betonlanarak sabitlenmiştir. Bu işlem için ilk önce büyük kaya blokları deney kasalarının içine forklift yardımı ile yerleştirilmiş ve daha sonra betonlama işlemi için beton santralinden mikser getirilmiştir (Şekil 3.40). Tam boyutlu doğrusal kazı setinde deney yapabilmek için hazırlanan numuneye bir örnek Şekil 3.41’de görülmektedir.



Şekil 3.40: Numunenin hazırlanması ve betonlama işlemi.



Şekil 3.41: Tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) için hazırlanmış örnek numune.

Taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) mini V tip disk keski kullanılarak kesme deneyi yapabilmek için yaklaşık 15×15×20 cm boyutlarına kadar kayaç numuneleri (Arkoz, şeyl, fosilli kireçtaşı) küçük deney kasalarına yerleştirilerek kesme deneyleri için hazırlanmıştır. Taşınabilir doğrusal kazı setinde deney yapabilmek için hazırlanan numune setine bir örnek Şekil 3.42’de görülmektedir.



Şekil 3.42: Taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM) için hazırlanmış örnek numune.

3.3 Deneyisel Sonuçlar

3.3.1 Fiziksel ve mekanik deneylerin sonuçları

Bu bölümde, Kartal-Kadıköy Metrosu'ndan alınan arkoz ve şeyl numuneleri ile Başakşehir-İkitelli Metrosu'ndan alınan fosilli kireçtaşı numunesinin formasyon özellikleri ile bu numuneler üzerinde gerçekleştirilen fiziksel ve mekanik testlerin sonuçları verilmiştir. Kayaçların mineral bileşimi ve % oranlarının bulunması, mineral tane boyu analizi, çimentolanma derecesi, dokusal ve petrografik özelliklerinin saptanması kazılacak formasyonların daha iyi tanımlanmasına yardımcı olmaktadır. Buradan yola çıkılarak arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri için ince kesitler alınarak petrografik incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Arkoz numunesinin alındığı Kurtköy Formasyonu Ordovisiyen yaştaadır. Birim mor renkli çakıltası, kumtaşı ve çamurtaşından oluşmaktadır. Formasyonun egemen litolojisi mor renkli, çoğunlukla kaotik içyapılı, tabakalanması belirsiz çakıl taşlarıdır. Bunlar içerisinde seyrek olarak paralel laminasyon ve çapraz tabakalanma izlenmektedir. Çakıltasının taneleri genellikle kuvars, volkanik ve düşük dereceli metamorfitten oluşur ve içerisinde çamur intraklastları bulunur [100]. Şekil 3.43'te arkoz numunesinin temsili görünümü verilmiştir.

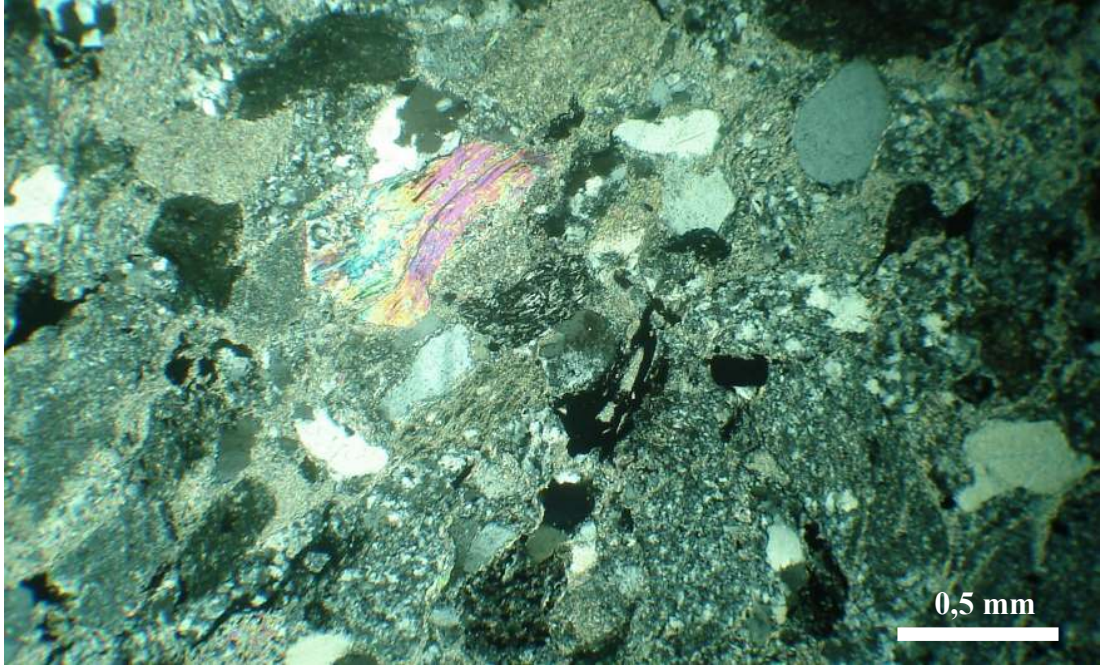
Petrografik olarak kuvars içeriği %15-20'dir. Köşeli, yarı köşeli ve girintili çıkıntılı sınırlara sahip kuvars daneleri matriks içinde dağılmıştır. Kuvars daneleri polarize ışıktaki beyaz, sarımsı canlı renk tonlarıyla dikkat çekmektedir. %10 oranında hafif yönelmiş kuvars kümelenmesi şeklinde izlenen çört oluşumu mevcuttur. %10-15 oranında levhamsı yer yer bükülmüş durumda eflatun, mavi ve açık pembe polarize renklerde muskovit izlenir. %5-10 oranında çok ince daneli serizit mevcuttur. Matriks; mika, silis ve opak özelliğinde %45 oranında çimentodur. Danelerin arasında opak zenginleşmesi vardır. Yer yer siyah dağınık lekeler şeklinde izlenmekte, yer yer de şekilsiz koyu renkli opak daneler şeklindedir. Arkoz numunesinin ince kesit analiz sonuçları Çizelge 3.10'da ve ince kesit fotoğrafı Şekil 3.44'te verilmiştir.



Şekil 3.43: Arkoz numunesinin temsili görünümü [100].

Çizelge 3.10: Arkoz numunesi için ince kesit analiz sonuçları.

Mineraller	Mineral içeriği (% ort)	Tane boyu (mm)	Özellikler
Kuvars	15-20	0,3-0,5	Köşeli yarı köşeli girintili çıkıntılı sınırlara sahip, matriks içinde dağılmış, polarize ışıktaki beyaz, sarımsı canlı renk tonlarında
Çört	5-10	0,5-0,8	Hafif yönlenmiş kuvars kümelenmesi şeklinde
Muskovit	10-15	0,3-0,7	Yer yer bükülmüş levhalar şeklinde, eflatun, mavi, açık pembe polarize renklerde
Serizit	5-10	<0,1	Çok ince daneli.
Çimento (matriks+ çok ince serizit+muskovit daneler)	45		Matriks (Mika+silis+opak) mineral bileşiminde, danelerin arasında opak zenginleşme, yer yer siyah dağınık lekeler şeklinde, yer yer de şekilsiz koyu renkli opak daneler halinde
Kayacın Mohs sertliği 6- 6,5 olarak belirlenmiştir.			



Şekil 3.44: Arkoz numunesi ince kesit fotoğrafı.

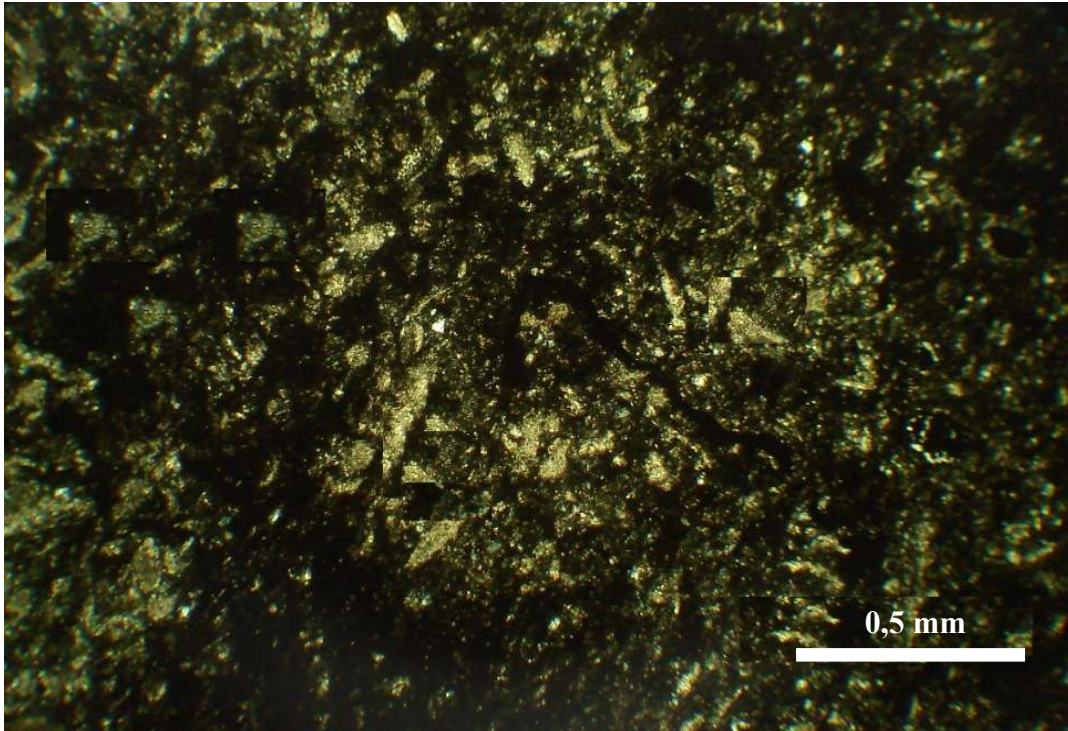
Şeyl numunesinin alındığı Gözdağ Formasyonu Orta Ordovisiyen-Landoveriyen yaştaadır. Birimin alt kesimleri ince laminalı ve yeşilimsi koyu gri renkli yapraklanmalı şeyllerden oluşmaktadır. Üste doğru mercekssel ve ince orta tabakalı feldspatik kumtaşı ara tabakaları izlenir. Bu zonun üzerinde formasyon kuvars arenit-yarı feldspatlı arenit mercekleri içeren şeyller halindedir. Gözdağ Formasyonu tektonik deformasyonlardan etkilenerek çok kıvrımlı ve kırıklı bir yapı kazanmıştır. Bilhassa kırık düzlemlerinden itibaren etkili olan ayrışma sonucu koyu kahverengi kile dönüşmüştür [100]. Şekil 3.45'te şeyl numunesinin temsili görünümü verilmiştir.

Petrografik olarak kayaç yer yer organik madde miktarı %55'e kadar çıkan kil boyutlu matriksten oluşur. Altere feldispat, klorit ve mika parçacıkları da içeren matriksin, illit türü bir kil minerali olduğu söylenebilir. İllit bileşimli kil matriksten sonra kayacın ikinci önemli bileşeni %35'e varan tamamen ayrıışmış feldispatlardır. Feldispat kristallerinin tamamı killeşme, serisitleşme ve kloritleşmeyle temsil edilen alterasyona maruz kalmıştır. Orijinal minerallerinin tanımlanması alterasyon nedeniyle imkansızlaşmış feldispat kristalleri veya daneleri; üçlü, dörtlü ya da daha çok mineral kümeleri halinde matriks içinde dağılmış halde izlenir. Kayacın bir diğer önemli bileşeni altere olmuş mikalar ve kloritlerdir (%10). Ancak topolojileriyle mika ve/veya klorit olarak ayırt edilebilen bu oluşumlar da ileri derecede alterasyona maruz kalarak killeşmişlerdir. Kuvars içeriği %2'dir. İnce danelenmiş, çoğunlukla

yarı yuvarlak – yuvarlak kuvars daneler matriks içinde dağılmıştır. Kuvars daneleri beyaz, sarımsı beyaz canlı renk tonlarıyla hemen dikkat çekmektedir. Kayaç genelinde son derece dağınık bir şekilde, matriks ve altere olmuş diğer kayaç bileşenleri içinde son derece az miktarda opak mineral de tanımlanmaktadır. Şeyl numunesinin ince kesit analiz sonuçları Çizelge 3.11’de ve ince kesit fotoğrafı Şekil 3.46’da verilmiştir.



Şekil 3.45: Şeyl numunesinin temsili görünümü.



Şekil 3.46: Şeyl numunesi ince kesit fotoğrafı.

Çizelge 3.11: Şeyl numunesi için ince kesit analiz sonuçları.

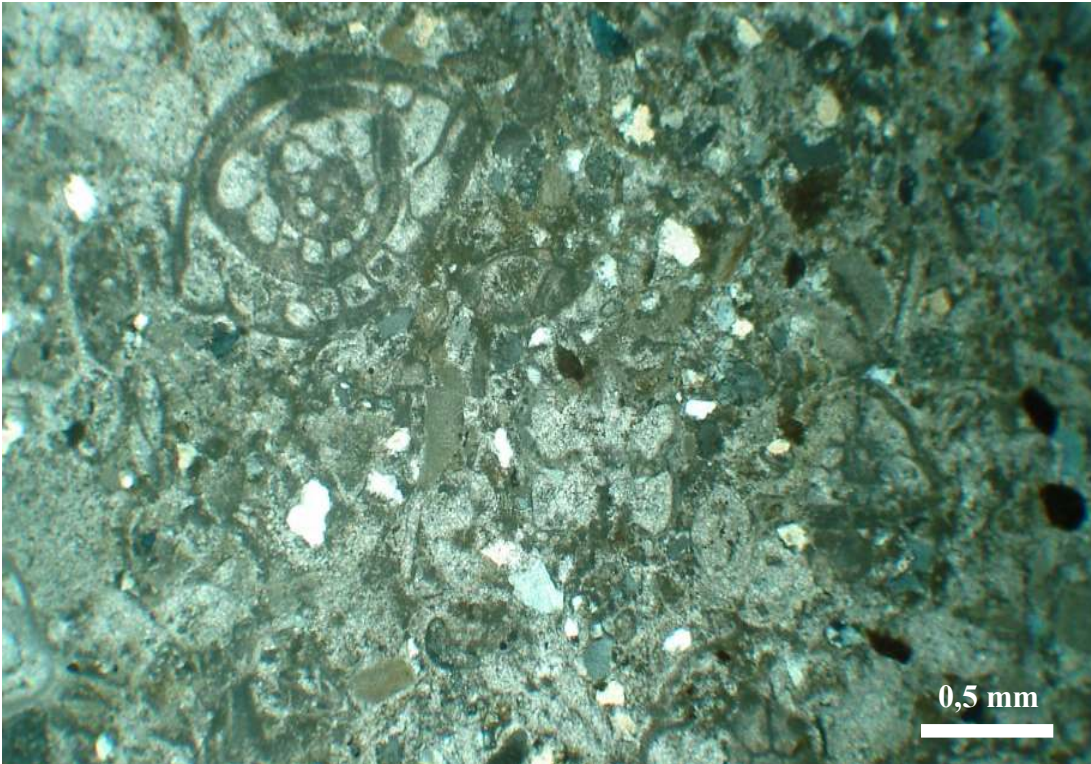
Mineraller	Mineral içeriği (% ort)	Tane boyu (mm)	Özellikler
Kil matriks (organik madde içerikli)	50-55	<0,001	Kayacın esaslı yer yer organik madde miktarı %50-55 'e kadar çıkan kil boyutlu malzemeye temsil edilen matriksten oluşur. Dane boyutu <0,001 mm den küçük olan altere feldispat, klorit ve mika parçacıkları da içeren matriksin, illit türü bir kil minerali olduğu söylenebilir
Ayrılmış feldispat	30-35	0,01-0,2	Feldispat kristallerinin tamamı killeşme, serisitleşme ve kloritleşmeye maruz kalmıştır, orijinal mineralleri belirsiz, kristalleri mineral kümeleri halinde matriks içinde dağılmış halde
Mika + Klorit	8-10	0,01-0,1	Topolojileriyle mika ve/veya klorit olarak ayırt edilebilen bu oluşumlar ileri derecede alterasyona maruz kalarak killeşmişlerdir
Kuvars	2-4	<0,01	Çoğunlukla yarı yuvarlak – yuvarlak ince daneler matriks içinde dağılmış, mikroskopta beyaz, sarımsı beyaz canlı renk tonlarıyla ayırt edilir halde
Opak mineraller	3-4	<0,01	Kayaç genelinde son derece dağınık şekilde, matriks ve altere olmuş diğer kayaç bileşenleri içinde son derece az miktarda
Kayacın Mohs sertliği 4 - 4,5 olarak belirlenmiştir.			

Fosilli kireçtaşı numunesinin alındığı Kırklareli Formasyonu Orta Eosen-Alt Oligosen yaştaadır. Birim beyazımsı krem renkli, karstik kireçtaşlarından oluşmaktadır. Kırklareli Formasyonu, tabanında beyazımsı krem renkli ve kısmen gevşek tutturulmuş karbonatlı ve kumtaşı kuvars çakıllı bir taban konglomerasıyla ya da çakıl, kum ile birlikte siyah, organik içerikli kömür ara tabakalı killeriyle başlayıp üste doğru ince-orta, yer yer kalın katmanlı, çatlaklı, sert-sıkı, yer yer karstik, dayanımı yüksek kireçtaşlarıyla devam eder [100]. Şekil 3.47’de fosilli kireçtaşı numunesinin temsili görünümü verilmiştir.

Petrografik olarak kayacın esaslı nümülit ve alveolin fosillerden (%25’e kadar) oluşur. Kuvars içeriği %15’tir. Köşeli, yarı köşeli, yarı yuvarlak kuvars daneleri matriks içinde dağılmıştır. İçeriği %15’e varan rekristalize kalsit gri, kirli gri, pembe polarize renklerde yarı yuvarlak daneler şeklindedir. %45 killi karbonattan oluşmaktadır. Fosilli kireçtaşı numunesinin ince kesit analiz sonuçları Çizelge 3.12’de ve ince kesit fotoğrafı Şekil 3.48’de verilmiştir.



Şekil 3.47: Fosilli kireçtaşı blok numunesini alındığı İkitelli-Sanayi istasyonu.



Şekil 3.48: Fosilli kireçtaşı numunesi ince kesit fotoğrafı.

Çizelge 3.12: Fosilli kireçtaşı numunesi için ince kesit analiz sonuçları.

Mineraller	Mineral içeriği (% ort)	Tane boyu (mm)	Özellikler
Fosil	20-25	0,5-1,0	Nümülit ve Alveolin.
Rekristalize kalsit	10-15		Gri, kirli gri, pembe polarize renklerde yarı yuvarlak daneler şeklinde
Kuvars	10-15	0,2-0,5	Köşeli yarı köşeli yarı yuvarlak, daneler 0,2 ile 0,5 mm arasında, matriks içinde dağılmış halde
Kayaç parçası	1-2		Yarı yuvarlak, yarı küresel daneler şeklinde
Karbonat	43		Killi karbonat
Kayacın Mohs sertliği 5 olarak belirlenmiştir.			

Kayaçların kırılma mekanizmasında ve kazılabilirliklerinde, fiziksel ve mekanik özelliklerin önemli rol oynadığı bilinmektedir. Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri için Bölüm 3.1’de anlatılan deneysel yöntemler ve standartlar uygulanarak fiziksel ve mekanik özellikler belirlenmiştir (Deneyler, Amerikan Standart ve Test Metotları (ASTM) ve Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği’nin (ISRM) belirlediği standartlara göre yapılmıştır). Kazılabilirlikleri üzerinde çalışılan kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin farklılıklarının anlaşılabilmesi için deney sonuçları karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.13’te verilmiştir.

Çizelge 3.13: Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri [11, 93, 97].

	Arkoz	Şeyl	Fosilli k.t.
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	34,1 ± 10,3	27,6 ± 8,7	31,9 ± 14,8
Dolaylı Çekme Dayanımı (MPa)	4,2 ± 0,8	5,5 ± 0,67	3,9 ± 1,5
Statik Elastik Modül (GPa)	6,4 ± 1,5	4,5 ± 0,4	7,6 ± 0,1
Statik Poisson Oranı	0,26± 0,01	0,30 ± 0,01	-
P Dalga Hızı (m/s)	6068 ± 117	5397 ± 75	4625 ± 114
S Dalga Hızı (m/s)	3165 ± 355	3060 ± 139	2541 ± 190
Dinamik Elastik Modül (GPa)	70,1 ± 12	28,6 ± 0,6	40,2 ± 5,5
Dinamik Poisson Oranı	0,3 ± 0,07	0,3 ± 0,04	0,28 ± 0,03
Cerchar Aşındırıcılık Değeri	2,00	1,25	0,75
Schmidt Çekici (L-9 tip)	30 ± 4	49,5 ± 3	46,4 ± 1,7
Nokta Yük Dayanımı İndeksi ($I_{s(50)}$)	3,3 ± 0,3	3,0 ± 0,4	2,1 ± 0,2
Shore Yüzey Sertliği	32,1 ± 1,8	34,8 ± 2,8	36,1 ± 5,2
Koni Delici indeks değeri	0,29 ± 0,2	0,26 ± 0,3	0,26 ± 0,1
Yoğunluk (gr/cm^3)	2,68	2,70	2,41

3.3.2 Kesme deneyi sonuçları

3.3.2.1 Arkoz numunesinde yapılan doğrusal kesme deneylerinin sonuçları

Kartal-Kadıköy Metro hattında kazı yapan tam cepheli tünel açma makinesinin (TBM) geçtiği formasyonlardan biri olan arkoz için laboratuvar ortamında tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) kesme deneyleri yapılmıştır. Arkoz numunesi, tam boyutlu doğrusal kazı setinde 13 inç (330 mm) CCS tip disk, 15 inç (380 mm) V tip disk ve 17 inç (432 mm) CCS tip disk keskilerle, taşınabilir doğrusal kazı setinde ise mini V tip (130 mm) disk keski ile kesilmiştir.

13 inç CCS tip disk keski ile yardımcı ve yardımcı olarak kesme deneyleri yapılmıştır. Yardımsız kesme deneylerinde, kesme derinlikleri (d) 3, 5 ve 7 mm olarak belirlenmiştir. Yardımlı kesme deneylerinde ise keski arası mesafe (s) 70 mm’de kesme derinlikleri (d) 3, 5, 7 mm ve keski arası mesafe (s) 80 mm’de ise kesme derinlikleri (d) 5, 7 mm olarak belirlenmiştir.

15 inç V tip disk keski ile yardımcı ve yardımcı olarak kesme deneyleri yapılmıştır. Yardımsız kesme deneylerinde, kesme derinlikleri (d) 3, 5 ve 7 mm olarak belirlenmiştir. Yardımlı kesme deneylerinde ise keski arası mesafe (s) 40 mm’de kesme derinlikleri (d) 3, 5, 7, 9 mm olarak belirlenmiştir.

17 inç CCS tip disk keski ile yardımcı ve yardımcı olarak kesme deneyleri yapılmıştır. Yardımsız kesme deneylerinde, kesme derinlikleri (d) 3, 5, 7, 9 mm olarak belirlenmiştir. Yardımlı kesme deneylerinde ise keski arası mesafe (s) 80 mm’de kesme derinlikleri (d) 3, 5, 7, 9 mm olarak belirlenmiştir.

Mini V tip disk keski ile kesme derinliği (d) 5 mm’de indeks bir değer elde edebilmek için arkoz numunesinde 3 adet kesme deneyi yapılmıştır.

Çizelge 3.14’te 13 inç CCS tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımcı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmektedir. Çizelge 3.15’te 13 inç CCS tip disk ile arkoz numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımcı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmiştir. Arkoz numunesi üzerinde yapılan doğrusal kesme deneylerinin detaylı sonuçları EK A’da verilmiştir.

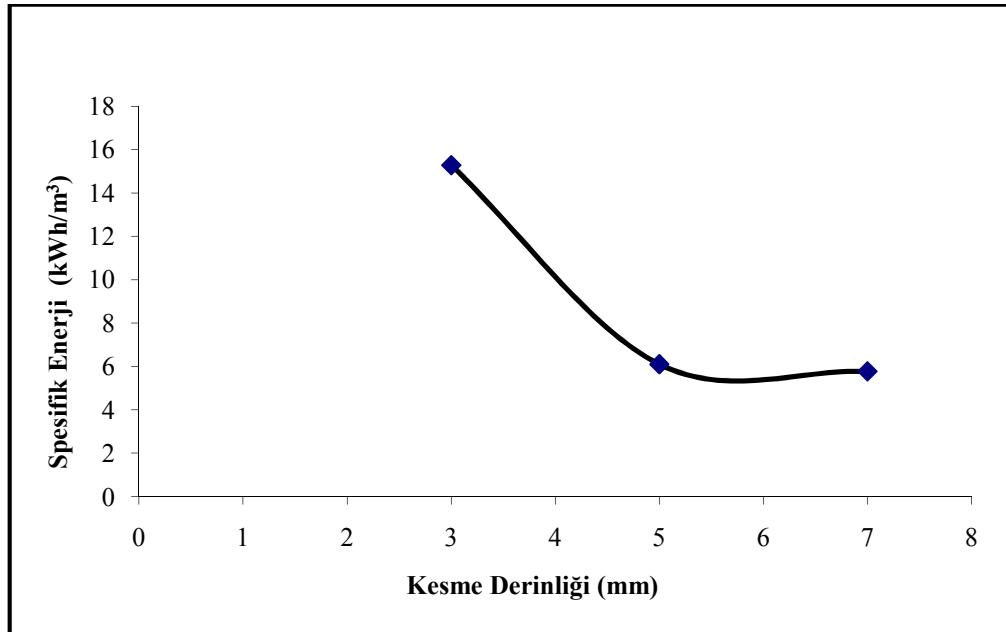
Çizelge 3.14: 13 inç CCS tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu.

d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)	PİK
3	5067,7	8441,8	436,9	917,4	15,3	444
5	7470,9	12825,8	1013,5	1921,6	6,1	485
7	10427,9	16563,9	1659,8	2819,6	5,8	482

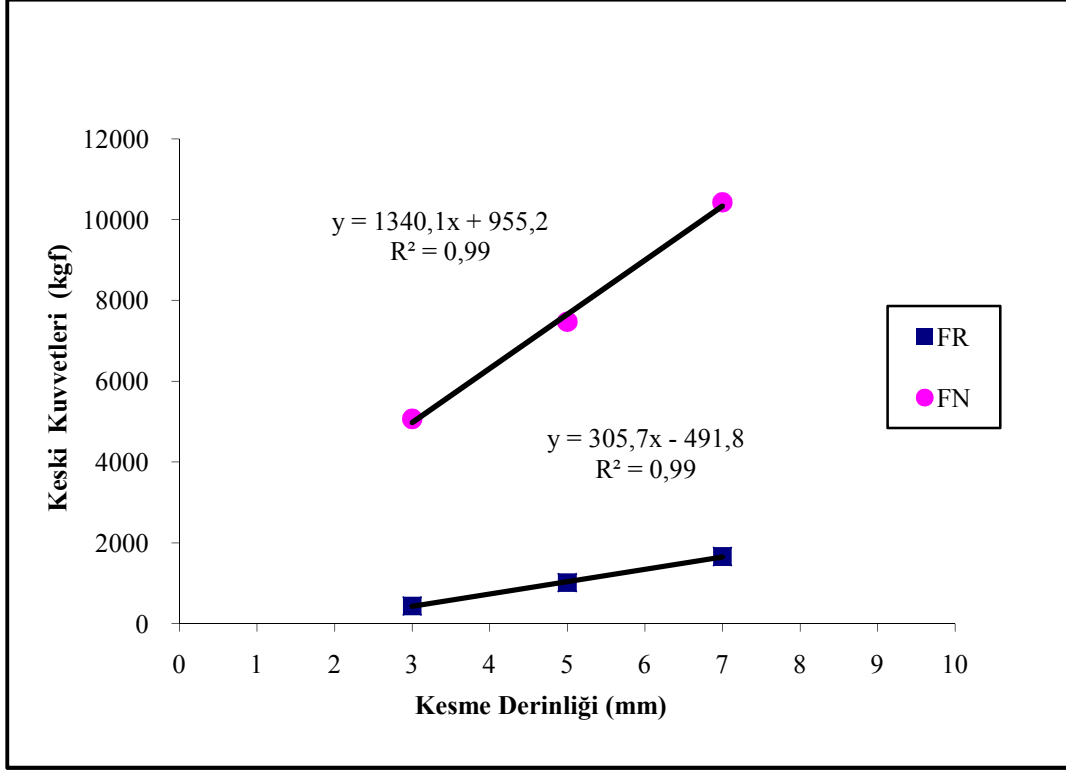
Çizelge 3.15: 13 inç CCS tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)	PİK
3	70	23,3	4022,4	6722,7	332,0	634,7	8,9	515
5	70	14,0	6542,6	11482,9	787,6	1448,6	5,0	518
7	70	10,0	8553,1	13657,2	1330,0	2366,4	8,1	485
5	80	16,0	7390,8	12207,9	880,9	1501,0	5,6	498
7	80	11,4	9006,6	18246,9	1423,4	2921,5	5,6	521

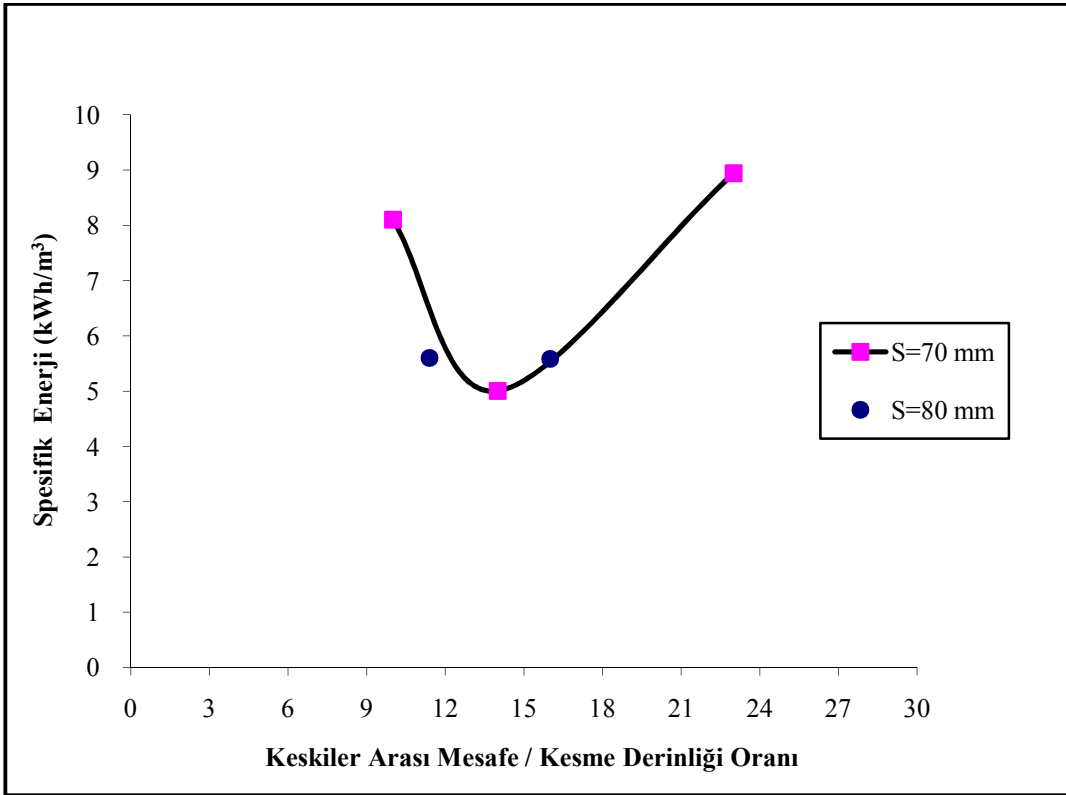
Yardımsız kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesme derinliği ile spesifik enerjinin keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.49-50'de verilmiştir. Yardımlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji, keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ve kesme derinliği ile keski kuvvetleri grafikleri Şekil 3.51-52 ve 53'te verilmiştir.



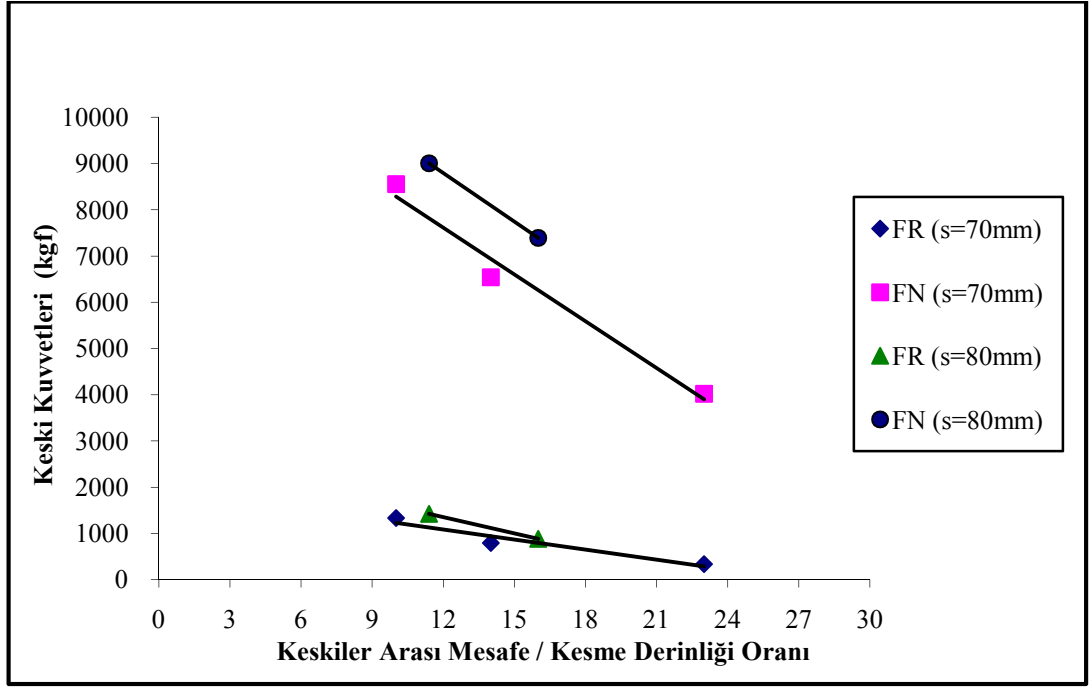
Şekil 3.49: Arkoz numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi.



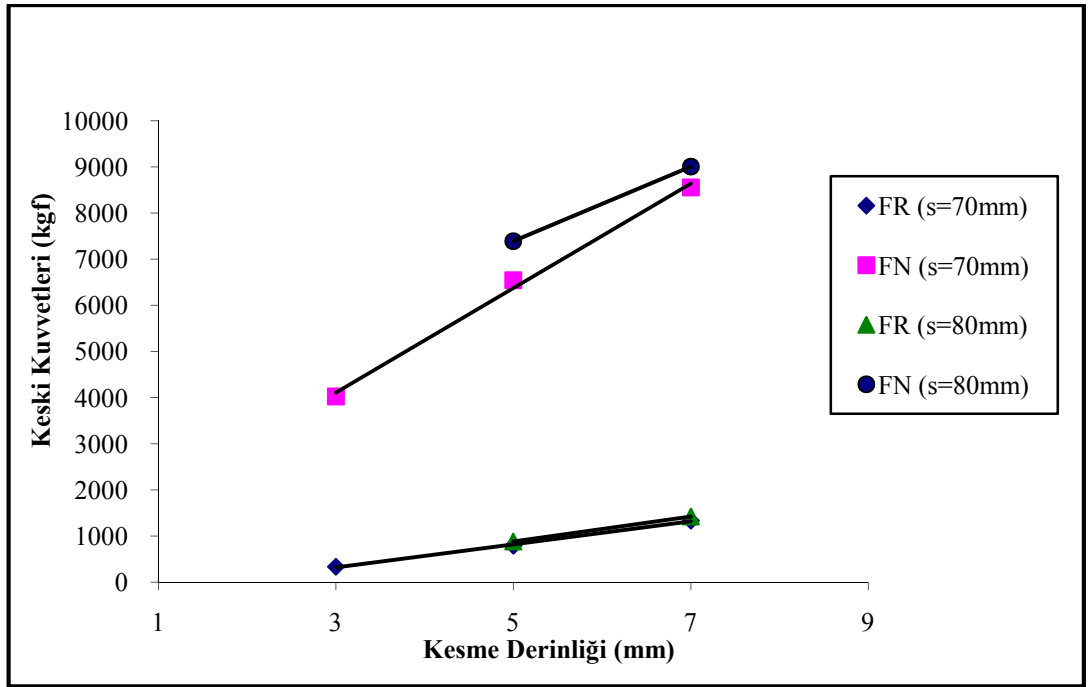
Şekil 3.50: Arkoz numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.51: Arkoz numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 3.52: Arkoz numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski arası mesafe/ kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.53: Arkoz numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.

Arkoz numunesinde 13 inç CCS tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneylerinde kesme derinliği arttıkça, keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvetleri artmakta buna karşılık spesifik enerji azalmaktadır. Yardımlı kesme deneyleri ise iki farklı keski arası mesafede yapılmıştır. Bunlar; $s=70$ mm ve $s=80$

mm'dir. Arkoz numunesi için 13 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, $s=70$ mm ve $d=5$ mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji $5,0 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 14 olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.16'da 15 inç V tip disk ile arkoz numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımsız kesme deneylerinin özet sonuçları verilmektedir. Çizelge 3. 17'de 15 inç V tip disk ile arkoz numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımcı kesme deneyi özet sonuçları verilmiştir.

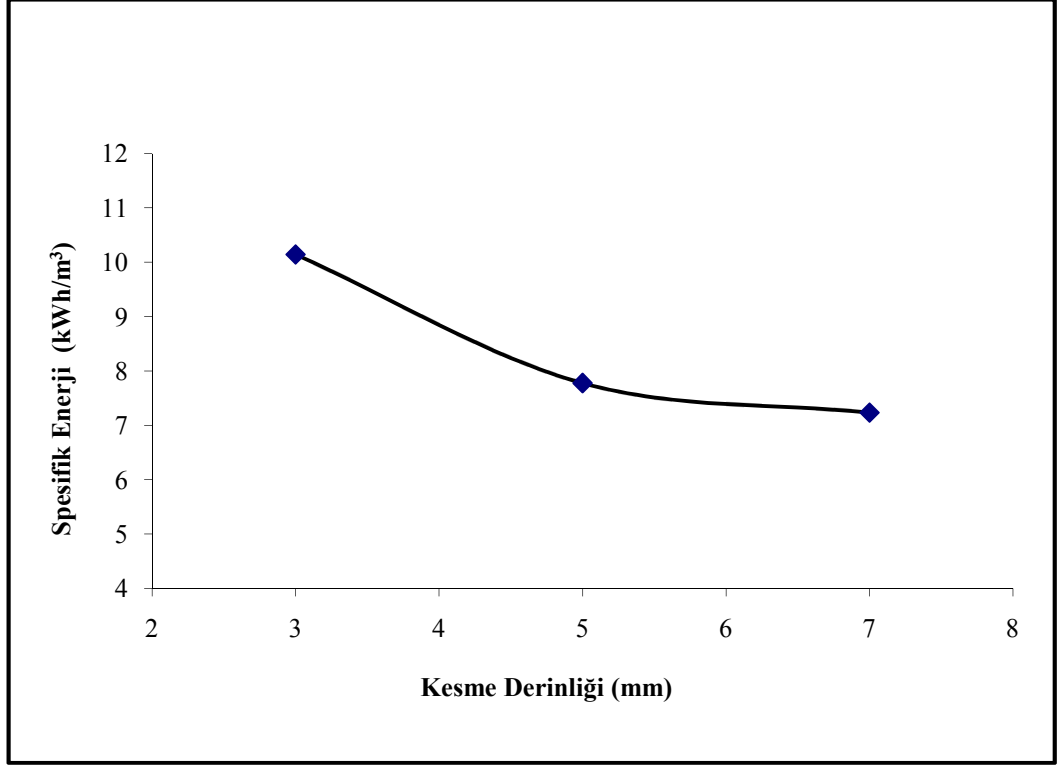
Çizelge 3.16: 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu.

d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)	PİK
3	3032,0	5732,3	322,6	718,5	10,1	397
5	5082,0	8845,4	476,8	1230,7	7,8	400
7	9103,5	15218,2	1028,5	1935,0	7,2	397

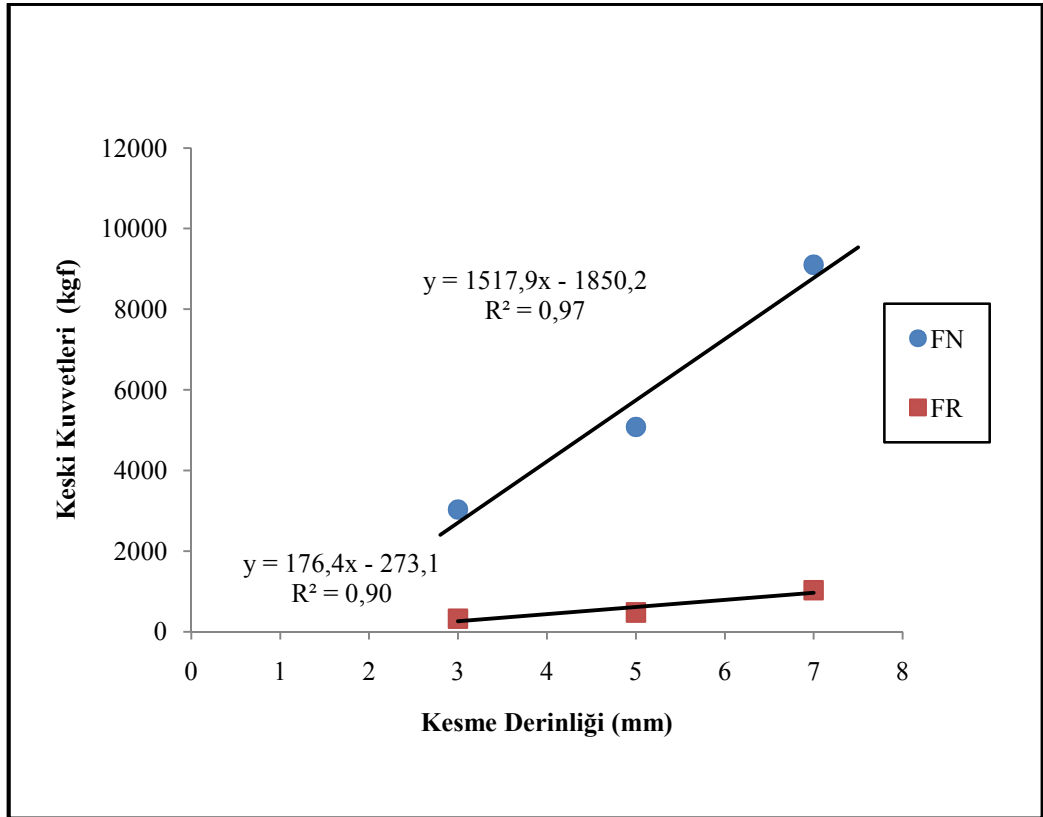
Çizelge 3.17: 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)	PİK
3	40	13,3	2935,8	6738,2	274,2	614,6	6,2	438
5	40	8,0	4297,0	9071,4	402,4	1065,2	5,5	429
7	40	5,7	6137,9	12043,8	736,3	1553,2	7,2	425
9	40	4,4	9381,7	15343,5	950,4	2220,0	7,2	426

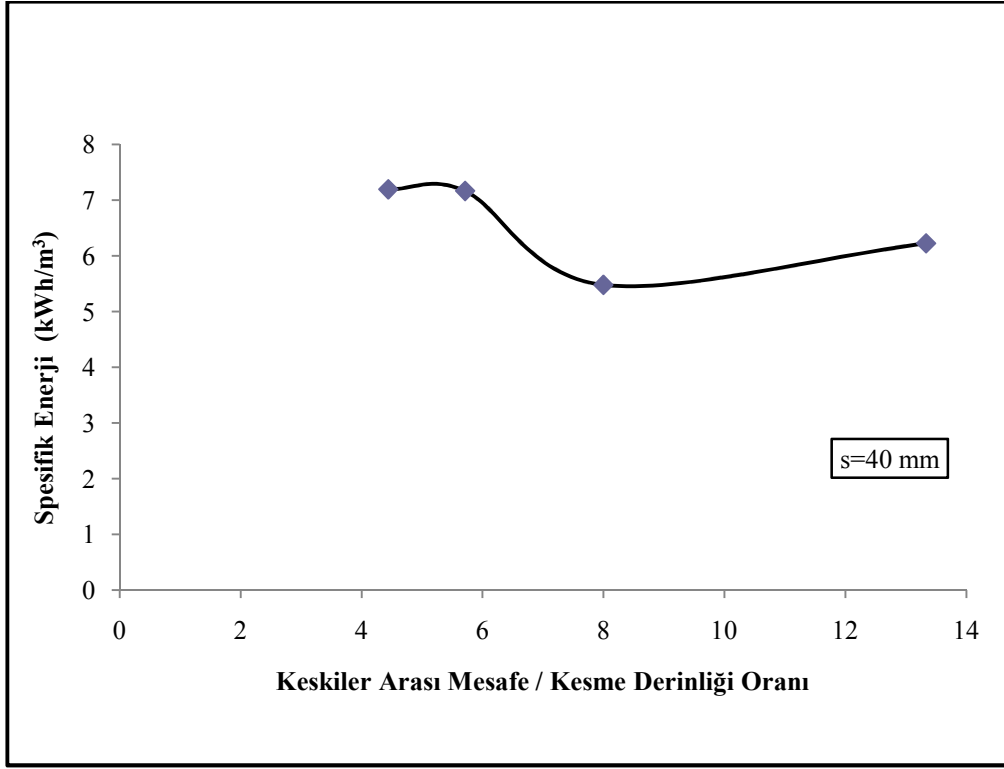
Yardımsız kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesme derinliği ile spesifik enerji ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.54 ve 55'te verilmiştir. Yardımlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji, keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.56-57 ve 58'te verilmiştir.



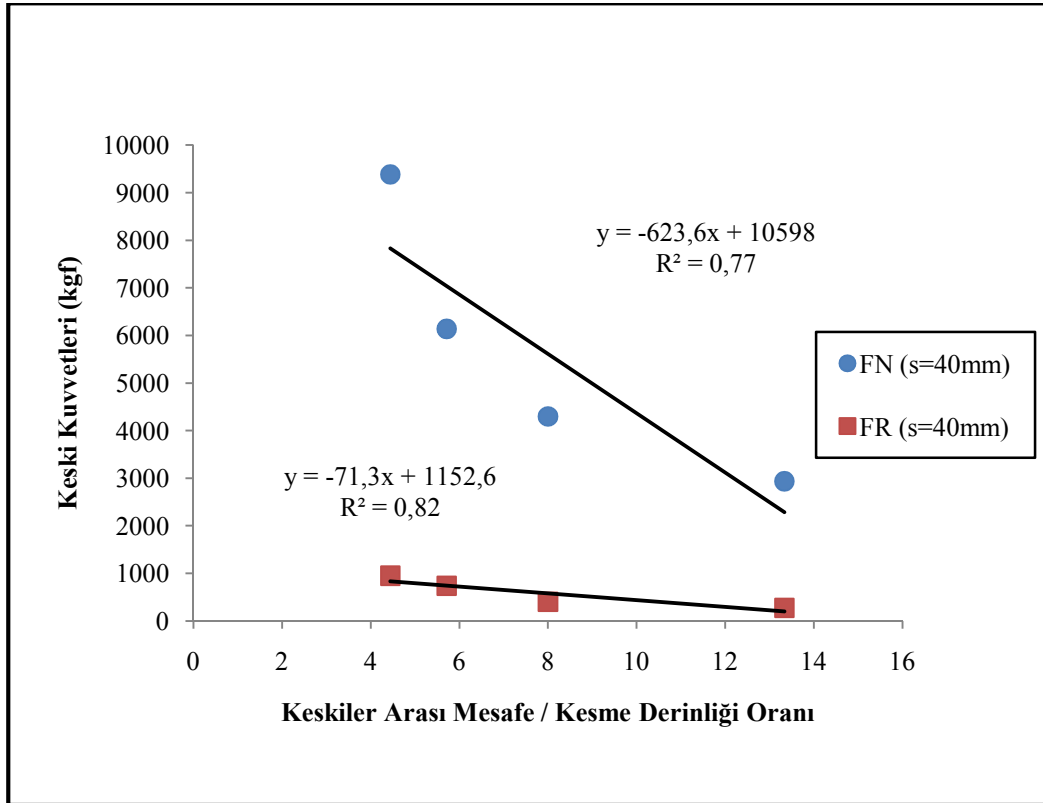
Şekil 3.54: Arkoz numunesi, 15 inç V tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi.



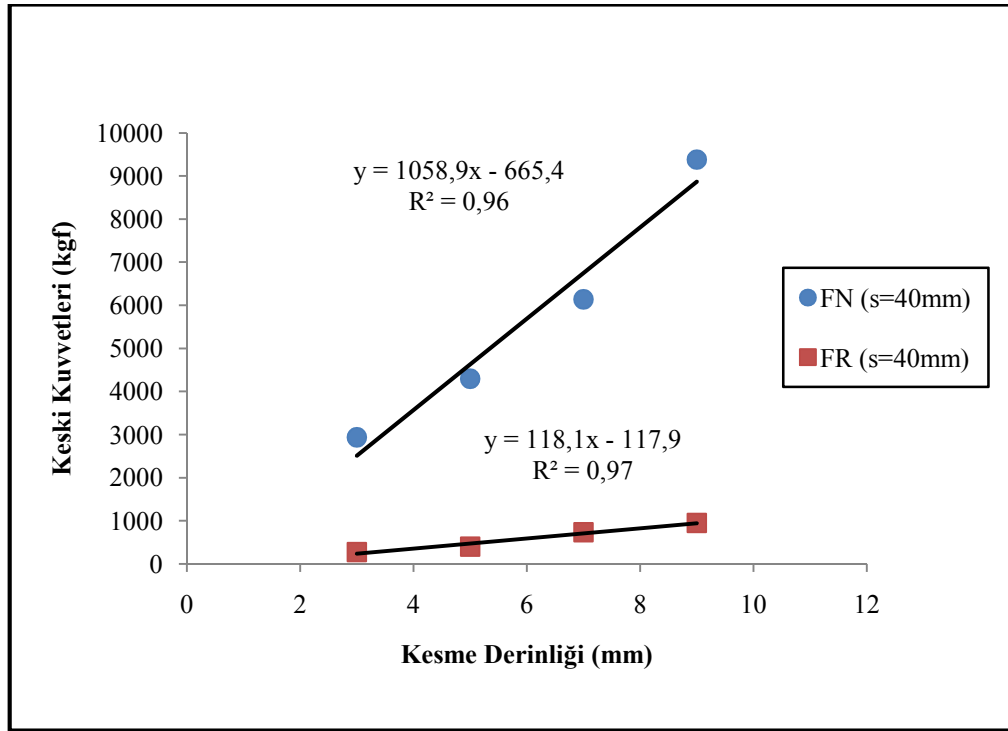
Şekil 3.55: Arkoz numunesi, 15 inç V tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.56: Arkoz numunesi, 15 inç V tip disk yardımlı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 3.57: Arkoz numunesi, 15 inç V tip disk yardımlı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.58: Arkoz numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.

Arkoz numunesinde 15 inç V tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneylerinde kesme derinliği arttıkça, keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvetleri artmakta, buna karşılık spesifik enerji azalmaktadır. Yardımlı kesme deneyleri s=40 mm’de yapılmıştır. s=40 mm keski arası mesafede kesme derinliği arttıkça keskiye gelen kuvvetler artmaktadır. Arkoz numunesi için 15 inç V tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, s=40 mm ve d=5 mm’de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji 5,5 kWh/m³ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 8 olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.18’de 17 inç CCS tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımsız kesme deneylerinin özet sonuçları verilmektedir. Çizelge 3.19’da 17 inç CCS tip disk ile arkoz numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımcı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmiştir.

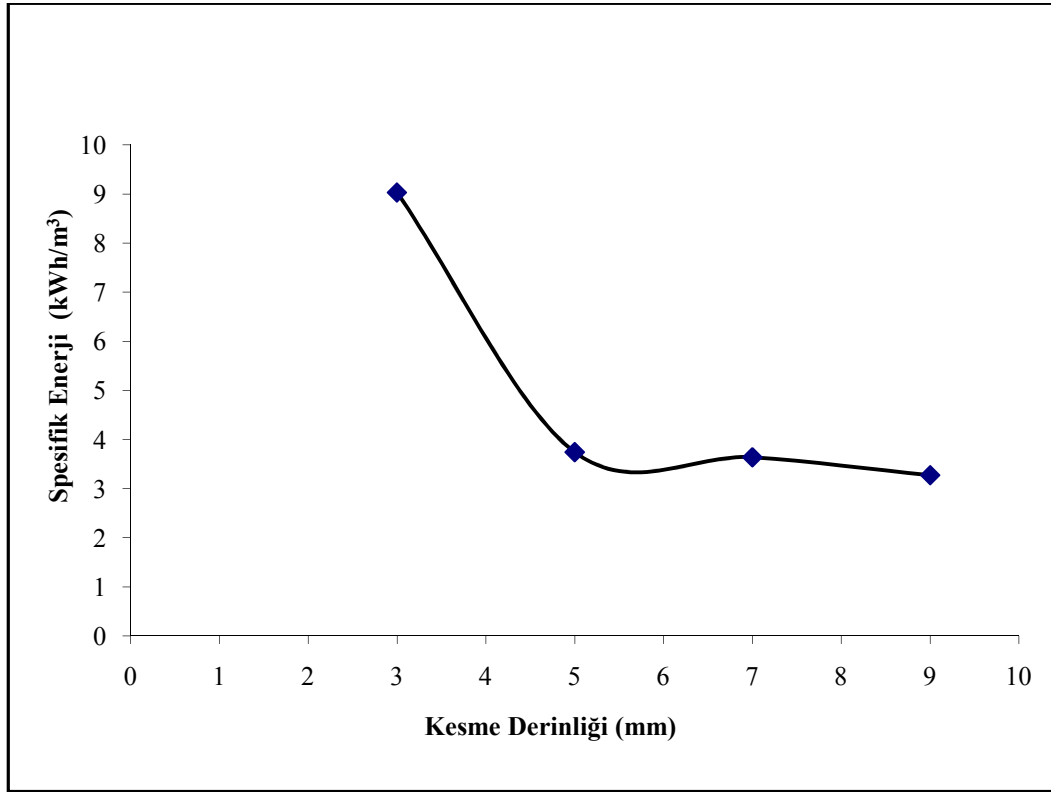
Çizelge 3.18: 17 inç CCS tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu.

d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m ³)	PİK
3	8210,7	15117,8	324,5	1055,8	9,0	383
5	9786,4	18964,4	587,9	1753,7	3,7	502
7	10611,0	18767,6	870,8	2040,3	3,6	492
9	11591,5	22626,5	1244,5	2892,3	3,3	515

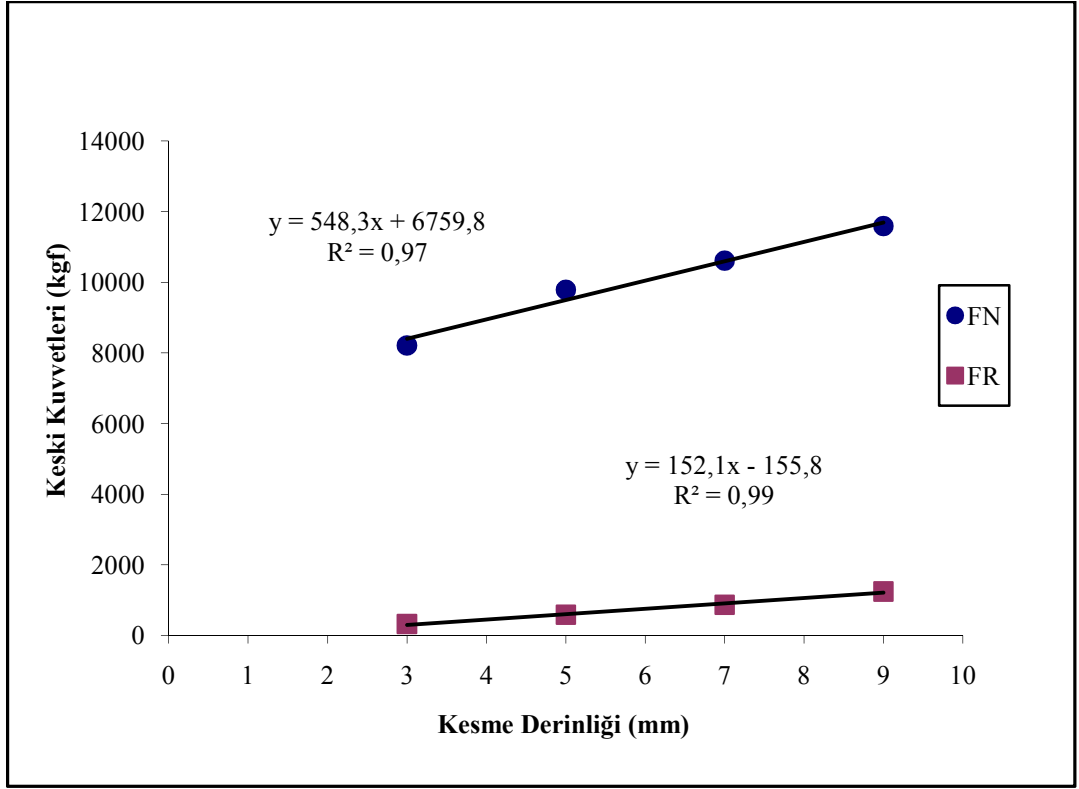
Çizelge 3.19: 17 inç CCS tip disk tip keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)	PİK
3	80	26,7	5008,7	11201,7	302,3	1071,2	6,9	384
5	80	16,0	8528,9	15934,4	557,9	1500,9	3,7	477
7	80	11,4	9164,1	17858,9	846,1	1989,8	3,5	484
9	80	8,9	11150,6	16742,7	1119,6	1994,1	4,1	503

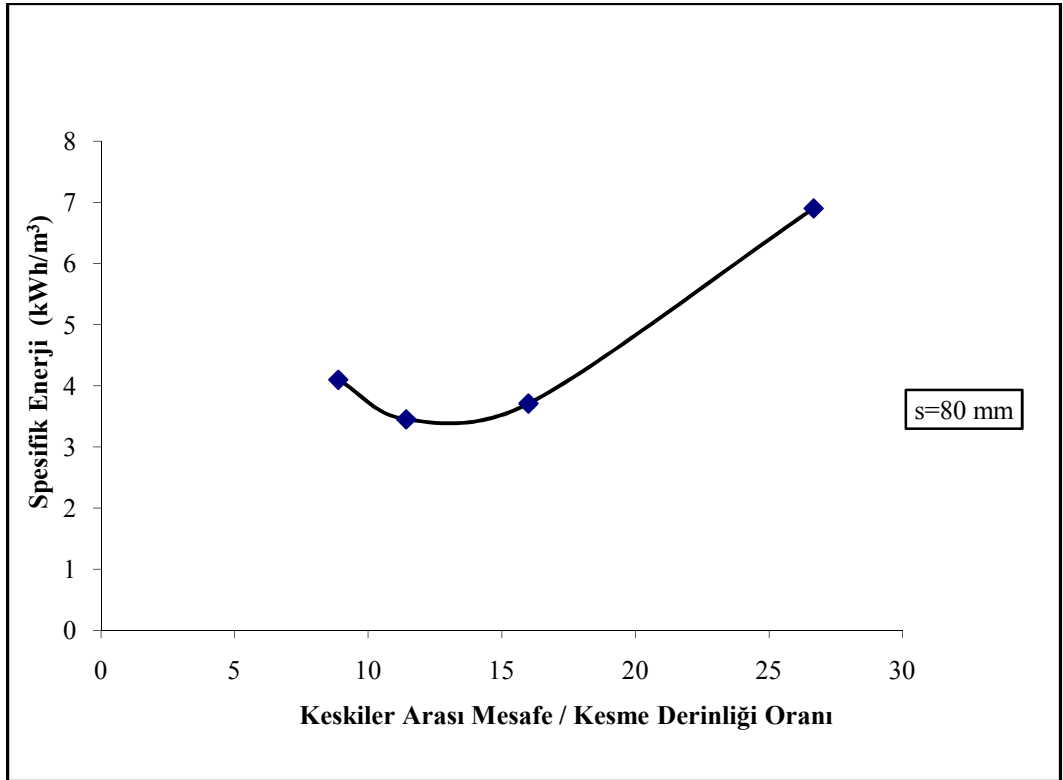
Yardımsız kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesme derinliği ile spesifik enerji ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.59-60'ta verilmiştir. Yardımlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesmeler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji, kesmeler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.61-62 ve 63'te verilmiştir.



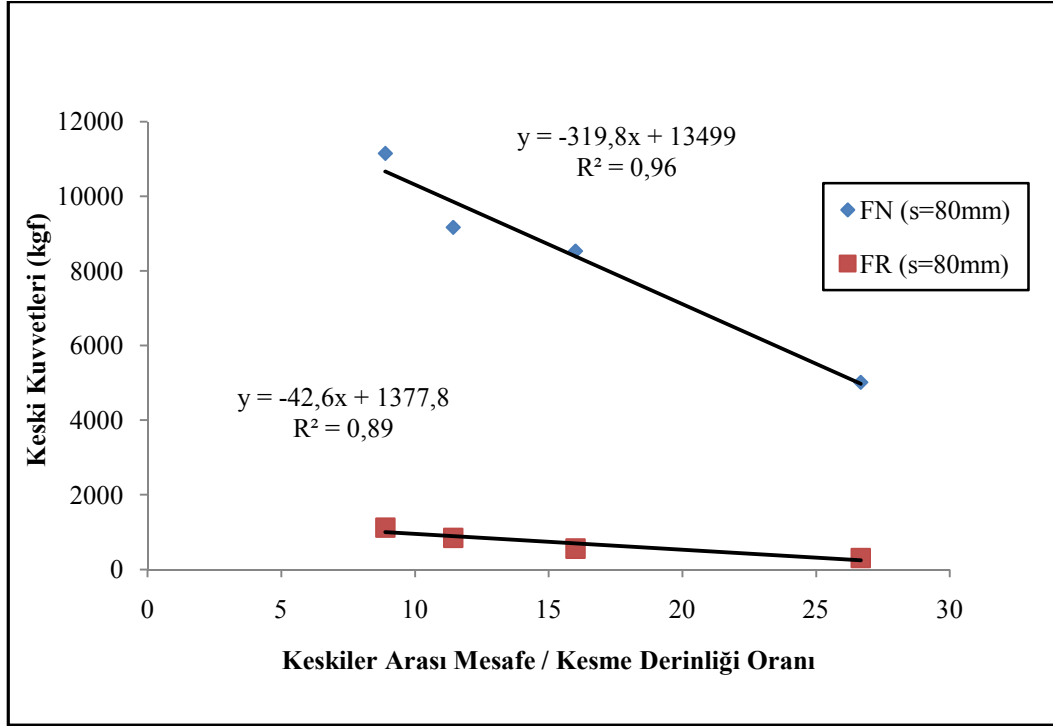
Şekil 3.59: Arkoz numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi.



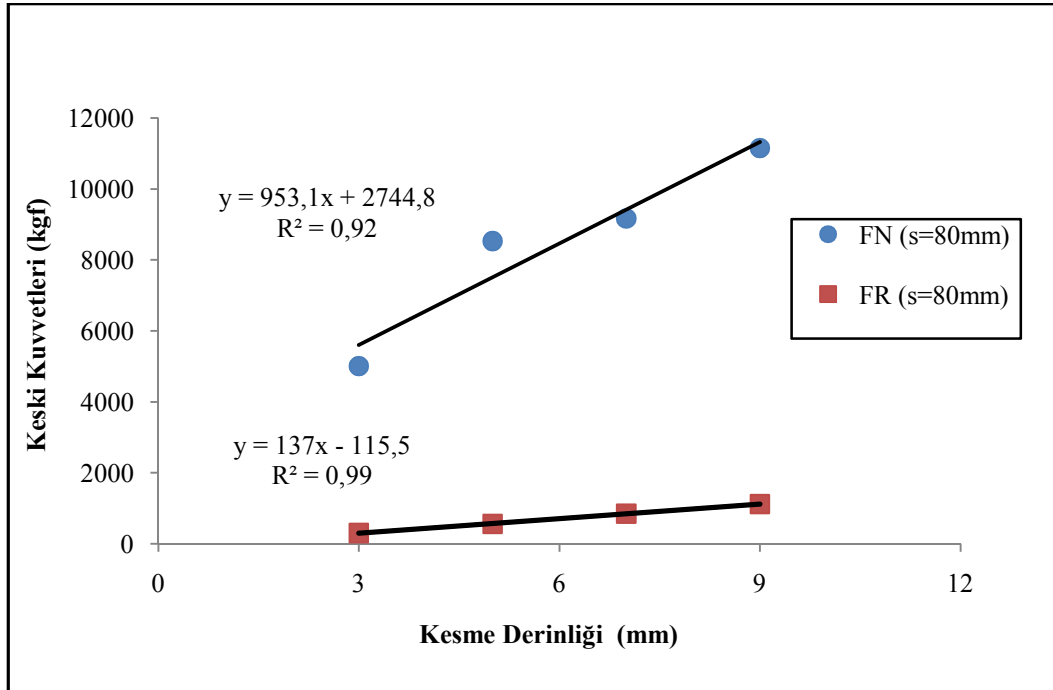
Şekil 3.60: Arkoz numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.61: Arkoz numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 3.62: Arkoz numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.63: Arkoz numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.

Arkoz numunesinde 17 inç CCS tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneylerinde kesme derinliği arttıkça, keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvetleri artmakta buna karşılık spesifik enerji azalmaktadır. Yardımlı kesme

deneyleri $s=80$ mm'de yapılmıştır. $s=80$ mm keskiler arası mesafede kesme derinliği arttıkça keskiye gelen kuvvetler artmaktadır. Arkoz numunesi için 17 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, $s=80$ mm ve $d=7$ mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji $3,5 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 11,4 olarak bulunmuştur.

Arkoz numunesi için hazırlanan yaklaşık $15 \times 15 \times 20$ cm ebatlarındaki kaya blokları üzerinde taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) kesme deneyleri yapılmıştır. Kesme deneyleri yardımsız kesme koşullarında üç adet yapılmıştır. Deneyler sonucunda; mini V tip disk keskiye etki eden normal kuvvetler, yuvarlanma kuvvetleri ve spesifik enerji değerleri bulunmuştur. Çizelge 3.20'de, mini V tip disk keski ile taşınabilir doğrusal kazı setinde yapılan kesme deneylerinin sonuçları görülmektedir.

Çizelge 3.20: Arkoz için mini V tip disk kesme sonuçları.

d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
5,1	2522,0	3215,1	470,5	690,2	42,8
4,8	2401,0	2964,3	451,2	670,5	50,1
5,0	2368,9	3241,4	476,4	674,5	43,3
ort (d=5)	2446,9	3161,3	469,2	682,9	45,7

13 inç CCS tip disk keski, 15 inç V tip disk keski ve 17 inç CCS tip disk keski ile arkoz numunesinde yapılan kesme deneyleri sonunda oluşan pasalar toplanmıştır. Farklı keski tipleriyle yapılan kesme deneyleri sonucunda oluşan pasa dağılımını görmek ve pasa irilik katsayısını belirlemek için elek analizleri yapılmıştır. Elek analizleri, yardımcı ve yardımsız kesme deneyleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Aynı tip keski için yardımcı ve yardımsız kesme deneyleri sonucunda yapılan elek analizlerinde farklılıklar olup olmadığı belirlenmeye çalışılmış ve pasa irilik indeks değişimleri belirlenmeye çalışılmıştır. Elek analizinde kullanılan elek açıklıkları Bölüm 3.2.4'te detaylı olarak verilmiştir. Çizelge 3.21'de arkoz numunesi için elek analizlerinin özeti verilmiştir. EK. B'de ise 13 inç CCS tip disk keski, 15 inç V tip disk keski ve 17 inç CCS tip disk keski ile yapılan kesme deneyleri sonucu elde edilen pasanın detaylı elek analiz çizelgeleri, pasa irilik katsayısı hesapları ve kümülatif yüzde elek altı grafikleri verilmiştir.

Çizelge 3.21: Arkoz için elek analizi sonuçları.

Disk tipi/çapı	Keskiler arası mesafe (s, mm)	Kesme derinliği (d, mm)	s/d	Pasa irilik katsayısı
13 inç CCS	yardımsız	3	-	444
13 inç CCS	yardımsız	5	-	485
13 inç CCS	yardımsız	7	-	482
13 inç CCS	70	3	23,3	515
13 inç CCS	70	5	14,0	518
13 inç CCS	70	7	10,0	485
13 inç CCS	80	5	16,0	498
13 inç CCS	80	7	11,4	521
15 inç V	yardımsız	3	-	397
15 inç V	yardımsız	5	-	400
15 inç V	yardımsız	7	-	397
15 inç V	40	3	13,3	438
15 inç V	40	5	8,0	429
15 inç V	40	7	5,7	425
15 inç V	40	9	4,4	426
17 inç CCS	yardımsız	3	-	383
17 inç CCS	yardımsız	5	-	502
17 inç CCS	yardımsız	7	-	492
17 inç CCS	yardımsız	9	-	515
17 inç CCS	80	3	26,7	384
17 inç CCS	80	5	16,0	477
17 inç CCS	80	7	11,4	484
17 inç CCS	80	9	8,9	503

3.3.2.2 Şeyl numunesinde yapılan doğrusal kesme deneylerinin sonuçları

Kartal-Kadıköy Metro hattında kazı yapan tam cepheli tünel açma makinesinin (TBM) geçtiği formasyonlardan biri olan şeyl için laboratuvar ortamında tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) kesme deneyleri yapılmıştır. Şeyl numunesi, tam boyutlu doğrusal kazı setinde 13 inç (330 mm) CCS tip disk, 15 inç (380 mm) V tip disk ve 17 inç (432 mm) CCS tip disk keskilerle, taşınabilir doğrusal kazı setinde ise mini V tip (130 mm) disk keski ile kesilmiştir.

13 inç CCS tip disk keski ile yardımcı ve yardımcı olarak kesme deneyleri yapılmıştır. Yardımsız kesme deneylerinde, kesme derinlikleri (d) 5, 7 ve 9 mm olarak belirlenmiştir. Yardımlı kesme deneylerinde ise keskiler arası mesafe (s) 80 mm’de kesme derinlikleri (d) 4, 6, 8 mm ve keskiler arası mesafe (s) 100 mm’de ise kesme derinlikleri (d) 5, 7, 9 mm olarak belirlenmiştir.

15 inç V tip disk keski ile yardımcı ve yardımcı kesme deneyleri yapılmıştır. Yardımsız kesme deneylerinde, kesme derinlikleri (d) 5, 7 ve 9 mm olarak belirlenmiştir. Yardımlı kesme deneylerinde ise keski arası mesafe (s) 80 mm’de kesme derinlikleri (d) 7, 9, 12 mm olarak belirlenmiştir.

17 inç CCS tip disk keski ile yardımcı ve yardımcı olarak kesme deneyleri yapılmıştır. Yardımsız kesme deneylerinde, kesme derinlikleri (d) 5, 7, 9 mm olarak belirlenmiştir. Yardımlı kesme deneylerinde ise keski arası mesafe (s) 80 mm’de kesme derinlikleri (d) 5, 7, 9 mm olarak belirlenmiştir.

Mini V tip disk keski ile kesme derinliği (d) 5 mm’de indeks bir değer elde edebilmek için şeyl numunesinde 3 adet kesme deneyi yapılmıştır.

Çizelge 3.22’de 13 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımcı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmektedir. Çizelge 3.23’te ise 13 inç CCS tip disk ile şeyl numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımcı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmiştir. Şeyl numunesi üzerinde yapılan doğrusal kesme deneylerinin detaylı sonuçları EK A’da verilmiştir.

Çizelge 3.22: 13 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu.

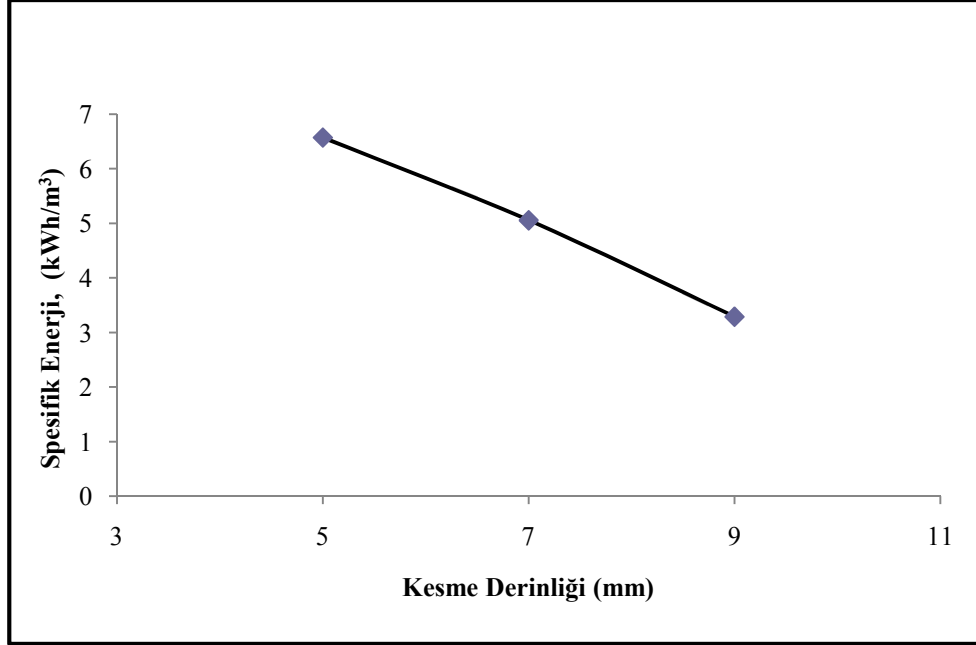
d (mm)	FN (kgf)	F’N (kgf)	FR (kgf)	F’R (kgf)	SE (kWh/m³)	PİK
5	4463,0	6870,9	472,4	969,4	6,6	372
7	5241,6	7360,7	782,7	1201,0	5,1	447
9	6741,2	9470,7	1138,8	1647,2	3,3	501

Çizelge 3.23: 13 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu.

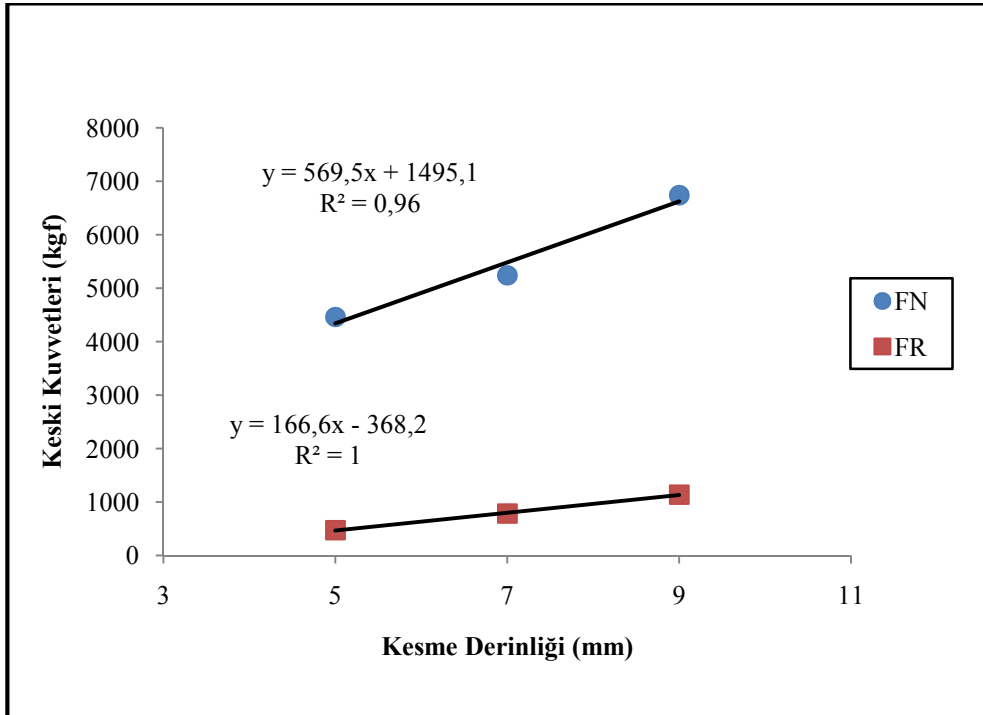
d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F’N (kgf)	FR (kgf)	F’R (kgf)	SE (kWh/m³)	PİK
4	80	20,0	3898,8	7241,6	430,5	917,9	3,9	524
6	80	13,3	4591,5	8960,1	582,9	1155,3	3,3	498
8	80	10,0	4642,3	8515,2	705,1	1405,0	3,0	473
5	100	20,0	3511,3	6736,5	468,1	928,3	2,6	489
7	100	14,3	4114,1	7343,5	598,3	1111,1	2,3	412
9	100	11,1	4628,7	9801,8	753,2	1810,9	2,3	519

Yardımsız kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesme derinliği ile spesifik enerji ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.64 ve 65’te

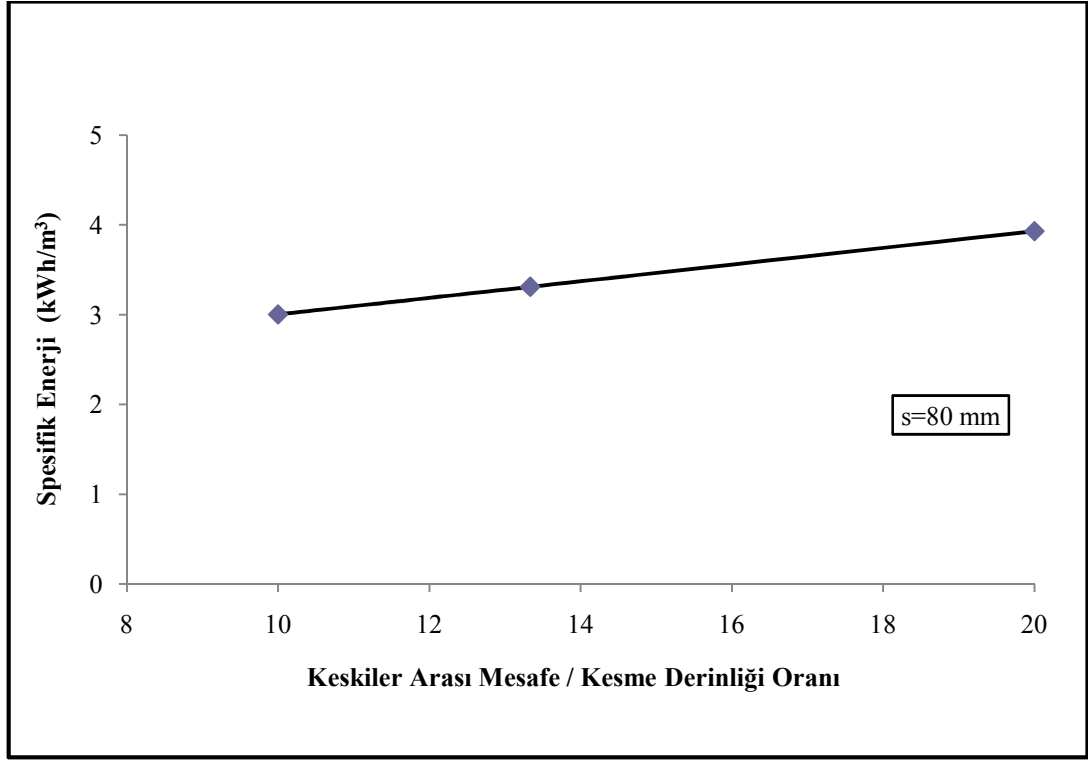
verilmiştir. Yardımlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji, keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri ise Şekil 3.66-71’te verilmiştir.



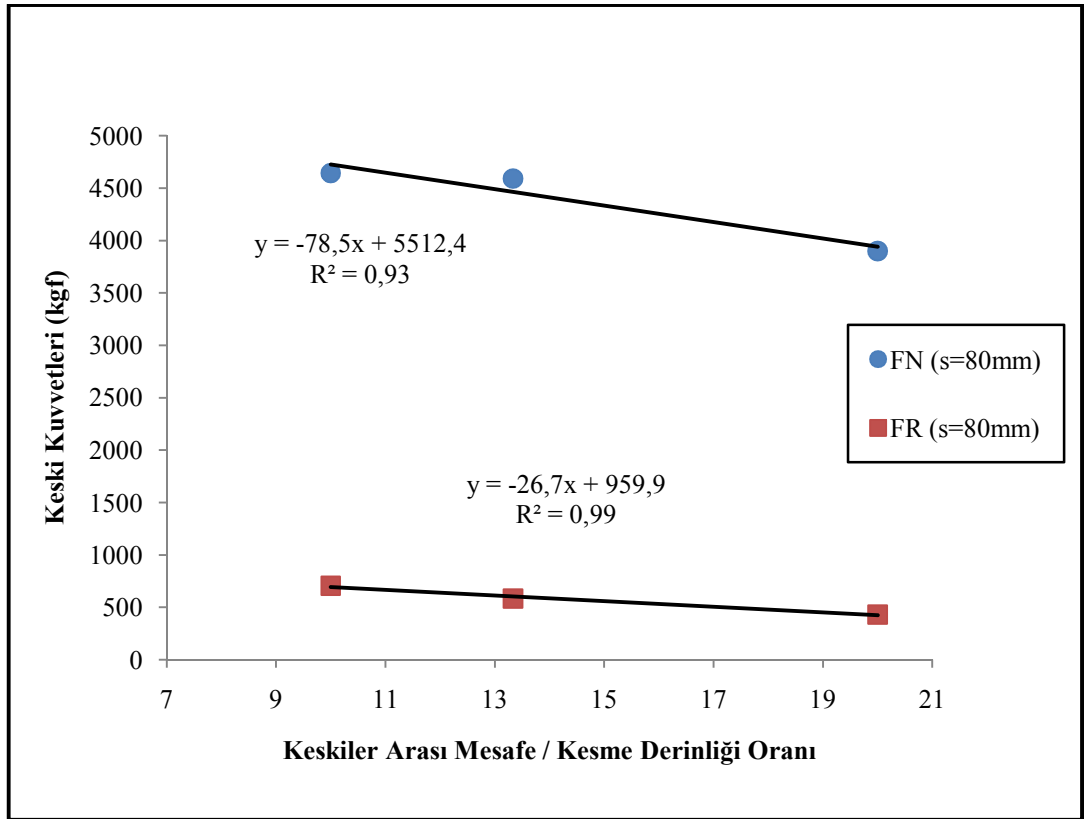
Şekil 3.64: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi.



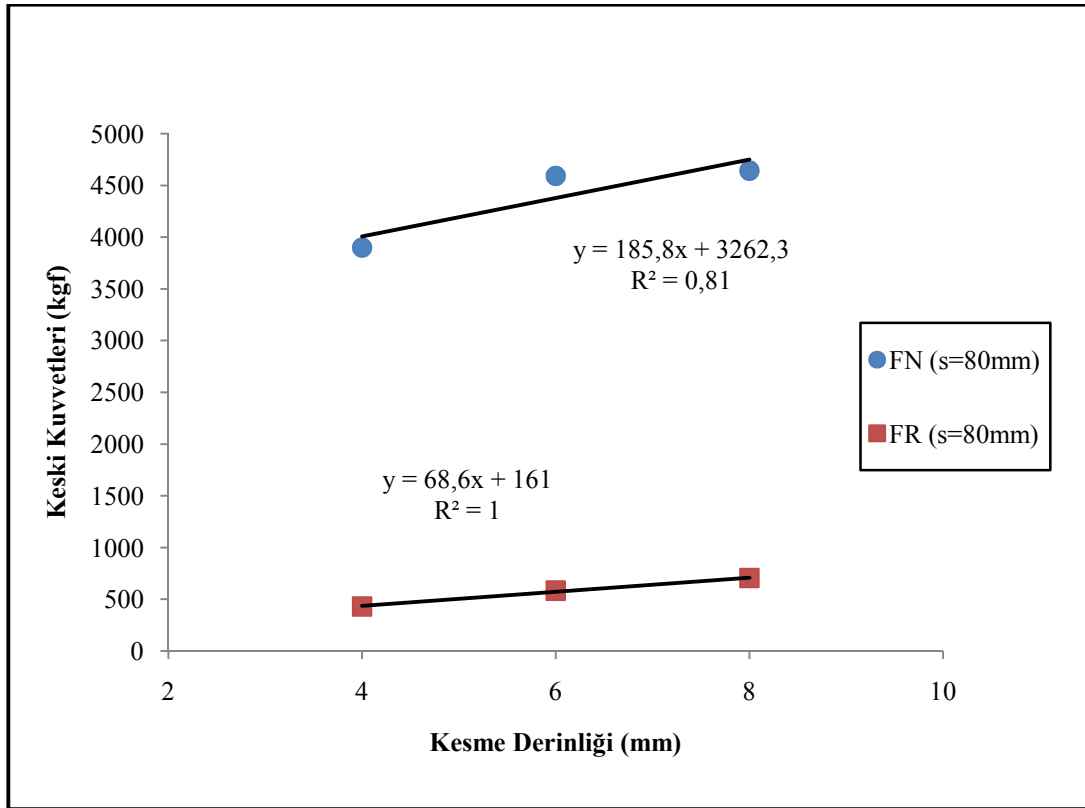
Şekil 3.65: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.



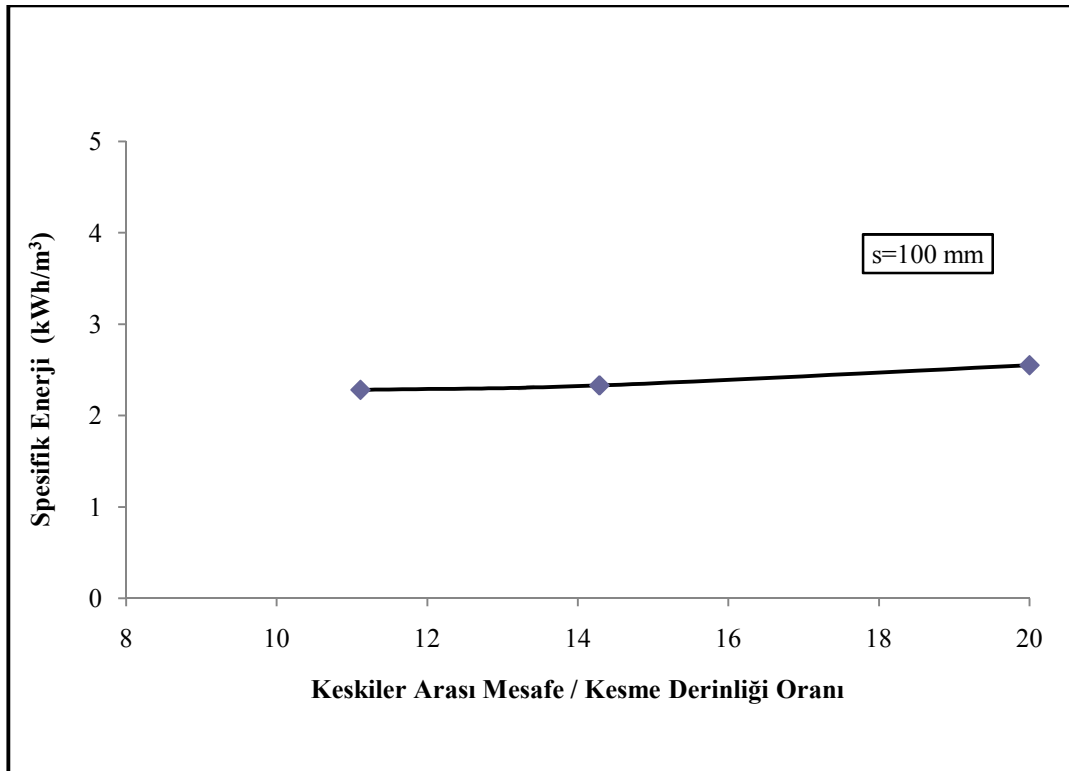
Şekil 3.66: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımlı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



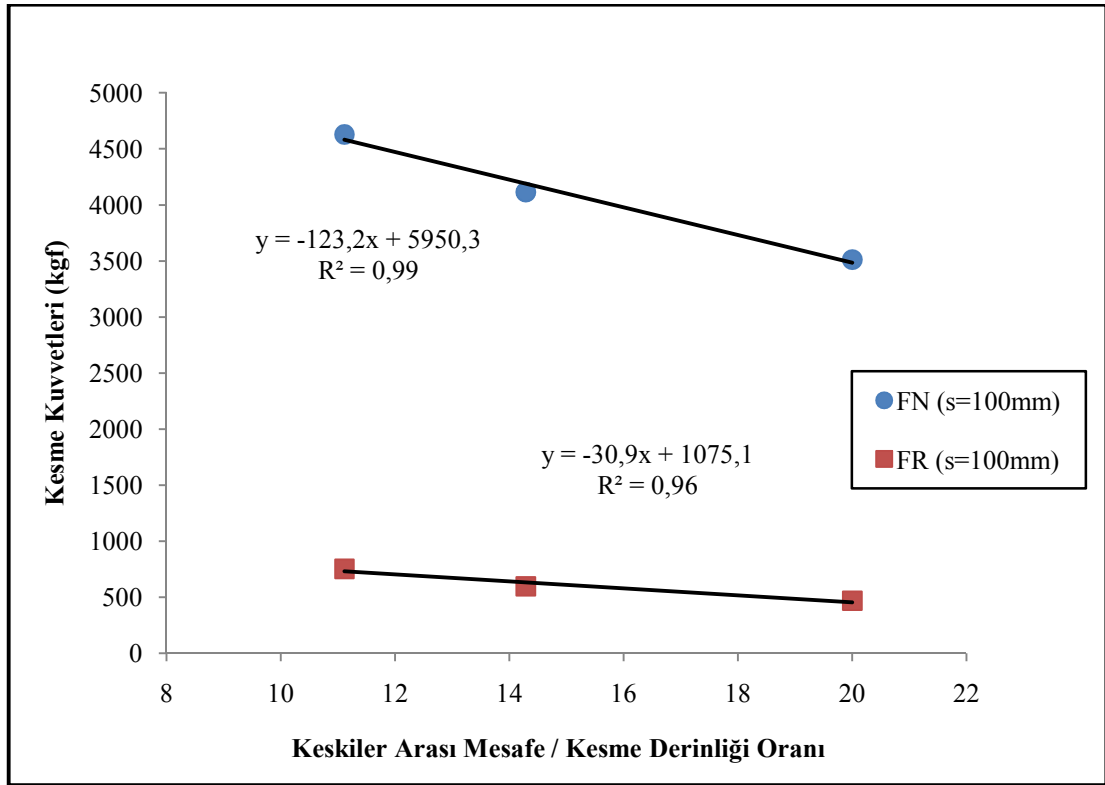
Şekil 3.67: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımlı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.



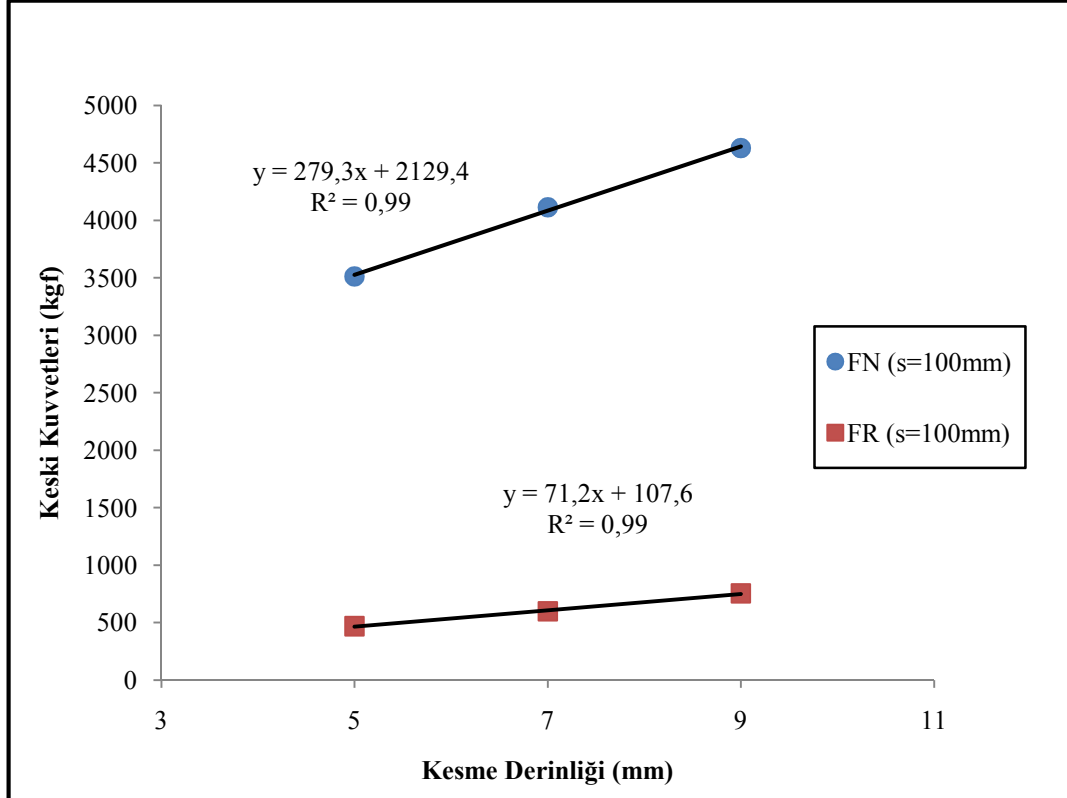
Şekil 3.68: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımlı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.69: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımlı kesme için keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 3.70: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımlı kesme için keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.71: Şeyl numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımlı kesme için kesme derinliği ile kesme kuvvetleri ilişkisi.

Şeyl numunesinde 13 inç CCS tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneylerinde kesme derinliği arttıkça, keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvetleri artmakta buna karşılık spesifik enerji azalmaktadır. Yardımlı kesme deneyleri ise iki farklı keski arası mesafede yapılmıştır, bunlar; s=80 mm ve s=100 mm'dir. Her iki keski arası mesafede de kesme derinliği arttıkça keskiye gelen kuvvetler artmakta buna karşılık spesifik enerji değişmemektedir bunun sebebi şeyl numunesinin tabakalanmaya paralel olarak kesilmesi gösterilebilir. Şeyl numunesi için 13 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri; s=80 mm için, d=5 mm'de elde edilmiş (optimum s/d=10) ve optimum spesifik enerji 3,0 kWh/m³ bulunmuştur. s=100 mm için ise, optimum koşullar d=9 mm'de elde edilmiş (optimum s/d=11) ve optimum spesifik enerji 2,3 kWh/m³ bulunmuştur. s=80 mm ve 100 mm'de keski arası mesafede kesme derinliği arttıkça keskiye gelen kuvvetler artmaktadır fakat spesifik enerji sabit kalmıştır. Spesifik enerjinin sabit kalmasının sebebi şeyl numunesinin tabakalanmaya paralel kesilmesi gösterilebilir.

Çizelge 3.24'te 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımsız kesme deneylerinin özet sonuçları verilmektedir. Çizelge 3.25'te 15 inç V tip disk ile şeyl numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımlı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3.24: 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu.

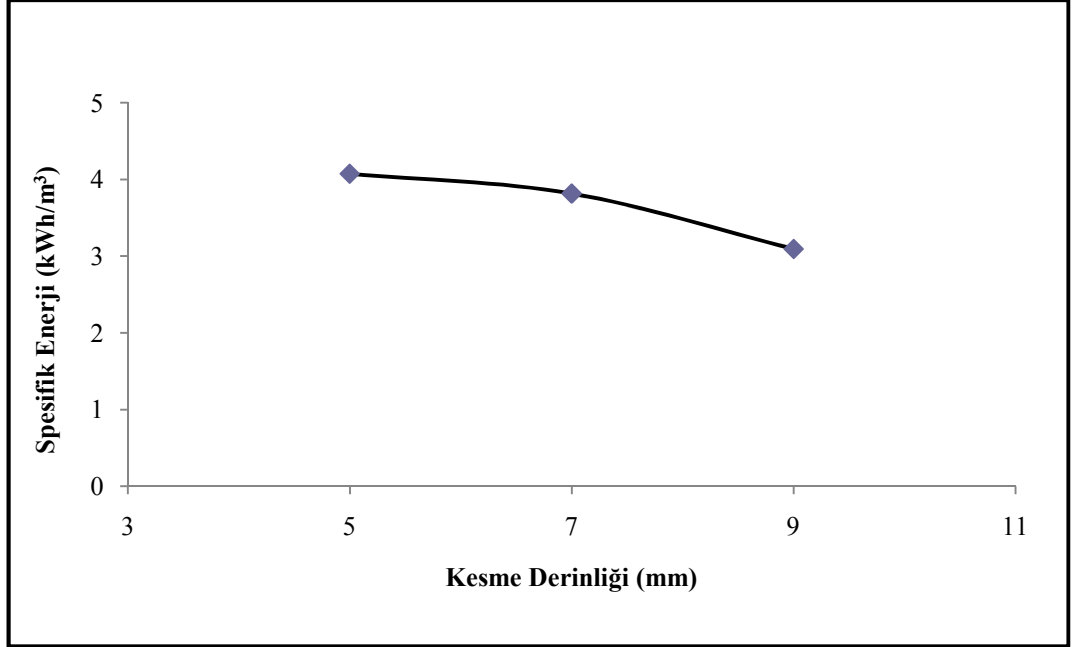
d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m ³)	PİK
5	3088,9	4519,4	401,1	659,6	4,1	428
7	3888,3	6337,6	484,3	757,4	3,8	429
9	5805,6	8803,9	824,6	1246,1	3,1	418

Çizelge 3.25: 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımlı kesme deneyleri özet tablosu.

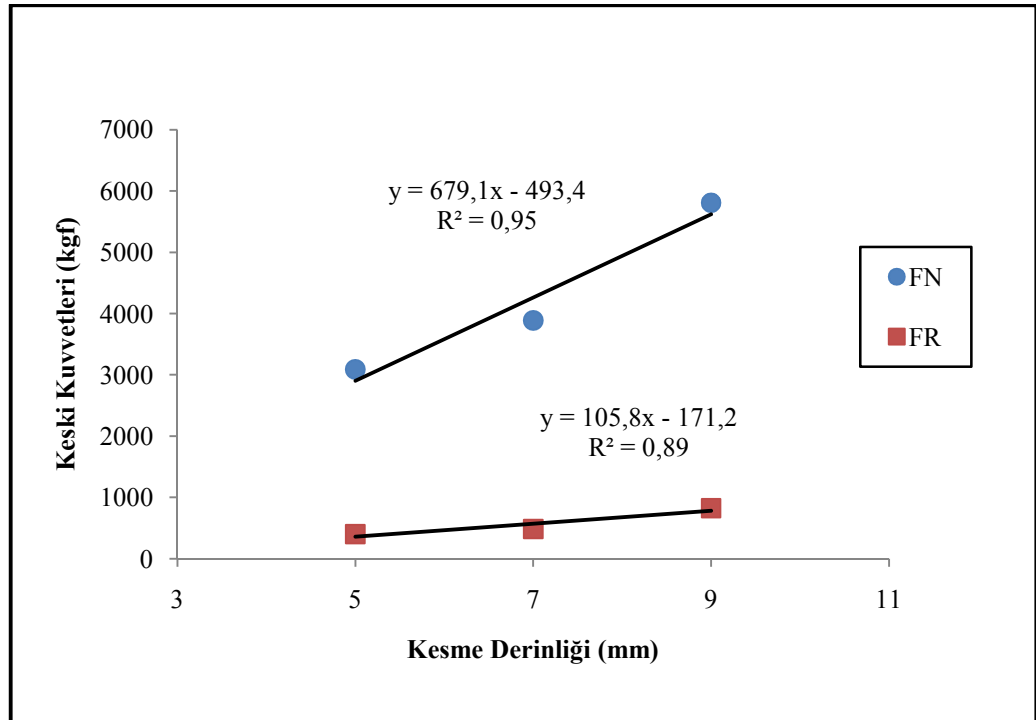
d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m ³)	PİK
7	80	11,4	3532,0	5830,2	445,9	749,1	2,5	496
9	80	8,9	4621,3	7798,7	675,8	1127,6	2,1	488
12	80	6,7	5536,7	8880,3	963,7	1556,1	2,4	489

Yardımsız kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesme derinliği ile spesifik enerji ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.72 ve 73'te

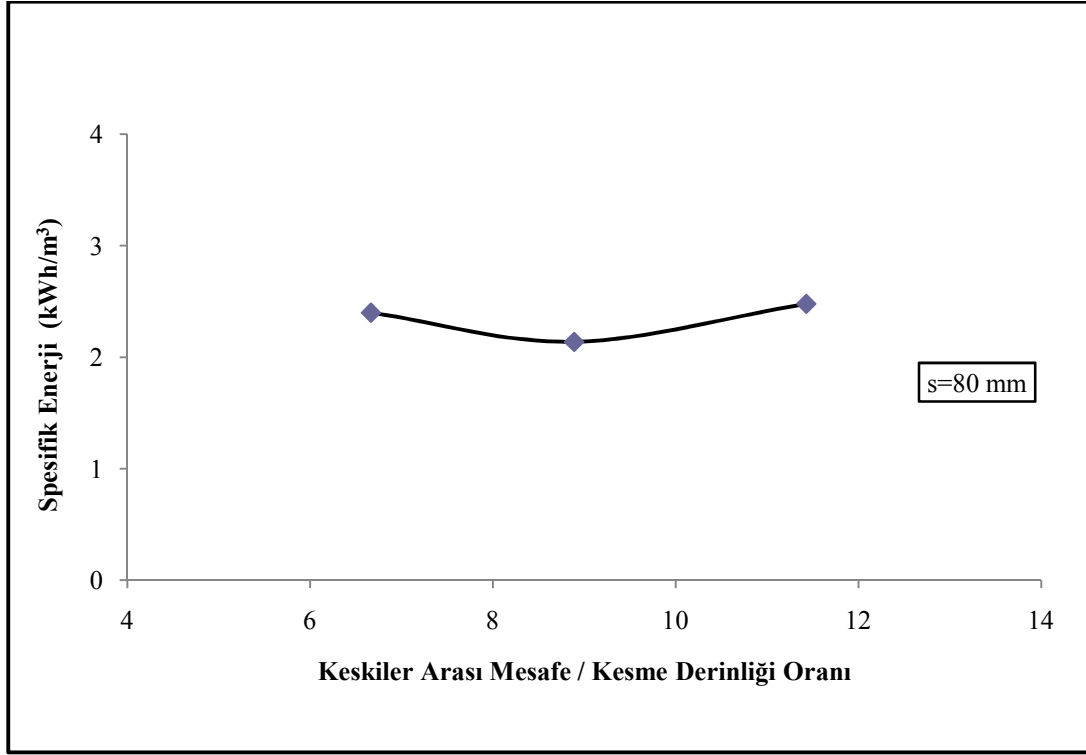
verilmiştir. Yardımlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji, keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri ise Şekil 3.74-76’da verilmiştir.



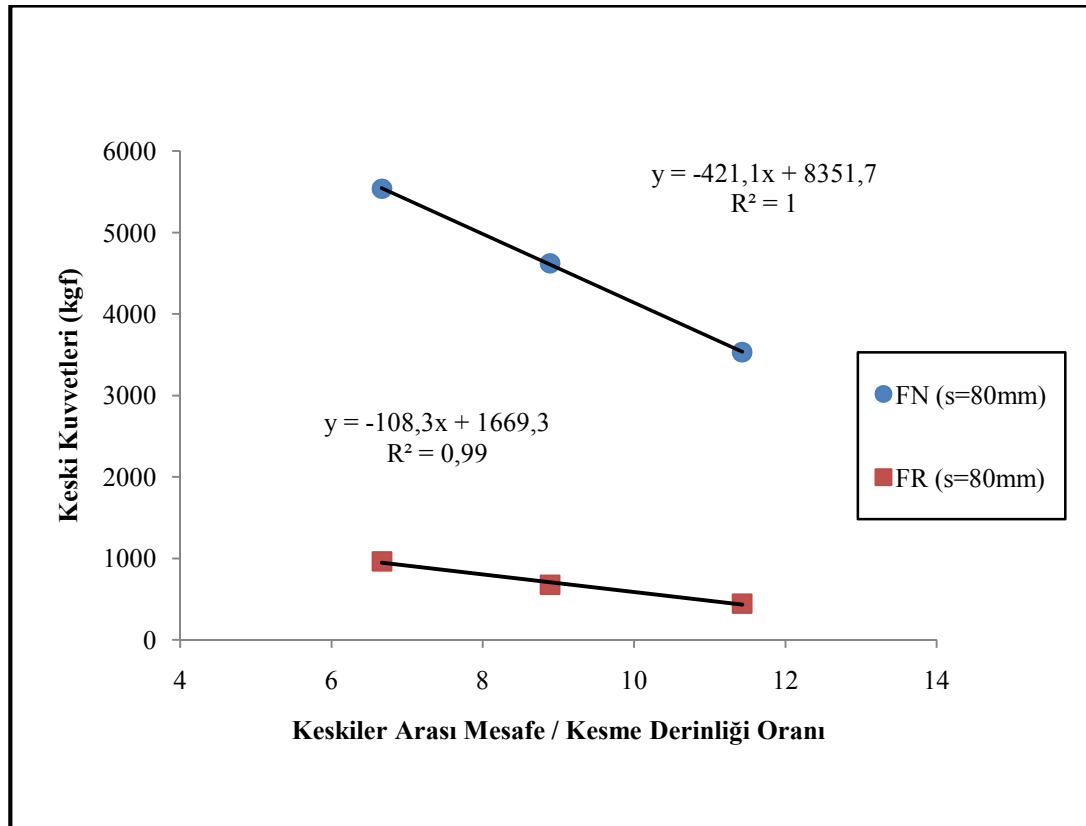
Şekil 3.72: Şeyl numunesi, 15 inç V tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi.



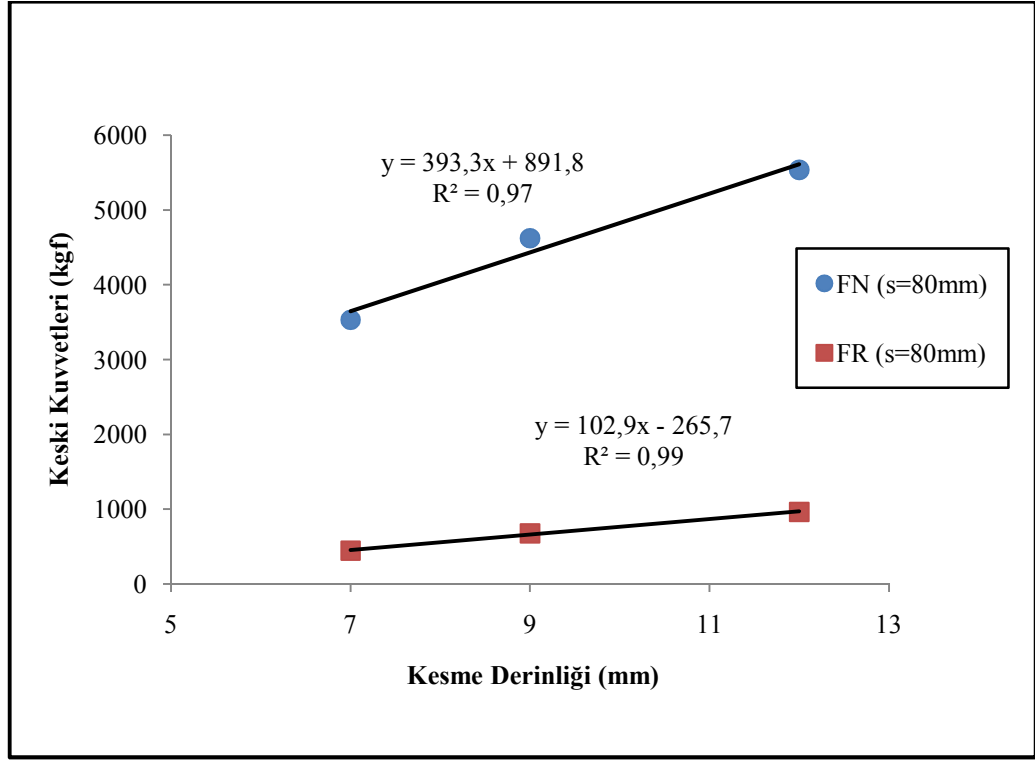
Şekil 3.73: Şeyl numunesi, 15 inç V tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.74: Şeyl numunesi, 15 inç V tip disk yardımlı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 3.75: Şeyl numunesi, 15 inç V tip disk yardımlı kesme için keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.76: Şeyl numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği keski kuvvetleri ilişkisi.

Şeyl numunesinde 15 inç V tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneylerinde kesme derinliği arttıkça, keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvetleri artmakta buna karşılık spesifik enerji azalmaktadır. Yardımlı kesme deneyleri s=80 mm'de yapılmıştır. s=80 mm keski arası mesafede kesme derinliği arttıkça keskiye gelen kuvvetler artmaktadır. Şeyl numunesi için 15 inç V tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, s=80 mm ve d=9 mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji 2,1 kWh/m³ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 8,9 olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.26'da 17 inç CCS tip disk ile şeyl numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımsız kesme deneylerinin özet sonuçları verilmektedir. Çizelge 3.27'de 17 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımlı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmiştir.

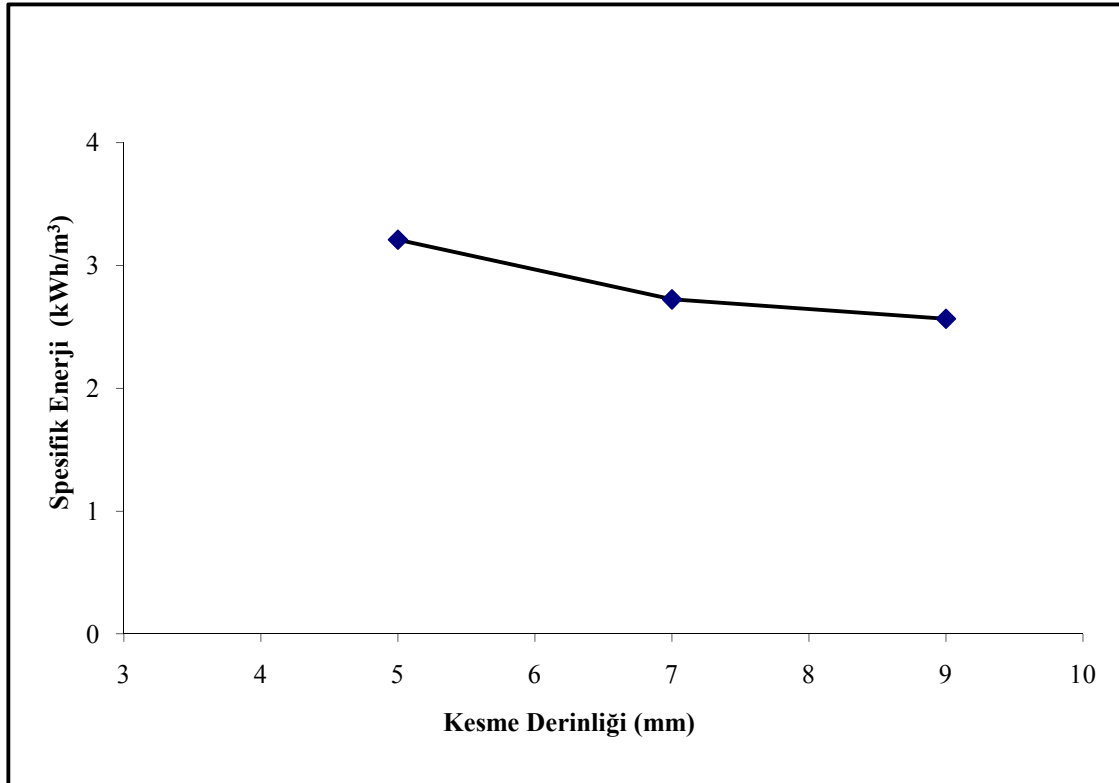
Çizelge 3.26: 17 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu.

d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m ³)	PIK
5	5434,3	8888,3	362,4	781,1	3,2	472
7	6119,1	9763,6	622,6	1033,2	2,7	477
9	7399,2	11050,0	933,7	1517,5	2,6	312

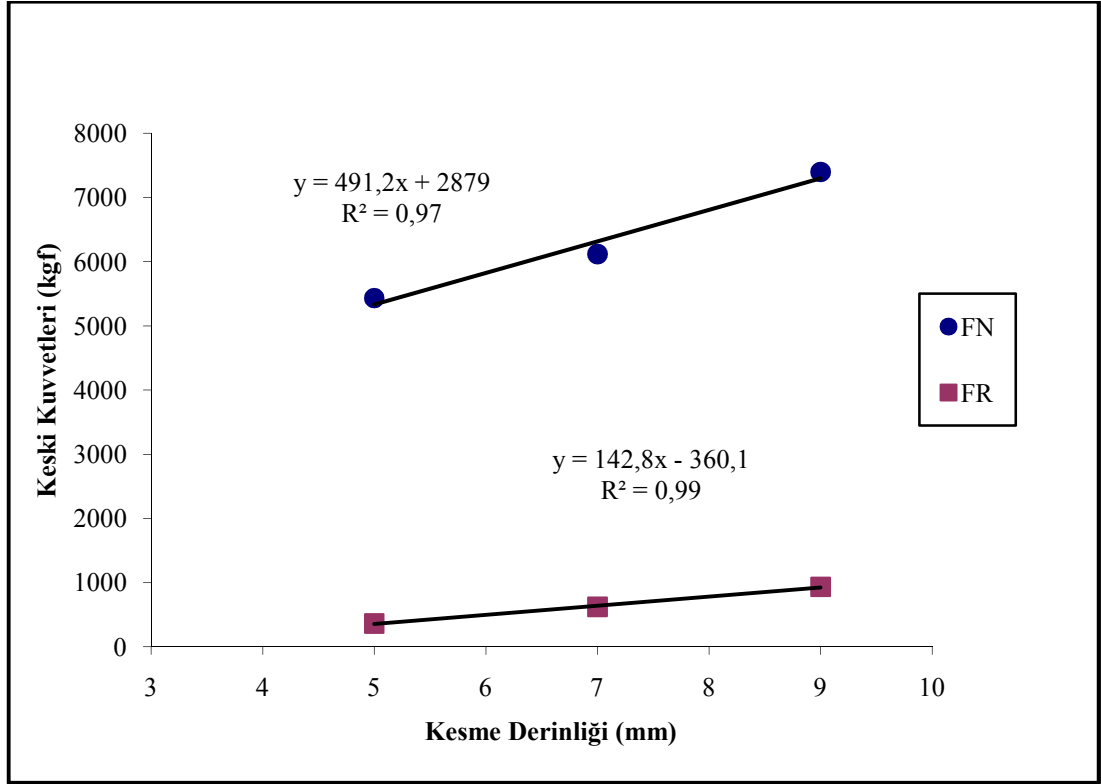
Çizelge 3.27: 17 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m ³)	PİK
5	80	16,0	4253,3	7000,8	311,6	657,6	2,5	470
7	80	11,4	5552,3	9302,6	551,3	1113,7	2,4	489
9	80	8,9	7088,0	11397,4	899,8	1687,3	2,4	480

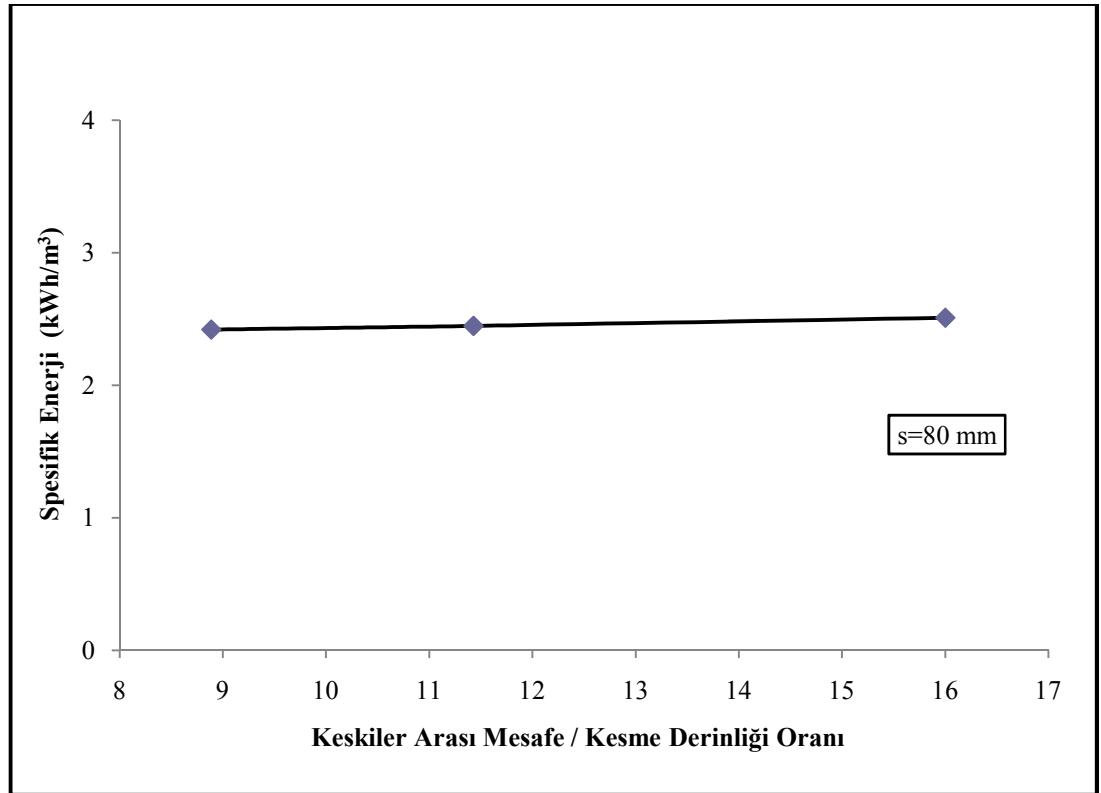
Yardımsız kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesme derinliği ile spesifik enerji ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.77 ve 78'de verilmiştir. Yardımlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji, kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri ise Şekil 3.79-81'de verilmiştir.



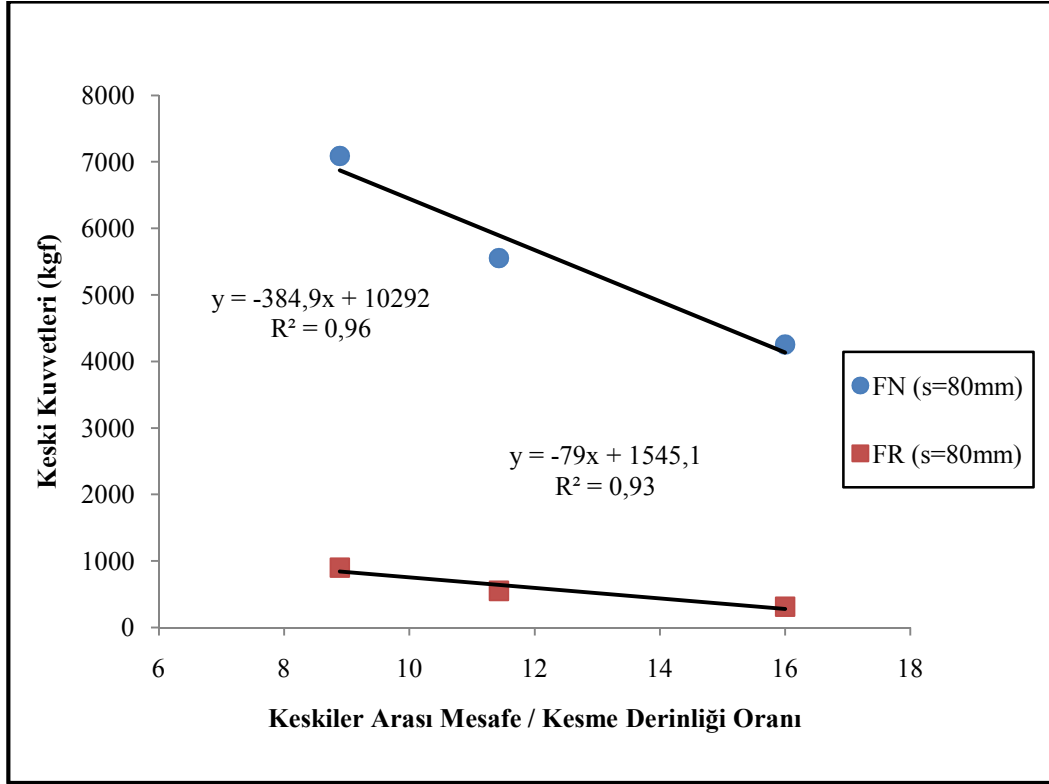
Şekil 3.77: Şeyl numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi.



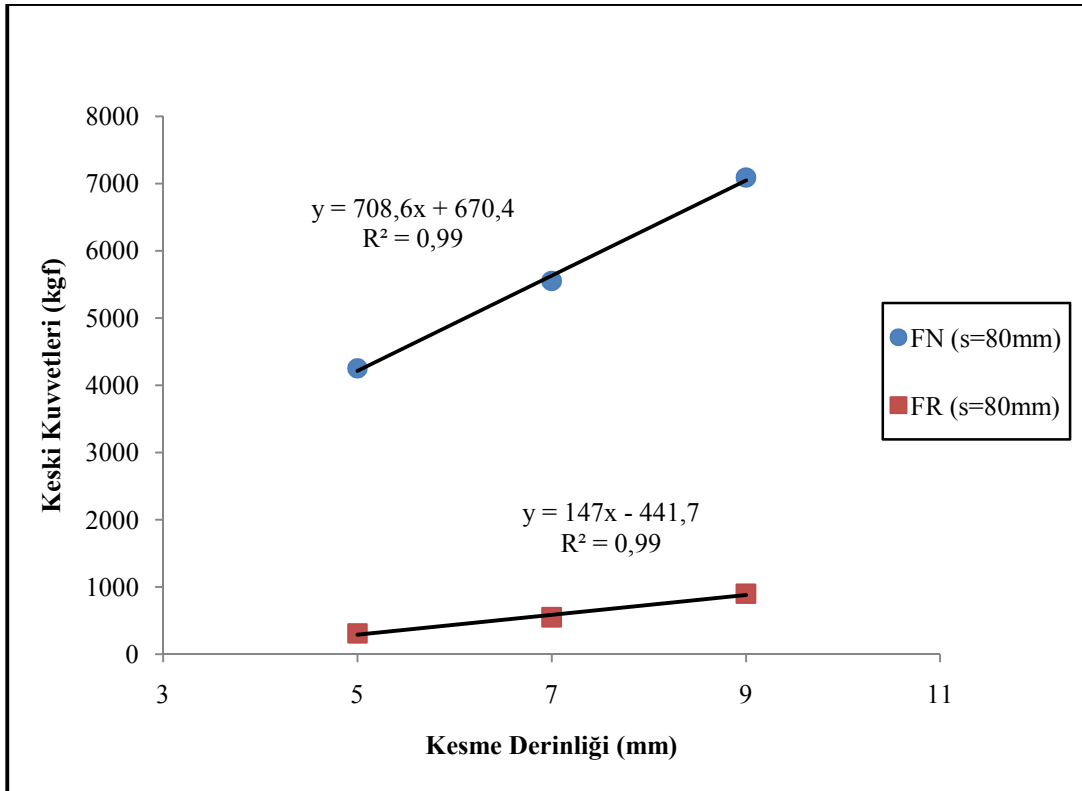
Şekil 3.78: Şeyl numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile kesme kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.79: Şeyl numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 3.80: Şeyl numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.81: Şeyl numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.

Şeyl numunesinde 17 inç CCS tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneylerinde kesme derinliği arttıkça, keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvetleri artmakta buna karşılık spesifik enerji azalmaktadır. Yardımlı kesme deneyleri s=80 mm'de yapılmıştır. s=80 mm keskiler arası mesafede kesme derinliği arttıkça keskiye gelen kuvvetler artmaktadır fakat spesifik enerji sabit kalmıştır. Spesifik enerjinin sabit kalmasının sebebi şeyl numunesinin tabakalanmaya paralel kesilmesi gösterilebilir. Şeyl numunesi için 17 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, s=80 mm ve d=9 mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji 2,4 kWh/m³ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 8,9 olarak bulunmuştur.

Şeyl numunesi için hazırlanan yaklaşık 15x15x20 cm ebatlarındaki kaya blokları üzerinde taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) kesme deneyleri yapılmıştır. Kesme deneyleri yardımsız kesme koşullarında üç adet yapılmıştır. Deneyler sonucunda, mini V tip disk keskiye etki eden normal kuvvetler, yuvarlanma kuvvetleri ve spesifik enerji değerleri bulunmuştur. Çizelge 3.28'de, mini V tip disk keski ile taşınabilir doğrusal kazı setinde yapılan kesme deneylerinin sonuçları görülmektedir.

Çizelge 3.28: Şeyl için mini V tip disk kesme sonuçları.

d	FN	F'N	FR	F'R	SE
(mm)	(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kWh/m³)
6,1	1576,2	2339,8	336,2	833,1	22,2
4,7	1101,5	1734,0	308,4	673,9	28,1
5,1	1491,1	2182,0	516,8	1002,6	28,2
ort (d=5)	1310,9	1967,2	365,2	789,2	24,7

13 inç CCS tip disk keski, 15 inç V tip disk keski ve 17 inç CCS tip disk keski ile şeyl numunesinde yapılan kesme deneyleri sonunda oluşan pasalar toplanmıştır. Farklı keski tipleriyle yapılan kesme deneyleri sonucunda oluşan pasa dağılımını görmek ve pasa irilik katsayısını belirlemek için elek analizleri yapılmıştır. Elek analizleri, yardımlı ve yardımsız kesme deneyleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Aynı tip keski için yardımlı ve yardımsız kesme deneyleri sonucunda yapılan elek analizlerinde farklılıklar olup olmadığı belirlenmeye çalışılmış ve pasa irilik indeks değişimleri belirlenmeye çalışılmıştır. Elek analizinde kullanılan elek açıklıkları Bölüm 3.2.4'te detaylı olarak verilmiştir. Çizelge 3.29'da şeyl numunesi için elek analizlerinin özeti verilmiştir. EK. B'de ise 13 inç CCS tip disk keski, 15 inç V tip disk keski ve 17 inç CCS tip disk keski ile yapılan kesme deneyleri sonucu elde

edilen pasanın detaylı elek analiz çizelgeleri, pasa irilik katsayısı hesapları ve kümülatif yüzde elek altı grafikleri verilmiştir.

Çizelge 3.29: Şeyl için elek analizi sonuçları.

Disk tipi/çapı	Keskiler arası mesafe (s, mm)	Kesme derinliği (d, mm)	s/d	Pasa irilik katsayısı
13 inç CCS	yardımsız	5	-	372
13 inç CCS	yardımsız	7	-	447
13 inç CCS	yardımsız	9	-	501
13 inç CCS	80	4	20,0	524
13 inç CCS	80	6	13,3	498
13 inç CCS	80	8	10,0	473
13 inç CCS	100	5	20,0	489
13 inç CCS	100	7	14,3	412
13 inç CCS	100	9	11,1	519
15 inç V	yardımsız	5	-	428
15 inç V	yardımsız	7	-	429
15 inç V	yardımsız	9	-	418
15 inç V	80	5	16,0	496
15 inç V	80	7	11,4	488
15 inç V	80	9	8,9	489
17 inç CCS	yardımsız	5	-	472
17 inç CCS	yardımsız	7	-	477
17 inç CCS	yardımsız	9	-	312
17 inç CCS	80	5	16,0	470
17 inç CCS	80	7	11,4	489
17 inç CCS	80	9	8,9	480

3.3.2.3 Fosilli kireçtaşı numunesinde yapılan doğrusal kesme deneylerinin sonuçları

Başakşehir-İkitelli Metro hattında kazı yapan tam cepheli tünel açma makinesinin (TBM) geçtiği formasyonlardan biri olan fosilli kireçtaşı için laboratuvar ortamında tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) kesme deneyleri yapılmıştır. Fosilli kireçtaşı numunesi, tam boyutlu doğrusal kazı setinde 13 inç (330 mm) CCS tip disk, 15 inç (380 mm) V tip disk ve 17 inç (432 mm) CCS tip disk keskiyle, taşınabilir doğrusal kazı setinde ise mini V tip (130 mm) disk keski ile kesilmiştir.

13 inç CCS tip disk keski ile yardımcı ve yardımcı olarak kesme deneyleri yapılmıştır. Yardımsız kesme deneylerinde, kesme derinlikleri (d) 5, 7 ve 9 mm

olarak belirlenmiştir. Yardımlı kesme deneylerinde ise keskiler arası mesafe (s) 75 mm ve kesme derinlikleri (d) 5, 7, 9 mm olarak belirlenmiştir.

15 inç V tip disk keski ile de yardımcı ve yardımcı kesme deneyleri yapılmıştır. Yardımsız kesme deneylerinde, kesme derinlikleri (d) 5, 7.5, 10 ve 12 mm olarak belirlenmiştir. Yardımlı kesme deneylerinde ise keskiler arası mesafe (s) 75 mm ve kesme derinlikleri (d) 5, 7.5, 10, 12 ve 15 mm olarak belirlenmiştir.

17 inç CCS tip disk keski ile yardımcı ve yardımcı olarak kesme deneyleri yapılmıştır. Yardımsız kesme deneylerinde, kesme derinlikleri (d) 5, 7, 9 mm olarak belirlenmiştir. Yardımlı kesme deneylerinde ise keskiler arası mesafe (s) 75 mm, kesme derinlikleri (d) 5, 7, 9 mm ve keskiler arası mesafe (s) 90 mm ve kesme derinlikleri (d) 7, 9, 12 mm olarak belirlenmiştir.

Mini V tip disk keski ile kesme derinliği (d) 5 mm'de indeks bir değer elde edebilmek için şeyl numunesinde 3 adet kesme deneyi yapılmıştır.

Çizelge 3.30'da 13 inç CCS tip disk ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımcı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmektedir. Çizelge 3. 31'de 13 inç CCS tip disk ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımcı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmiştir. Fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan doğrusal kesme deneylerin detaylı sonuçları EK A'da verilmiştir.

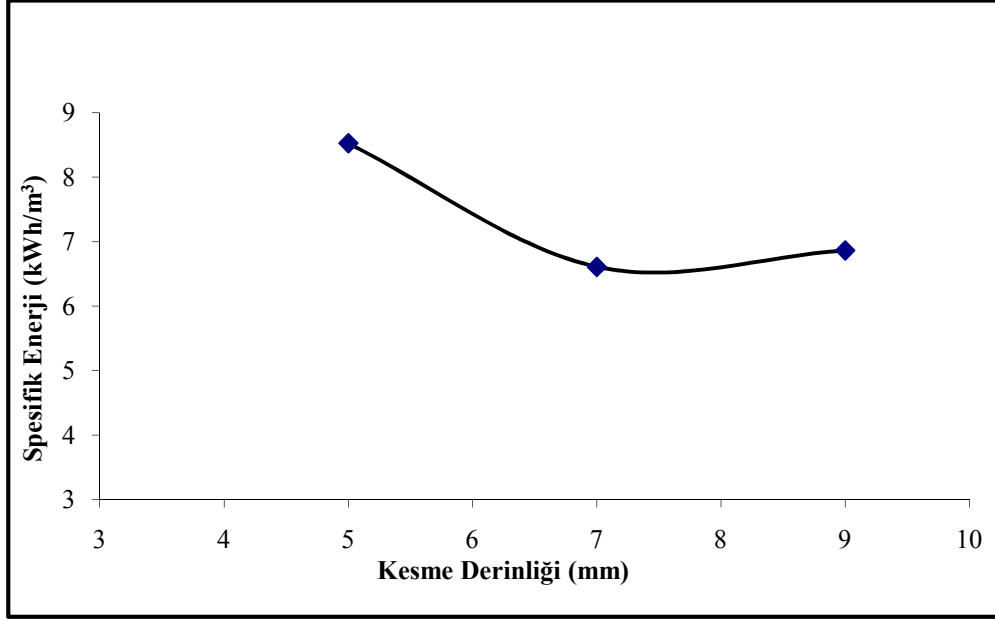
Çizelge 3.30: 13 inç CCS tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu.

d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)	PİK
5	5021,5	8871,9	558,7	1102,5	8,5	373
7	6820,7	12540,2	822,5	1605,0	6,6	403
9	8056,7	14026,3	1301,5	2259,2	6,9	419

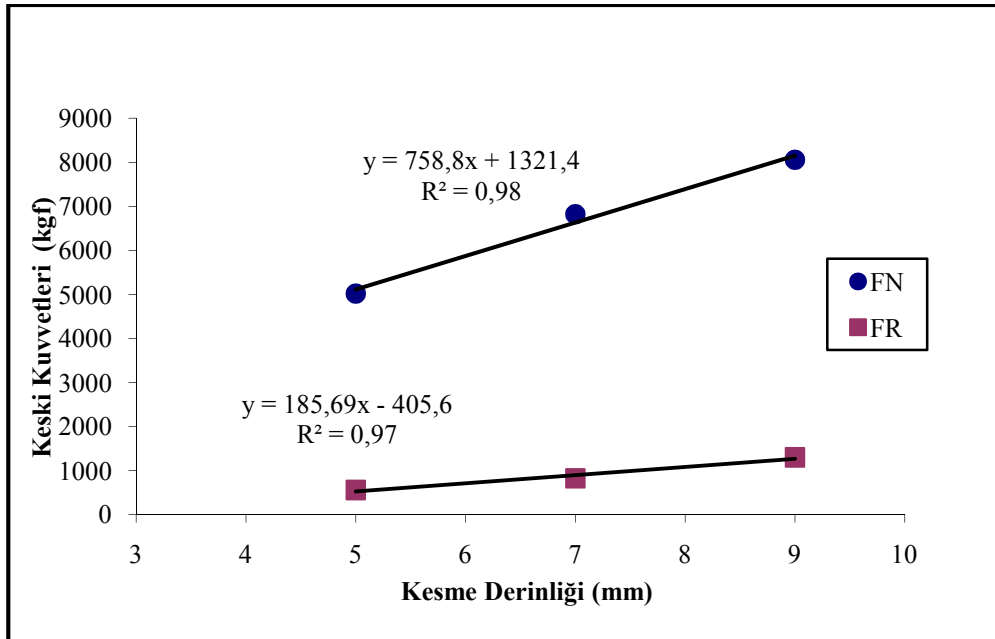
Çizelge 3.31: 13 inç CCS tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)	PİK
5	75	15,0	4995,0	8397,8	550,7	1019,6	4,2	474
7	75	10,7	6228,9	12997,8	799,9	1671,3	2,9	527
9	75	8,3	6913,0	17418,3	1235,5	2943,4	3,4	492

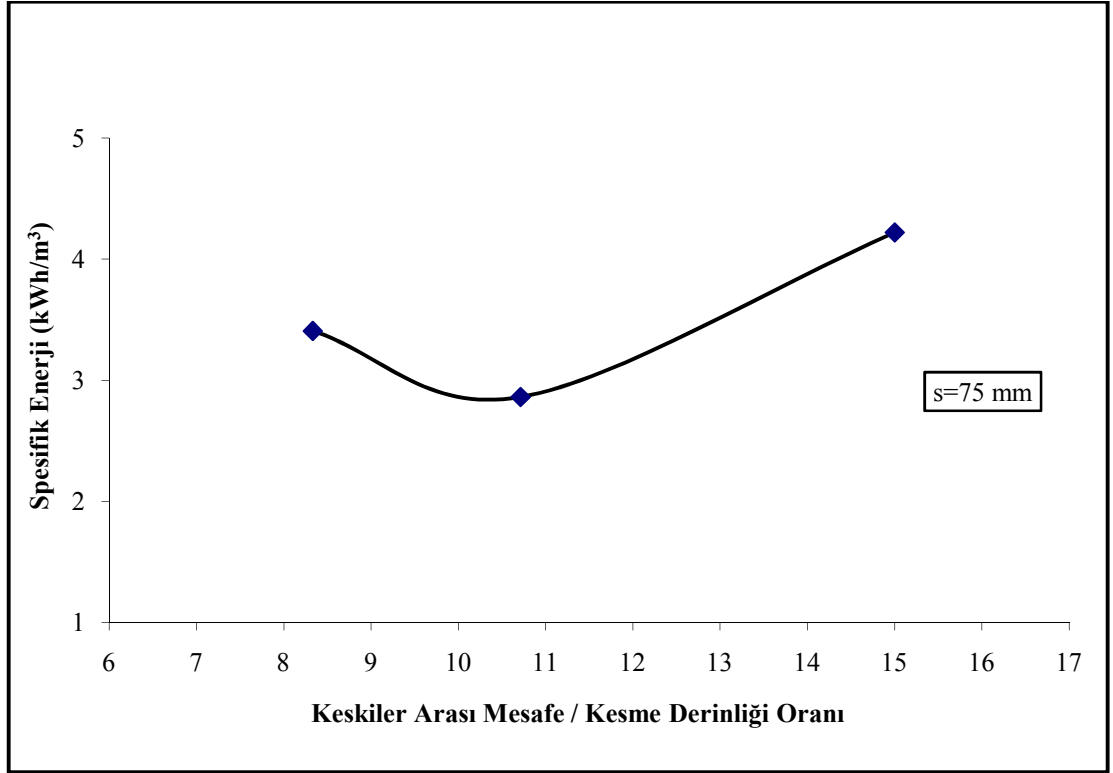
Yardımsız kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesme derinliği ile spesifik enerji ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.82 ve 83'te verilmiştir. Yardımlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen keski mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji, keski mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri ise Şekil 3.84-86'da verilmiştir.



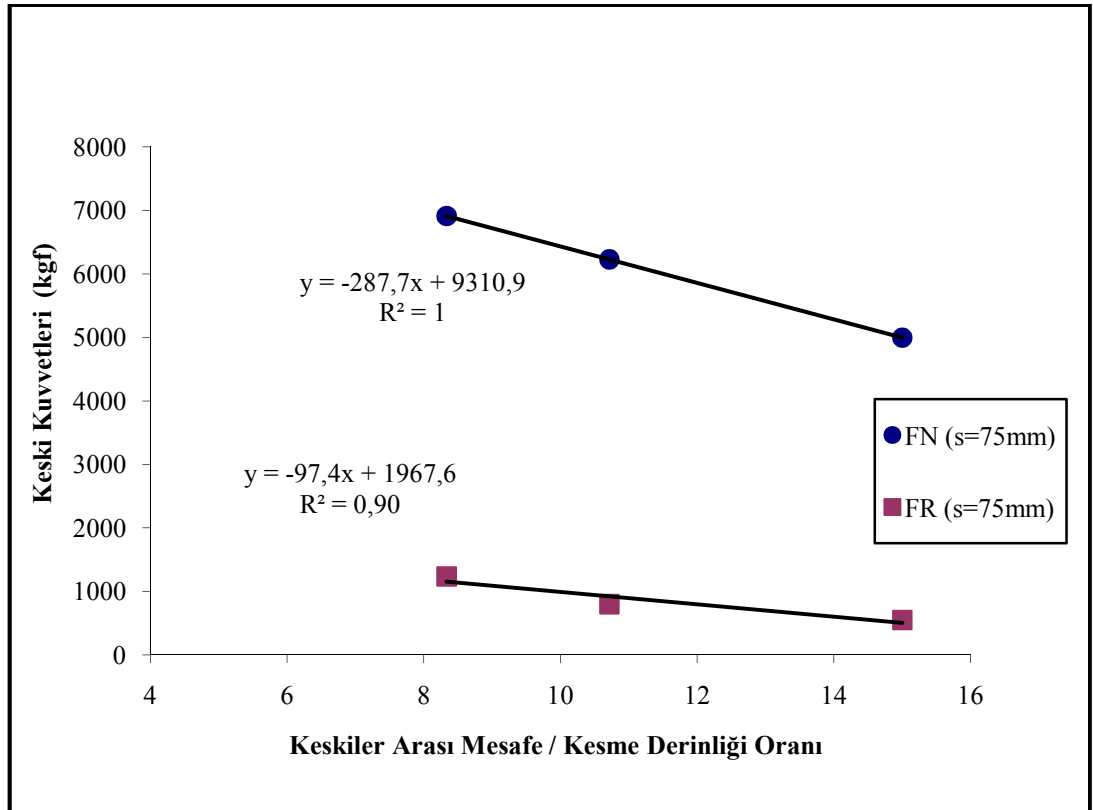
Şekil 3.82: Fosilli kireçtaşı numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi.



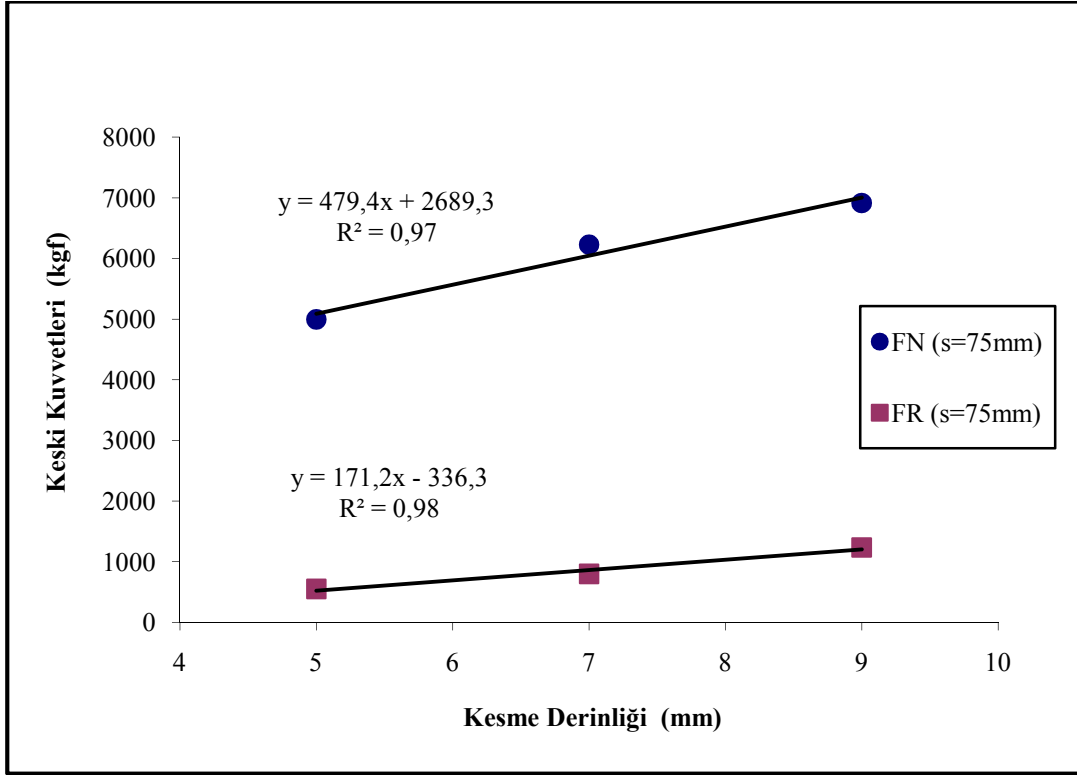
Şekil 3.83: Fosilli kireçtaşı numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.84: Fosilli kireçtaşı numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımsız kesme için keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 3.85: Fosilli kireçtaşı numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.86: Fosilli kireçtaşı numunesi, 13 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.

Fosilli kireçtaşı numunesinde 13 inç CCS tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneylerinde kesme derinliği arttıkça, keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvetleri artmakta buna karşılık spesifik enerji azalmaktadır. Yardımlı kesme deneyleri $s=75$ mm’de yapılmıştır. $s=75$ mm keski arası mesafede kesme derinliği arttıkça keskiye gelen kuvvetler artmaktadır. Fosilli kireçtaşı numunesi için 13 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, $s=75$ mm ve $d=7$ mm’de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji $2,9 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 10,7 olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.32’de 15 inç V tip disk ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımsız kesme deneylerinin özet sonuçları verilmektedir. Çizelge 3.33’te 15 inç V tip disk ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımcı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmiştir.

Yardımsız kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesme derinliği ile spesifik enerji ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.87 ve 88’de verilmektedir. Yardımlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji, keski arası mesafe/kesme derinliği

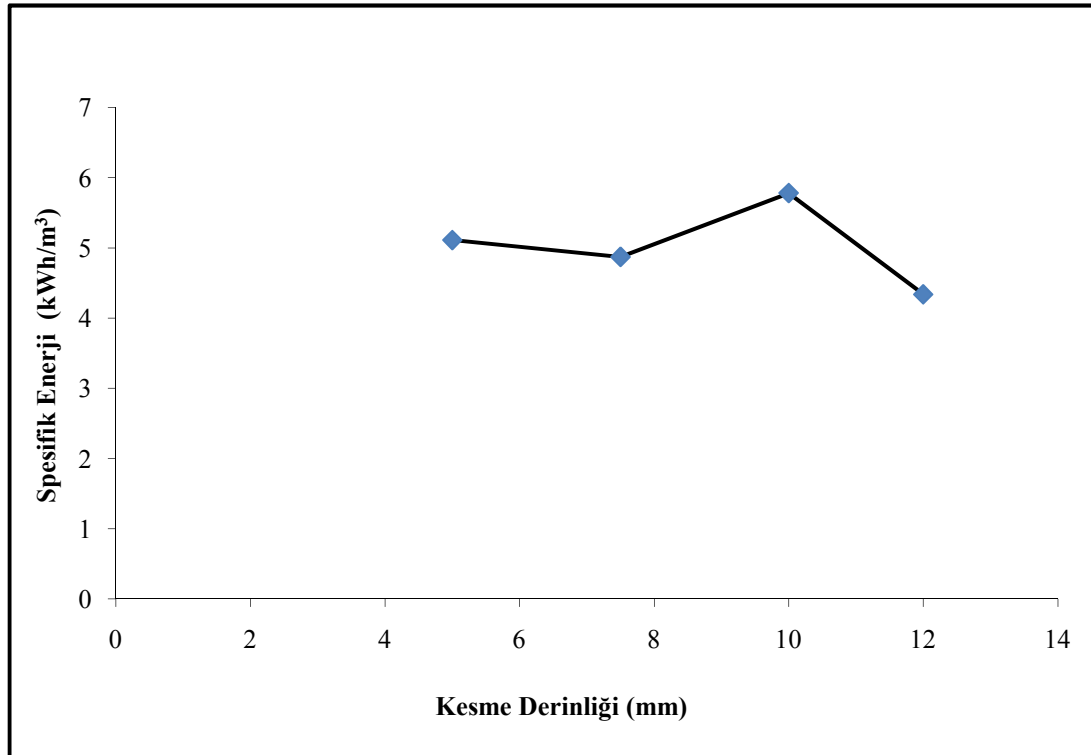
oranı ile keski kuvvetleri ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri ise Şekil 3.89-91’de verilmiştir.

Çizelge 3.32: 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu.

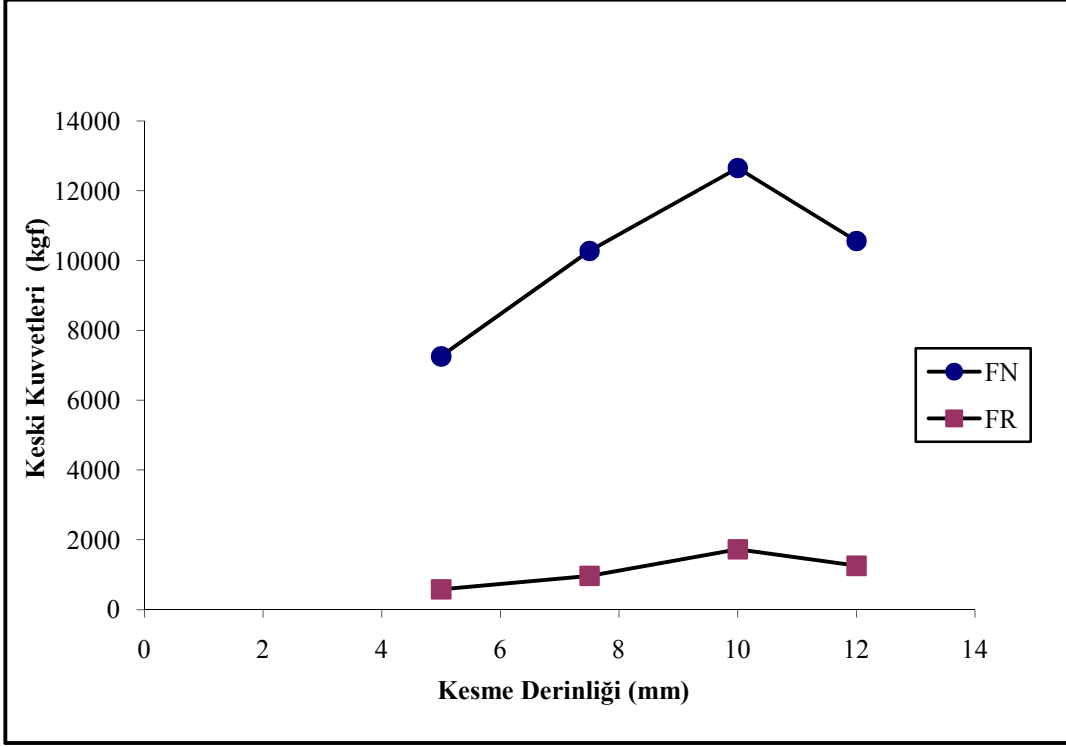
d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m ³)	PİK
5	7256,1	11205,3	580,0	1102,5	5,1	515
7,5	10279,7	16036,5	968,8	1928,8	4,9	474
10	12654,1	19859,7	1727,0	3125,1	5,8	501
12	10562,8	17213,7	1258,1	2875,5	4,3	480

Çizelge 3.33: 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri özet tablosu.

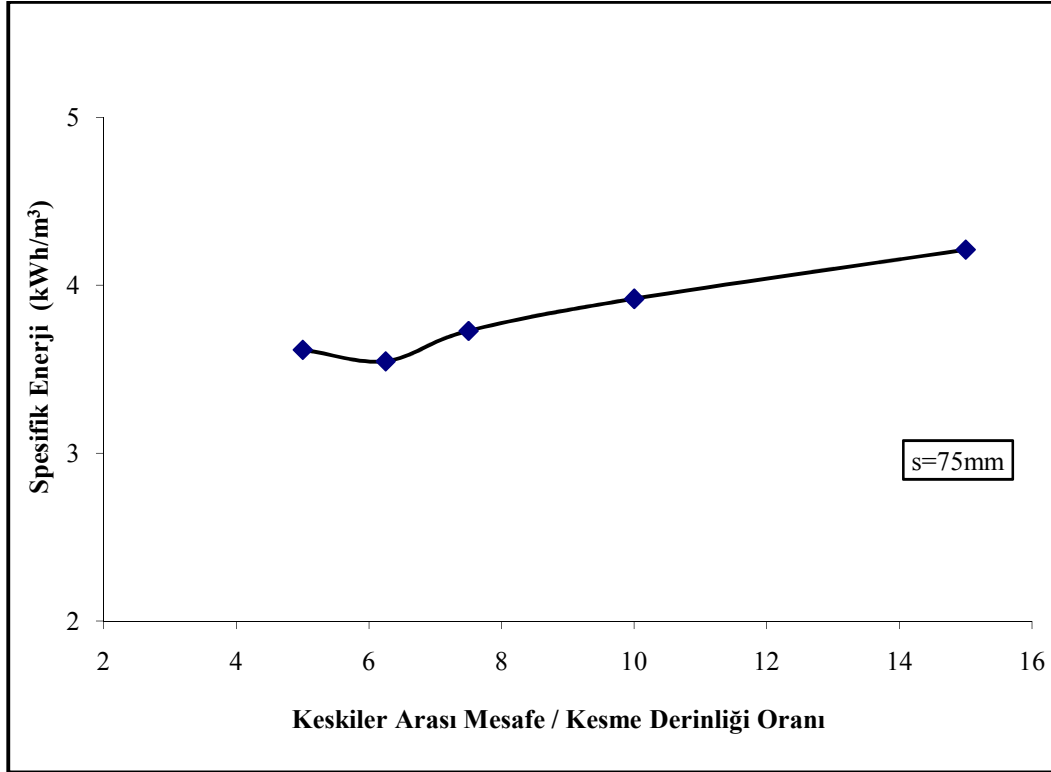
d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m ³)	PİK
5	75	15,0	5207,6	9819,0	455,0	877,9	4,2	490
7,5	75	10,0	7425,6	13613,1	773,7	1642,0	3,9	506
10	75	7,5	9736,6	17555,0	1235,5	2256,4	3,7	509
12	75	6,3	9843,1	17105,7	1224,6	2609,8	3,5	513
15	75	5,0	7622,6	14746,7	1159,1	2420,4	3,6	481



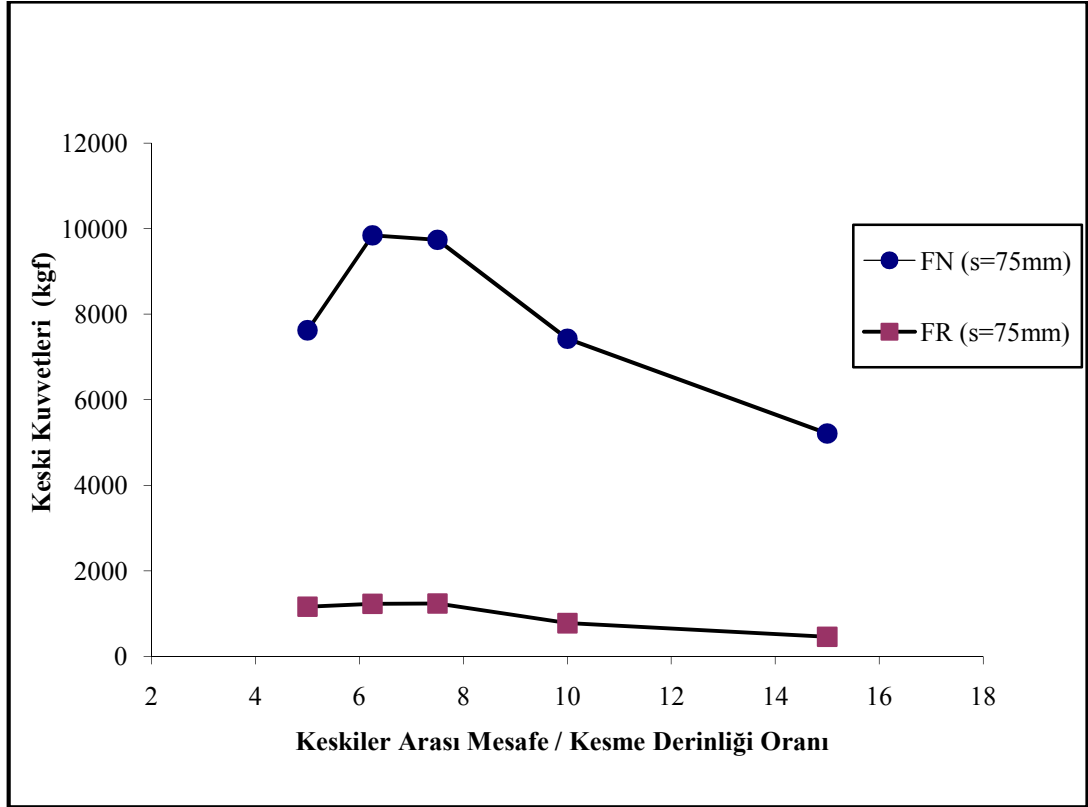
Şekil 3.87: Fosilli kireçtaşı numunesi, 15 inç V tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi.



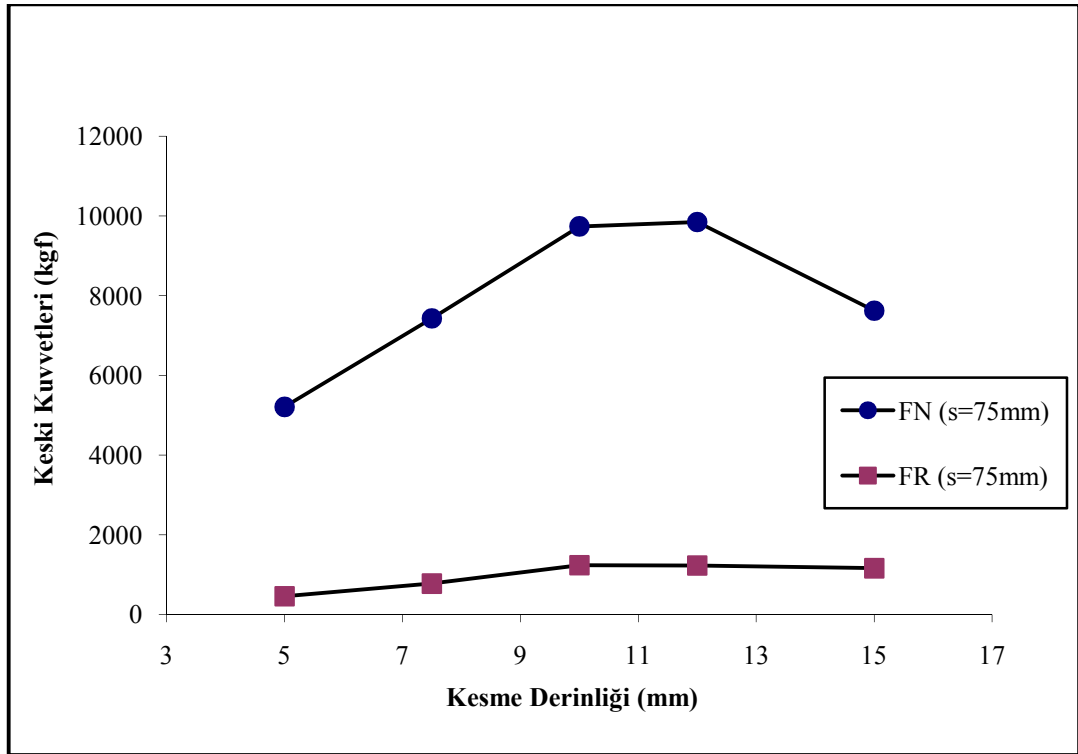
Şekil 3.88: Fosilli kireçtaşı numunesi, 15 inç V tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.89: Fosilli kireçtaşı numunesi, 15 inç V tip disk yardımcı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 3.90: Fosilli kireçtaşı numunesi, 15 inç V tip disk yardımlı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.91: Fosilli kireçtaşı numunesi, 15 inç V tip disk yardımlı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.

Fosilli kireçtaşı numunesinde 15 inç V tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneylerinde kesme derinliği arttıkça, keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvetleri artmakta buna karşılık spesifik enerji değeri ise azalmaktadır. Yardımlı kesme deneyleri s=75 mm'de yapılmıştır. s=75 mm keski arası mesafede kesme derinliği arttıkça keskiye gelen kuvvetler artmaktadır. Fosilli kireçtaşı numunesi için 15 inç V tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, s=75 mm ve d=12 mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji 3,5 kWh/m³ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 6,3 olarak bulunmuştur. Yardımlı ve yardımsız kesme deneylerinde yüksek kesme derinliklerinde elde edilen normal ve yuvarlanma kuvvet değerleri beklenenden farklı olmuş ve trendi bozmuştur. Bunun sebebi; kesme derinliğinin çok yüksek olması ya da deneysel hata olarak açıklanabilir.

Çizelge 3.34'te 17 inç CCS tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımsız kesme deneylerinin özet sonuçları ve Çizelge 3.35'te 17 inç CCS tip disk ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde gerçekleştirilen yardımlı kesme deneylerinin özet sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3.34: 17 inç CCS tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri özet tablosu.

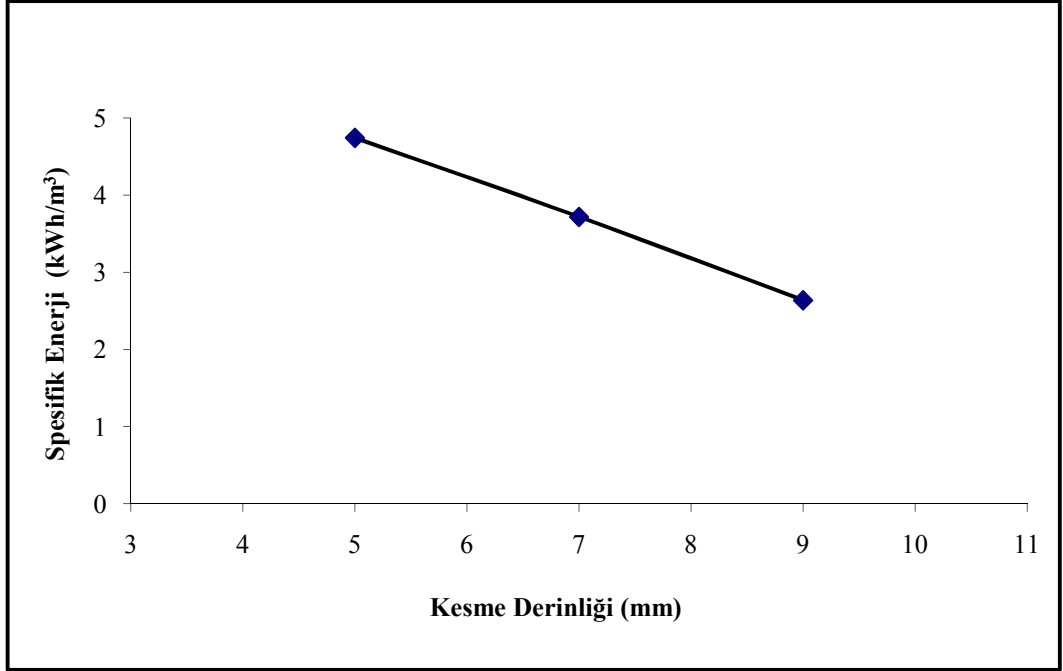
d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m ³)	PİK
5	12616,4	19094,1	763,1	1554,8	4,7	482
7	13042,7	19034,6	1175,5	2075,9	3,7	513
9	14100,4	22387,3	1471,8	3000,1	2,6	518

Çizelge 3.35: 17 inç CCS tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımlı kesme deneyleri özet tablosu.

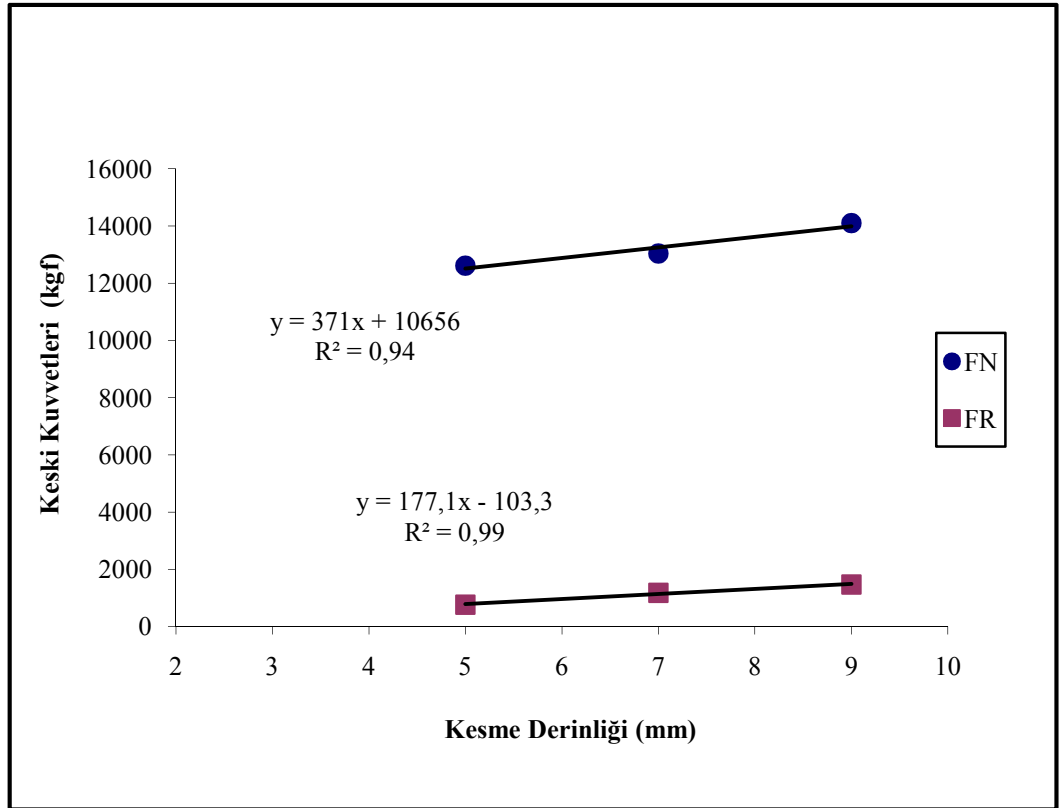
d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m ³)	PİK
5	75	15,0	6335,3	11493,2	466,7	1005,8	2,4	489
7	75	10,7	8623,7	16629,5	778,0	1991,7	2,1	484
9	75	8,3	11827,4	19817,8	1175,3	2138,6	2,5	482
7	90	12,9	9455,5	21544,5	761,9	2032,9	2,4	512
9	90	10,0	10168,8	19286,2	1078,4	2432,6	2,2	506
12	90	7,5	12317,5	21578,5	1623,3	3194,1	2,5	497

Yardımsız kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesme derinliği ile spesifik enerji ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri Şekil 3.92-93'te verilmiştir. Yardımlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen keski arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji, keski arası mesafe/kesme derinliği

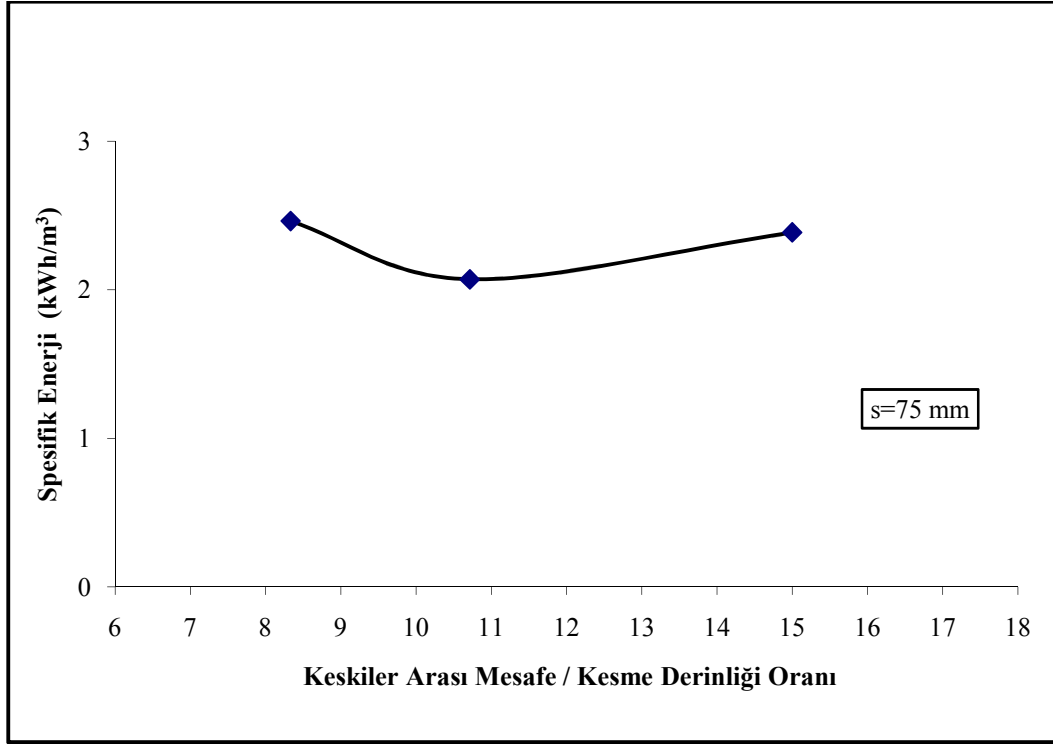
oranı ile keski kuvvetleri ve kesme derinliği ile keski kuvvetlerinin değişim grafikleri ise Şekil 3.94-99’da verilmiştir.



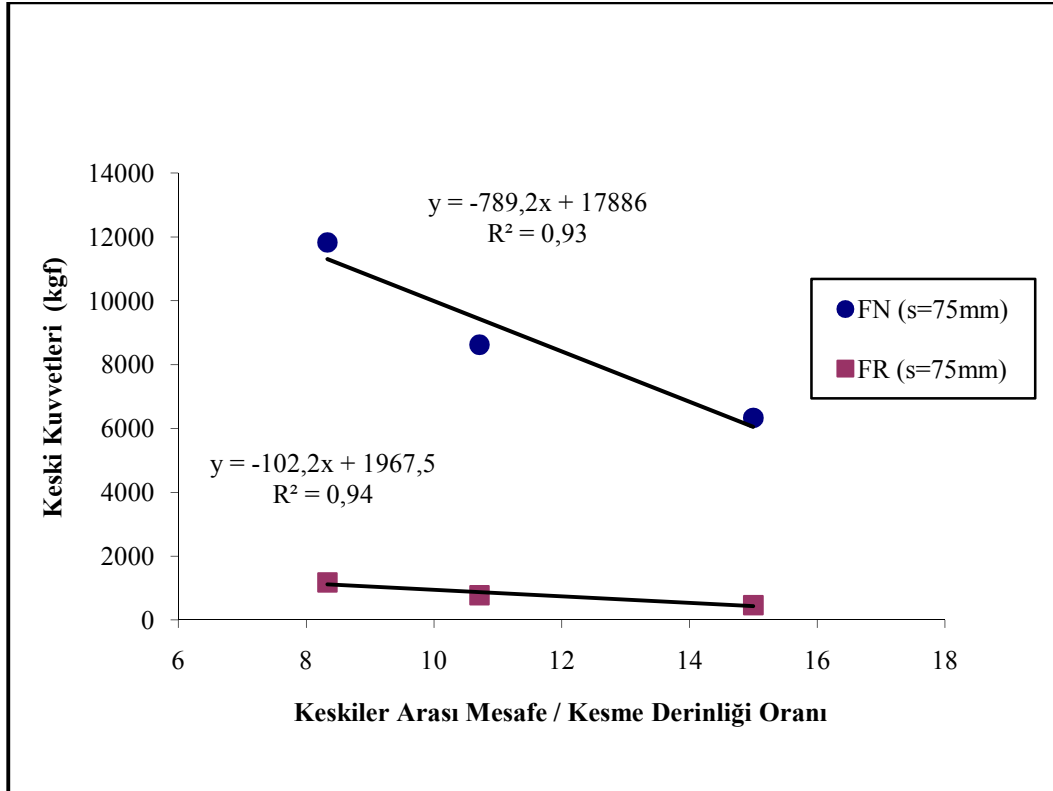
Şekil 3.92: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile spesifik enerji ilişkisi.



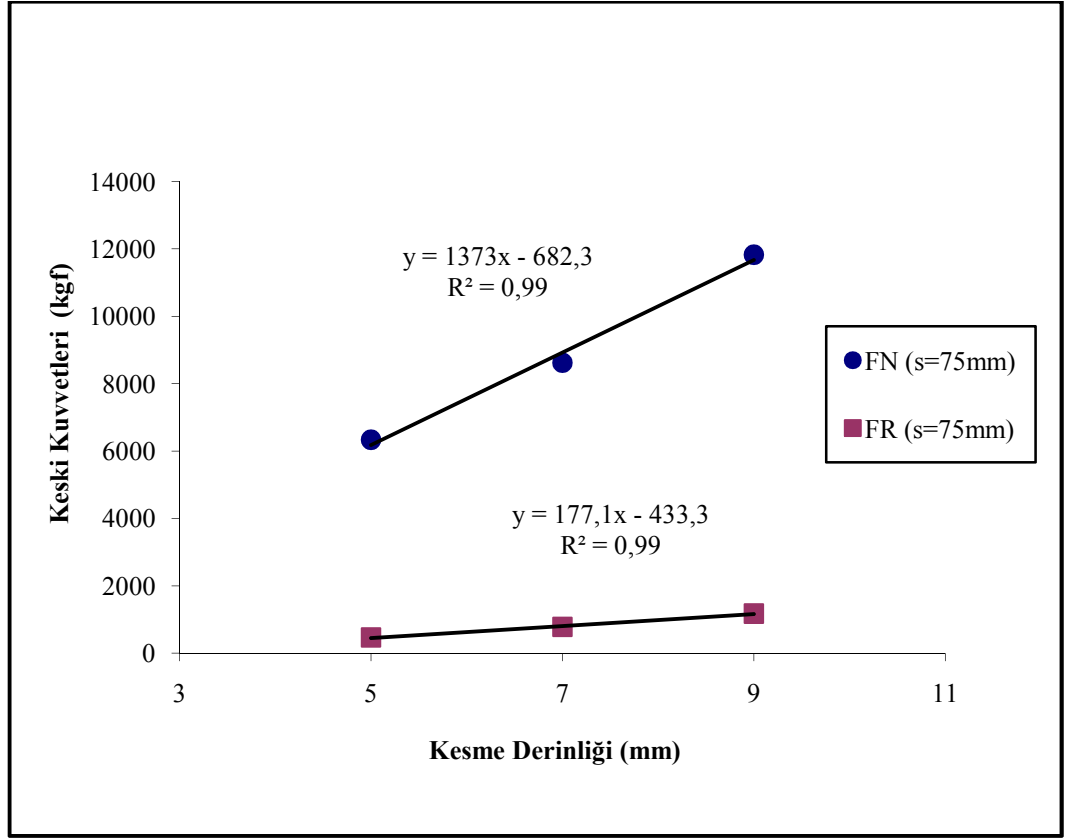
Şekil 3.93: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımsız kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.



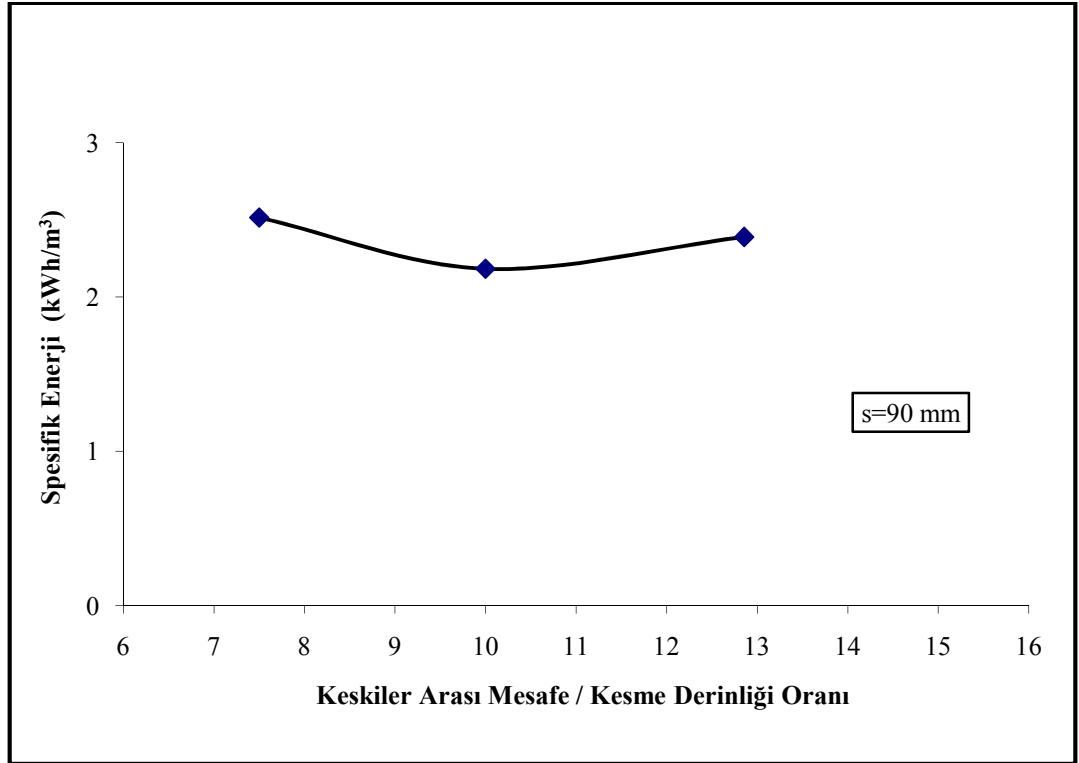
Şekil 3.94: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



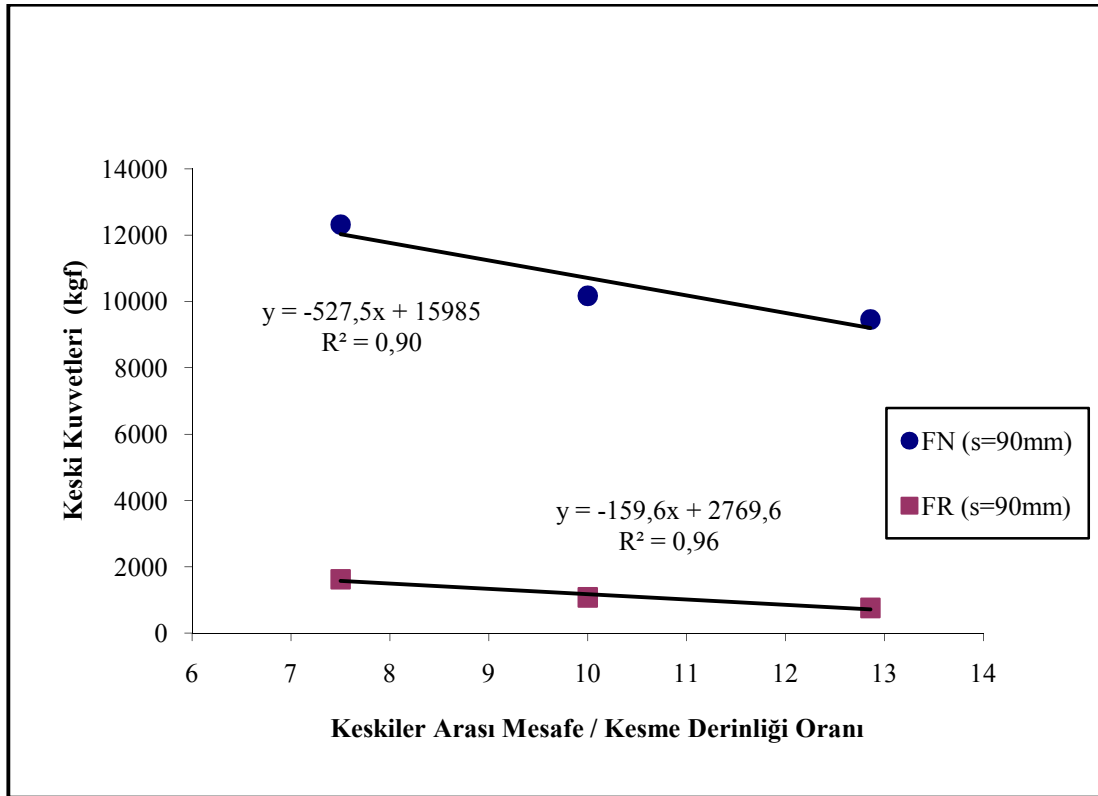
Şekil 3.95: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.



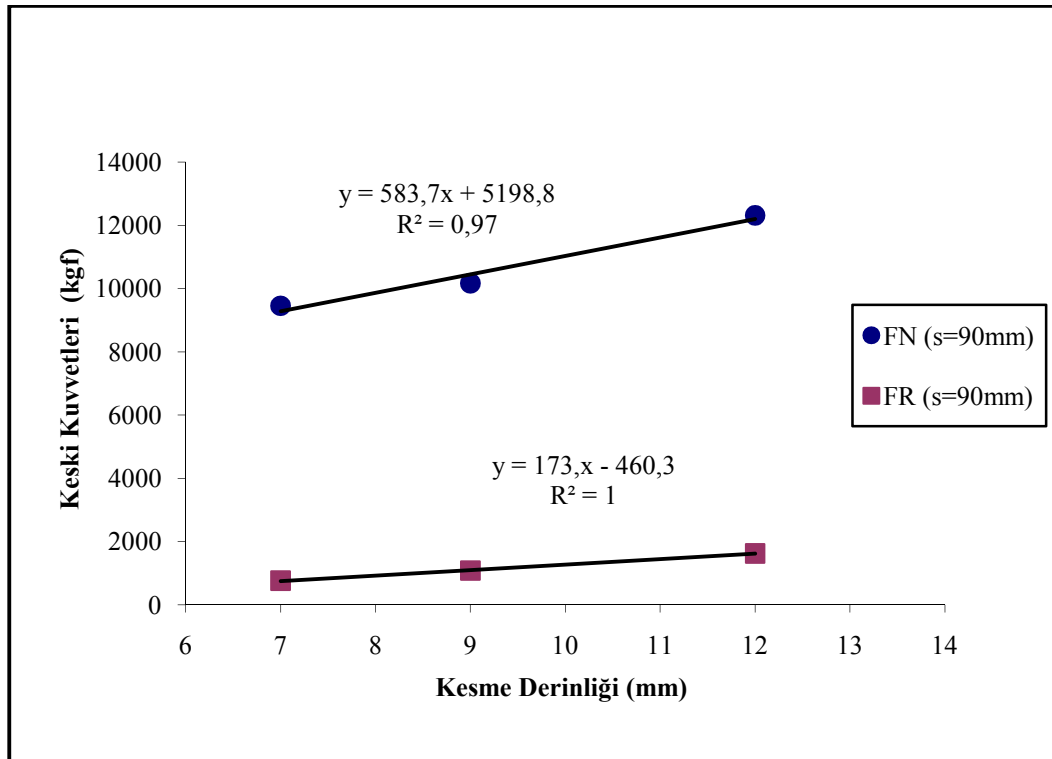
Şekil 3.96: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımlı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.97: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımlı kesme için kesimler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 3.98: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 3.99: Fosilli kireçtaşı numunesi, 17 inç CCS tip disk yardımcı kesme için kesme derinliği ile keski kuvvetleri ilişkisi.

Fosilli kireçtaşı numunesinde 17 inç CCS tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneylerinde kesme derinliği arttıkça, keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvetleri artmakta buna karşılık spesifik enerji değeri azalmaktadır. Yardımlı kesme deneyleri ise iki farklı keskiler arası mesafede yapılmıştır, bunlar; $s=75$ mm ve $s=90$ mm'dir. Her iki keskiler arası mesafede de kesme derinliği arttıkça keskiye gelen kuvvetler artmakta buna karşılık spesifik enerji azalmaktadır. Fosilli kireçtaşı numunesi için 17 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri; $s=75$ mm için, $d=7$ mm'de elde edilmiş (optimum $s/d=10,7$) ve optimum spesifik enerji $2,1 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. $s=90$ mm için ise, $d=9$ mm'de elde edilmiş (optimum $s/d=10$) ve optimum spesifik enerji $2,2 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur.

Fosilli kireçtaşı numunesi için hazırlanan yaklaşık $15 \times 15 \times 20$ cm ebatlarındaki kaya blokları üzerinde taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) kesme deneyleri yapılmıştır. Kesme deneyleri yardımsız kesme koşullarında üç adet yapılmıştır. Deneyler sonucunda, mini V tip disk keskiye etki eden normal kuvvetler, yuvarlanma kuvvetleri ve spesifik enerji değerleri bulunmuştur. Çizelge 3.36'da, mini V tip disk keski ile taşınabilir doğrusal kazı setinde yapılan kesme deneylerinin sonuçları görülmektedir.

Çizelge 3.36: Fosilli kireçtaşı için mini V tip disk kesme sonuçları.

d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
5,0	3367,0	4485,2	556,0	969,2	43,3
4,9	2850,1	3692,8	634,0	1066,4	47,0
5,1	2071,5	2795,7	466,4	705,5	38,6
ort (d=5)	2762,9	3657,9	552,1	913,7	43,0

13 inç CCS tip disk keski, 15 inç V tip disk keski ve 17 inç CCS tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesinde yapılan kesme deneyleri sonunda oluşan pasalar toplanmıştır. Farklı keski tipleriyle yapılan kesme deneyleri sonucunda oluşan pasa dağılımını görmek ve pasa irilik katsayısını belirlemek için yardımcı ve yardımsız kesme koşulları için elek analizleri yapılmıştır. Çizelge 3.37'de fosilli kireç taşı numunesi için elek analizlerinin özeti verilmiştir. EK. B' de ise 13 inç CCS tip disk keski, 15 inç V tip disk keski ve 17 inç CCS tip disk keski ile yapılan kesme deneyleri sonucu elde edilen pasanın detaylı elek analiz çizelgeleri, pasa irilik katsayısı hesapları ve kümülatif yüzde elek altı grafikleri verilmiştir.

Çizelge 3.37: Fosilli kireçtaşı için elek analizi sonuçları.

Disk tipi/çapı	Keskiler arası mesafe (s, mm)	Kesme derinliği (d, mm)	s/d	Pasa irilik katsayısı
13 inç CCS	yardımsız	5	-	373
13 inç CCS	yardımsız	7	-	403
13 inç CCS	yardımsız	9	-	419
13 inç CCS	75	5	15,0	474
13 inç CCS	75	7	10,7	527
13 inç CCS	75	9	8,3	492
15 inç V	yardımsız	5	-	515
15 inç V	yardımsız	7,5	-	474
15 inç V	yardımsız	10	-	501
15 inç V	yardımsız	12	-	480
15 inç V	75	5	15,0	490
15 inç V	75	7,5	10,0	506
15 inç V	75	10	7,5	509
15 inç V	75	12	6,3	513
17 inç CCS	yardımsız	5	-	482
17 inç CCS	yardımsız	7	-	513
17 inç CCS	yardımsız	9	-	518
17 inç CCS	75	5	15,0	489
17 inç CCS	75	7	10,7	484
17 inç CCS	75	9	8,3	482
17 inç CCS	90	7	12,9	512
17 inç CCS	90	9	10,0	506
17 inç CCS	90	12	7,5	497

4. DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ VE TARTIŞMA

Laboratuvar deneylerinden elde edilen kesme verileri, keski tipleri ve kesme teorileri göz önünde tutularak irdelenmiştir. İlk önce sabit kesit alanlı disk keskilerden (CCS) elde edilen kesme deneyi sonuçları kendi içinde karşılaştırılmış ve bu deneylerden elde edilen keski kuvvetleri Rostami ve Ozdemir (1993-1997) tarafından CCS tip diskler için geliştirilen kesme teorisinden elde edilen keski kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır [3,76]. Daha sonra, V tip kesit alanlı disk keskilerden elde edilen kesme deneyi sonuçları kendi içerisinde karşılaştırılmış ve bu deneylerden elde edilen keski kuvvetleri Roxborough tarafından V tip diskler için geliştirilen kesme teorisinden elde edilen keski kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır [5]. Tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinin (PLCM) performans tahmini için kullanılabilirlikleri üzerinde tartışılmıştır.

4.1 Keski Çapının Kesme Performansına Etkisi

Tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 13 inç (330 mm) ve 17 inç (432 mm) çaplarındaki sabit kesit alanlı disk keskilerle (CCS tip) yapılan kesme deneyleri sonucunda elde edilen keski kuvvetleri ve spesifik enerji değerlerinin disk çapıyla değişimi üzerinde incelemeler yapılmıştır. Ayrıca, taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) mini V tip (130 mm) disk keski ile yapılan kesme deneyleri, tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 15 inç (380 mm) V tip disk keski ile yapılan kesme deneyleri karşılaştırılmış ve V tip disk keski için disk çapının kesme performansına etkisi üzerinde durulmuştur.

4.1.1 Sabit kesit alanlı disk keskiler (CCS)

Disk keski çapının normal ve yuvarlanma kuvvetleri ile spesifik enerji üzerindeki etkisi ilk olarak Roxborough ve Philips (1975) tarafından Bunter kumtaşı numunesi üzerinde incelenmiş olup V tipli dik keski için irdelenmiştir. Yapılan bu çalışmada normal kuvvet disk çapı ile artarken yuvarlanma kuvveti ve spesifik enerjinin sabit kaldığı görülmüştür [5].

Bu bölümde, Kartal-Kadıköy ve Başakşehir-İkitelli metro inşasında kullanılan TBM’lerin geçtiği formasyonlardan getirilen arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri sabit kesin alanlı (CCS) 13 inç ve 17 inç disk keskinle tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) kesilmiştir. Kesme deneyleri sonucunda elde edilen normal kuvvet (FN), yuvarlanma kuvveti (FR) ve spesifik enerjinin (SE), disk çapı ile değişimi irdelenmiştir. Deneylerde kullanılan 13 inç CCS tip disk keskinin uç genişliği 1,2 cm’dir, 17 inç CCS tip disk keskinin uç genişliği ise 1,8 cm’dir. Disk keski çapının kesme performansına etkisinin net olarak anlaşılabilmesi için deney sonuçları üzerinde uç genişliği için normalizasyona gidilmiştir ve elde edilen deneysel sonuçlar her iki tip disk keski için 1 cm’ye indirgenerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

4.1.1.1 Arkoz numunesi için CCS tip disk keskinle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması

13 inç (330 mm) ve 17 inç (432 mm) CCS tip disk keskinle arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı ve yardımcı kesme deney sonuçları Bölüm 3.3.2.1’de verilmiştir. Arkoz numunesi için disk keski çapının kesme performansına etkisini inceleyebilmek için her bir keskinde uç genişliği normalizasyonu yapılmış ve uç genişliği 1 cm’ye indirgenerek disk çapının kesme performansına etkisi incelenmiştir. Arkoz numunesi için 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keskin için normalize edilmiş yardımcı kesme verileri Çizelge 4.1’de ve yardımcı kesme verileri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

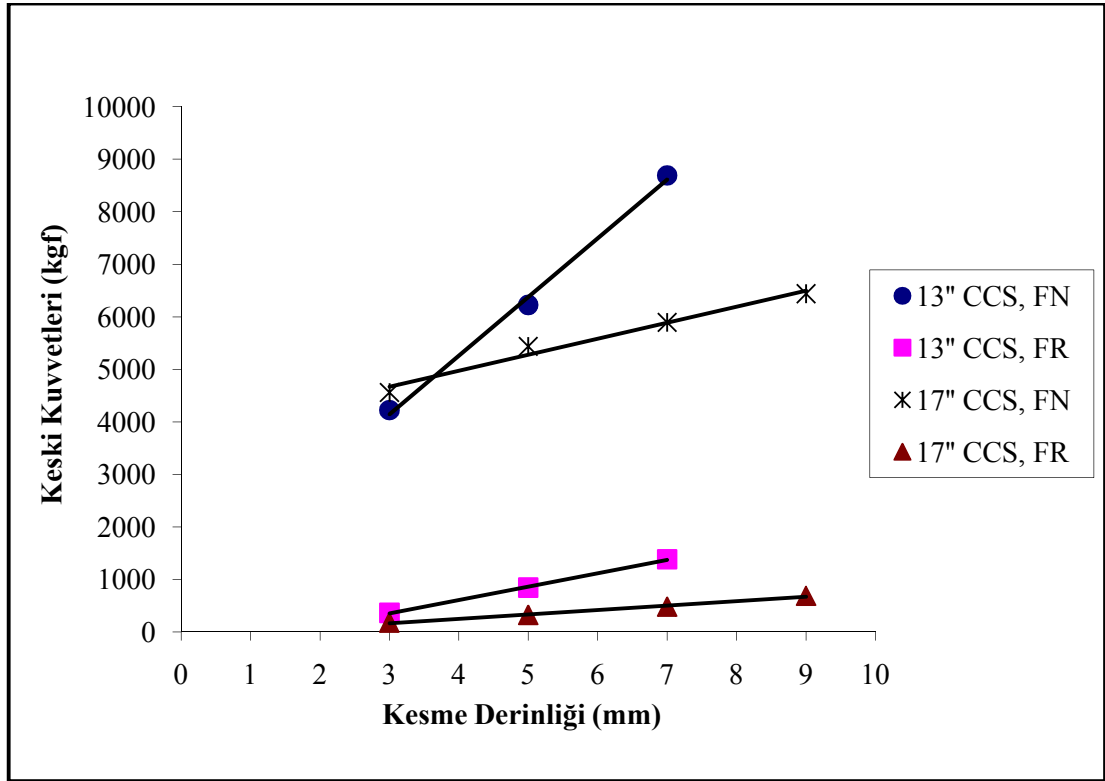
Çizelge 4.1: 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keskin için normalize edilmiş yardımcı kesme deneylerinin sonuçları (arkoz numunesi).

	d (mm)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m³)
13" CCS tip disk keski	3	4223,1	364,1	12,7
	5	6225,8	844,6	5,1
	7	8689,9	1383,2	4,8
17" CCS tip disk keski	3	4561,5	180,3	5,0
	5	5436,9	326,6	2,1
	7	5895,0	483,8	2,0
	9	6439,7	691,4	1,8

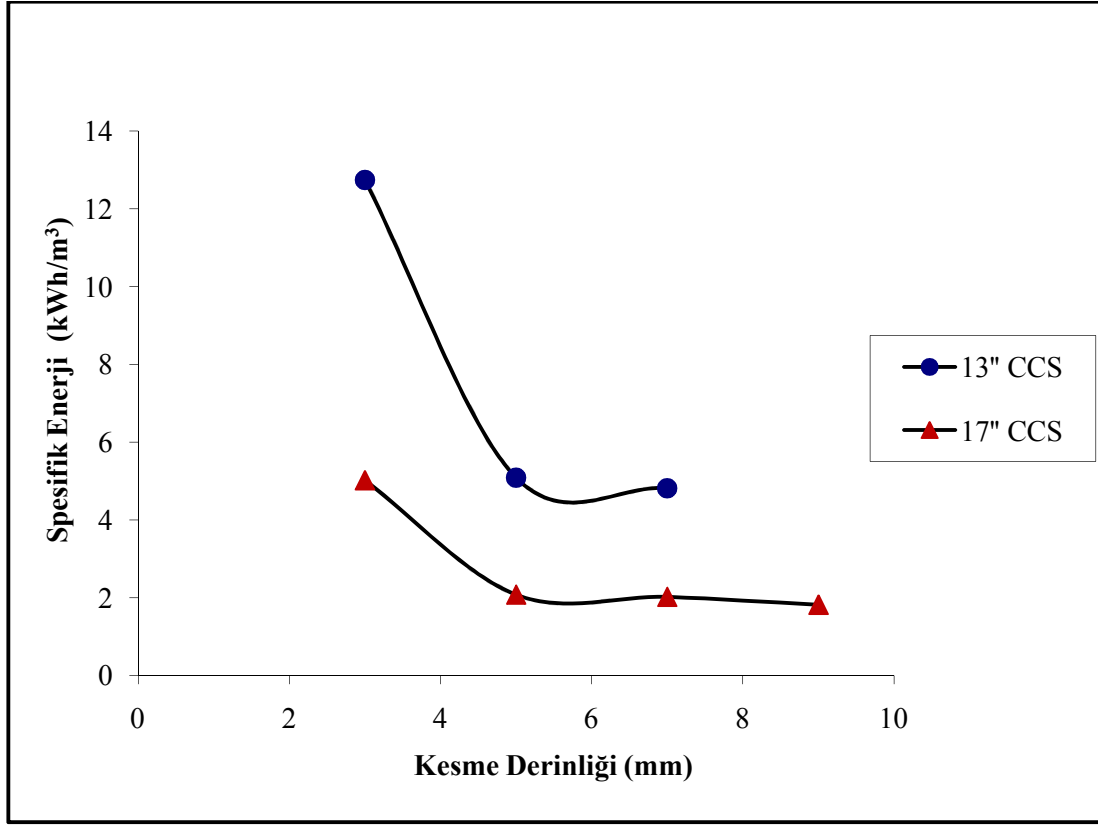
Çizelge 4.2: 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keskiler için normalize edilmiş yardımcı kesme deneylerinin sonuçları (arkoz numunesi).

	d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m³)
13" CCS	5	80	16,0	6159,0	734,1	4,7
tip disk keski	7	80	11,4	7505,5	1186,2	4,7
	3	80	26,7	2782,6	167,9	3,8
17" CCS	5	80	16,0	4738,3	310,0	2,1
tip disk keski	7	80	11,4	5091,2	470,0	1,9
	9	80	8,9	6194,8	622,0	2,3

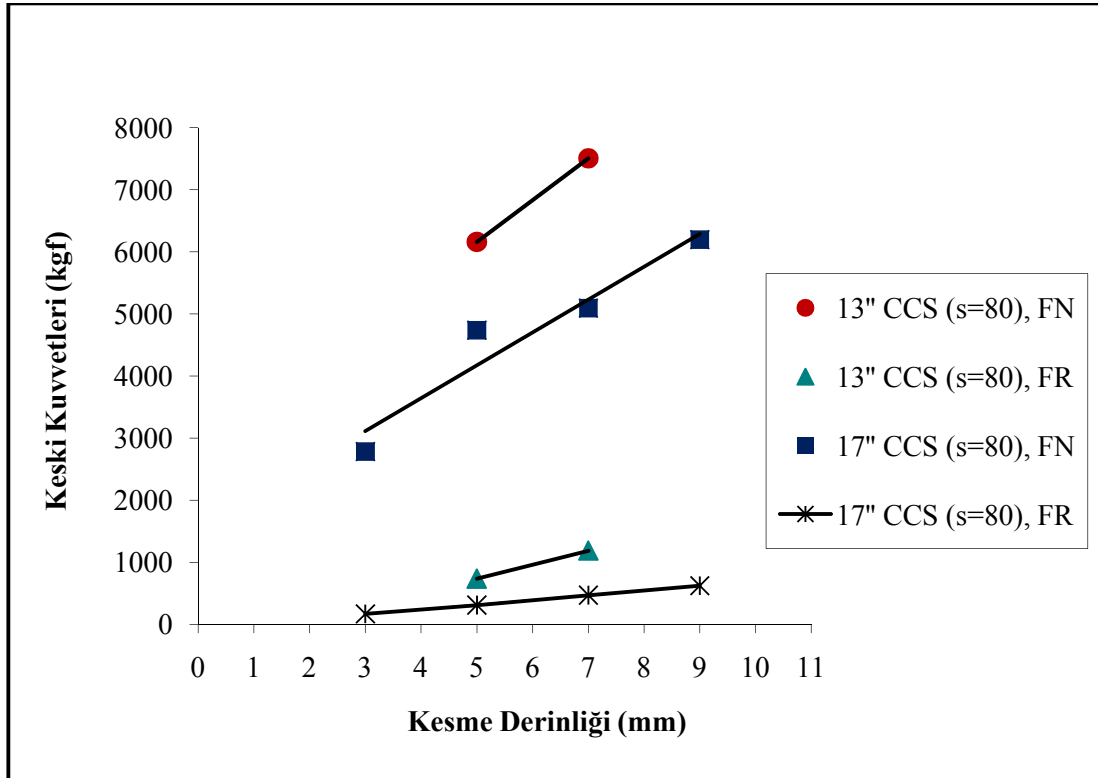
Şekil 4.1’de arkoz numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş normal keski kuvvetlerinin ilişkisi verilmiştir. Şekil 4.2’de arkoz numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş spesifik enerji karşılaştırması verilmiştir. Şekil 4.3’te arkoz numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetlerinin ilişkisi verilmiştir. Şekil 4.4’te arkoz numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği/keskiler arası mesafe oranı ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi verilmiştir.



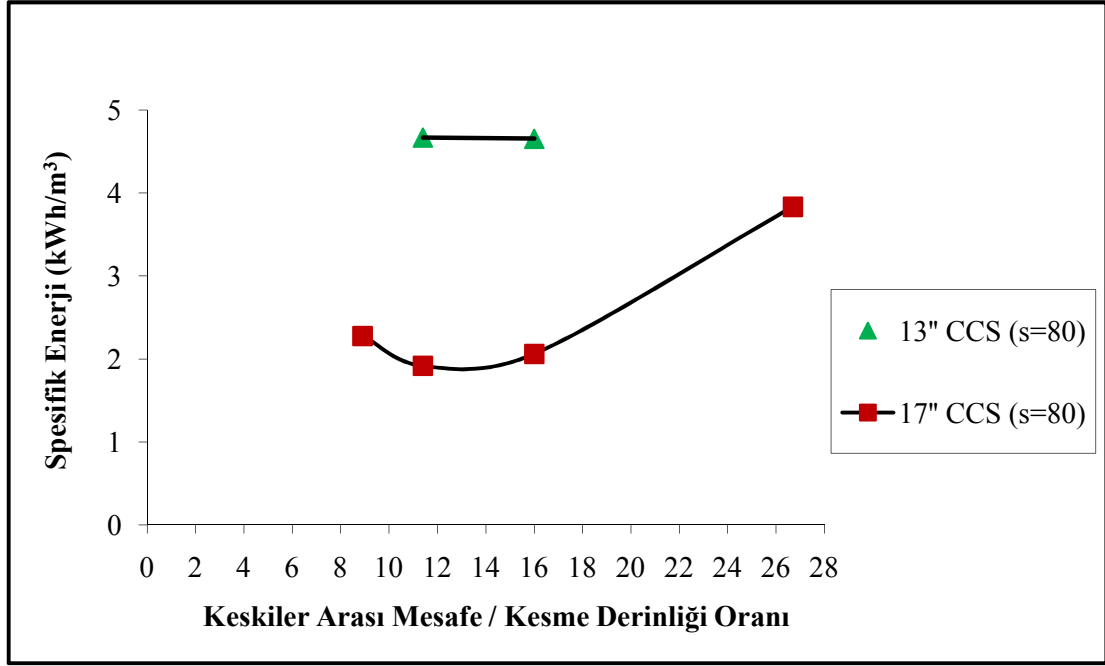
Şekil 4.1: Arkoz numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 4.2: Arkoz numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 4.3: Arkoz numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 4.4: Arkoz numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen optimum kesiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi.

4.1.1.2 Şeyl numunesi için CCS tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması

13 inç (330 mm) ve 17 inç (432 mm) CCS tip disk keskiler ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı ve yardımcı kesme deney sonuçları Bölüm 3.3.2.2’de verilmiştir. Şeyl numunesi için disk keski çapının kesme performansına etkisini inceleyebilmek için her bir kesimde uç genişliği normalizasyonu yapılmış ve uç genişliği 1 cm’ye indirgenerek disk çapının kesme performansına etkisi incelenmiştir. Şeyl numunesi için 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keskiler için normalize edilmiş yardımcı kesme verileri Çizelge 4.3’te ve yardımcı kesme verileri Çizelge 4.4’te verilmiştir.

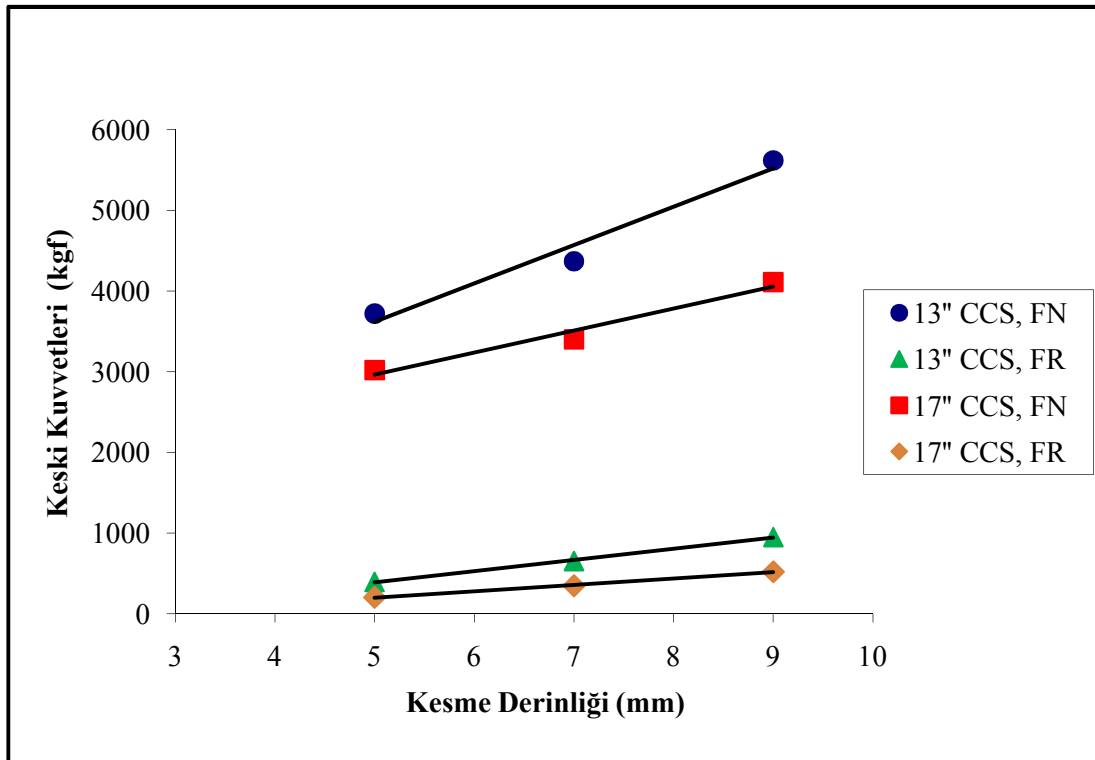
Çizelge 4.3: 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keskiler için normalize edilmiş yardımcı kesme deneylerinin sonuçları (şeyl numunesi).

	d (mm)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)
13" CCS tip disk keski	5	3719,2	393,7	5,5
	7	4368,0	652,3	4,2
	9	5617,7	949,0	2,7
17" CCS tip disk keski	5	3019,1	201,3	1,8
	7	3399,5	345,9	1,5
	9	4110,7	518,7	1,4

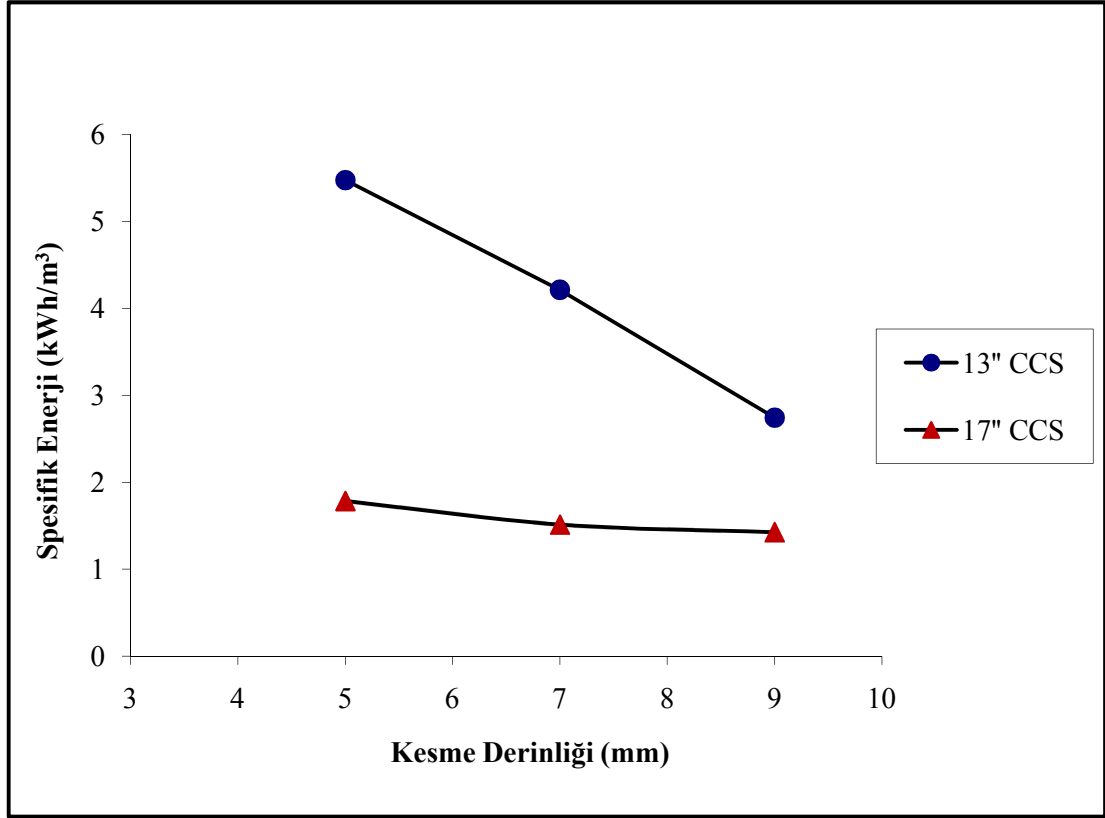
Çizelge 4.4: 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keski için normalize edilmiş yardımcı kesme deneylerinin sonuçları (şeyl numunesi).

	d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)
13" CCS	5	80	16,0	3537,6	422,3	3,0
tip disk keski	7	80	11,4	3847,4	536,7	2,6
	9	80	8,9	3890,0	649,2	2,4
17" CCS	5	80	16,0	2362,9	173,1	1,4
tip disk keski	7	80	11,4	3084,6	306,3	1,4
	9	80	8,9	3937,8	499,9	1,3

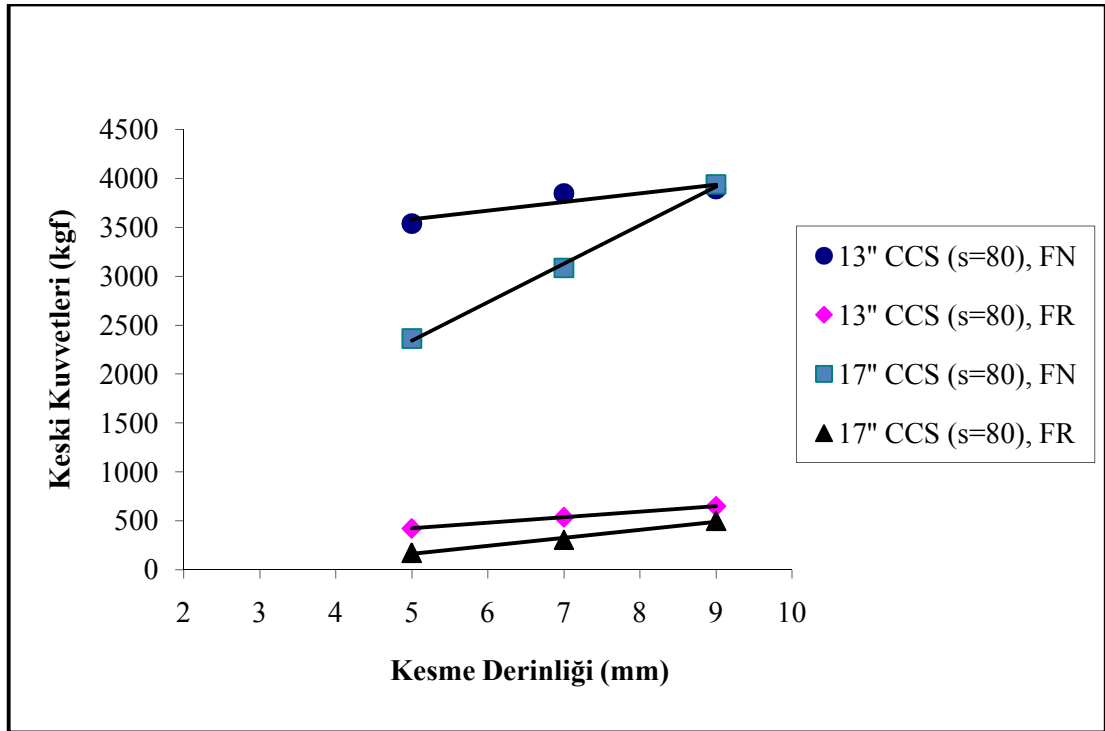
Şekil 4.5'te şeyl numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş normal keski kuvvetlerinin ilişkisi verilmiştir. Şekil 4.6'da şeyl numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi verilmiştir. Şekil 4.7'de şeyl numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetlerinin ilişkisi verilmiştir. Şekil 4.8'de şeyl numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği/keskiler arası mesafe oranı ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi verilmiştir.



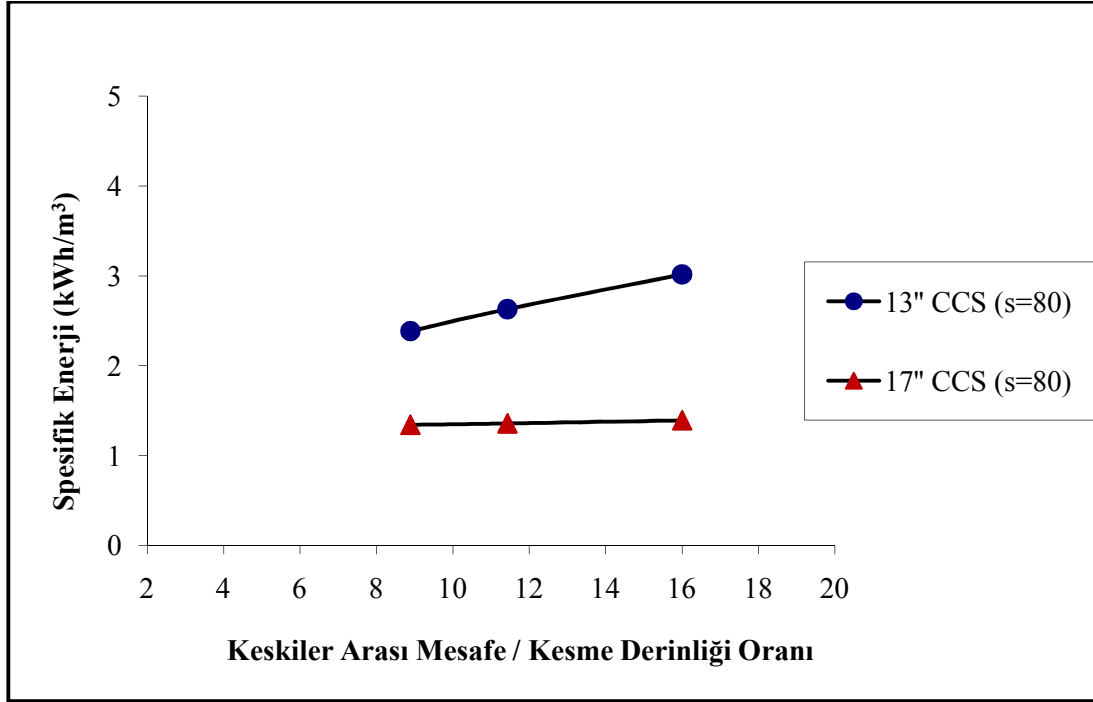
Şekil 4.5: Şeyl numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 4.6: Şeyl numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi.



Şekil 4.7: Şeyl numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 4.8: Şeyl numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen optimum keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi.

4.1.1.3 Fosilli kireçtaşı numunesi için CCS tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması

13 inç (330 mm) ve 17 inç (432 mm) CCS tip disk keskiler ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı ve yardımcı kesme deney sonuçları Bölüm 3.3.2.3'te verilmiştir. Fosilli kireçtaşı numunesi için disk keski çapının kesme performansına etkisini inceleyebilmek için her bir kesimde uç genişliği normalizasyonu yapılmış ve uç genişliği 1 cm'ye indirgenerek disk çapının kesme performansına etkisi incelenmiştir. Fosilli kireçtaşı numunesi için 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keskiler için normalize edilmiş yardımcı kesme verileri Çizelge 4.5'te ve yardımcı kesme verileri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

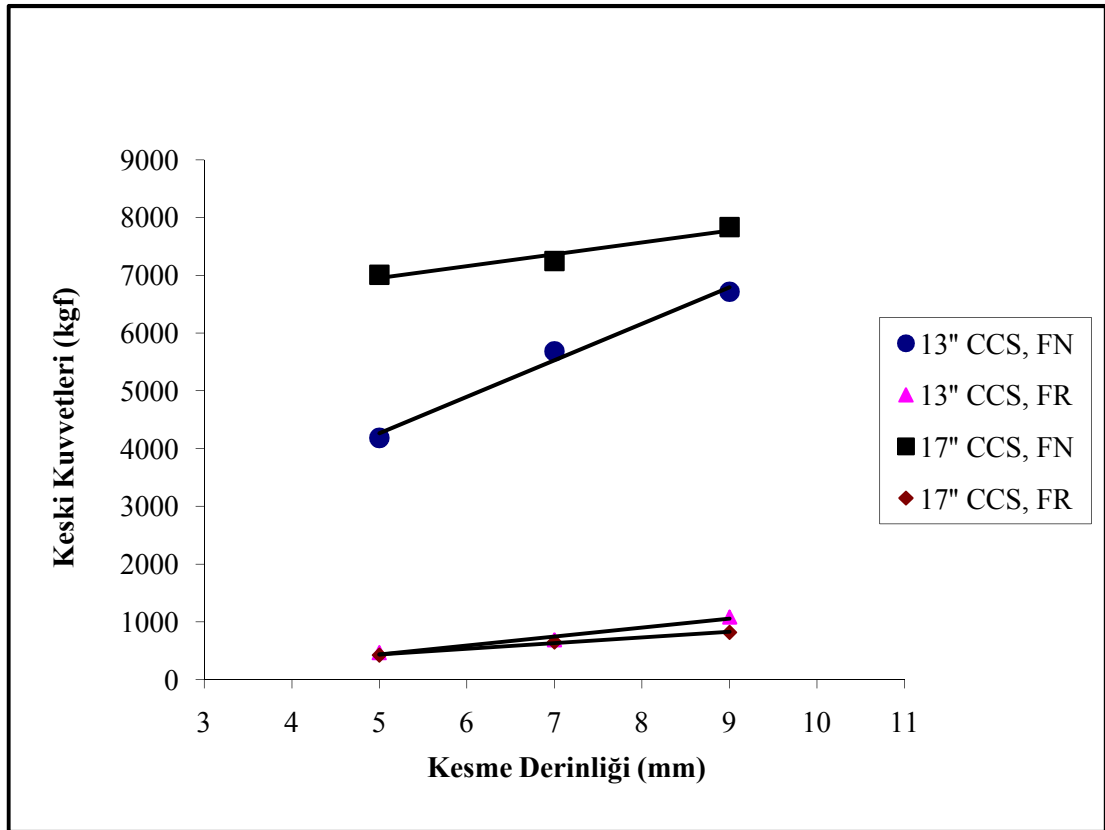
Çizelge 4.5: 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keskiler için normalize edilmiş yardımcı kesme deneylerinin sonuçları (fosilli kireçtaşı numunesi).

	d (mm)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)
13" CCS	5	4184,6	465,6	7,1
tip disk keski	7	5684,0	685,4	5,5
	9	6713,9	1084,6	5,7
17" CCS	5	7009,1	424,0	2,6
tip disk keski	7	7245,9	653,1	2,1
	9	7833,6	817,7	1,5

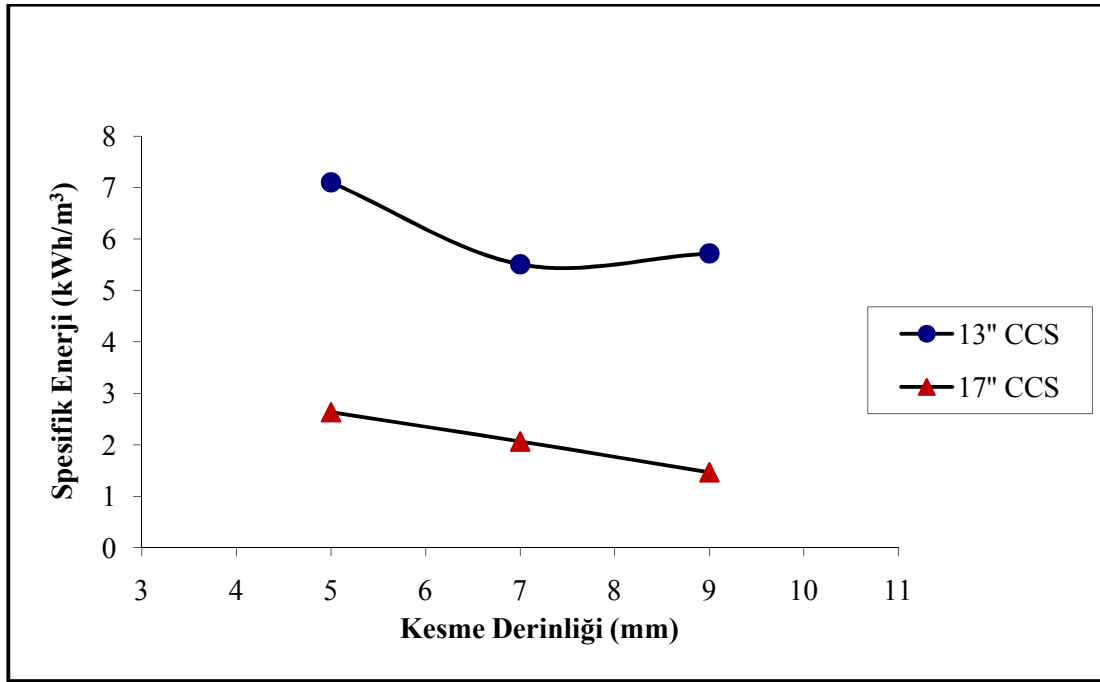
Çizelge 4.6: 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keskiler için normalize edilmiş yardımcı kesme deneylerinin sonuçları (fosilli kireçtaşı numunesi).

	d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m³)
13" CCS	5	75	15,0	4162,5	458,9	3,5
tip disk keski	7	75	10,7	5190,7	666,6	2,4
	9	75	8,3	5760,8	1029,6	2,8
17" CCS	5	75	15,0	3519,6	259,3	1,3
tip disk keski	7	75	10,7	4790,9	432,2	1,1
	9	75	8,3	6570,8	653,0	1,4

Şekil 4.9’da fosilli kireçtaşı numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetlerinin ilişkisi verilmiştir. Şekil 4.10’da fosilli kireçtaşı numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi verilmiştir.

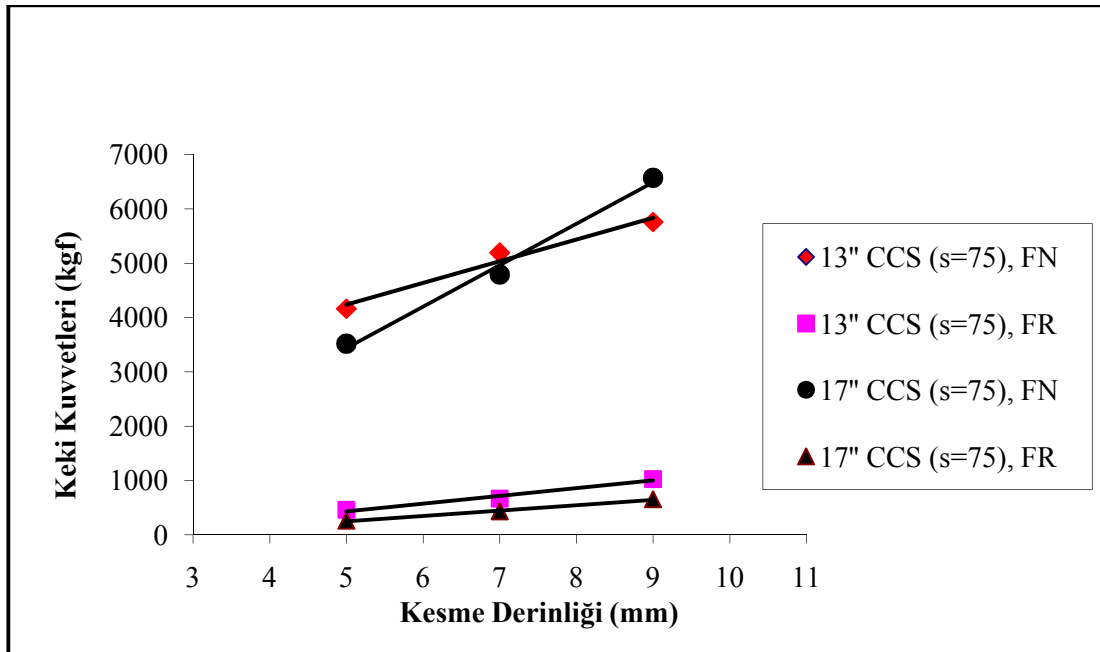


Şekil 4.9: Fosilli kireçtaşı numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi.

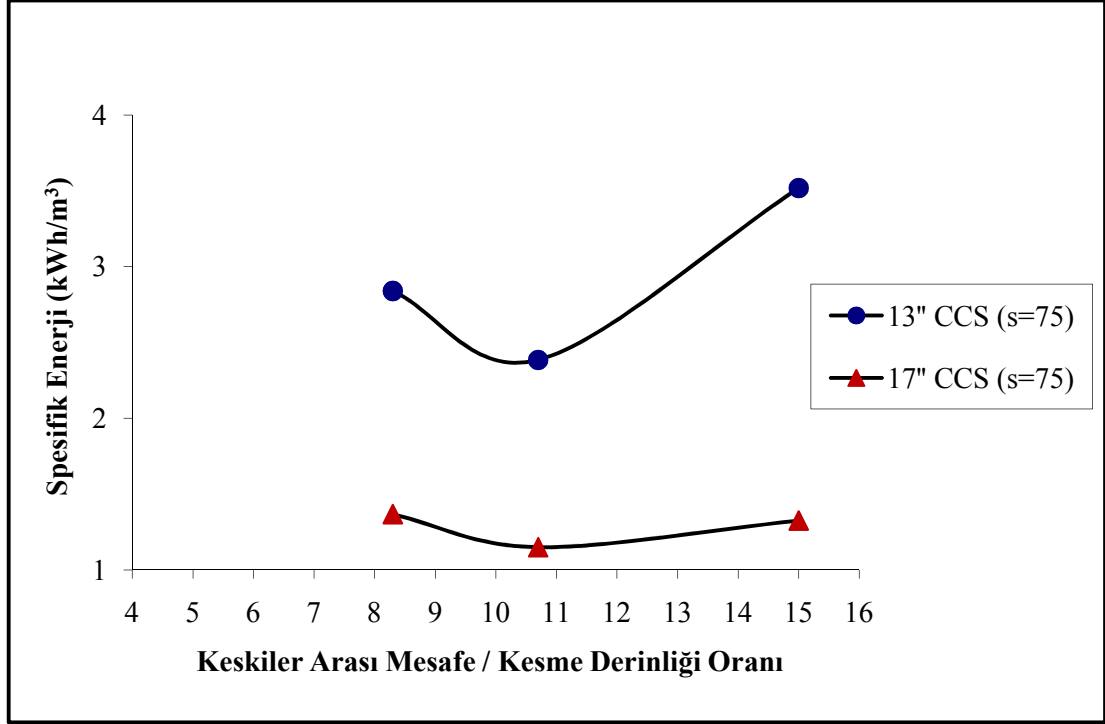


Şekil 4.10: Fosilli kireçtaşı numunesi için yardımsız kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi.

Şekil 4.11’de fosilli kireçtaşı numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetlerinin ilişkisi verilmiştir. Şekil 4.12’de fosilli kireçtaşı numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği/keskiler arası mesafe oranı ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.11: Fosilli kireçtaşı numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen kesme derinliği ile normalize edilmiş keski kuvvetleri ilişkisi.



Şekil 4.12: Fosilli kireçtaşı numunesi için yardımcı kesme deneylerinden elde edilen optimum keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı ile normalize edilmiş spesifik enerji ilişkisi.

4.1.1.4 CCS tip disk keski laboratuvar deneylerinin sonuçları

Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri üzerinde 13 inç ve 17 inç sabit kesit alanlı (CCS) disk keskiler ile kesme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, disk çapı değiştikçe keskiye gelen kuvvetlerin (normal ve yuvarlanma) ve spesifik enerji (SE) değerlerinin değiştiği gözlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan kayaçlardan; arkoz masif ve klastik yapıya, şeyl tabakalı yapıya ve fosilli kireçtaşı ise fosilli yapıya sahiptir. Disk keski çapı arttıkça keskiye gelen kuvvetlerin (normal ve yuvarlanma) ve spesifik enerji değerinin formasyonlara göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu incelemede Bilgin ve arkadaşlarının önerdiği aşağıdaki eşitliklerin (6.1, 6.2 ve 6.3) kullanılması öngörülmüştür [101].

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = k_1 \cdot \frac{FN_1}{FN_2} \quad (6.1)$$

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = k_2 \cdot \frac{FR_1}{FR_2} \quad (6.2)$$

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = k_3 \cdot \frac{SE_1}{SE_2} \quad (6.2)$$

Disk keski çapı ve keskiye gelen kuvvetler (FN, FR) ve spesifik enerji (SE) arasında bir geçişin yapılıp yapılamayacağı, eğer yapılabiliyorsa bir geçiş katsayısının (k_1 , k_2 , k_3) belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Deneylerde kullanılan numuneler birbirinden farklı özelliklere sahiptir, bunlar; masif ve klastik, tabakalı, fosillidir. Bu sebepten ötürü her formasyon türü için farklı bir geçiş katsayısı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu üç kayaç üzerinde sabit kesit alanlı (CCS) 13 inç ve 17 inç disk keskilerle farklı kesme derinliklerinde yardımsız kesme deneyleri yapılmıştır. Her bir kesme derinliği için minimum üç adet deney yapılmıştır. Aşağıdaki hesaplamalarda her kesme derinliği için elde edilen ortalama keski kuvveti değerleri kullanılmıştır. 13 inç ve 17 inç disk keskilerle yapılan kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar disk uç genişlikleri göz önüne alınarak normalize edilmiştir (Bölüm 4.1). Karşılaştırmalar normalize edilmiş sonuçlar üzerinden yapılmıştır. Masif ve klastik yapıya sahip arkoz numunesi için yukarıdaki eşitliklerin kullanılabilmesi için gerekli olan 13 inç'ten 17 inç'e geçiş katsayıları (k_1 , k_2 , k_3) Çizelge 4.7'de ki hesaplamalarla elde edilmiştir. Tabakalı yapıya sahip şeyl numunesi için yukarıdaki eşitliklerin kullanılabilmesi için gerekli olan 13 inç'ten 17 inç'e geçiş katsayıları (k_1 , k_2 , k_3) Çizelge 4.8'deki hesaplamalarla elde edilmiştir. Fosilli ve boşluklu yapıya sahip fosilli kireçtaşı numunesi için yukarıdaki eşitliklerin kullanılabilmesi için gerekli olan 13 inç'ten 17 inç'e geçiş katsayıları (k_1 , k_2 , k_3) Çizelge 4.9'daki hesaplamalarla elde edilmiştir.

Çizelge 4.7: Masif ve klastik (arkoz) formasyon için yardımsız kesme koşullarında geçiş katsayısı hesabı.

ARKOZ									
13 inç CCS disk				17 inç CCS disk			k_1 (FN)	k_2 (FN)	k_3 (SE)
d (mm)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)			
3	4223,1	364,1	12,7	4561,5	180,3	5,0	0,94	0,43	0,34
5	6225,8	844,6	5,1	5436,9	326,6	2,1	0,76	0,34	0,36
7	8689,9	1383,2	4,8	5895,0	483,8	2,0	0,59	0,31	0,37
Ortalama							0,77	0,36	0,36

Çizelge 4.8: Tabakalı (şeyl) formasyon için yardımsız kesme koşullarında geçiş katsayısı hesabı.

ŞEYL									
13 inç CCS disk				17 inç CCS disk					
d (mm)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)	k ₁ (FN)	k ₂ (FR)	k ₃ (SE)
5	3719,2	393,7	5,5	3019,1	201,3	1,8	0,71	0,45	0,28
7	4368,0	652,3	4,2	3399,5	345,9	1,5	0,68	0,46	0,31
9	5617,7	949,0	2,7	4110,7	518,7	1,4	0,64	0,48	0,45
Ortalama							0,68	0,46	0,35

Çizelge 4.9: Fosilli ve (fosilli kumlu kireçtaşı) formasyon için yardımsız kesme koşullarında geçiş katsayısı hesabı.

FOSİLLİ KİREÇTAŞI									
13 inç CCS disk				17 inç CCS disk					
d (mm)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)	k ₁ (FN)	k ₂ (FR)	k ₃ (SE)
5	4184,6	465,6	7,1	7009,1	424,0	2,6	1,46	0,80	0,32
7	5684,0	685,4	5,5	7245,9	653,1	2,1	1,11	0,83	0,33
9	6713,9	1084,6	5,7	7833,6	817,7	1,5	1,02	0,66	0,22
Ortalama							1,20	0,76	0,29

Yapılan araştırmaların sonucu olarak; 13 inç CCS tip disk keskiden 17 inç CCS tip disk keskiye geçiş için kullanılabilecek ilişkiler 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9’da ki eşitliklerle verilmiştir.

Masif ve klastik formasyon için (Arkoz)

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 0,77x \frac{FN_1}{FN_2} \quad (6.4)$$

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 0,36x \frac{FR_1}{FR_2} \quad (6.5)$$

Tabakalı formasyon için (Şeyl)

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 0,68x \frac{FN_1}{FN_2} \quad (6.6)$$

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 0,46x \frac{FR_1}{FR_2} \quad (6.7)$$

Fosilli formasyon için (Fosilli kireçtaşı)

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 1,20x \frac{FN_1}{FN_2} \quad (6.8)$$

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 0,76x \frac{FR_1}{FR_2} \quad (6.9)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde disk keski çapından keski kuvvetlerine geçiş için ortalama değerler kullanılmıştır. Arkoz ve fosilli kireçtaşı için kesme derinliği arttıkça normal ve yuvarlanma kuvvetleri için geçiş katsayıların azaldığı görülmektedir. Disk çapından keski kuvvetine geçişte daha kesin sonuçlar elde edebilmek için her kesme derinliğine ait geçiş kat sayıları ayrı ayrı kullanılabilir. Şeyl numunesi tabakalanmaya paralel olarak kesildiğinden keski kuvveti geçiş kat sayılarının kesme derinliğine göre çok fazla değişmediği gözlemlenmiştir.

Disk keski çapı ile spesifik enerji değerleri arasında numune tipine bağlı olarak 13 inç'ten 17 inç'e geçiş katsayısında (k_3) çok fazla değişimin olmadığı gözlenmiştir. Geçiş katsayısı olarak kullanılacak olan k_3 katsayısının 0,30 ile 0,35 arasında bir değer olarak kullanılabileceği öngörülmüştür. Keski çapı ile spesifik enerji arasındaki ilişki eşitlik 6.10 ile hesaplanabilir.

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = (0,30 \sim 0,35)x \frac{SE_1}{SE_2} \quad (6.10)$$

4.1.2 V tip disk keskiler

Bu bölümde; arkoz, fosilli kireçtaşı ve şeyl numuneleri ilk önce tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 15 inç (380 mm) V tip disk keskiyle, daha sonra taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) mini V tip (130 mm) disk keski ile kesilmiştir. PLCM'de mini V tip disk ile $d=5$ mm yardımsız kesme deney sonuçları, LCM'de 15 inç V tip disk ile elde edilen kesme deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Buradan yola çıkarak, V tip keskiler için, PLCM'den LCM'e bir geçiş yapıp yapılamayacağı üzerinde durulmuştur.

4.1.2.1 Arkoz numunesi için V tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması

Arkoz numunesi üzerinde, tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 15 inç (380 mm) V tip disk keski ile yardımcı ve yardımsız kesme deneyleri, taşınabilir kazı setinde (PLCM) ise mini V tip (130 mm) disk keski ile yardımsız kesme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin detayları Bölüm 3.3.2'de verilmiştir. Mini V tip (130 mm) disk keski ile 15 inç V tip (380 mm) disk keskilerin karşılaştırmasını

yapabilmek için keski uç genişlikleri normalize edilmiştir. Mini V tip disk keskinin uç genişliği 1 mm'dir; 15 inç V tip disk keskinin uç genişliği ise 1,4 mm'dir. Laboratuarda elde edilen kesme deney sonuçları 1 mm uç genişliği için normalize edilmiştir. Çizelge 4.10-12'de arkoz numunesi üzerinde V tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin normalize edilmiş sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4.10: 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımsız kesme deneyleri.

d (mm)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m³)
3	2165,7	230,4	7,2
5	3630,0	340,6	5,6
7	6502,5	734,6	5,2

Çizelge 4.11: 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m³)
3	40	13,3	2097,0	195,9	4,4
5	40	8,0	3069,3	287,4	3,9
7	40	5,7	4384,2	525,9	5,1
9	40	4,4	6701,2	678,9	5,1

Çizelge 4.12: Mini V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri.

d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
5,1	2522,0	3215,1	470,5	690,2	42,8
4,8	2401,0	2964,3	451,2	670,5	50,1
5,0	2368,9	3241,4	476,4	674,5	43,3
ort (d=5)	2446,9	3161,3	469,2	682,9	45,7

Arkoz numunesi için; 5 mm kesme derinliğinde, tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 15 inç V tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneyi ile taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) mini V tip disk keski ile yapılan kesme deneyi karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar şu şekildedir: Mini V tip disk keskiye gelen normal kuvvetler % 32 azalmış ve yuvarlanma kuvvetleri % 38 artmıştır, buna karşılık spesifik enerji 8,2 kat artmıştır. 15 inç V tip disk keski ile yapılan yardımcı kesme deneylerinden elde edilen optimum spesifik enerji değerinin mini V tip disk keski ile elde edilen indeks spesifik enerji değeri arasında da 12 kat fark olduğu saptanmıştır.

4.1.2.2 Şeyl numunesi için V tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması

Şeyl numunesi üzerinde, tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 15 inç (380 mm) V tip keski ile yardımcı ve yardımcı kesme deneyleri, taşınabilir kazı setinde (PLCM) ise mini V tip (130 mm) keski ile yardımcı kesme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin detayları Bölüm 3.3.2’de verilmiştir. Mini V tip disk keskinin uç genişliği 1 mm’dir; 15 inç V tip disk keskinin uç genişliği ise 1,4 mm’dir. Laboratuarda elde edilen kesme deney sonuçları 1 mm uç genişliği için normalize edilmiştir. Çizelge 4.13-15’te şeyl numunesi üzerinde V tip disk keskilerle yapılan kesme deneylerinin normalize edilmiş sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4.13: 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m³)
5	2206,3	286,5	2,9
7	2777,3	345,9	2,7
9	4146,9	589,0	2,2

Çizelge 4.14: 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m³)
7	80	11,4	2522,9	318,5	1,8
9	80	8,9	3300,9	482,7	1,5
12	80	6,7	3954,8	688,4	1,7

Çizelge 4.15: Mini V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
6,1	1576,2	2339,8	336,2	833,1	22,2
4,7	1101,5	1734,0	308,4	673,9	28,1
5,1	1491,1	2182,0	516,8	1002,6	28,2
ort (d=5)	1310,9	1967,2	365,2	789,2	24,7

Şeyl numunesi için; 5 mm kesme derinliğinde, tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 15 inç V tip disk keski ile yapılan yardımcı kesme deneyi ile taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) mini V tip disk keski ile yapılan kesme deneyi karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar şu şekildedir: Mini V tip disk keskiye gelen normal kuvvetler % 40 azalmış ve yuvarlanma kuvvetleri % 27 artmıştır, buna

karşılık spesifik enerji 8,5 kat artmıştır. 15 inç V tip disk keski ile yapılan yardımcı kesme deneylerinden elde edilen optimum spesifik enerji değerinin mini V tip disk keski ile elde edilen indeks spesifik enerji değeri arasında da 16 kat fark olduğu saptanmıştır.

4.1.2.3 Fosilli kireçtaşı numunesi için V tip disk keskiyle yapılan kesme deneylerinin karşılaştırılması

Fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde, tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 15 inç (380 mm) V tip disk keski ile yardımcı ve yardımcı kesme deneyleri, taşınabilir kazı setinde (PLCM) ise mini V tip (130 mm) disk keski ile yardımcı kesme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin detayları Bölüm 3.3.2’de verilmiştir. Laboratuarda elde edilen kesme deney sonuçları 1 mm uç genişliği için normalize edilmiştir. Çizelge 4.16-18’de fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde V tip disk keskiyle yapılan kesme deneylerinin normalize edilmiş sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4.16: 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)
5	5182,9	414,3	3,7
7,5	7342,6	692,0	3,5
10	9038,7	1233,6	4,1
12	7544,9	898,6	3,1

Çizelge 4.17: 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan normalize edilmiş yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)
5	75	15,0	3719,7	325,0	3,0
7,5	75	10,0	5304,0	552,7	2,8
10	75	7,5	6954,7	882,5	2,7
12	75	6,3	7030,8	874,7	2,5
15	75	5,0	5444,7	828,0	2,6

Çizelge 4.18: Mini V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m ³)
5,0	3367,0	4485,2	556,0	969,2	43,3
4,9	2850,1	3692,8	634,0	1066,4	47,0
5,1	2071,5	2795,7	466,4	705,5	38,6
ort (d=5)	2762,9	3657,9	552,1	913,7	43,0

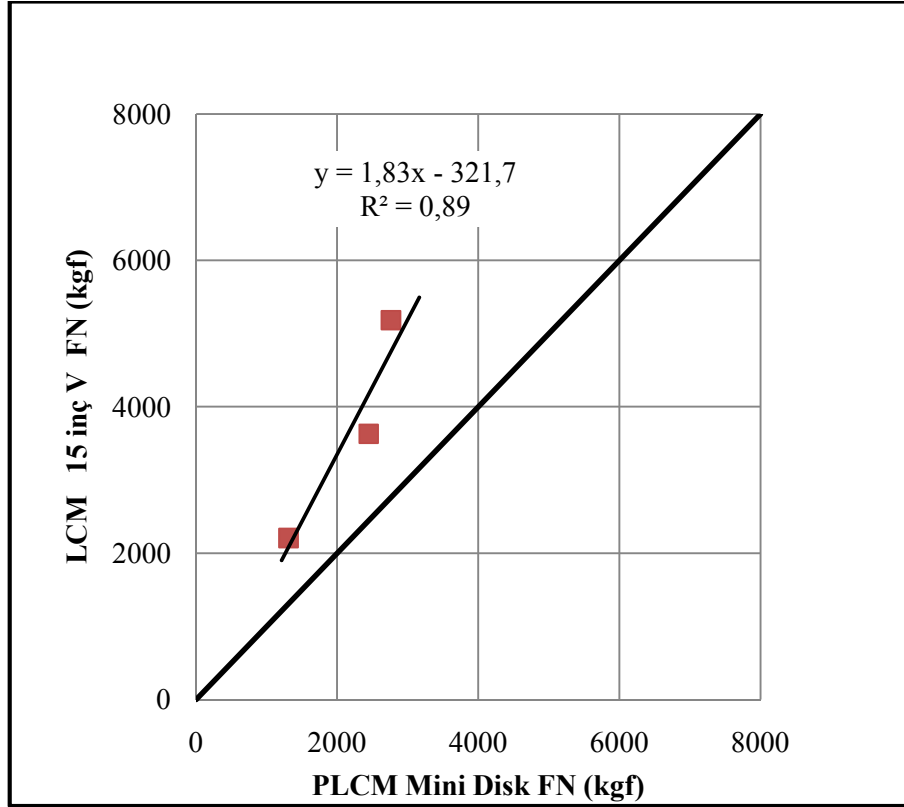
Fosilli kireçtaşı numunesi için; 5 mm kesme derinliğinde, tam boyutlu doğrusal kazı setinde 15 inç V tip disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneyi ile taşınabilir doğrusal kazı setinde mini V tip disk keski ile yapılan kesme deneyi karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar şu şekildedir: Mini V tip disk keskiye gelen normal kuvvetler % 45 azalmış ve yuvarlanma kuvvetleri % 33 artmıştır, buna karşılık spesifik enerji 12 kat artmıştır. 15 inç V tip disk keski ile yapılan yardımcı kesme deneylerinden elde edilen optimum spesifik enerji değerinin mini V tip disk keski ile elde edilen indeks spesifik enerji değeri arasında da 17 kat fark olduğu saptanmıştır.

4.1.2.4 V tip disk keski için kesme deneylerinin sonuçları

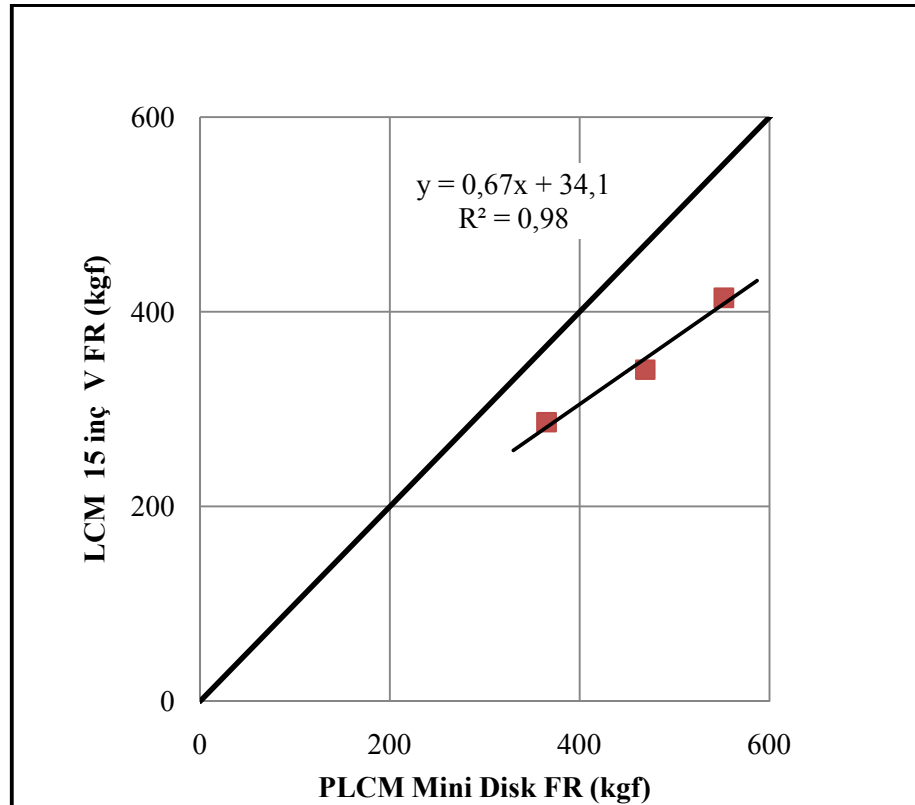
Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri üzerinde yapılan kesme deneylerinin normalize edilmiş sonuçları grafiksel olarak irdelenmiştir. Buradaki amaç; mini V tip disk keski kullanılarak PLCM’de yapılan kesme deneylerinden, 15 inç V disk kullanılarak LCM’de yapılan kesme deneylerine geçiş yapılıp yapılamayacağıdır. Kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar 5 mm kesme derinliği esas alınarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar ilk önce, 15 inç V tip (380 mm) disk keski ile mini V tip (130 mm) disk keski arasında yardımsız kesme sonuçlarına göre yapılmıştır. LCM’de 15 inç V tip disk keski ile PLCM’de mini V tip (130 mm) disk keski ile yapılan karşılaştırmaların özet tablosu Çizelge 4.19’da ve buna bağlı olarak elde edilen FN, FR ve SE ilişkileri Şekil 4.13-15’te verilmiştir.

Çizelge 4.19: Yardımsız d=5 mm için LCM ve PLCM, V disk karşılaştırmaları özet tablosu.

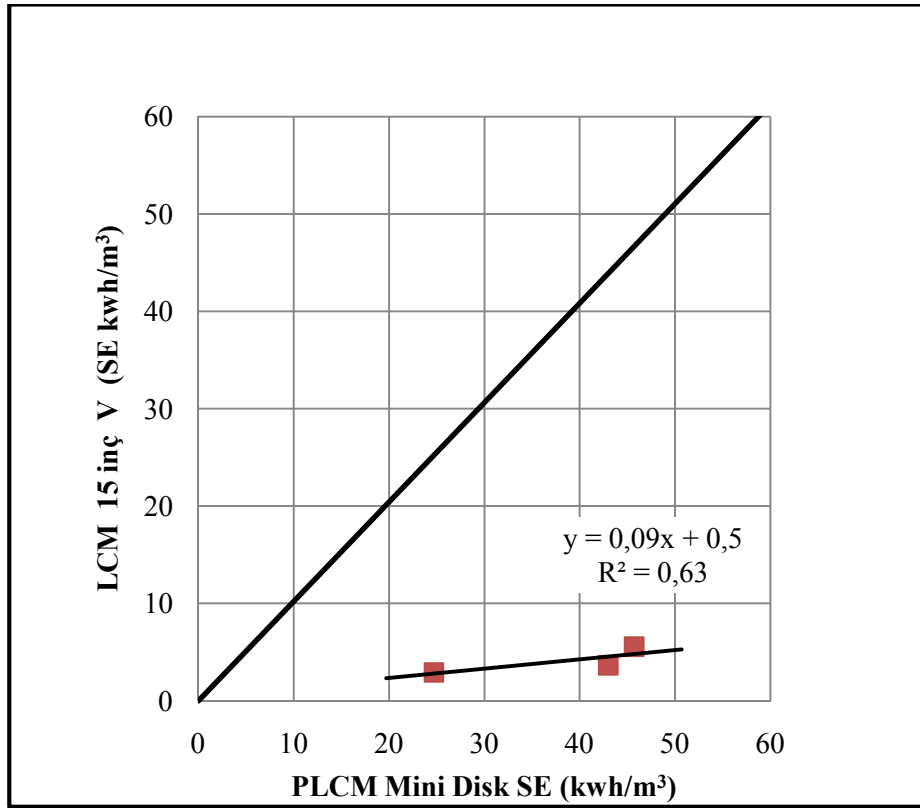
	PLCM (Mini V disk)			LCM (15" V disk)		
	FN (kgf)	FR (kgf)	SE(kWh/m ³)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)
Arkoz	2446,9	469,2	45,7	3630,0	340,6	5,6
Şeyl	1310,9	365,2	24,7	2206,3	286,5	2,9
Kireçtaşı	2762,9	552,1	43,0	5182,9	414,3	3,7



Şekil 4.13: 15 inç V tip disk keski ile mini V tip disk keski, normal kuvvet (FN) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme).



Şekil 4.14: 15 inç V tip disk keski ile mini V tip disk keski, yuvarlanma kuvveti (FR) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme).

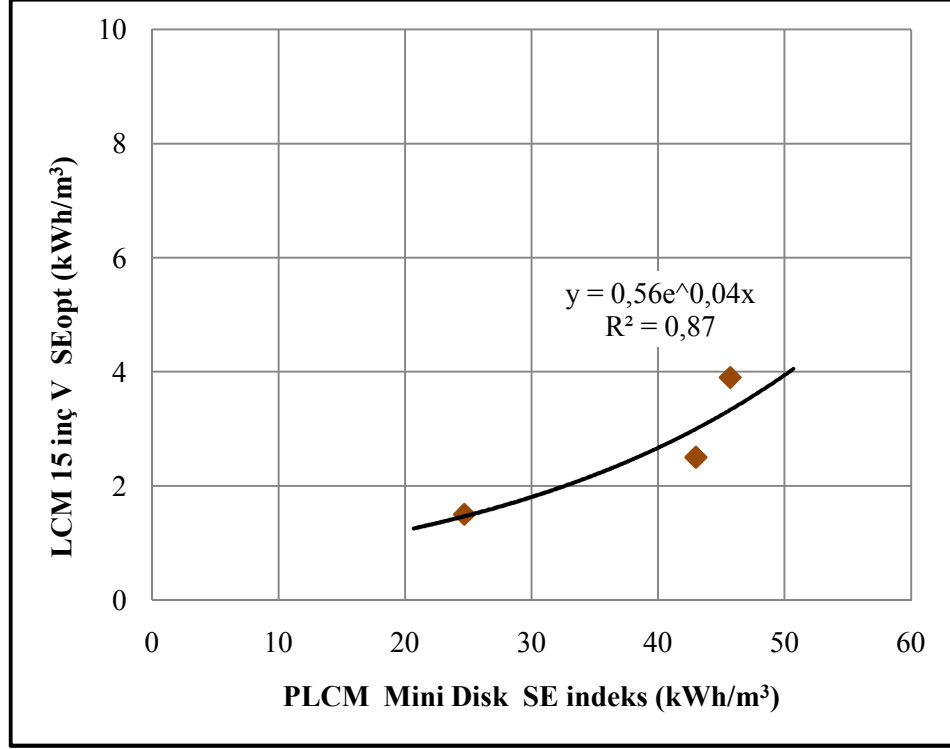


Şekil 4.15: 15 inç V tip disk keski ile mini V tip disk keski, spesifik enerji (SE) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme).

Daha sonra, 15 inç V disk ile LCM’de yardımcı kesme deneyinden elde edilen optimum spesifik enerji ile mini V diskten elde edilen d=5 mm indeks spesifik enerji arasında karşılaştırma yapılmıştır. Deneylerden elde edilen özet sonuçlar Çizelge 4.20’de ve Şekil 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.20: PLCM’de mini V tip disk keski ile d=5 mm’de elde edilen indeks SE’nin LCM’de 15 inç V tip disk keski ile elde edilen optimum SE ile karşılaştırılması.

Numune adı	Mini LCM Mini V tip disk	LCM 15 inç V tip disk
	SE indeks (kWh/m ³)	SE opt (kWh/m ³)
Arkoz	45,7	3,9
Şeyl	24,7	1,5
Fosilli K.T.	43,0	2,5



Şekil 4.16: Üç kayaç numunesi için PLCM d=5 mm SE indeks ile LCM 15 inç V tip disk keski SE opt arasındaki ilişki.

Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri üzerinde LCM ve PLCM’de yapılan d=5 mm yardımsız kesme deney sonuçlarına göre; her üç örnek numune üzerinde de mini V tip diske gelen normal kuvvetler ortalama %30-45 oranında azalmış, yuvarlanma kuvvetleri ise ortalama %30-40 oranında artmıştır. Buna karşılık spesifik enerji değeri yaklaşık 8-12 kat artmıştır. LCM’de deney yapmak zor ve uzmanlık gerektirdiğinden, PLCM’de mini V disk keski ile d=5 mm indeks kesme derinliğinden LCM kesme değerlerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Üç farklı kayaç numunesinin değerleri Şekil 4.13-14 ve 15’te görüldüğü üzere aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir. Bu eşitlikler kullanılarak V tip keski için PLCM’den LCM değerlerine geçiş yapılabilceği öngörülmüştür.

$$FN_{LCM} = 1,83.FN_{PLCM} - 321,7 \quad R^2=0,89 \quad (6.11)$$

$$FR_{LCM} = 0,67.FR_{PLCM} + 34,1 \quad R^2=0,98 \quad (6.12)$$

$$SE_{LCM} = 0,09.SE_{PLCM} + 0,5 \quad R^2=0,63$$

(6.13)

Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri üzerinde LCM’de 15 inç V tip disk ile yapılan yardımcı kesme deneylerinde elde edilen optimum spesifik enerji ile bu üç

kayaç üzerinde PLCM’de mini V tip disk keskidenden d=5 mm kesme derinliğinde elde edilen indeks spesifik enerji değeri arasında da her üç kayaç içinde yaklaşık 15 kat artış gözlenmiştir. PLCM’de d=5 mm indeks kesme derinliğinde elde edilen indeks spesifik enerji (SE_{indeks}) değerinden, LCM’de yardımcı kesme deneyleri sonucunda elde edilen spesifik enerji optimum (SE_{opt}) değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, Şekil 4.16 ile yapılan analiz sonucunda aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir.

$$SE_{\text{opt}(LCM)} = 0,56.e^{0,04.SE_{\text{indeks}(PLCM)}} \quad R^2=0,87 \quad (6.14)$$

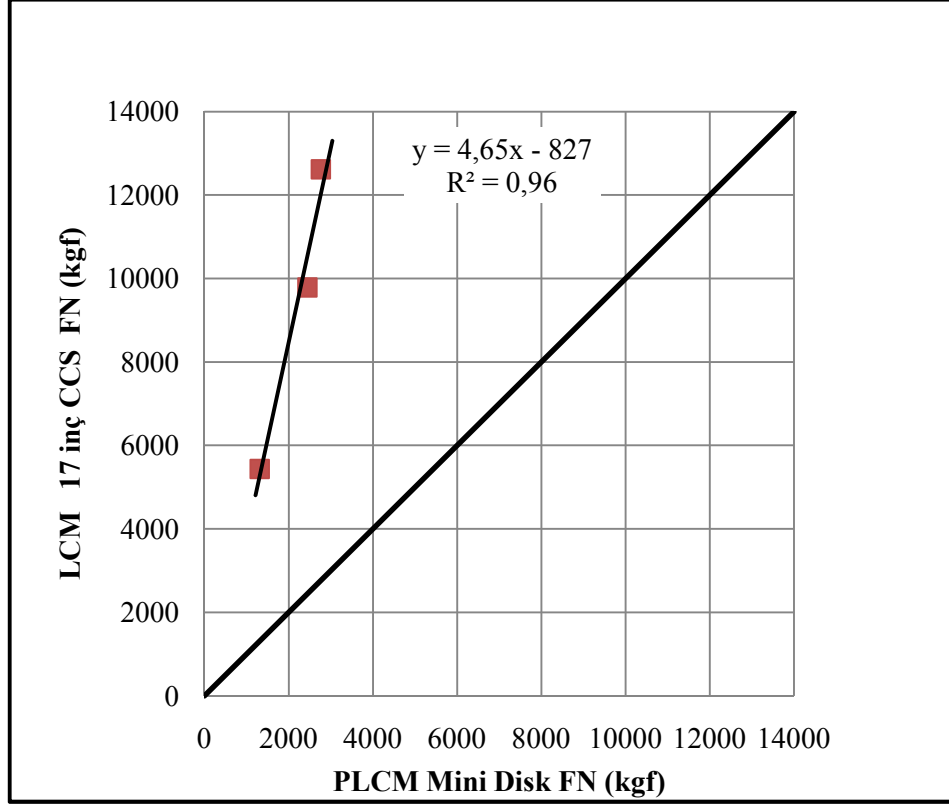
Farklı V tip disk keskilere geçiş yapılabilmesi için buradan elde edilen 15 inç V disk sonuçları (FN, FR, SE), Roxborough tarafından geliştirilen disk çapı-FT, FR, SE grafiklerinde kullanılabilir [5]. Böylelikle laboratuarda PLCM’de mini V disk keski ile yapılan kesme deney sonucunda farklı çaplardaki V disk değerlerine geçiş sağlanabilir. V tip keskiler için, verilen eşitliklerin doğruluğunu arttırabilmek için daha fazla numune üzerinde kesme deneylerinin yapılması gerekmektedir.

4.1.3 Mini V tip disk keskidenden CCS tip disk keskiye geçiş

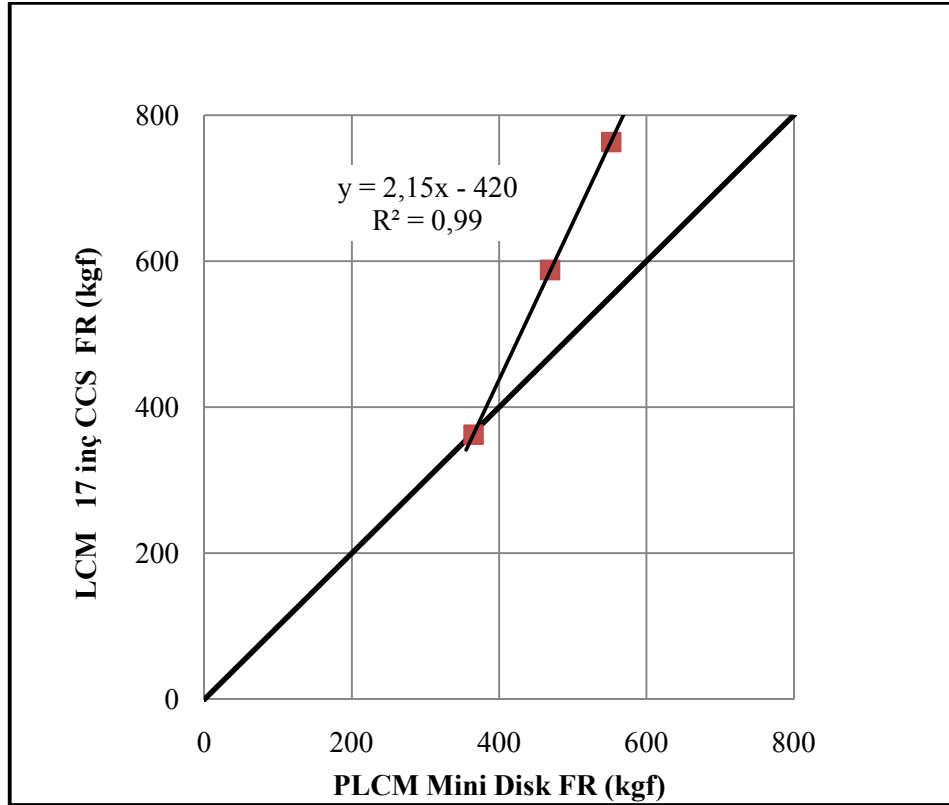
Günümüzde tam cepheli tünel açma makinelerinde sıklıkla 17 inç sabit kesit alanlı (CCS) disk keskiler kullanılmaktadır. Yapılan laboratuvar çalışmalarında arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı hem LCM’de 17 inç CCS disk keski ile kesilmiş hem de PLCM’de mini V disk keski ile kesilmiştir ve kesme deney sonuçlarının arasında bir ilişki olup olmadığına dair karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar 17 inç CCS tip disk ile mini V tip (130 mm) disk keski arasında yardımcı kesme sonuçlarına göre yapılmıştır. Karşılaştırmalar kesme derinliği d=5mm’de gerçekleştirilen yardımcı kesme sonuçlarıyla yapılmıştır. LCM’de 17 inç CCS (432 mm) disk keski ile PLCM’de mini V tip (130 mm) disk keski ile yapılan karşılaştırmaların özet tablosu Çizelge 4.21’de ve buna bağlı olarak elde edilen FN, FR ve SE ilişkileri Şekil 4.17-19’da verilmiştir.

Çizelge 4.21: Yardımsız d=5 mm için LCM 17 inç CCS ve PLCM mini V disk karşılaştırmaları özet tablosu.

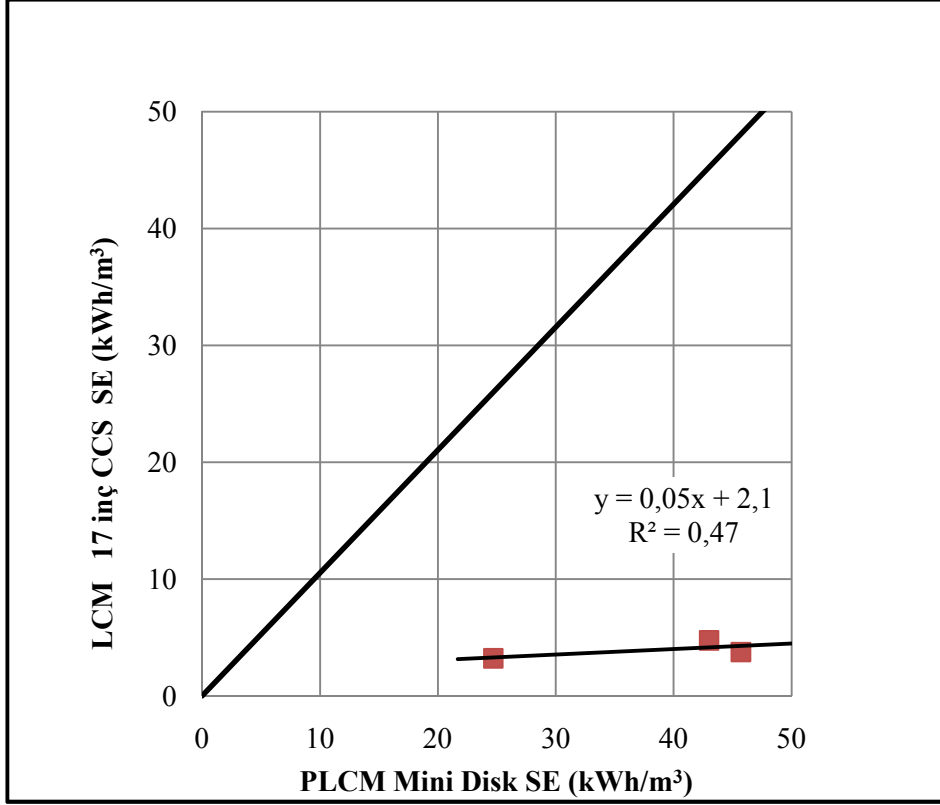
	Mini LCM (Mini V disk)			LCM (17 inç CCS disk)		
	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)
Arkoz	2446,9	469,2	45,7	9786,38	587,93	3,74
Şeyl	1310,9	365,2	24,7	5434,33	362,39	3,21
Kireçtaşı	2762,9	552,1	43,0	12616,39	763,14	4,74



Şekil 4.17: Mini V tip disk keski ile 17 inç CCS disk keski, normal kuvvet (FN) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme).



Şekil 4.18: Mini V tip disk keski ile 17 inç CCS disk keski, yuvarlanma kuvveti (FR) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme).



Şekil 4.19: Mini V tip disk keski ile 17 inç CCS disk keski, spesifik enerji (SE) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme).

Yapılan incelemeler sonucunda yuvarlanma (FR) ve normal (FN) kuvvetler için PLCM'den LCM'e bir geçiş yapılabileceği görülmektedir. Fakat aynı durum spesifik enerji değerleri için söylenememektedir. PLCM'de mini V disk keski kullanılarak yapılan bir kesme deneyi sonucunda, 17 inç CCS disk keski için gerekli olan kesme kuvvetlerinin (FN, FR) ön görülebileceği düşünülmektedir. Eğer tam cepheli tünel açma makinesinde 17 inç CCS disk keski kullanılıyorsa, LCM kesme deneyleri yapmadan bu keskiye gelecek kuvvetler PLCM'de çok kısa sürede önceden tahmin edilebilir. Bu tahmin için gerekli olan denklemler eşitlik 6.15 ve 6.16'da verilmiştir. Bu deneylerin güvenilirliğinin artırılabilmesi için farklı formasyon tiplerinde de deneyler yapılarak veri tabanının geliştirilmesi gerekmektedir.

$$FN_{LCM} = 4,65.FN_{MLCM} - 827 \quad R^2=0,96 \quad (6.15)$$

$$FR_{LCM} = 2,15.FR_{MLCM} - 420 \quad R^2=0,99 \quad (6.16)$$

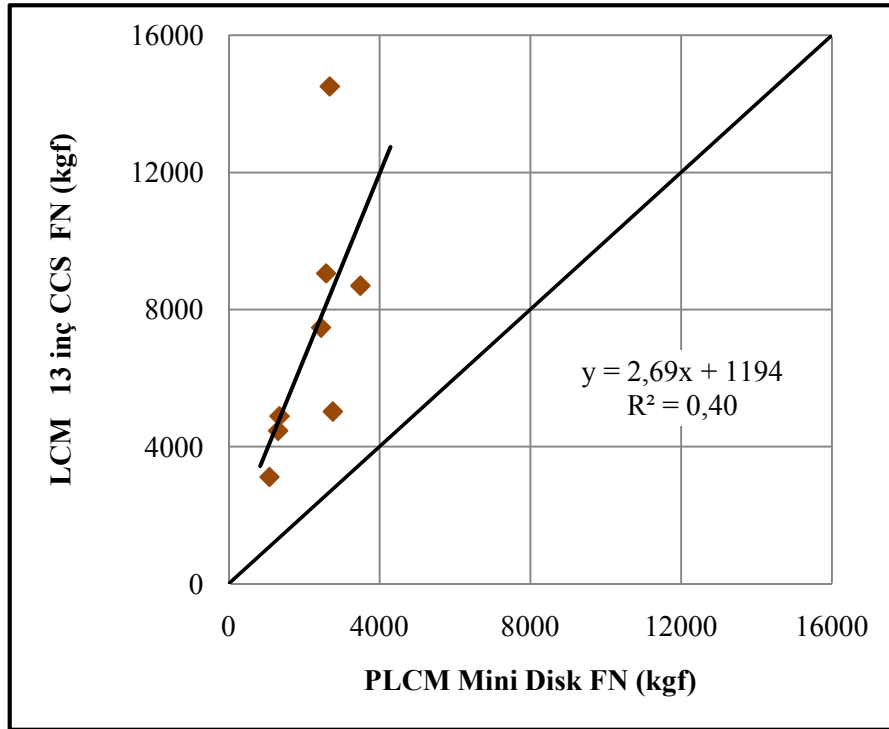
Yapılan laboratuvar çalışmalarında arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı LCM'de 13 inç CCS disk keski ile kesilmiştir. PLCM'de mini V disk ile d= 5 mm kesme derinliğinde elde edilen sonuçların, LCM'de 13 inç CCS disk keski ile d= 5 mm yardımsız kesme

sonuçlarıyla arasında bir ilişki olup olmadığına dair karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar 13 inç CCS (330 mm) disk ile mini V tip (130 mm) disk keski arasında yardımsız kesme sonuçlarına göre yapılmıştır. LCM'de 13 inç CCS (330 mm) disk keski ile PLCM'de mini V tip (130 mm) disk keski ile yapılan karşılaştırmaların özet tablosu Çizelge 4.22'de ve buna bağlı olarak elde edilen FN, FR ve SE ilişkileri Şekil 4.20-22'de verilmiştir.

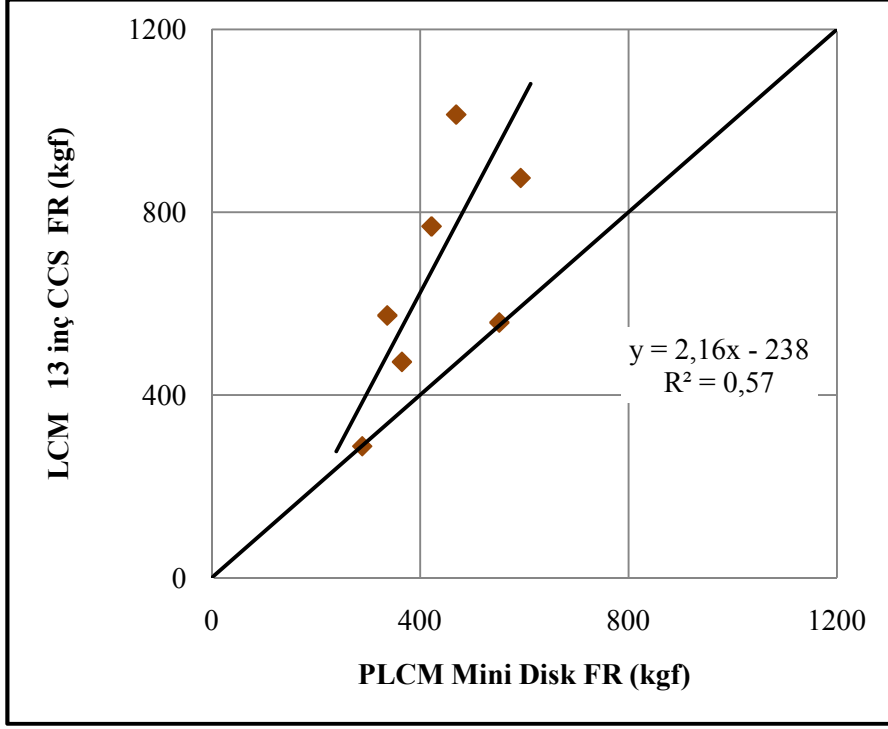
Çizelge 4.22: Yardımsız d=5 mm için LCM 13 inç CCS ve PLCM mini V disk karşılaştırmaları özet tablosu.

	PLCM (Mini V disk)			LCM (13 inç CCS disk)		
	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)	FN (kgf)	FR (kgf)	SE (kWh/m ³)
Arkoz	2446	469	45,7	7470	1013	6,1
Şeyl	1310	365	24,7	4463	472	6,6
Fosilli	2762	552	43	5021	558	8,5
*Trona	1082	289	11,9	3114	288	5,3
*Riyolit	1347	337	22,1	4885	574	9,5
*Kireçtaşı (dolayoba)	2680	612	40,3	14505	1387	9,7
*Kireçtaşı (kartal)	3491	422	36,5	8693	769	11,9
*Silttaşı	2582	593	65,3	9052	875	6,6

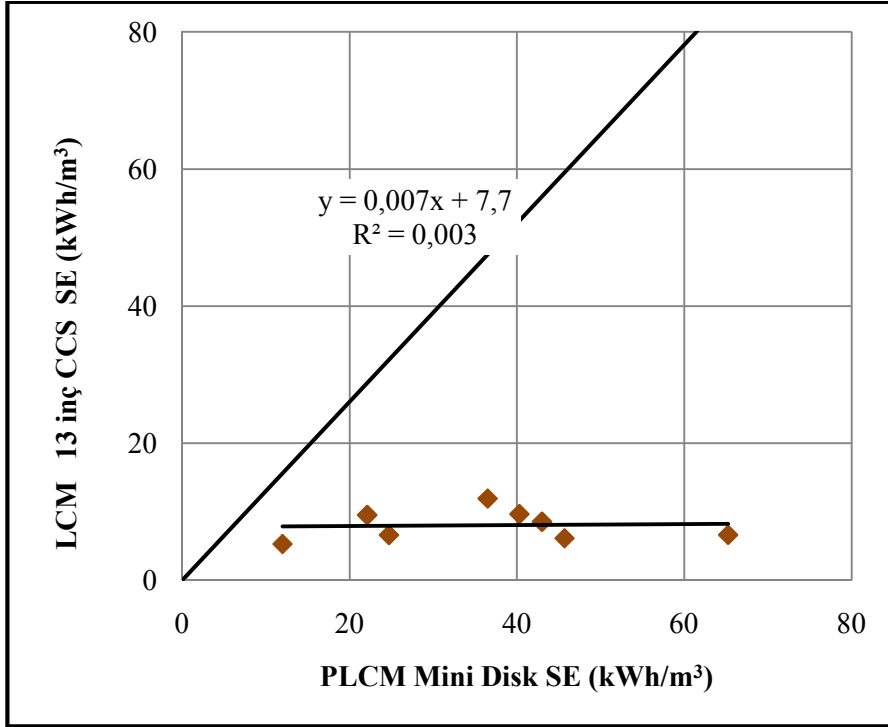
* İTÜ Kazı Mekaniği Laboratuvarında daha önceden yapılan doğrusal kesme deneyleri [102].



Şekil 4.20: Mini V tip disk keski ile 13 inç CCS disk keski, normal kuvvet (FN) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme).



Şekil 4.21: Mini V tip disk keski ile 13 inç CCS disk keski, yuvarlanma kuvveti (FR) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme).



Şekil 4.22: Mini V tip disk keski ile 13 inç CCS disk keski, spesifik enerji (SE) karşılaştırması (d=5 mm, yardımsız kesme).

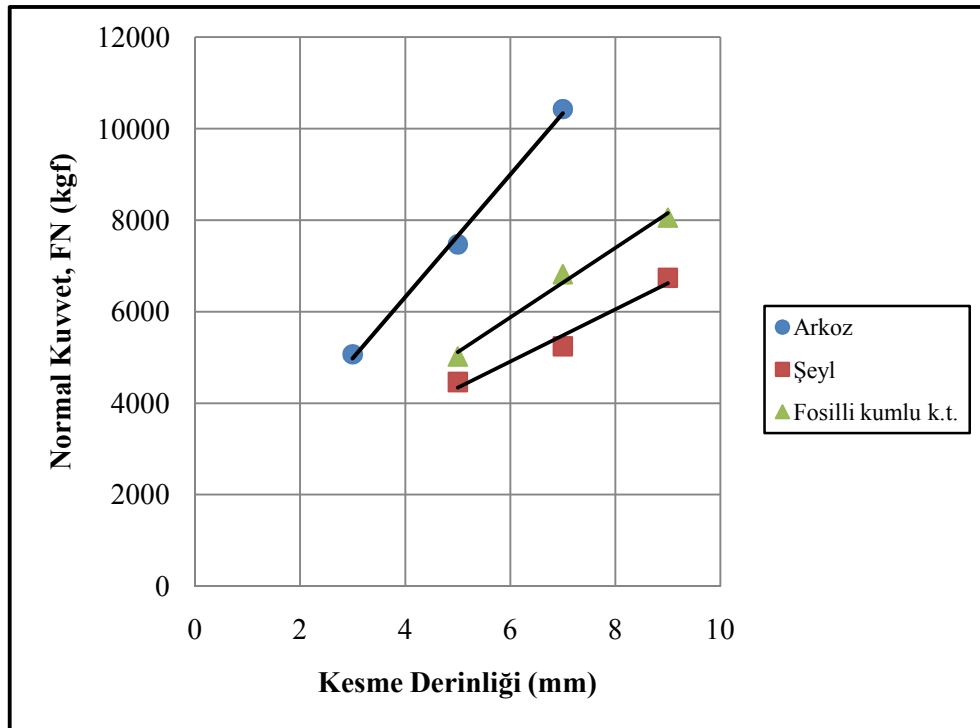
Mini V disk keski ile 13 inç CCS disk keski arasında yapılan karşılaştırmalarda 17 inç CCS disk keskide olduğu gibi yüksek korelasyon değerleri elde edilememiştir.

4.2 Kayaç Tipinin Kesme Performansına Etkisi

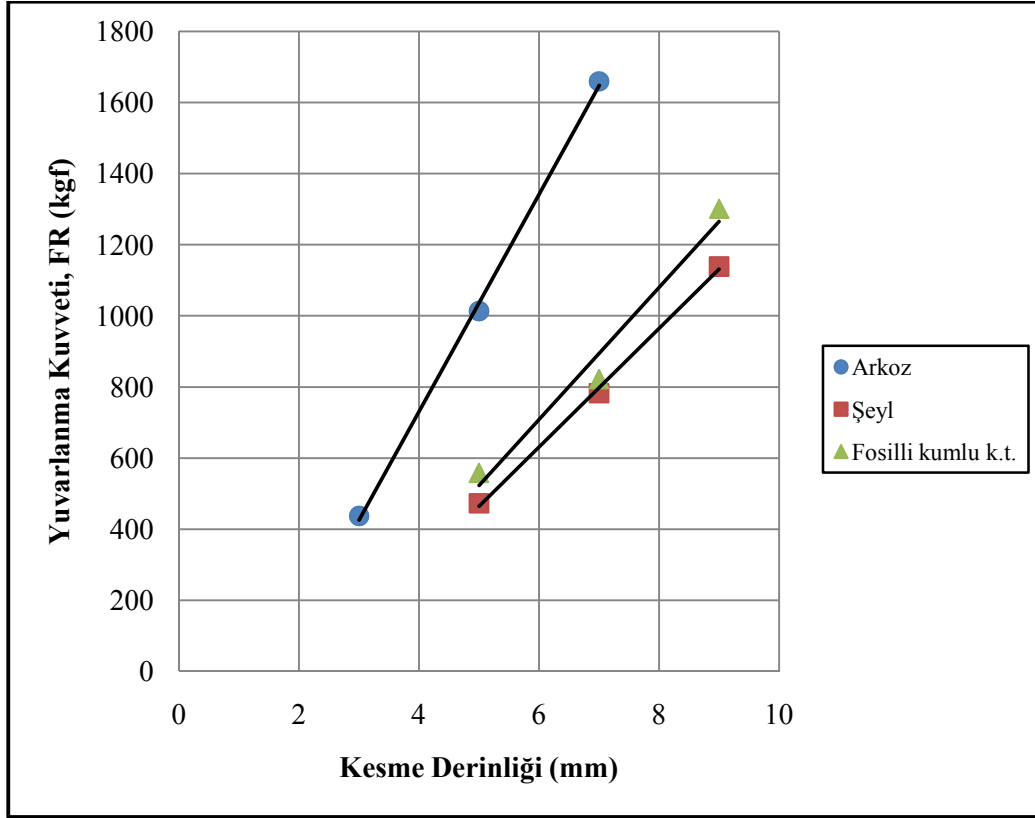
Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri 13 inç (330 mm) CCS tip, 15 inç (380 mm) V tip ve 17 inç (432 mm) CCS tip disk keskilerle kesilmiştir. Bu çalışmada, kayaç tipinin farklı disk keskilerle elde edilen kesme performansına etkisi araştırılmıştır.

4.2.1 13 inç CCS tip disk için kayaç tipinin kesme performansına etkisi

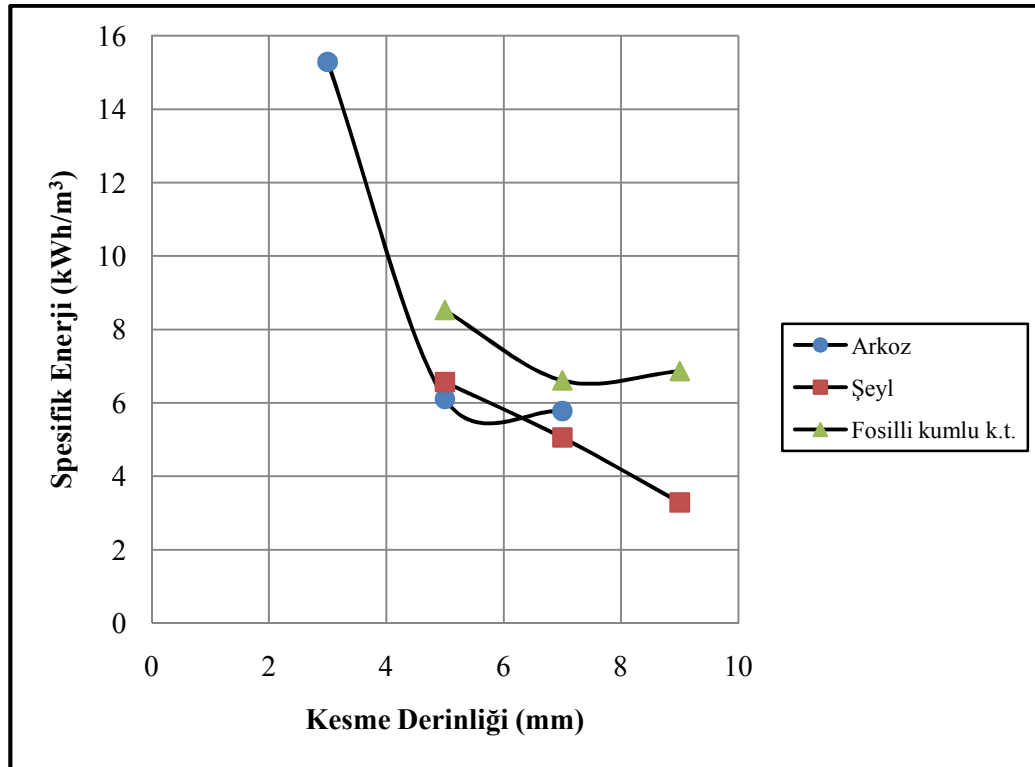
Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 13 inç (330 mm) CCS tip disk keski ile kesilmiştir. Kesme deneyleri sonucunda elde edilen keski kuvvetleri (FN, FR) ve spesifik enerji (SE) değeri değişimleri Bölüm 3.3.2’de verilmiştir. Bu çalışmada 13 inç CCS tip disk keski ile yapılan kesme deneylerine kayaç tipinin etkisi araştırılmıştır. Karşılaştırmaların aynı koşullarda yapılabilmesi için yardımsız kesme deney sonuçları kullanılmıştır. Yardımlı kesme deney sonuçlarının kullanılmayışının sebebi; keski arası mesafenin her kayaç için farklı seçilmiş olmasıdır. Şekil 4.23-25’te yardımsız koşulda 13 inç CCS tip disk keski ile üç farklı kayaçta yapılan kesme deneylerinin karşılaştırmalı sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.23: 13 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin normal kuvvete (FN) etkisi.



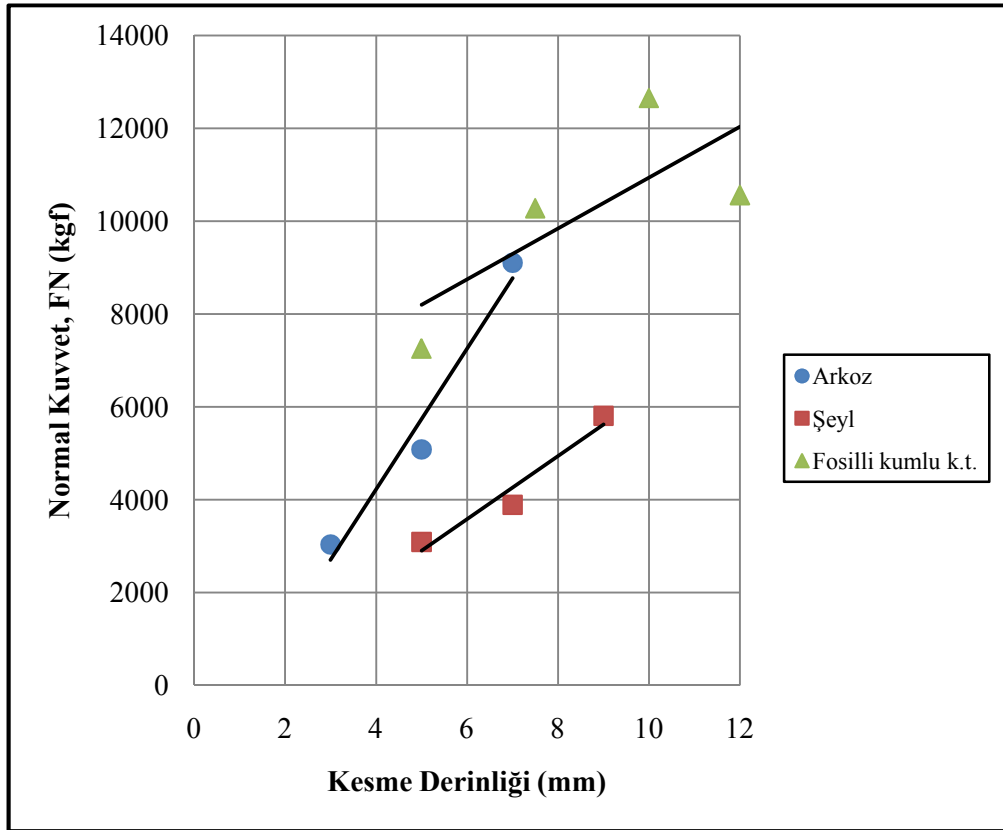
Şekil 4.24: 13 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin yuvarlanma kuvvetine (FR) etkisi.



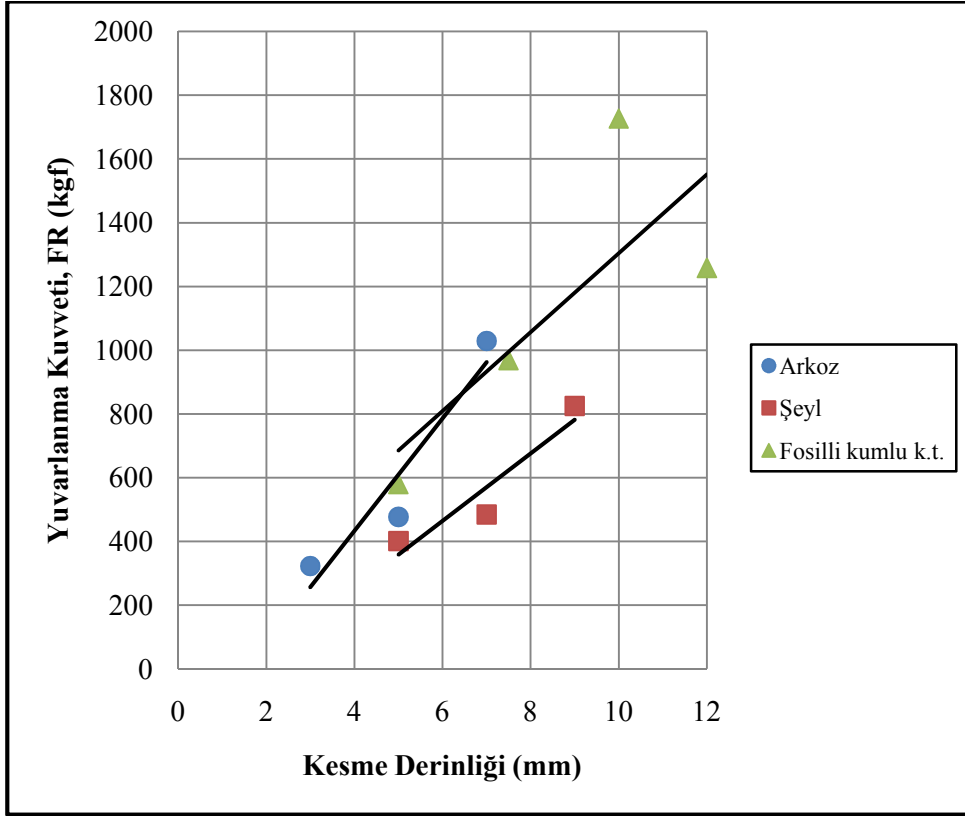
Şekil 4.25: 13 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin spesifik enerjiye (SE) etkisi.

4.2.2 15 inç V tip disk için kayaç tipinin kesme performansına etkisi

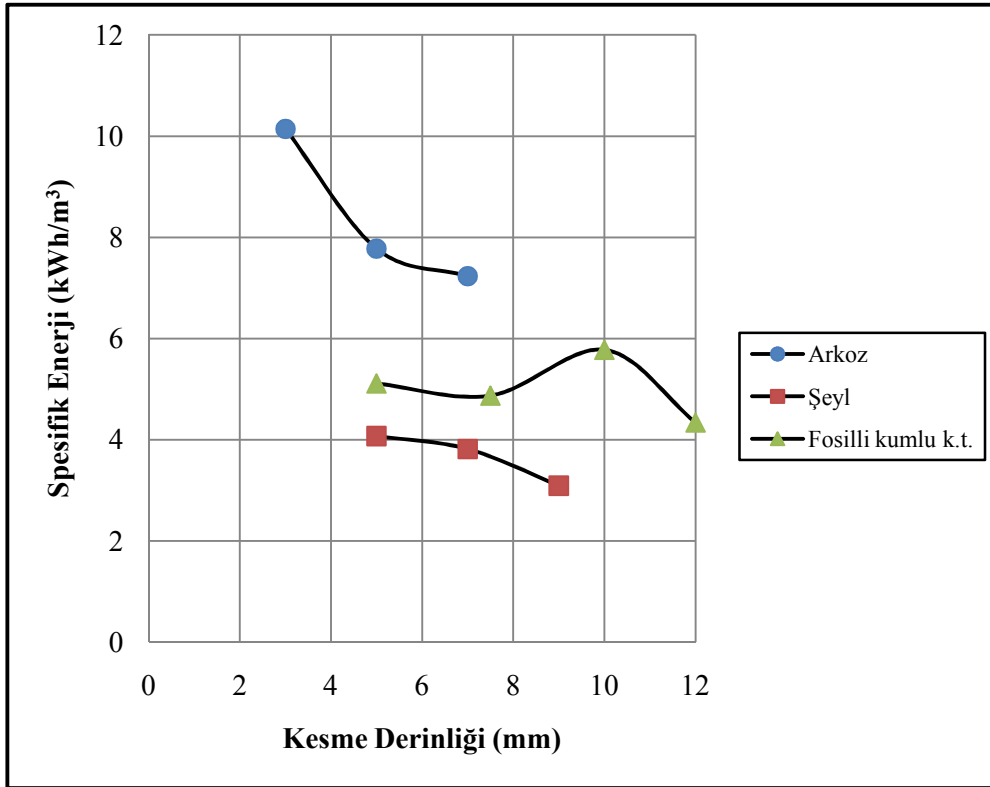
Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 15 inç (380 mm) V tip disk keski ile kesilmiştir. Kesme deneyleri sonucunda elde edilen keski kuvvetleri (FN, FR) ve spesifik enerji (SE) değeri değişimleri Bölüm 3.3.2’de verilmiştir. Bu çalışmada 15 inç V tip disk keski ile yapılan kesme deneylerine kayaç tipinin etkisi araştırılmıştır. Karşılaştırmaların aynı koşullarda yapılabilmesi için yardımsız kesme deney sonuçları kullanılmıştır. Yardımlı kesme deney sonuçlarının kullanılmayışının sebebi; keski arası mesafenin her kayaç için farklı seçilmiş olmasıdır. Şekil 4.26-28’de yardımsız koşulda 15 inç V tip disk keski ile üç farklı kayaçta yapılan kesme deneylerinin karşılaştırmalı sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.26: 15 inç V tip disk keski için kayaç tipinin normal kuvvete (FN) etkisi.



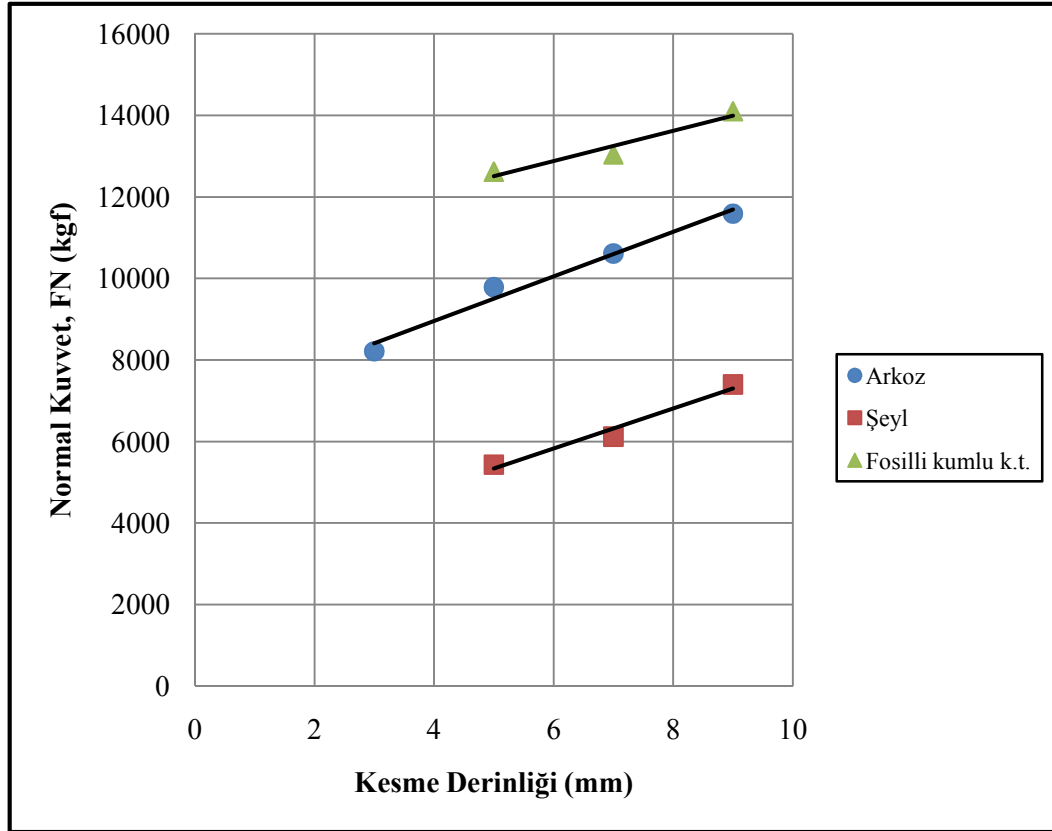
Şekil 4.27: 15 inç V tip disk keski için kayaç tipinin yuvarlanma kuvvetine (FR) etkisi.



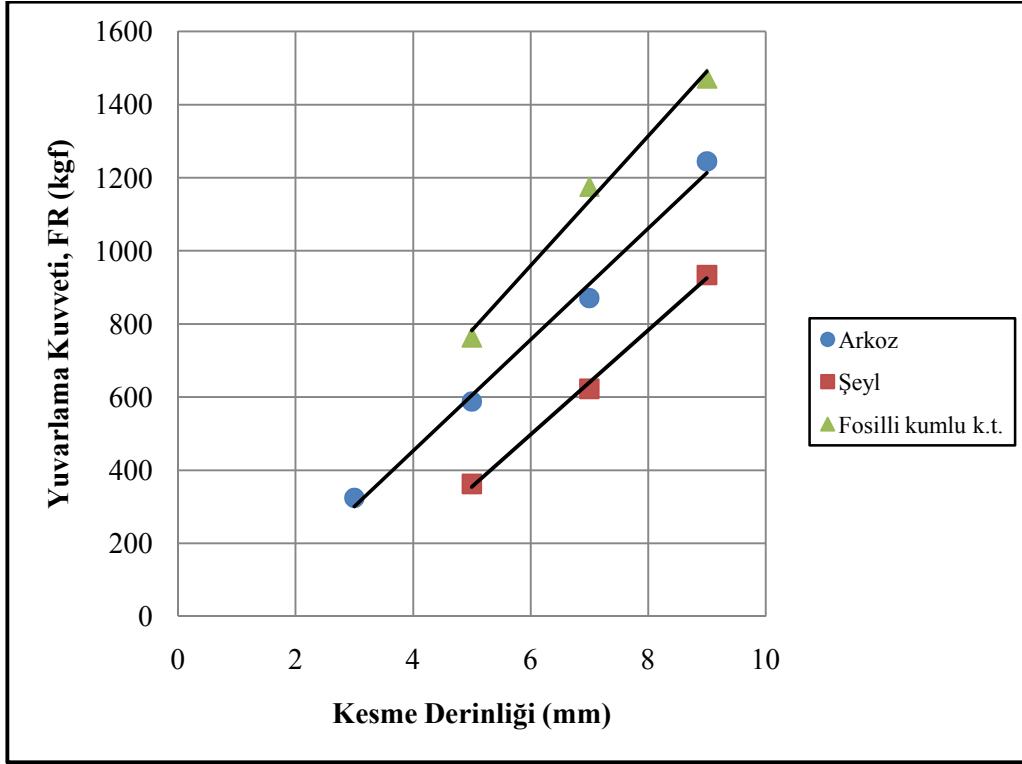
Şekil 4.28: 15 inç V tip disk keski için kayaç tipinin spesifik enerjiye (SE) etkisi.

4.2.3 17 inç CCS tip disk için kayaç tipinin kesme performansına etkisi

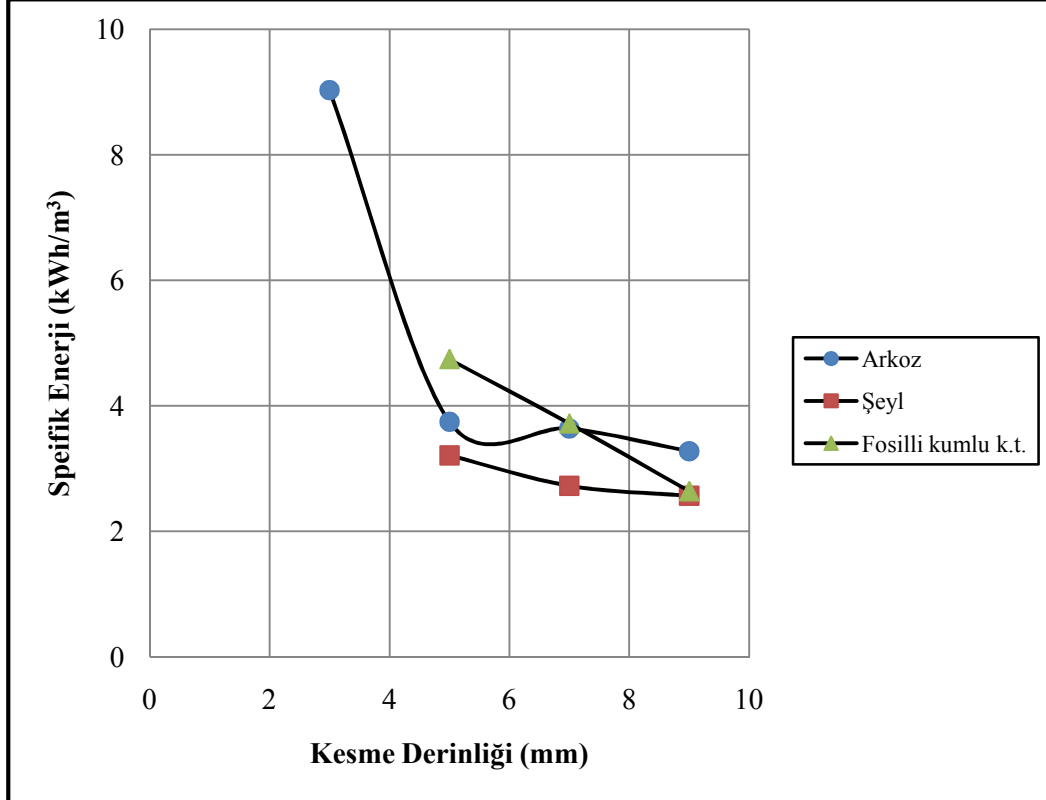
Arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı numuneleri tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 17 inç (432 mm) CCS tip disk keski ile kesilmiştir. Kesme deneyleri sonucunda elde edilen keski kuvvetleri (FN, FR) ve spesifik enerji (SE) değeri değişimleri Bölüm 3.3.2’de verilmiştir. Bu çalışmada 17 inç CCS tip disk keski ile yapılan kesme deneylerine kayaç tipinin etkisi araştırılmıştır. Karşılaştırmaların aynı koşullarda yapılabilmesi için yardımsız kesme deney sonuçları kullanılmıştır. Yardımlı kesme deney sonuçlarının kullanılmayışının sebebi; keski arası mesafenin her kayaç için farklı seçilmiş olmasıdır. Şekil 4.29-31’de yardımsız koşulda 17 inç CCS tip disk keski ile üç farklı kayaçta yapılan kesme deneylerinin karşılaştırmalı sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.29: 17 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin normal kuvvete (FN) etkisi.



Şekil 4.30: 17 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin yuvarlanma kuvvetine (FN) etkisi.



Şekil 4.31: 17 inç CCS tip disk keski için kayaç tipinin spesifik enerjiye (SE) etkisi.

4.2.4 Kayaç tipinin kesme performansına etkisi için elde edilen sonuçlar

Kesme deneylerinde kullanılan arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşının fiziksel ve mekanik özellikleri Bölüm 3.3.1’de verilmiştir. Bu üç numunenin tek eksenli basınç dayanımları, çekme dayanımları, elastisite modülleri, poisson oranları ve yoğunluklarında çok önemli farklılıkların olmadığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak kesme performansını etkileyen en önemli parametrenin kayaçların yapısal ve petrografik özellikleri olduğu söylenebilir.

13 inç CCS tip disk keski ile yapılan kesme deneylerinde, şeyl numunesinin tabakalı yapısından ötürü normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin en az olduğu; arkoz numunesinin masif ve klastik yapısından ötürü normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin diğer kayaçlara göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Fosilli kireçtaşı için elde edilen normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin diğer iki kayaç için elde edilen değerlerin arasında olduğu gözlemlenmiştir.

15 inç V tip disk keski ile yapılan kesme deneylerinde; şeyl numunesinin tabakalı yapısından ötürü normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin en az olduğu gözlemlenmiştir. Arkoz ve fosilli kireçtaşında 15 inç V disk keski ile yapılan deneylerde normal kuvvetlerin fosilli kireçtaşında daha yüksek olduğu ve yuvarlanma kuvvetinin arkoz numunesinde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi; deneysel varyasyonlardan ya da fosilli kireçtaşı numunesinin yapısındaki iri fosillerden kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir.

17 inç CCS tip disk keski ile yapılan kesme deneylerinde; şeyl numunesinin tabakalı yapısından ötürü normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin en az olduğu gözlemlenmiştir. Fosilli kireçtaşında keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvet değerleri arkoz numunesinde keskiye gelen normal ve yuvarlanma kuvvet değerlerinden daha yüksektir. 17 inç disk keskide 13 inç CCS disk keskiye göre bu karşılaştırmanın tam tersi olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; fosilli kireçtaşının farklılık gösteren yapısı göz önüne alındığında, deneylerin sert zonlarda yapılmış olma olasılığı gösterilebilir.

Bu üç tip disk keski için minimum spesifik enerji değerleri tabakaya paralel olarak kesilen şeyl numunesinde elde edilmiştir. Arkoz ve fosilli kireçtaşı numuneleri için elde edilen spesifik enerji değerleri 13 inç CCS tip, 15 inç V tip ve 17 inç CCS tip disk keskilerde birbirinden farklılıklar göstermektedir.

4.3 Keski Kuvvetlerinin Teorik Keski Kuvvetleriyle Karşılaştırılması

4.3.1 CCS tip disk keski laboratuvar sonuçlarıyla CCS disk kesme teorisinin karşılaştırılması

Rostami ve Ozdemir, disk keski altında kalan kırılma basıncını hesaba katarak, bu keski için bir teori geliştirmiştir [3]. Bu çalışma günümüzde tam boyutlu tünel açma makinelerinde (TBM) sıkça kullanılan sabit kesit alanlı (CCS) disk keski içindir. Normal (FN) ve yuvarlanma (FR) kuvvetleri Bölüm 2.5.2’de detaylıca anlatılmıştır [3]. Laboratuvar keski kuvvetleri - teorik keski kuvvetleri için karşılaştırma çizelgeleri ve grafikleri verilmeden önce, teorik keski kuvvetlerinin hesaplanması aşağıdaki örnekle açıklanmıştır.

Kayaç : Arkoz

Kesme derinliği (d) : 3 mm

Keskiler arası mesafe (s) : 69 mm

Keski uç genişliği (T) : 12 mm

Keski yarıçapı (R) : 165 mm (13 inç CCS tip disk keski yarı çapı)

C : Dönüşüm katsayısı : 2,12

Kayacın basınç dayanımı : 34 MPa

Kayacın çekme dayanımı : 4,2 MPa

ψ : CCS tip disk keski için sıfır

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{R-d}{R}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{165-3}{165}\right) = 0,191 \quad (6.17)$$

$$P = C \cdot \sqrt{\frac{s \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_T}{\gamma \cdot \sqrt{R \cdot T}}} = 2,12 \cdot \sqrt{\frac{69 \cdot (34)^2 \cdot 4,2}{0,191 \cdot \sqrt{165 \cdot 12}}} = 72,15 MPa \quad (6.18)$$

$$F_T = \frac{P \cdot R \cdot T \cdot \gamma}{\psi + 1} = \frac{72,15 \cdot 165 \cdot 12 \cdot 0,191}{0 + 1} = 27283,8 N \quad (6.19)$$

$$F_N = F_T \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) = 27283,8 \cdot \cos\left(\frac{0,191}{2}\right) = 27159 N = 2715,9 kgf \quad (6.20)$$

$$F_R = F_T \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) = 27283,8 \times \sin\left(\frac{0,191}{2}\right) = 2601,4N = 260,1kgf \quad (6.21)$$

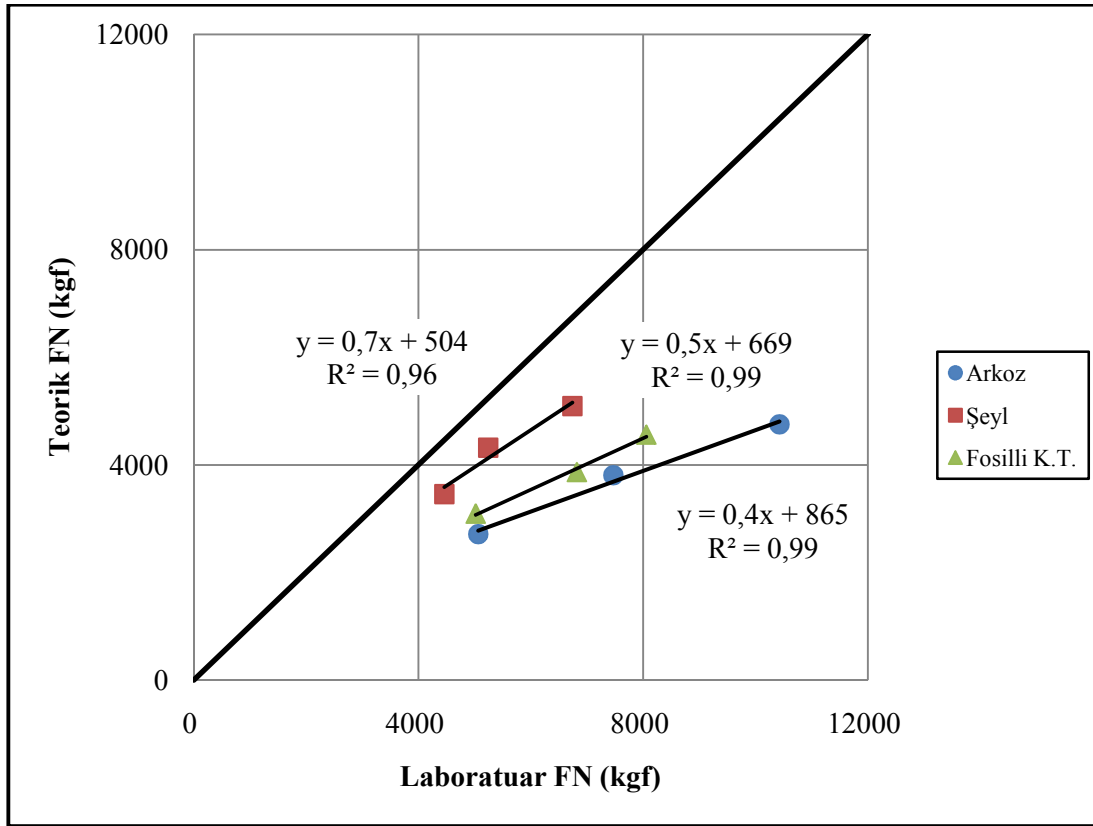
Çalışmanın bu bölümünde laboratuarda 13 inç ve 17 inç CCS tip disk keski ile üç farklı kayada (arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı) yapılan yardımsız kesme deneylerinde elde edilen keski kuvvetleri, CCS disk teorisinden elde edilen keski kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.23'te 13 inç CCS tip disk için elde edilen laboratuvar ve teorik keski kuvvetlerinin karşılaştırması verilmiştir. Çizelge 4.24'te 17 inç CCS disk için elde edilen laboratuvar ve teorik keski kuvvetlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4.32-33'te 13 inç CCS tip disk keski için elde edilen laboratuvar ve teorik keski kuvvetlerinin karşılaştırmaları verilmiştir. Şekil 4.34-35'te 17 inç CCS tip disk keski için elde edilen laboratuvar ve teorik keski kuvvetlerinin karşılaştırmaları verilmiştir. Karşılaştırmalar her numune (arkoz, şeyl ve fosilli kireçtaşı) için yapılmıştır.

Çizelge 4.23: 13 inç CCS disk keski için laboratuvar ve teorik keski kuvvetleri.

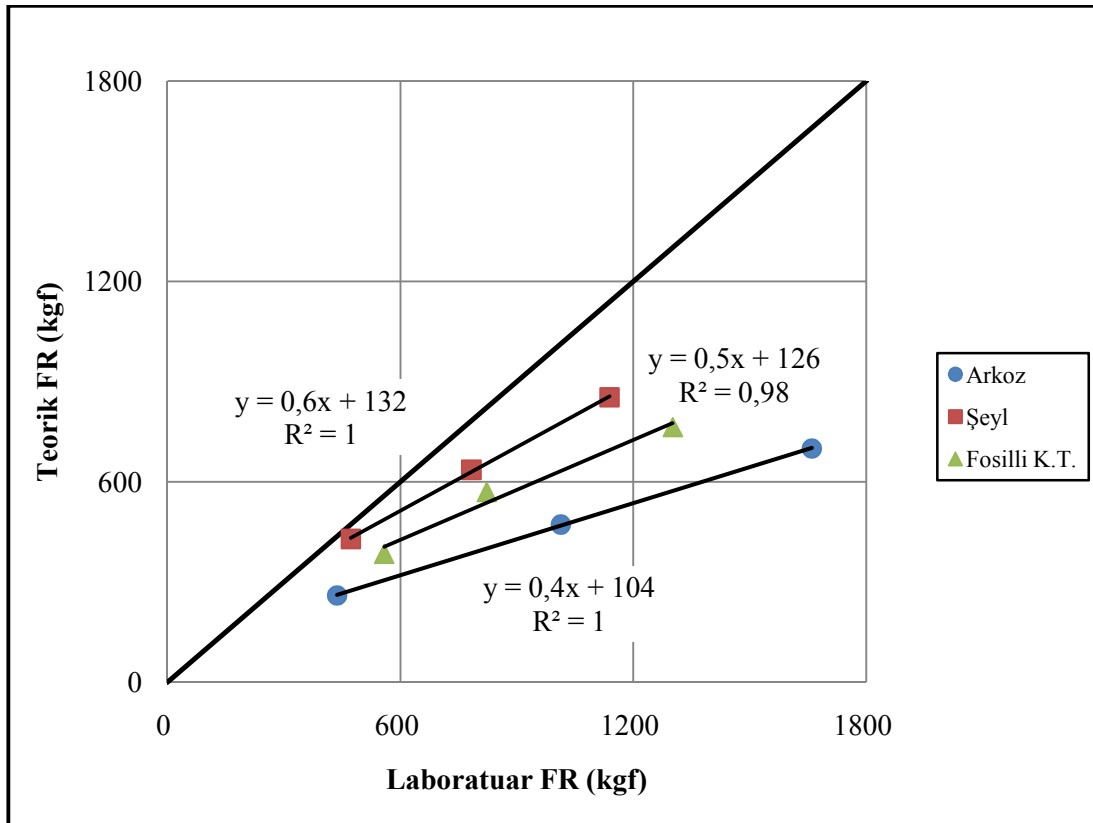
Numune	d (mm)	Laboratuvar		Teorik	
		FN (kgf)	FR (kgf)	FN (kgf)	FR (kgf)
Arkoz	3	5067,7	436,9	2715,9	260,1
	5	7470,9	1013,5	3808,8	472,4
	7	10427,9	1659,8	4755,1	700,0
Şeyl	5	4463,0	472,4	3461,1	429,3
	7	5241,6	782,7	4321,0	636,1
	9	6741,2	1138,8	5096,8	853,4
Fosilli K.T.	5	5021,5	558,7	3098,8	384,4
	7	6820,7	822,5	3868,7	569,5
	9	8056,7	1301,5	4563,3	764,1

Çizelge 4.24: 17 inç CCS disk keski için laboratuvar ve teorik keski kuvvetleri.

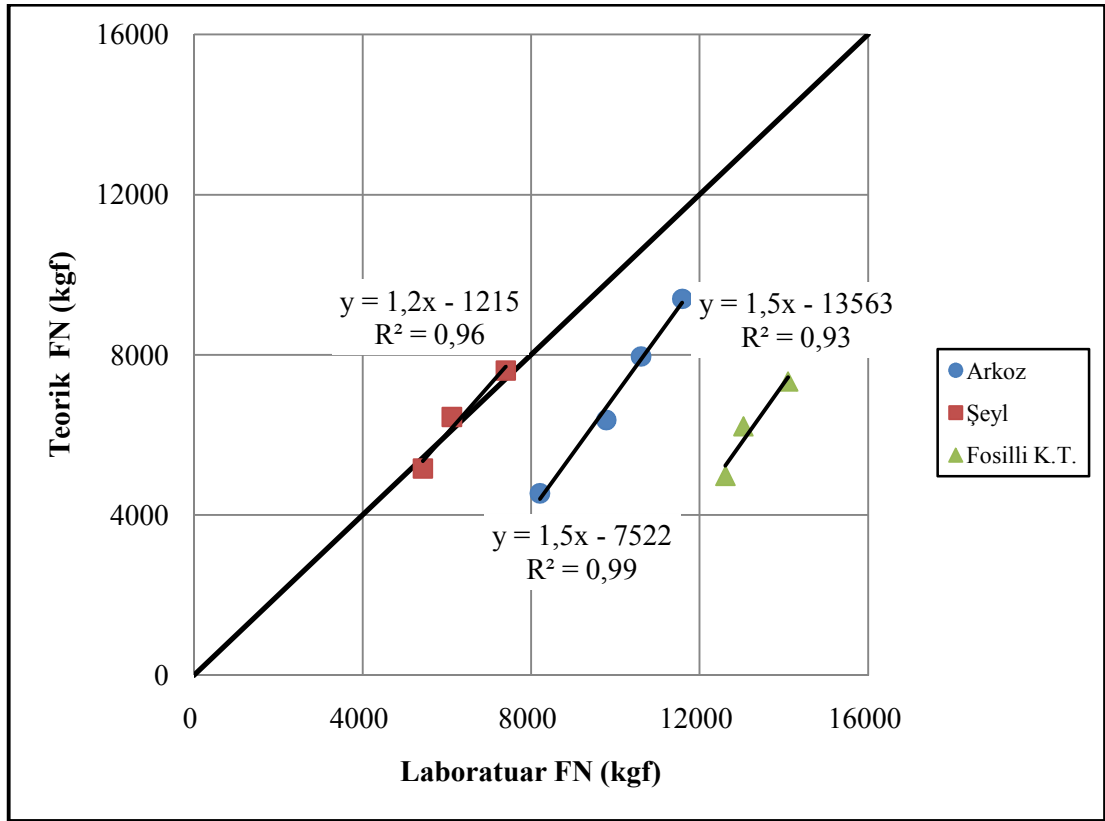
Numune	d (mm)	Laboratuvar		Teorik	
		FN (kgf)	FR (kgf)	FN (kgf)	FR (kgf)
Arkoz	3	8210,7	324,5	4542,2	379,8
	5	9786,4	587,9	6373,4	689,7
	7	10611,0	870,8	7961,6	1021,8
	9	11591,5	1244,5	9396,4	1370,6
Şeyl	5	5434,3	362,4	5161,1	558,5
	7	6119,1	622,6	6447,2	827,4
	9	7399,2	933,7	7609,2	1109,9
Fosilli K.T.	5	12616,4	763,1	4977,8	538,7
	7	13042,7	1175,5	6218,1	798,0
	9	14100,4	1471,8	7338,8	1070,5



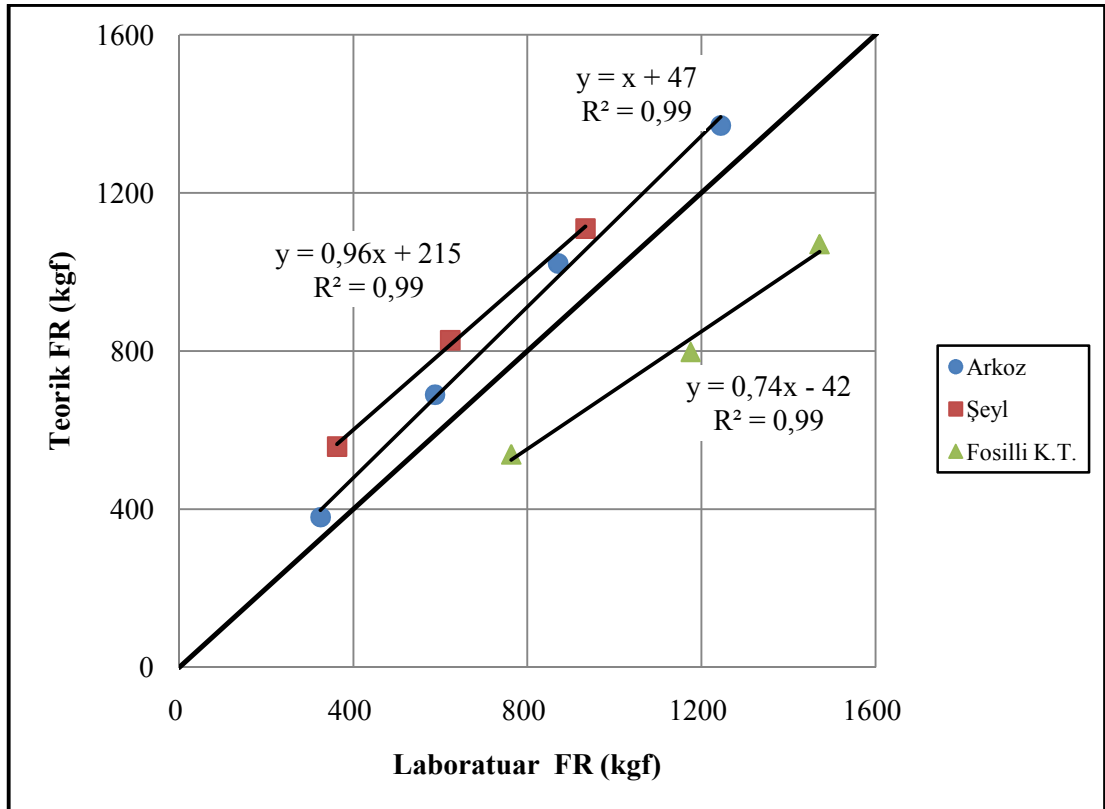
Şekil 4.32: 13 inç CCS disk keski için laboratuar FN ile teorik FN karşılaştırması.



Şekil 4.33: 13 inç CCS disk keski için laboratuar FR ile teorik FR karşılaştırması.



Şekil 4.34: 17 inç CCS disk keski için laboratuar FN ile teorik FN karşılaştırması.



Şekil 4.35: 17 inç CCS disk keski için laboratuar FR ile teorik FR karşılaştırması.

13 inç ve 17 inç CCS tip disk keskiiler kullanılarak yapılan kesme deneylerinde keskiye etki eden keski kuvvetleri, teorik keski kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır. Laboratuar keski kuvvetleri ile teorik keski kuvvetleri arasında yüksek belirlilik kat sayısı (R^2) elde edilmiştir. Yuvarlanma kuvvetleri (FR) için; keski çapı arttıkça her üç kayaç için laboratuar yuvarlanma kuvvet değerlerinin, CCS tip disk ile kesme teorisinden elde edilen yuvarlanma kuvvet değerlerine daha yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Normal kuvvetler (FN) için; keski çapı arttıkça arkoz ve şeyl numunesi için laboratuar normal kuvvet değerlerinin, CCS tip disk ile kesme teorisinden elde edilen normal kuvvet değerlerine daha yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Fakat fosilli kireçtaşı laboratuar ve teorik normal kuvvet değerlerinde farklılık gözlenmiştir, bunun nedeni ise fosilli kireçtaşı numunesinin bünyesinde bulunan iri fosiller ve kum taneleri gösterilebilir.

Rostami ve Ozdemir tarafından geliştirilen CCS tip disk keski teorisinde çoğunlukla 17 inç CCS disk keskiiler kullanılmıştır [3]. Aynı tip disk keskiiler kullanılarak oluşturulan bu teoriden elde edilen keski kuvvetleri, laboratuarda 17 inç CCS disk keski ile yapılan kesme deneylerinden elde edilen keski kuvvetlerine daha yakın sonuç vermiştir. 13 inç ve 15 inç CCS tip disk keskiiler kullanılarak yapılacak olan kesme deneyleriyle bu teorinin geliştirilmesi için çalışmalar yapılabilir.

4.3.2 V tip disk keski laboratuar sonuçlarıyla V tip disk kesme teorisinin karşılaştırılması

Roxborough, V tip disk keskiiler için keskiye etki eden normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin hesabında bir model geliştirmiştir. Teorinin temeli, disk keskinin normal kuvvetinin (FN) bulunmasıdır [5]. Roxborough V tip disk kesme teorisi Bölüm 2.5.2’de detaylıca anlatılmıştır. Laboratuar keski kuvvetleri - teorik keski kuvvetleri için karşılaştırma çizelgeleri ve grafikleri verilmeden, teorik keski kuvvetlerinin hesaplanması aşağıdaki örnekle verilmiştir.

Kayaç : Arkoz

Kesme derinliği (d) : 0,3 cm

Disk keski çapı (D) : 38 cm (13 inç CCS disk keski)

Disk keski uç açısı (ϕ) : 90°

Kayacın basınç dayanımı: 340 kg/cm²

$$F_N = 4\sigma_c . d . \tan \frac{\phi}{2} \sqrt{Dd - d^2} = 4 \times 340 \times 0,3 \times \tan \frac{90}{2} \times \sqrt{38 \times 0,3 - 0,3^2} = 1376,2 \text{ kgf} \quad (6.22)$$

$$F_R = 4 . \sigma_c . d^2 . \tan \frac{\phi}{2} = 4 \times 340 \times 0,3^2 \times \tan \frac{90}{2} = 122,8 \text{ kgf} \quad (6.23)$$

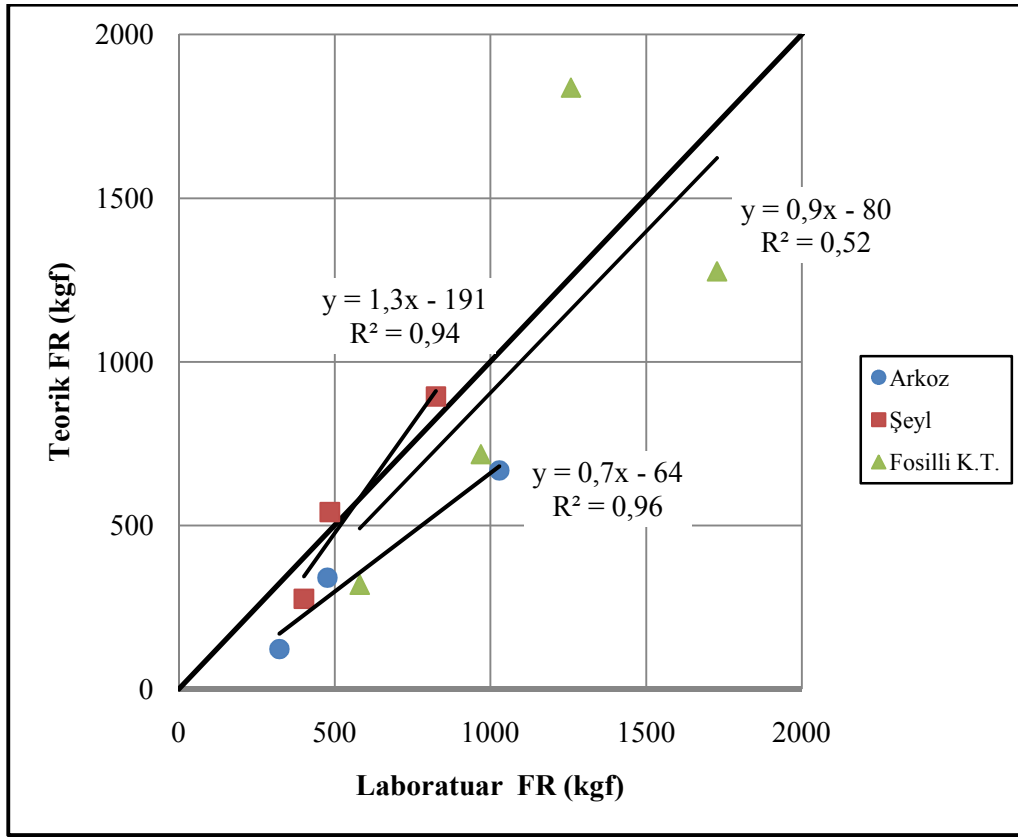
Çalışmanın bu bölümünde, laboratuarda LCM’de 15 inç (380 mm) V tip disk keski ve PLCM’de mini V (130 mm) tip disk keski ile üç farklı kayaçta yapılan kesme deneylerinden elde edilen keski kuvvetleri, V tip disk keski teorisinden elde edilen keski kuvvetleriyle karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.25’te 15 inç V tip disk keski için elde edilen laboratuvar ve teorik keski kuvvetlerinin (FN ve FR) karşılaştırması verilmiştir. Çizelge 4.26’da mini V tip disk keski için elde edilen laboratuvar ve teorik keski kuvvetlerinin (FN ve FR) karşılaştırması verilmiştir. Şekil 4.36-37’de 15 inç V tip disk keski için elde edilen laboratuvar ve teorik keski kuvvetlerinin karşılaştırmaları verilmiştir. Şekil 4.38-39’da mini V tip disk keski için elde edilen laboratuvar ve teorik keski kuvvetlerinin karşılaştırmaları verilmiştir.

Çizelge 4.25: 15 inç V tip disk keski için laboratuvar ve teorik keski kuvvetleri.

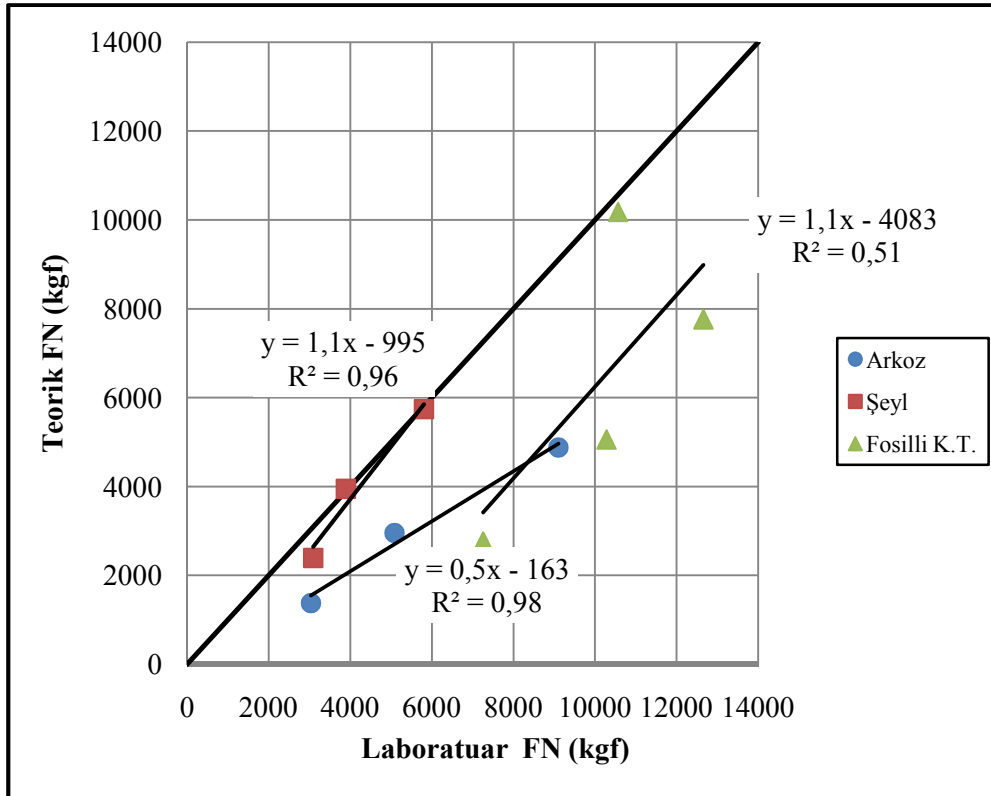
Numune	d (mm)	Laboratuvar		Teorik	
		FN (kgf)	FR (kgf)	FN (kgf)	FR (kgf)
Arkoz	3	3032,0	322,6	1376,2	122,8
	5	5082,0	476,8	2953,1	341,0
	7	9103,5	1028,5	4878,8	668,4
Şeyl	5	3088,9	401,1	2390,2	276,0
	7	3888,3	484,3	3948,8	541,0
	9	5805,6	824,6	5741,4	894,2
Fosilli K.T.	5	7256,1	580,0	2762,6	319,0
	7,5	10279,7	968,8	5058,3	717,8
	10	12654,1	1727,0	7761,6	1276,0
	12	10562,8	1258,1	10175,3	1837,4

Çizelge 4.26: Mini V tip disk keski için laboratuvar ve teorik keski kuvvetleri.

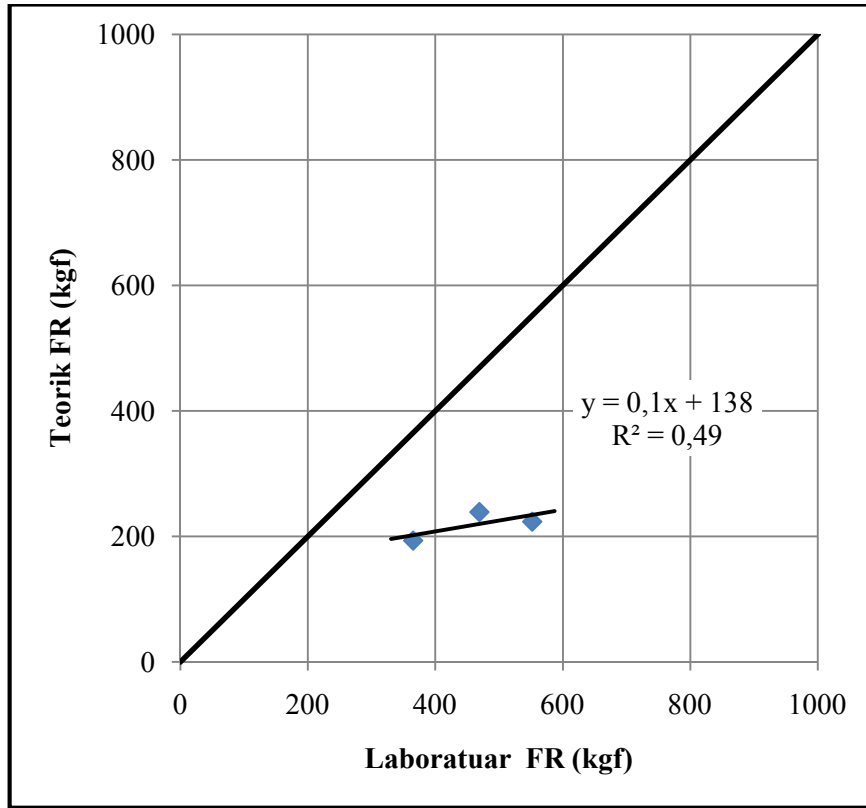
Numune	d (mm)	Laboratuvar		Teorik	
		FN (kgf)	FR (kgf)	FN (kgf)	FR (kgf)
Arkoz	5	2446,9	469,2	1193,9	238,8
Şeyl	5	1310,9	365,2	966,3	193,3
Fosilli K.T.	5	2762,9	552,1	1116,8	223,4



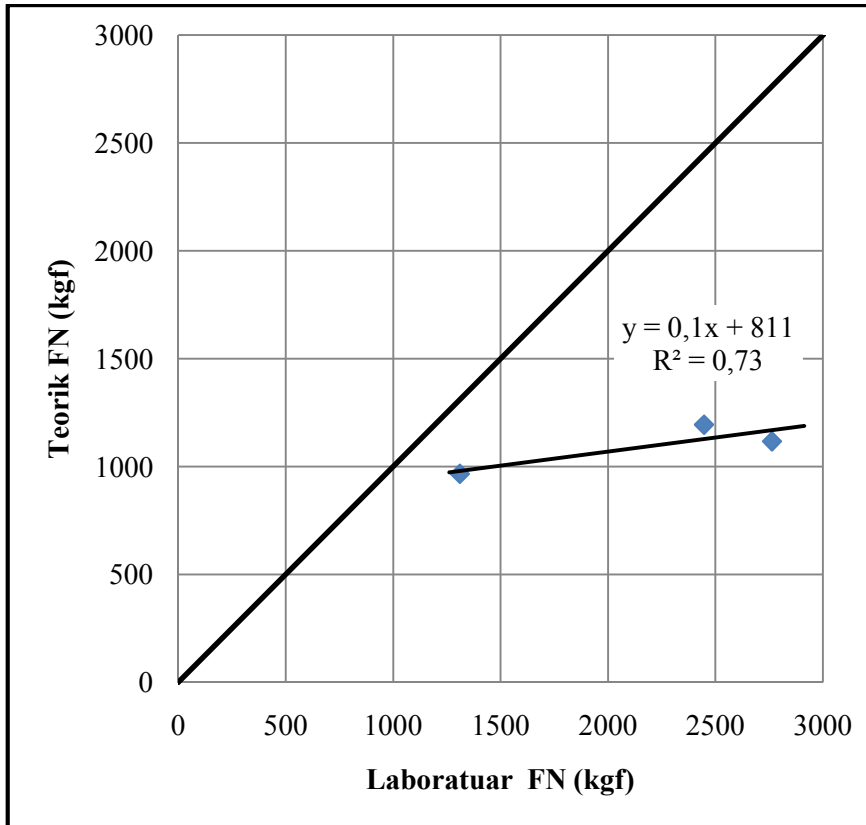
Şekil 4.36: 15 inç V tip disk keski için laboratuar FR ile teorik FR karşılaştırması.



Şekil 4.37: 15 inç V tip disk keski için laboratuar FN ile teorik FN karşılaştırması.



Şekil 4.38: Mini V tip disk keski laboratuar FR ile teorik FR karşılaştırması.



Şekil 4.39: Mini V tip disk keski laboratuar FN ile teorik FN karşılaştırması.

15 inç V tip (380 mm) ve mini V tip (130 mm) disk keskiler kullanılarak yapılan kesme deneylerinden elde edilen keski kuvvetleri, Roxborough V disk teorisinden elde edilen keski kuvvetleriyle karşılaştırıldığında şu sonuçlar elde edilmiştir: 15 inç V tip disk için teorik ve laboratuvar FN arasında, kayaç bazında arkoz için %98, şeyl için %96, fosilli kireçtaşı için %51 belirlilik kat sayısı (R^2) elde edilmiştir. 15 inç V tip disk için teorik ve laboratuvar FR arasında, kayaç bazında arkoz için %96, şeyl için %94, fosilli kireçtaşı için %52 belirlilik kat sayısı (R^2) elde edilmiştir. Mini V tip disk keski için teorik ve laboratuvar FN arasında, üç kayaç için toplu sonuç olarak, %73 belirlilik kat sayısı (R^2) elde edilmiştir. Mini V tip disk keski için teorik ve laboratuvar FR arasında, üç kayaç için toplu sonuç olarak, %49 belirlilik kat sayısı (R^2) elde edilmiştir. Fosilli kireçtaşı numunesi fosilli yapıya sahiptir. Kesme deneylerinde böyle bir kesme hattına denk gelinmiş olabilir. Bu sebepten ötürü V tip disk teorisiyle laboratuvar kesme deney sonuçları fosilli kireçtaşı numunesi için düşük belirlilik kat sayısı vermiş olabilir.

5. DENEYSEL VE ARAZİ SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışmanın birinci aşamasında, İstanbul’da metro inşasında çalışan iki farklı tünel açma makinesinin (TBM) kullanıldığı formasyonlardan kayaç numuneleri laboratuara getirilmiştir. Formasyonları temsilen alınan fosilli kireçtaşı ve şeyl numuneleri üzerinde tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM) kullanılarak kaya kesme deneyleri yapılmıştır. Kaya kesme deneyleri yardımı ile elde edilen veriler analiz edilerek bu formasyonlarda çalışan TBM’lerin performans tahmini yapılmaya çalışılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, bu formasyonlarda kazı yapan TBM’lerin gerçek arazi performans verileri alınarak detaylı analiz edilmiştir. Laboratuarda yapılan kaya kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar, TBM’lerin arazideki performans sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Fosilli kireçtaşı numunesi, laboratuarda doğrusal kazı setinde (LCM) 15 inç V tip disk keski ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) mini V tip (130 mm) disk keski ile kesilmiş ve tünel açma makinesinin performansına yönelik analizler yapılmıştır. Fosilli kireçtaşı, Otogar-Bağcılar metro inşasında kullanılan tam cepheli tünel açma (TBM) makinesi ile kesilmiştir. TBM’de kullanılan disk keski 15 inç V tip disk keskidir. Bu formasyon kesilirken, TBM’de bulunan veri kayıt sistemi ile kesme verileri kayıt altına alınmıştır. TBM kazısından elde edilen gerçek arazi verileri [11], laboratuvar kesme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Otogar-Bağcılar metro hattında kullanılan TBM’in teknik özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Otogar-Bağcılar metro hattında kullanılan TBM’in teknik özellikleri [11].

Makine çapı	6,52 m
Keski sayısı	46
Toplam itme kuvveti	780-1350 ton
Kesici kafa	Elektrik motorları
Kesici kafa gücü	1160 kW

Çizelge 5.1 (devam): Otogar-Bağcılar metro hattında kullanılan TBM’in teknik özellikleri [11].

Kesici kafa dönüş hızı	0-3,2 rpm
Kesici kafa torku	2610-3597 kNm
İtme silindirlerinin uzunluğu	1,5 m
Makine ağırlığı	567 ton
Keskiler arası mesafe	75 mm

Şeyl numunesi, laboratuarda tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM) 17 inç CCS tip disk keski ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) mini V (130mm) tip disk keski ile kesilmiş ve tünel açma makinesinin performansına yönelik analizler yapılmıştır. Şeyl, Kartal-Kadıköy metro inşasında tam cepheli tünel açma (TBM) makinesi ile kesilmiştir. TBM’de kullanılan disk keski 17 inç CCS disk’tir. Bu formasyon kesilirken, TBM’de bulunan veri kayıt sistemi ile kesme verileri kayıt altına alınmıştır. TBM kazısından elde edilen gerçek arazi verileri [11], laboratuvar kesme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Kartal-Kadıköy metro hattında kullanılan TBM’ in teknik özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2: Kartal Kadıköy metro hattında kullanılan TBM’in teknik özellikleri [11].

Makine çapı	6,57 m
Keski sayısı	38
Bir diske gelebilecek maksimum kuvvet	267 kN
İtme silindirleri kapasitesi	20000 kN statik
Kesici kafa tahrik sistemi	Elektrik motorları
Kesici kafa gücü	1260 kW
Kesici kafa dönüş hızı	1,6-5,5 rpm
Kesici kafa torku	1515-5200 kNm
İtme silindirleri mak. çalışma basıncı	42575 kN
İtme silindiri uzunluğu	1,5 m
Yaklaşık kesici kafa ağırlığı	350 ton
Keskiler arası mesafe	90 mm

5.1 Tam Boyutlu Doğrusal Kazı Seti (LCM) Kesme Deneyleriyle TBM Performans Tahmini

5.1.1 Fosilli kireçtaşı için 15 inç V tip disk keski ile performans tahmini

Fosilli kireçtaşı numunesi, bu formasyonu kazacak olan TBM üzerinde bulunan 15 inç V tip (380 mm) disk keski ile laboratuarda kesilmiştir. Kaya kesme deneylerinde optimum kesme koşulları, kesme derinliği (d) 12 mm'de ve keskiler arası mesafe (s) 75 mm'de elde edilmiştir. s/d'nin optimum olduğu bu koşullarda spesifik enerji 3,55 kWh/m³, ortalama normal kuvvet 9843,1 kgf bulunmuştur. Ortalama yuvarlanma kuvveti 1224,5 kgf bulunmuştur.

TBM İtme Kuvvetinin Belirlenmesi

TBM itme kuvveti eşitlik 5.1 kullanılarak hesaplanabilir [21].

$$FT = N_c \cdot FN \cdot f_L \quad (5.1)$$

Burada;

FN : Bir disk için ortalama itme kuvveti, kgf/disk

f_L : Sürtünme kayıpları için katsayı, genellikle 1,2

N_c : TBM'deki disk sayısı (46)

$$\sum_{n=1}^{n=46} FN = 46 \times 9843,1 \times 1,2 = 543339 \text{ kgf} = 543 \text{ t} = 5322 \text{ kN}$$

TBM Tork Gereksiniminin Belirlenmesi

TBM tork'u eşitlik 5.2 kullanılarak hesaplanabilir [21].

$$T = \frac{N_c \cdot xFR \cdot D_{TBM} \cdot x f_L}{4} \quad (5.2)$$

Burada;

T : Kesici kafa tork'u, kgm

FR : Bir disk için ortalama kesme kuvveti, kgf/disk

D_{TBM} : Kesici kafa çapı (6,52 m)

f_L : Sürtünme kayıpları için katsayı, genellikle 1,2

$$T = \sum_{n=1}^{n=46} FR \cdot x \frac{D_{TBM}}{4} \cdot x f_L$$

$$T = \sum_{n=1}^{n=46} 1224,6 \times \frac{6,52}{4} \times 1,2 = 109846,6 \text{ kgm} = 1098,5 \text{ kNm}$$

TBM Güç Gereksiniminin Belirlenmesi

Optimum kazı koşullarındaki güç gereksinimi ortalama tork değeri kullanılarak hesaplanabilir. TBM'in gücünü hesaplayabilmek için eşitlik 5.3 kullanılabilir [21].

$$P = 2\pi \frac{RPM}{60} T \quad (5.3)$$

Burada;

P : Kesici kafa gücü, kW

RPM : Kesici kafa dönüş hızı (3,2)

T : Tork, kNm

$$P = \frac{2\pi \times 3,2 \times 1098,5}{60} = 368 \text{ kW}$$

Net Kazı Miktarı ve Günlük İlerleme Hızının Hesaplanması

Rostami, laboratuvar kesme deneyleri sonucunda elde edilen optimum spesifik enerji değerini kullanarak net kazı miktarı tahminini önermiştir [6]. Net kazı miktarı ve günlük ilerleme hızı denklemleri eşitlik 5.4'te verilmiştir.

$$ICR = kx \frac{P}{SE_{opt}} \quad (5.4)$$

Burada;

ICR : Net kazı miktarı, m³/h

P : Optimum şartlardaki güç gereksinimi, kW

k : Enerji transver katsayısı (0,8-0,9)

SE_{opt} : Optimum spesifik enerji, kWh/m³

$$ICR = 0,8 \times \frac{368 \text{ kW}}{3,5 \text{ kWh/m}^3} = 84,1 \text{ m}^3 / \text{h}$$

5.1.2 Şeyl için 17 inç CCS tip disk keski ile performans tahmini

Şeyl numunesi, bu formasyonu kazacak olan TBM üzerinde bulunan 17 inç (432 mm) CCS tip disk keski ile laboratuvarında kesilmiştir. TBM arazi verilerinde ortalama kesme derinliği (d) 15 mm, keski arası mesafe (s) 80 mm ve kesici kafa dönüş hızı (Rpm) 2,9 devir/dak olarak gerçekleşmiştir. Laboratuvar kesme deneylerinden elde edilen, kesme derinliği ve keski kuvvetleri grafiklerinden, d=15 mm için kesme kuvvetleri bulunmuştur. Tasarım parametrelerinin hesaplanabilmesi için Çizelge

3.78'den normal kuvvet (FN) 10247 kgf, yuvarlanma kuvveti (FR) 1781,9 kgf olarak belirlenmiş ve spesifik enerji (SE) 3,2 kWh/m³ ve kesici kafa dönüş hızı (Rpm) 2,9 devir/dak alınmıştır. Bu kuvvetler kullanılarak TBM performans tahmini yapılmıştır.

TBM İtme Kuvvetinin Belirlenmesi

$$FT = N_c \cdot FN \cdot f_L$$

$$\sum_{n=1}^{n=38} FN = 38 \times 10247 \times 1,2 = 467263 \text{ kgf} = 467,2 \text{ t} = 4672 \text{ kN}$$

TBM Tork Gereksiniminin Belirlenmesi

$$T = \frac{N_c \times FR \times D_{TBM} \times f_L}{4}$$

$$T = \sum_{n=1}^{n=38} FR \times \frac{D_{TBM}}{4} \times f_L$$

$$T = \sum_{n=1}^{n=38} 1781,9 \times \frac{6,57}{4} \times 1,2 = 133460,7 \text{ kgm} = 1334,6 \text{ kNm}$$

TBM Güç Gereksiniminin Belirlenmesi

$$P = 2\pi \frac{RPM}{60} T$$

$$P = \frac{2\pi \times 2,9 \times 1334,6}{60} = 405 \text{ kW}$$

Net Kazı Miktarı ve Günlük İlerleme Hızının Hesaplanması

$$ICR = kx \frac{P}{SE_{opt}}$$

$$ICR = 0,8 \times \frac{405 \text{ kW}}{3,2 \text{ kWh} / \text{m}^3} = 101,2 \text{ m}^3 / \text{h}$$

5.2 Taşınabilir Kazı Seti (PLCM) Kesme Deneyleriyle TBM Performans Tahmini

5.2.1 Fosilli kireçtaşı için mini V tip disk keski ile performans tahmini

Fosilli kireçtaşı numunesi Mini V (130 mm) tip disk keski ile kesilmiştir. PLCM'de kesme derinliği (d) 5 mm'de yapılan kesme deneyleri sonucunda normal kuvvet

2762,8 kgf, yuvarlanma kuvveti 552,1 kgf ve indeks spesifik enerji değeri 43 kWh/m³ olarak bulunmuştur.

TBM İtme Kuvvetinin Belirlenmesi

$$FT = N_c \cdot FN \cdot f_L$$

$$\sum_{n=1}^{n=46} FN = 46 \times 2762,8 \times 1,2 = 152511,5 \text{ kgf} = 152,5 \text{ t} = 1525 \text{ kN}$$

TBM Tork Gereksiniminin Belirlenmesi

$$T = \frac{N_c \cdot FR \cdot D_{TBM} \cdot x f_L}{4}$$

$$T = \sum_{n=1}^{n=46} FR \cdot x \frac{D_{TBM}}{4} \cdot x f_L$$

$$T = \sum_{n=1}^{n=46} 552,1 \times \frac{6,52}{4} \times 1,2 = 49675,7 \text{ kgm} = 496,7 \text{ kNm}$$

TBM Güç Gereksiniminin Belirlenmesi

$$P = 2\pi \frac{RPM}{60} T$$

$$P = \frac{2\pi \times 3,2 \times 496,7}{60} = 166 \text{ kW}$$

Net Kazı Miktarı ve Günlük İlerleme Hızının Hesaplanması

$$ICR = kx \frac{P}{SE_{opt}}$$

$$ICR = 0,8 \times \frac{166 \text{ kW}}{43 \text{ kWh/m}^3} = 3,1 \text{ m}^3 / \text{h}$$

5.2.2 Şeyl için mini V tip disk keski ile performans tahmini

Şeyl numunesi Mini V (130 mm) tip disk keski ile kesilmiştir. PLCM’de kesme derinliği (d) 5 mm’de yapılan kesme deneyleri sonucunda normal kuvvet 1310,9 kgf, yuvarlanma kuvveti 365,2 kgf ve indeks spesifik enerji değeri 24,7 kWh/m³ olarak bulunmuştur.

TBM İtme Kuvvetinin Belirlenmesi

$$FT = N_c \cdot FN \cdot f_L$$

$$\sum_{n=1}^{n=38} FN = 38 \times 1310,9 \times 1,2 = 59778,8 \text{ kgf} = 59,7 \text{ t} = 597 \text{ kN}$$

TBM Tork Gereksiniminin Belirlenmesi

$$T = \frac{N_c \times FR \times D_{TBM} \times f_L}{4}$$

$$T = \sum_{n=1}^{n=38} FR \times \frac{D_{TBM}}{4} \times f_L$$

$$T = \sum_{n=1}^{n=38} 365,2 \times \frac{6,57}{4} \times 1,2 = 27352,7 \text{ kgm} = 273,5 \text{ kNm}$$

TBM Güç Gereksiniminin Belirlenmesi

$$P = 2\pi \frac{RPM}{60} T$$

$$P = \frac{2\pi \times 5,5 \times 273,5}{60} = 157,5 \text{ kW}$$

Net Kazı Miktarı ve Günlük İlerleme Hızının Hesaplanması

$$ICR = kx \frac{P}{SE_{opt}}$$

$$ICR = 0,8 \times \frac{157,5 \text{ kW}}{24,69 \text{ kWh} / \text{m}^3} = 5,1 \text{ m}^3 / \text{h}$$

5.3 TBM Arazi Verileri

5.3.1 Fosilli kireçtaşı için Otogar-Bağcılar TBM verisi

Otogar-Bağcılar raylı toplu taşıma projesi kapsamında İkitelli Sanayi 2 ve İkitelli-Güney Sanayi istasyonları arasında detaylı tünel açma makinesi verisi toplanmış ve analiz edilmiştir. Tünel açma makinesi bu iki istasyon arasında Kırklareli Formasyonu, fosilli kireçtaşı kazısı yaparken 25 Ekim 2008 - 13 Kasım 2008 tarihleri arasındaki toplam 262 ringlik, 366,8 m'lik kazı uzunluğundaki veri değerlendirilmiştir. Bu projede kullanılan tünel açma makinesi her 10 saniyede bir elektronik veri toplamakta ve veri toplama ünitesine kaydedilmektedir. Kesici kafanın dönüş hızı, torku, itme silindirlerinin uzama miktarı ve basınçları, arına uygulanan dengeleme basınç miktarları vb. birçok detaylı fiziksel büyüklük makine veri toplama sistemine kaydedilmiştir. Analizi yapılan kazılarda, bir ring 1,4 m'lik

kazı süresi 22 ile 48 dakika arasında değişmektedir. Bir ringde analiz edilmesi gerekli veri sayısı 132 ile 288 arasında değişmektedir. Bu çalışmada; Otogar-Bağcılar tünel projesinde kullanılan tünel açma makinesinin çalışma parametreleri, kesici kafanın bir dakikadaki dönüş sayısı, tork, ilerleme miktarı ve itme kuvveti analiz edilerek topluca Çizelge 5.3'te görülmektedir.

Çizelge 5.3: Fosilli kireçtaşı için Otogar-Bağcılar tünel açma makinesi çalışma parametrelerinin toplu verisi [11].

Tarih	Toplam ring	Toplam kazı süresi (dak)	RPM (devir/dak)	Tork (kNm)	İtme kuvveti (kN)	ICR (m ³ /h)
2008-10-25	18	821	2,7	2514	14638	62
2008-10-26	12	537	2,6	2639	15904	63
2008-10-27	7	153	2,8	2030	10769	130
2008-10-31	17	718	2,9	1933	11576	67
2008-11-01	22	904	3,0	2002	12634	69
2008-11-02	7	238	3,0	2074	14391	83
2008-11-03	22	702	2,9	1789	10431	89
2008-11-04	25	718	2,9	1918	10646	99
2008-11-05	19	655	3,0	1968	13631	82
2008-11-06	7	307	3,0	2164	15044	65
2008-11-08	12	417	3,0	1818	13008	81
2008-11-09	22	758	3,0	1979	12495	82
2008-11-10	19	759	3,0	2075	13307	71
2008-11-11	17	808	3,0	2184	14764	60
2008-11-12	18	849	3,0	1890	15562	60
2008-11-13	18	877	3,0	1872	8015	58
Ortalama			2,9	2053	12926	76

5.3.2 Şeyl için Kadıköy Kartal TBM verisi

Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Projesi kapsamında Kozyatağı-Yenisahra istasyonları arasında detaylı tünel açma makinesi verisi toplanmış ve analiz edilmiştir [97]. Tünel açma makinelerinde bulunan elektronik veri toplama sistemleri sayesinde, makine kazı yaparken birçok parametrenin kaydı bilgisayara kaydedilmektedir. Bu parametreler, tünel açma makinesinin kazı esnasında, ilerleme hızı, bir devirdeki dönüş hızı, kesici kafanın torku, toplam itme kuvveti vb. şeklinde özetlenebilir. Kozyatağı-Kadıköy Metro Tüneli'nde tünel açma makinesi ilk olarak 14 Ağustos 2007 tarihinde çalışmaya başlamıştır. Kozyatağı-Yenisahra arasında tünel açma makinesi kazı yaparken toplanan veriler 574 ringdir (yaklaşık 861 m.) ve her bir ring için 574 adet veri analiz edilmiştir. Tünel açma makinesinin çalışma parametreleri ve bilgisayar verilerinin toplu analizi Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4: Şeyl için Kadıköy Kartal tünel açma makinesi çalışma parametrelerinin toplu verisi [97].

Veri	İlerleme (mm/dev)	Devir (dev/min)		Tork (MNxm)		İlerleme Hızı (mm/dak)		FT (kN/disk)		FR (kN/disk)		Güç Tüketimi (kW)		Arazi Net Kazı Hızı (m³/h)		Arazi Spesifik Enerjisi (kWh/m³)	
		Ort.	St. Sap.	Ort.	St. Sap.	Ort.	St. Sap.	Ort.	St. Sap.	Ort.	St. Sap.	Ort.	St. Sap.	Ort.	St. Sap.	Ort.	St. Sap.
#																	
1	4	2,5	x	1,5	x	10,0	x	200,7	x	22,4	x	395,1	x	20,3	x	19,4	x
1	6	2,9	x	1,8	x	17,0	x	110,1	x	27,1	x	555,5	x	34,6	x	16,1	x
12	7	2,6	0,2	1,8	0,4	18,2	1,5	174,1	71,3	26,6	5,8	489,8	117,2	36,9	3,0	13,2	2,9
24	8	2,7	0,2	1,9	0,3	22,4	1,6	158,5	43,3	28,2	4,3	546,7	991,0	45,6	3,3	12,0	1,9
42	9	2,7	0,2	1,9	0,3	24,4	2,1	143,1	32,8	28,5	4,6	544,1	101,4	49,5	4,2	11,0	1,9
53	10	2,7	0,2	2,1	0,4	27,6	2,7	139,4	39,4	30,5	6,3	593,0	138,4	56,2	5,5	10,5	2,2
75	11	2,7	0,2	2,0	0,5	29,5	2,9	141,5	38,5	29,8	7,7	574,1	182,5	60,1	5,9	9,4	2,4
59	12	2,7	0,3	2,1	0,4	32,1	3,1	131,8	33,4	31,4	6,6	600,8	161,1	65,2	6,2	9,1	1,9
81	13	2,7	0,3	2,2	0,5	35,3	3,3	142,5	35,0	32,0	7,1	620,3	168,8	71,7	6,8	8,6	1,9
61	14	2,7	0,3	2,0	0,5	37,7	4,5	122,3	32,7	29,9	8,1	579,9	197,7	76,6	9,2	7,4	2,0
57	15	2,6	0,4	2,0	0,5	38,8	5,6	135,4	48,5	29,4	7,5	550,5	189,6	79,0	11,3	6,8	1,8
33	16	2,5	0,4	2,0	0,6	40,1	6,3	135,0	37,0	29,5	8,4	536,3	199,8	81,5	12,8	6,4	1,8
17	17	2,3	0,4	2,0	0,5	39,5	7,2	121,9	31,1	29,0	6,8	491,5	183,5	80,4	14,6	6,0	1,4
12	18	1,9	0,2	1,2	0,5	34,6	4,3	163,3	73,3	18,5	6,8	256,9	123,6	70,3	8,8	3,6	1,3
10	19	1,9	0,3	1,5	0,4	36,3	5,9	126,6	23,2	22,7	6,2	319,9	130,5	73,8	12,0	4,2	1,2
8	20	1,9	0,3	1,6	0,6	36,8	5,8	167,3	52,9	23,9	8,8	325,1	167,3	74,7	11,8	4,2	1,5
10	21	1,7	0,2	1,4	0,6	36,1	4,9	161,4	50,2	21,2	9,6	268,2	163,1	73,4	9,9	3,5	1,6
3	22	1,6	0,1	1,1	0,3	36,0	1,0	105,8	9,0	15,9	4,2	182,4	45,7	73,2	2,0	2,5	0,6
9	23	1,6	0,2	1,2	0,3	35,7	3,4	136,9	27,1	17,7	3,7	199,0	40,8	72,5	6,9	2,7	0,5
4	24	1,6	0,1	1,4	0,3	37,3	26,0	156,2	29,2	21,5	4,2	236,5	32,9	75,7	5,3	3,2	0,7
2	25	1,5	0,1	1,3	0,2	36,5	3,5	157,1	84,6	19,4	2,7	198,1	18,2	74,2	7,2	2,7	0,5
Ortalama	15,0	2,3		1,7		31,5		144,3		25,5		431,6		64,1		7,7	
Minimum	4,0	1,5		1,1		10,0		105,8		15,9		182,4		20,3		2,5	
Maksimum	25,0	2,9		2,2		40,1		200,7		32,0		620,3		81,5		19,4	
St. Sapma	6,3	0,5		0,3		8,4		22,5		5,0		157,7		17,2		4,7	

5.4 Laboratuvar Kesme Verileriyle TBM Arazi Verilerinin Karşılaştırması

Otogar-Bağcılar metro inşasında, fosilli kireçtaşı, kazı yapan Tam cepheli tünel açma makinesinin (TBM) performansı LCM ve PLCM’de yapılan kesme deneyleriyle tahmin edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen bu veriler TBM’in gerçek arazi verileriyle karşılaştırılmak istenmiştir. Aynı çalışma, Kadıköy Kartal hattında, şekilde kazı yapan TBM içinde yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda elde edilen nihai karşılaştırmalar ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.5’te verilmiştir.

Çizelge 5.5: Laboratuvar kesme deneyleri ve TBM arazi verilerinin karşılaştırması.

Fosilli Kireçtaşı							
	FN	FR	SE	İtme Kuvveti	Tork	Güç	ICR
	(kgf)	(kgf)	(kWh/m ³)	(kN)	(kNm)	(kW)	(m ³ /h)
LCM (15 inç V tip disk)	9843,1	1224,6	3,6	5322,0	1098,5	368,0	84,1
PLCM (Mini V tip disk)	2762,9	552,1	43,0	1525,0	496,7	166,0	3,1
TBM arazi verisi	-	-	-	12926,0	2053,0	623	76,0
Şeyl							
	FN	FR	SE	İtme Kuvveti	Tork	Güç	ICR
	(kgf)	(kgf)	(kWh/m ³)	(kN)	(kNm)	(kW)	(m ³ /h)
LCM (17 inç CCS disk)	10247,0	1781,9	3,2	4672	1334,6	405	101,2
PLCM (Mini V tip disk)	1310,9	365,2	24,7	597,0	273,5	157,5	5,1
TBM arazi verisi	-	-	-	5483,4	1700,0	431,0	64,1

Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

Tam boyutlu kazı setinde (LCM) fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan kazı deneyleri sonucunda, laboratuvar optimum koşullar altında elde edilen değerler, tam cepheli tünel açma makinesinin (TBM) arazi verileriyle karşılaştırılmıştır. Tam boyutlu doğrusal kazı seti ile gerçekleştirilen performans tahmininde; TBM itme kuvveti 5322 kN, tork gereksinimi 1098,5 kNm, güç gereksinimi 368 kW ve net kazı miktarı 84,1 m³/h olarak belirlenmiştir. Tam cepheli tünel açma makinesinin, kazı esnasında kayıt altına alınan verilerinin analizi sonucunda ise itme kuvveti 12926 kN, tork gereksinimi 2053 kNm, güç gereksinimi 623 kW ve net kazı miktarı 76 m³/h olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalar sonucunda, fosilli kireçtaşı için tam boyutlu doğrusal kazı setiyle elde edilen net kazı miktarının arazi verileriyle örtüştüğü gözlenmiştir. Şeyl kazısı yapan tam cepheli tünel açma makinesinin arazi verileri incelendiğinde (Çizelge 5.4), TBM’in ortalama 15 mm kesme derinliğinde kazı yaptığı görülmüştür. LCM kazı deneylerinden elde edilen kesme derinliği ve

keski kuvvetleri grafiklerinden 15 mm kesme derinliği için gerekli olan normal kuvvet (FN) 10247 kgf ve yuvarlanma kuvveti (FR) 1781,9 kgf olarak hesaplanmıştır. TBM itme kuvveti 4672 kN, tork gereksinimi 1334,6 kNm, güç gereksinimi 405 kW ve net kazı miktarı 101,2 m³/h olarak belirlenmiştir. Tam cepheli tünel açma makinesinin, kazı esnasında kayıt altına alınan verilerinin analizi sonucunda ise itme kuvveti 5483,4 kN, tork gereksinimi 1700 kNm, güç gereksinimi 431 kW ve net kazı miktarı 64,1 m³/h olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalar sonucunda, şeyl için tam boyutlu doğrusal kazı setiyle elde edilen net kazı miktarının arazi verileriyle örtüşmediği gözlenmiştir. Bunun en önemli sebebi; şeyl numunesindeki tabakalı yapının, kazı performansını doğrudan etkilemiş olmasıdır.

LCM için, büyük numune temini ve yetişmiş elemana ulaşma zorluğu bulunduğundan, deneylerin yapılması zaman almaktadır. Bu sebepten, TBM performans tahmini için PLCM ile LCM arasındaki ilişki üzerinde durulmuş ve LCM ile PLCM arasında TBM performansı tahmini açısından bir ilişkinin olup olmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Hem fosilli kireçtaşı hem de şeyl numunesi için yapılan tork tahmininde LCM'den elde edilen değer PLCM'den elde edilen değerin yaklaşık 2 katıdır, g tahmininde bu oran yaklaşık 2 kattır, itme kuvveti oranı ise yaklaşık 4 kattır, net kazı hızı oranı ise yaklaşık 25 kattır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) laboratuvar kaya kesme deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar kesme deneylerinde üç farklı kayaç numunesi kullanılmıştır. Bunlar; arkoz (masif ve klastik yapıya sahip), şeyl (tabakalı yapıya sahip) ve fosilli kireçtaşıdır (boşluklu ve fosilli yapıya sahip). Bu üç farklı kayaç numunesi, İstanbul'da tünel açma makinelerinin (TBM) kullanıldığı iki farklı metro tünel inşasından getirilmiştir. Bu tüneller; Kartal-Kadıköy ve Başakşehir-İkitelli metro inşaatlarıdır. İstanbul'un altyapı ulaşım sorununu hızlıca çözebilmek için, altyapı projeleri İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından tam cepheli tünel açma makinelerinin (TBM) kullanımı şartıyla ihaleye çıkarılmaktadır. Türkiye ve dünyada kullanımı hızla artan tam cepheli tünel açma makinelerinin performansının önceden tahmini günümüzde en çok irdelenen kazı mekaniği konusu olarak güncelliğini korumaktadır.

Kartal-Kadıköy metrosundan arkoz ve şeyl numuneleri, Başakşehir-İkitelli metrosundan ise fosilli kireçtaşı numunesi İTÜ Maden Fakültesi Kazı Mekaniği Laboratuvar'ına getirilmiştir. Numuneler üzerinde yapılacak deneyler belirlenmiş ve bir dizi deney programı oluşturulmuştur. İlk önce numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Kesme deneylerinin tam boyutlu doğrusal kazı (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) yapılmasına karar verilmiştir. Bu iki deney seti için, her üç kayaçtan kesme deney numuneleri hazırlanmıştır. Tam boyutlu doğrusal kazı setinde (LCM), bu üç numuneyi kesmek için, üç farklı keski tipi belirlenmiştir. Bunlar; 13 inç (330mm) CCS, 15 inç (380mm) V ve 17 inç (432 mm) CCS disk keskilerdir. Taşınabilir doğrusal kazı setinde (PLCM) ise mini V (130mm) disk keski kullanılmıştır. LCM'de kesme deneyleri, yardımcı ve yardımcı koşullarda yapılmıştır. PLCM'de ise kesme deneyleri 5 mm kesme derinliğinde yapılmıştır.

Arkoz numunesi üzerinde yapılan doğrusal kesme deneylerinde şu sonuçlar elde edilmiştir: 13 inç CCS tip disk keski ile yardımcı kesme deneyleri iki farklı keskilere arası mesafede yapılmıştır, bunlar; $s=70$ mm ve $s=80$ mm'dir. Arkoz numunesi için 13 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, $s=70$ mm ve

$d=5$ mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji $5,0 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 14 olarak bulunmuştur. 15 inç (380 mm) V tip disk keski ile yardımcı kesme deneyleri $s=40$ mm'de yapılmıştır. Arkoz numunesi için 15 inç V tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, $s=40$ mm ve $d=5$ mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji $5,5 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 8 olarak bulunmuştur. 17 inç CCS tip disk keski ile yardımcı kesme deneyleri $s=80$ mm'de yapılmıştır. Arkoz numunesi için 17 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, $s=80$ mm ve $d=7$ mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji $3,5 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 11,4 olarak bulunmuştur.

Şeyl numunesi üzerinde yapılan doğrusal kesme deneylerinde şu sonuçlar elde edilmiştir: 13 inç CCS tip disk keski ile yardımcı kesme deneyleri iki farklı keskiler arası mesafede yapılmıştır, bunlar; $s=80$ mm ve $s=100$ mm'dir. Şeyl numunesi için 13 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri; $s=80$ mm için, $d=5$ mm'de elde edilmiş (optimum $s/d=10$) ve optimum spesifik enerji $3,0 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. $s=100$ mm için ise, optimum koşullar $d=9$ mm'de elde edilmiş (optimum $s/d=11$) ve optimum spesifik enerji $2,3 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. $s=80$ mm ve 100 mm'de keskiler arası mesafede kesme derinliği arttıkça keskiye gelen kuvvetler artmaktadır fakat spesifik enerji sabit kalmıştır. Spesifik enerjinin sabit kalmasının sebebi olarak şeyl numunesinin tabakalanmaya paralel kesilmesi gösterilebilir. 15 inç V tip disk keski ile yardımcı kesme deneyleri $s=80$ mm'de yapılmıştır. Şeyl numunesi için 15 inç V tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, $s=80$ mm ve $d=9$ mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji $2,1 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 8,9 olarak bulunmuştur. 17 inç CCS tip disk keski ile yardımcı kesme deneyleri $s=80$ mm'de yapılmıştır. Kesme deneylerinde spesifik enerji sabit kalmıştır, bunun sebebi; şeyl numunesinin tabakalanmaya paralel kesilmesi gösterilebilir. Şeyl numunesi için 17 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, $s=80$ mm ve $d=9$ mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji $2,4 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 8,9 olarak bulunmuştur.

Fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan doğrusal kesme deneylerinde şu sonuçlar elde edilmiştir: 13 inç CCS tip disk keski ile yardımcı kesme deneyleri $s=75$ mm'de yapılmıştır. Fosilli kireçtaşı numunesi için 13 inç CCS tip disk keski ile elde edilen

optimum kesme parametreleri, $s=75$ mm ve $d=7$ mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji $2,9 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 10,7 olarak bulunmuştur. 15 inç V tip disk keski yardımcı kesme deneyleri $s=75$ mm'de yapılmıştır. Fosilli kireçtaşı numunesi için 15 inç V tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri, $s=75$ mm ve $d=12$ mm'de elde edilmiş ve optimum spesifik enerji $3,5 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. Optimum s/d oranı 6,3 olarak bulunmuştur. 17 inç CCS tip disk keski ile yardımcı kesme deneyleri iki farklı keskiler arası mesafede yapılmıştır, bunlar; $s=75$ mm ve $s=90$ mm'dir. Fosilli kireçtaşı numunesi için 17 inç CCS tip disk keski ile elde edilen optimum kesme parametreleri; $s=75$ mm için, $d=7$ mm'de elde edilmiş (optimum $s/d=10,7$) ve optimum spesifik enerji $2,1 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur. $s=90$ mm için, $d=9$ mm'de elde edilmiş (optimum $s/d=10$) ve optimum spesifik enerji $2,2 \text{ kWh/m}^3$ bulunmuştur.

Tam boyutlu doğrusal kazı seti (LCM) ve taşınabilir doğrusal kazı setinden (PLCM) elde edilen keski kuvvetleri, Roxborough V uçlu disk kesme teorisi ve Rostami-Ozdemir sabit kesit alanlı (CCS) disk teorisi ile karşılaştırılmıştır. Disk keski teorileri ile laboratuvar keski değerleri arasında yüksek belirlilik katsayısı (R^2) ve uygun trendler elde edilmiştir. Buradan yola çıkarak, keski tipinin ve kayaç özelliklerinin kesme performansına etkisi ve PLCM'den TBM'lerde kullanılan disk keskiler için tahmin yapmanın mümkünlüğü araştırılmıştır.

Keski tipinin kesme performansına etkisini ortaya koyabilmek için bir seri doğrusal kesme deneyi yapılmıştır. Sabit kesit alanlı disk keskiler için, disk keski çapı ve keskiye gelen kuvvetler (FN, FR) ve spesifik enerji (SE) arasında bir geçişin yapıp yapılamayacağı, eğer yapılabiliyorsa bir geçiş katsayısının (k_1 , k_2 , k_3) belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Deneylerde kullanılan numuneler birbirinden farklı özelliklere sahiptir, bu sebepten ötürü her formasyon türü için farklı bir geçiş katsayısı belirlenmeye çalışılmıştır. Disk keski çapının etkisinin net olarak belirlenebilmesi için kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar disk uç genişlikleri göz önüne alınarak normalize edilmiştir. Yapılan araştırmaların sonucu olarak; 13 inç CCS tip disk keskidən 17 inç CCS tip disk keskiye geçiş için kullanılabilecek ilişkiler aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

Masif ve klastik formasyon için (Arkoz)

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 0,77x \frac{FN_1}{FN_2}$$

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 0,36x \frac{FR_1}{FR_2}$$

Tabakalı formasyon için (Seyl)

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 0,68x \frac{FN_1}{FN_2}$$

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 0,46x \frac{FR_1}{FR_2}$$

Fosilli formasyon için (Fosilli kireçtaşı)

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 1,20x \frac{FN_1}{FN_2}$$

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = 0,76x \frac{FR_1}{FR_2}$$

Üç tip kayaç için spesifik enerji değişimi

$$\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} = (0,30 \sim 0,35)x \frac{SE_1}{SE_2}$$

LCM’de deney yapmak zor ve uzmanlık gerektirdiğinden, PLCM’de mini V disk keski ile d=5 mm indeks kesme derinliğinden LCM kesme değerlerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Üç farklı kayaç numunesinin değerleri Şekil 4.13-14 ve 15’te görüldüğü üzere aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir. Bu eşitlikler kullanılarak V tip keski için PLCM’den LCM değerlerine geçiş yapılabileceği öngörülmüştür.

$$FN_{LCM} = 1,83.FN_{PLCM} - 321,7 \quad R^2=0,89$$

$$FR_{LCM} = 0,67.FR_{PLCM} + 34,1 \quad R^2=0,98$$

$$SE_{LCM} = 0,09.SE_{PLCM} + 0,5 \quad R^2=0,63$$

$$SE_{opt(LCM)} = 0,56.e^{0,04.SE_{indeks(PLCM)}} \quad R^2=0,87$$

Günümüzde tam cepheli tünel açma makinelerinde (TBM) sıklıkla 17 inç sabit kesit alanlı (CCS) disk keski kullanılmaktadır. LCM kesme deneyleri yapmadan bu keskiye gelecek kuvvetler PLCM'den tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu tahmin için gerekli olan eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$FN_{LCM} = 4,65.FN_{MLCM} - 827 \quad R^2=0,96$$

$$FR_{LCM} = 2,15.FR_{MLCM} - 420 \quad R^2=0,99$$

Kayaç tipinin kesme performansına etkisi için yapılan çalışmalarda, kesme performansını etkileyen en önemli parametrenin kayaçların yapısal ve petrografik özellikleri olduğu söylenebilir. Tabakalı yapıya sahip şeyl numunesinde üç tip keski içinde en düşük keski kuvvetlerine ve spesifik enerji değerine ulaşılmıştır. Masif ve sert formasyonlarda en yüksek keski kuvvetlerine ve spesifik enerji değerlerine ulaşılmıştır.

Tam boyutlu kazı setinde (LCM) ile elde edilen veriler, tam cepheli tünel açma makinesinin (TBM) arazi verileriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalar sonucunda fosilli kireçtaşı için LCM ile elde edilen net kazı miktarının arazi verileriyle örtüştüğü gözlenmiştir. Şeyl kazısı yapan tam cepheli tünel açma makinesinin arazi verileri incelendiğinde, TBM'in ortalama 15 mm kesme derinliğinde kazı yaptığı görülmüştür. LCM kazı deneylerinden elde edilen kesme derinliği ve keski kuvvetleri grafiklerinden 15 mm kesme derinliği için gerekli olan FN ve FR hesaplanmıştır ve bu kuvvetlerle hesaplanan TBM itme kuvveti, tork ve güç gereksiniminin arazi verilerini desteklediği gözlenmiştir.

Bu çalışma, laboratuvar ve arazi çalışmalarından oluşmaktadır. Laboratuvarda yapılan çalışmalar uzun süreli ve emek yoğunudur. Bugüne kadar yapılan teorik çalışmalarda (matematiksel) oluşturulan kuvvet tahminleri kayaçların basınç ve çekme dayanımlarını kullanmaktadır. Bu çalışmada, basınç ve çekme dayanımları birbirine yakın olan kayaçlar seçilerek kayaç iç yapısının kazı performansına etkisi araştırılmış ve arazide bu formasyonları kesen tünel açma makinelerinin performansları ile sonuçlandırılmıştır. İleride yapılacak olan çalışmalara ışık tutmak amacı ile yapılacak yeni çalışmalarda; keski çapları farklı olan diğer disk keski (15 inç CCS ve 19 inç CCS) seçilmelidir. Tabakalı formasyonlarda, tabaka açısının yönü kesme deneylerinde önem arz etmektedir. Farklı tabaka açılarında kaya kesme deneyleri

yapılarak, tabaka açısının kazı performansına etkisi araştırılmalıdır. Taşınabilir doğrusal kazı seti (PLCM) deneylerinde, tünel açma makinesi performans tahmini için veri tabanı geliştirilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Stack, B.**, 1995. Encyclopaedia of tunnelling mining and drilling equipment, Vol. 1-2, *Mining Hobart Muden Publishing Company*, Hobart, Australia, pp. 1911.
- [2] **Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., Feridunoğlu, C., ve Tumaç, D.**, 2006. Kaya kazı makinelerinin (galeri ve tünel açma makineleri gibi) optimum seçiminde kullanılmak üzere taşınabilir bir test cihazının geliştirilmesi, *TÜBİTAK Araştırma Projesi Nihai Rapor, Proje No: MİSAG-274 (104M013)*.
- [3] **Rostami, J., and Ozdemir, L.**, 1993. A new model for performance prediction of hard rock TBM's, *Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*, Boston MA, June 13-17, pp. 793-809.
- [4] **Rostami, J., Ozdemir, L., and Nilsen, B.**, 1996. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models, *In: Proceedings, The Annual Conference of the Institution of Shaft Drilling Technology (ISDT)*, Las Vegas, pp. 11.
- [5] **Roxborough, F. F., and Phillips, H. R.**, 1975. Rock excavation by disc cutter, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **12**, pp. 361-366.
- [6] **Rostami, J., Ozdemir, L., and Neil, D. M.**, 1994. Performance prediction: a key issue in mechanical hard rock mining, *Mining Engineering*, Nov, pp. 1263-1267.
- [7] **Bilgin, N.**, 1989. İnşaat ve Maden mühendisleri için uygulamalı kazı mekaniği, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- [8] **Pakes, G.**, 1991. Selection of methods, *World Tunnelling*, Vol. 4, no. 9, pp.399-403.
- [9] **Copur, H., Rostami, J., Ozdemir, L., and Bilgin, N.**, 1997. Studies on performance prediction of roadheaders based on field data in mining and tunneling projects, *Fourth International Symposium on Mine Mechanization and Automation*, Vol. 1, Brisbane, Queensland, pp.1-7.
- [10] **Tumac, D.**, 2004. Küçük tünellerinde kollu galeri açma makinesinin performans tahminin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Müh. Programı.
- [11] **Balcı, C., Bilgin, N., Çopur, H., ve Tumaç, D.**, 2009. Tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) performans tahmini ve optimizasyonu, *TÜBİTAK Araştırma Projesi Nihai Raporu, Proje No: 106M298*.
- [12] **Ozdemir, L.**, 1992. Mechanical excavation techniques in underground construction, *Short Course Note*, Vol. 1, pp. 427.

- [13] **Url 1** <<http://www.fhwa.dot.gov/Bridge/tunnel/pubs/nhi09010/appd.cfm>>, alındığı tarih 13.03.2010.
- [14] **Bilgin, N., and Çopur, H.**, 2002. Mechanization in mines and tunnel excavation (MAD 412E), *İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Lisans Ders Notları*.
- [15] **Hekimoğlu, O. Z., ve Fowell, R. J.**, 1988. Bomlu kazı makinelerinin temel özellikleri ve seçimleri, *Kömür Kongresi*, Zonguldak, pp. 1-17.
- [16] **Url 2** <<http://www.astt.com.au/instal.htm>> alındığı tarih 13.03.2010.
- [17] **Yazıcı, S.**, 1984. Galeri açma makinelerinin seçimi için kazılabilirliğin saptanması, *Madencilik Dergisi*, Mart, pp. 23-31.
- [18] **Url 3** <<http://www.apsystems.com.au/products/applications/surface>> alındığı tarih 13.03.2010.
- [19] **Franklin, J. A., and Dusseault, M. B.**, 1989. *Rock Engineering*, New York: McGraw-Hill.
- [20] **Ozdemir, L.**, 1995. Mechanical mining, *Short Course Notebook*, Colorado School of Mines, Mining Eng. Dept., Golden.
- [21] **Balci, C., Bilgin, N., Copur, H., Tumac, D., ve Akgün, M.**, 2007. Tünel açma makinelerinin (TBM) tam boyutlu kesme deneyi ile performans tahmini, *Birinci Maden Makinaları Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, ISBN 978-9944-89-277-3, Kütahya, Türkiye, pp. 61-70.
- [22] **Graham, P. C.**, 1976. Rock exploration for machine manufacturers, *Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, South Africa, Nov., pp. 173-180.
- [23] **Mc-Feat, I., and Tarkoy, P. J.**, 1979. Assessment of tunnel boring machine performance, *Tunnels and Tunnelling*, pp. 33-37.
- [24] **Farmer, I. W., and Glossop, N. H.**, 1980. Mechanics of disc cutter penetration, *Tunnels and Tunneling*, Vol. 12, Jan., pp. 22-25.
- [25] **Cassinelli, F.**, 1982. Power consumption and metal wearing tunnel boring machines: Analysis of tunnel boring operation in hard rock, *Tunnelling'82, IMM*, London, pp. 73-81.
- [26] **Howarth, D. F.**, 1986. Review of rock drillability and borability assessment methods, *Transaction of the Institution of Mining and Metallurgy*, Section A, pp. 191-202.
- [27] **Bamford, W. E.**, 1984. Rock test indices are being succesfully correlated with tunnel boring machines performance, *Fifth Australian Tunnelling Conference*, Sydney, pp. 218-221.
- [28] **Hughes, H.M.**, 1986. The relative cuttability of coal-measures stone, *Mining Science and Technology*, 3/2, pp. 95-109.
- [29] **Lislerud, A.**, 1988. Hard rock tunnel boring: prognosis and costs, *Tunnelling and Underground Space Technolohy*, Vol. 3, no. 1, pp. 9-17.
- [30] **Peach, T.**, 1994. TBM optimisation, *World Tunnelling*, April, pp. 120-123.

- [31] **Barton, N.**, 1999. TBM Performance estimation in rock using Q_{TBM} , *Tunnels and Tunnelling International*, Sep., pp. 30-34.
- [32] **Wijk, G.**, 1992. A model of tunnel boring machine performance, *Geotech. Geol. Eng.*, Vol. **10**, pp. 19–40.
- [33] **Yagiz, S.**, 2008. Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23 (3), pp. 326–339.
- [34] **Rostami, J.**, 2008. Hard rock TBM cutterhead modeling for design and performance prediction, *Geomechanik und Tunnelbau*, Vol. **1**, pp. 18-28.
- [35] **Hamidi, J. K., Shahriar, K., Rezai, B., and Rostami, J.**, 2010. Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system, *Tunnelling and Underground Space Technology*, DOI: 10.1016/j.tust.2010.01.008.
- [36] **Maidle, B., Schmidz, L., Ritz, W., and Herrenknecht, M.**, 2008. Hard rock tunnel boring machines, *Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften GmbH & Co. KG*, ISBN 978-3-433-01676-3, Berlin.
- [37] **Fairhurst, C., and Lacabanne, W. D.**, 1956. Some principles and developments in hard rock drilling techniques, *6th Annual Drilling and Blasting Symposium*, Minneapolis, pp. 15-25.
- [38] **Hartman, H. L.**, 1959. Basic studies of percussion drilling, *Mining Engineering Magazine* (11), pp. 68–75.
- [39] **Tandanand, S., and Hartman, H. L.**, 1962. Stress distribution beneath a wedge-shaped drill bit loaded statically, *International Symposium on Mining Research*, New York, Vol. **2**, pp. 799-83.
- [40] **Frocht, M. M., Flynn, P. D., and Landsberg, D.** 1957. Handbook of experimental stress analysis, *The Japan Society of Mechanical Engineers, Soc. Exp. Stress Anal Proc.*, Vol. **14**, no. 2, ISSN:00214728, pp. 81-90.
- [41] **Hetenyi, M.**, 1966. Handbook of experimental stress analysis, New York, Wiley.
- [42] **Cheatham, J. B.**, 1958. An analytical study of rock penetration by a single bit Tooth, *Proceedings of the 8th Annual Drilling and Blasting Symposium*.
- [43] **Gring, P. F., and Cheatham, J. B.**, 1963. Indentation experiments on dry rock under pressure, *Transactions of Society of Petroleum Engineers, AIME*, pp. 1031-1039.
- [44] **Pariseau, W. G., and Fairhurst, C.**, 1967. The Force penetration characteristic for wedge penetration into rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. **4**, pp. 165-180.
- [45] **Reichmuth, D. R.**, 1963. Correlation of force-displacement data with physical properties of rock for percussive drilling systems, *Rock Mechanics*, New York, pp. 33–60.

- [46] **Paul, B., and Sikarskie, D. L.,** 1965. A preliminary theory of static penetration by a rigid wedge into brittle material, *Transactions Society of Mining Engineers, AIME* 232, pp. 372–383.
- [47] **Miller, M. H., and Sikarskie, D. L.,** 1968. On the penetration of rock by three-dimensional indenters, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Amp; Geomechanics Abstracts* 5(5), pp. 375-398.
- [48] **Benjumea, R., and Sikarskie, D. L.,** 1969. A note on the penetration of a rigid wedge into a nonisotropic brittle material, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Amp; Geomechanics Abstracts* 6 (4), pp. 343-352.
- [49] **Jaeger, J. C.,** 1960. Shear failure of anisotropic rocks. *Geological Magazine* 97, pp. 65-72.
- [50] **Jaeger, J. C.,** 1962. Elasticity, fracture and flow, *Methuen & Co. and Wiley Press*, London and New York.
- [51] **Dutta, P. K.,** 1972. A theory of percussive drill bit penetration, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 9, pp. 543–567.
- [52] **Lundberg, B.,** 1974. Penetration of rock by conical indenters, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, pp. 209–214.
- [53] **Lundqvist, R. G.,** 1981. Hemispherical indentation and the design of button bits for percussive drilling. In: *Proc. 22nd Symposium of Rock Mechanics, AIME*, Cambridge, pp. 219–222.
- [54] **Lindqvist, P. A., and Lai, H. H.,** 1983. Behaviour of the crushed zone in rock indentation, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 16, no. 3, ISSN: 0723-2632.
- [55] **Cook, N. G. W., Hood, M., and Tsai, F.,** 1984. Observations of crack growth in hard rock loaded by an indenter, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* 21 (2), pp. 97–107.
- [56] **Pang, S. S., Goldsmith, W., and Hood, M.,** 1989. A force-indentation model for brittle rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering* (22), pp. 127–148.
- [57] **Alehossein, H., Detournay, E., and Huang, H.,** 2000. Approximate solutions for indentation of rocks with blunt tools, *Rock Mechanics and Rock Engineering* (4), pp. 33.
- [58] **Ozdemir, L., Miller, R. S., and Wang F.D.,** 1978. Mechanical tunnel boring prediction and machine design. *Report to National Science Foundation*, Colorado School of Mines, Golden, pp. 313.
- [59] **Sanio, H. P.,** 1985. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* 22 (3), pp. 153–161.
- [60] **Rostami, J., and Ozdemir, L.,** 1997. Selection design optimization and performance prediction of tunnel boring machines for mining operations, *Preprints of SME 126th Annual Meeting & Exhibit*, Colorado, pp. 97-189.

- [61] **Phillips, H. R., Bilgin, N., and Price, D. L.,** 1978. The influence of type tip geometry on the design of disc cutter arrays, *Proc. 3rd Austin Tunnelling Conference*, Sydney, pp. 48-52.
- [62] **Ouchterlony, F.,** 1974. Fracture mechanics applied to rock blasting, *In: Proceedings of the 3th Congress of The International Society of Rock Mechanics* Vol. **2B** ISRM, Denver, pp. 1377–83.
- [63] **Sato, K., Gong, F., and Itakura, K.,** 1993. Measurement of tool force and twist exerted on TBM disc cutters, *Proceedings of 2nd International Mine Mechanization and Automation Symposium*, University of Lulea', Lulea, Sweden.
- [64] **Korinets, A., Chen, L., Alehossein, H., and Lim, W.,** 1996. Diana modeling of a rolling disc cutter and rock indentation, *2nd NARMS Rock Mechanics Tools and Techniques*, Montreal, pp. 647–54.
- [65] **Guan, Z.,** 1997. Mechanics of rock/tool/machine interaction in disc rock cutting, *Ph.D. Thesis*, Mining Engineering Department, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- [66] **Erdoğan, F., and Sih, G. C.,** 1963. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, *ASME Journal of Basic Engineering*, **10**, pp. 519-527.
- [67] **Sih, G. C.,** 1973. Some basic problems in fracture mechanics and new concepts, *Engineering of Fracture Mechanics*, pp. 365-377.
- [68] **Griffith, A.,** 1921. The phenomena of rupture and flow in solids, *Philosophical Transaction, London Royal Society, Series A*, **221**, pp: 163-198.
- [69] **Irwin, G. R.,** 1956. Relation of stresses near a crack to the crack extension force, *9th Congress Applied Mechanics*, Brussels.
- [70] **Huang, H. Y.,** 1999. Discrete element modeling of tool-rock interaction, *University of Minnesota Pres.*, Minneapolis, MN.
- [71] **Takaoka, S., Hayamizu, H., and Misawa, S.,** 1973. Studies on the cutting of rock by rotary cutters – part 2 –cutting using a spherical chip and a milled tooth cutter, *Tunnels and Tunneling*, pp. 276-283.
- [72] **Takaoka, S., Hayamizu, H., and Misawa, S.,** 1973. Studies on the cutting of rock by rotary Cutters – part 1 – rock cutting by disc cutters, *Tunnels and Tunneling*, pp. 181-185.
- [73] **Roxborough, F. F.,** 1969. Rock cutting research, *Tunnels and Tunneling*, pp. 125-128.
- [74] **Roxborough, F. F.,** 1973. Cutting rock with picks, *The Mining Engineer*, June, pp. 445-452.
- [75] **Rostami, J., and Ozdemir, L.,** 1996. Modeling for design and performance analysis of mechanical excavators, *Proc. Conf. on Mechanical Excavation's Future Role in Mining*, World Rock Boring Association, Sudbury, Ontario, Canada.

- [76] **Rostami, J.**, 1997. Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure, *Ph.D. Thesis*, Colorado School of Mines, Golden CO.
- [77] **Gong, Q. M., Zhao, J., and Jiang, Y. S.**, 2007. In situ TBM penetration tests and rock mass boreability analysis in hard rock tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, (22), pp. 303–316.
- [78] **Ozdemir, L., Yağız, S., Cigla, M., Asbury, B., and Kim, T.**, 2000. Queens water tunnel no.3 stage.2 report. *Earth Mechanics Institute, Colorado School of Mines*, Golden CO.
- [79] **Cigla, M., Yağız, S., and Ozdemir, L.**, 2001. Application of tunnel boring machines in underground mining development, *17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey IMCET*, pp.155-164.
- [80] **Samuel, A. E., Seow, L. P.**, 1984. Disc force measurements on a full-face tunnelling machine, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 21, no. 2, pp. 83-96.
- [81] **Zhang, Z. X., Yu, J., Kou, S. Q., and Lindqvist, P. A.**, 2001. Effects of high temperatures on dynamic rock fracture, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38 (2), pp. 211–225.
- [82] **ISRM**, 1981. Rock characterization testing and monitoring; suggested methods, E. T. Brown, Pergamon Pres. Oxford, pp. 211.
- [83] **ASTM**, D5731. Standard test method for determination of the point load strength index of rock.
- [84] **Karpuz, C., ve Hindistan, M. A.**, 2006. Kaya mekaniği ilkeleri ve uygulamaları, *Türkiye Maden Mühendisleri Odası Yayını*, Ankara.
- [85] **CNS Electronics Ltd.** Pundit portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester, *Operating Manual*, London.
- [86] **King, M. S.**, 1983. Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomech. Abstr.* Vol. 20, no. 5, pp. 237-241.
- [87] **Kahraman, S.**, 2002. Estimating the P-wave velocity value of intact rock from indirect laboratory measurements, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, pp. 101-104.
- [88] **Mc-Feat, I., and Tarkoy, P.**, 1979. Assessment of tunnel boring machine performance, *Tunnels and Tunnelling*, pp. 33-37.
- [89] **Tumac, D., Bilgin, N., Feridunoglu, C., and Ergin, H.**, 2007. Estimation of rock cuttability from shore hardness and compressive strength properties, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 40, no.5, pp. 477-490.
- [90] **National Coal Board**, 1972. NCB cone indenter. *Mining Research and Development Establishment, MRDE Handbook*, London, England.
- [91] **West, G.**, 1989. Rock abrasiveness testing for tunnelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 26, pp. 151-160.

- [92] Eskikaya, S., Bilgin, N., ve diğ., 2000. Development of rapid excavation technologies for the Turkish mining and tunnelling industries, *NATO TU-Excavation Sff Programme Project Report: 172*, Istanbul Technical University.
- [93] Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Tumac, D., Akgul, M., and Yuksel, A., 2008. The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in Istanbul Kozyatagi-Kadikoy metro tunnels, *World Tunnel Congress 2008*, Agra, India, pp: 1509-1517.
- [94] Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., Tumac, D., Akgül, M., Yüksel, A., ve Kahriman, A., 2007. Kadıköy–Kartal metro tünellerinde kullanılacak tünel açma makinelerinin (TBM) bazı tasarım parametrelerinin kesme deneyleri ile belirlenmesi ve performans tahmini, *Ulaşımında Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası*, ISBN 978-9944-89-400-5, pp. 63-71.
- [95] Ozdemir, L., 1975. A laboratory and field investigation of tunnel boreability, *M.Sc. Thesis*, T1755, Colorado School of Mines, Golden CO, 184.
- [96] Bilgin, N., Copur, H., Balcı, C., Tumac, D., Akgül, M., and Yüksel, A., 2008. The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in Istanbul Kozyatagi-Kadikoy metro tunnels, *Proceedings of World Tunnel Congress, India*, pp. 1509-1517.
- [97] Balcı, C., 2009. Correlation of Cutting tests with field performance of a TBM in highly fractured rock formation: A case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, no.4, pp. 423-435.
- [98] Tuncdemir, H., Bilgin, N., Copur, H., and Balcı, C., 2008. Control of rock cutting efficiency by muck size, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 45, Issue 2, Feb., pp. 278-288.
- [99] Roxborough, F. F., and Rispin, A., 1973. The mechanical cutting characteristics of the lower chalck, *Tunnels & Tunnelling*, 5, pp.45-67.
- [100] Yüksel, A., Sözak, N. N., and Gulle, G., 2006. Engineering geology report prepared for Kadıköy Kartal metro tunnels.
- [101] Bilgin, N., Balcı, C., Tumaç, D., Feridunoğlu, C., and Çopur, H., 2010. Development of a portable rock cutting rig for rock cuttability determination, *EUROCK 2010-Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering*, basım aşamasında.
- [102] Feridunoglu, C., 2009. Kayaç kazılabilirliğinin tayini için taşınabilir kayaç kesme deney aletinin geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Müh. Programı.

EKLER

EK A: Detaylı Doğrusal Kesme Deney Sonuçları

EK B: Elek Analizi Sonuçları

EK A

Çizelge A.1: 13 inç CCS disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
3	yardımsız	-	6218,8	7872,9	504,8	962,8	15,8
3	yardımsız	-	3874,5	8384,8	346,0	828,4	11,7
3	yardımsız	-	4052,8	7462,2	313,2	711,5	15,7
3	yardımsız	-	6124,8	10047,4	583,7	1166,8	18,0
	ortalama		5067,7	8441,8	436,9	917,4	15,3
5	yardımsız	-	8509,7	14073,4	1099,9	1995,6	6,7
5	yardımsız	-	6432,1	11578,2	927,2	1847,7	5,5
	ortalama		7470,9	12825,8	1013,5	1921,6	6,1
7	yardımsız	-	10065,9	16394,4	1702,7	2967,3	5,1
7	yardımsız	-	10750,5	16216,4	1527,0	2267,3	5,1
7	yardımsız	-	10467,3	17080,8	1749,6	3224,3	7,1
	ortalama		10427,9	16563,9	1659,8	2819,6	5,8

Çizelge A.2: 13 inç CCS disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
3	70	23,3	4608,5	7056,2	396,1	688,0	3,0
3	70	23,3	4830,5	6931,8	391,3	589,2	9,1
3	70	23,3	3573,2	6513,8	272,5	660,7	4,5
3	70	23,3	3017,2	6959,3	278,1	688,0	2,9
3	70	23,3	4082,7	6152,3	322,0	547,8	25,3
ortalama			4022,4	6722,7	332,0	634,7	8,9
5	70	14,0	6249,3	14163,2	878,8	1861,9	4,2
5	70	14,0	6080,0	10818,7	761,5	1508,2	3,8
5	70	14,0	8381,8	14085,3	983,0	1725,9	5,9
5	70	14,0	6141,9	10289,0	605,9	1125,5	5,4
5	70	14,0	4191,9	6776,0	528,8	880,7	6,0
5	70	14,0	8210,7	12765,1	967,7	1589,1	4,8
ortalama			6542,6	11482,9	787,6	1448,6	5,0
7	70	10,0	7734,3	12976,3	1210,5	2478,4	5,8
7	70	10,0	9778,6	16013,5	1495,7	2590,8	10,6
7	70	10,0	9258,0	14883,8	1486,9	2562,9	7,7
7	70	10,0	7441,5	10755,5	1126,7	1833,3	8,4
ortalama			8553,1	13657,2	1330,0	2366,4	8,1
5	80	16,0	7441,1	12425,6	962,4	1647,9	7,3
5	80	16,0	6163,0	10445,3	740,3	1335,4	5,1
5	80	16,0	8113,6	11731,3	1022,3	1345,6	6,7
5	80	16,0	8911,0	15354,6	897,7	1826,4	5,2
5	80	16,0	6325,3	11082,7	781,9	1349,9	3,7
ortalama			7390,8	12207,9	880,9	1501,0	5,6
7	80	11,4	8591,1	17461,0	1212,4	2545,6	5,9
7	80	11,4	8350,6	19415,2	1294,4	2859,4	6,0
7	80	11,4	10604,4	21732,5	1683,4	3696,4	6,3
7	80	11,4	8273,7	15269,1	1385,4	2703,1	7,8
7	80	11,4	10277,2	22599,7	1591,0	2988,7	4,5
7	80	11,4	6085,8	13996,0	972,1	2399,9	4,0
7	80	11,4	10863,1	17255,0	1825,3	3257,5	4,8
ortalama			9006,6	18246,9	1423,4	2921,5	5,6

Çizelge A.3: 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
3	yardımsız	-	3084,8	5097,4	327,9	646,7	10,8
3	yardımsız	-	2738,9	4591,3	334,6	659,4	10,9
3	yardımsız	-	3272,4	7508,2	305,1	849,4	8,7
3	yardımsız	-	2612,0	5572,7	266,4	483,1	9,3
	ortalama		3032,0	5732,3	322,6	718,5	10,1
5	yardımsız	-	4768,4	8868,3	472,9	1335,9	6,9
5	yardımsız	-	5099,4	8964,2	520,7	1452,2	7,1
5	yardımsız	-	4807,2	8940,4	452,1	1125,5	7,1
5	yardımsız	-	5652,9	8608,6	461,4	1009,2	10,0
	ortalama		5082,0	8845,4	476,8	1230,7	7,8
7	yardımsız	-	10386,2	16748,9	1232,2	2190,9	8,5
7	yardımsız	-	8823,2	13997,2	1036,7	1993,3	7,5
7	yardımsız	-	8396,3	15470,7	959,4	1766,6	6,3
7	yardımsız	-	8808,4	14655,9	885,7	1789,2	6,6
	ortalama		9103,5	15218,2	1028,5	1935,0	7,2

Çizelge A.4: 15 inç V tip disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
3	40	13,3	3255,9	7753,2	335,5	832,4	7,6
3	40	13,3	3188,1	7111,3	268,1	534,6	6,1
3	40	13,3	2363,5	5350,1	219,0	476,7	5,0
ortalama			2935,8	6738,2	274,2	614,6	6,2
5	40	8,0	3415,7	9825,9	328,6	1419,0	4,5
5	40	8,0	4277,3	9316,3	396,3	853,3	5,4
5	40	8,0	4120,7	6889,4	390,9	1094,0	5,3
5	40	8,0	5416,0	10530,1	449,5	857,1	6,1
5	40	8,0	3875,4	9548,7	383,8	1218,8	5,2
5	40	8,0	4677,1	8318,1	465,2	949,1	6,3
ortalama			4297,0	9071,4	402,4	1065,2	5,5
7	40	5,7	5783,9	11042,5	607,3	1256,7	5,9
7	40	5,7	5804,0	10396,4	692,9	1452,7	6,7
7	40	5,7	6212,8	11678,8	836,0	1563,0	8,1
7	40	5,7	7582,5	12673,5	888,3	1712,5	8,6
7	40	5,7	5306,2	14427,7	656,7	1781,1	6,4
ortalama			6137,9	12043,8	736,3	1553,2	7,2
9	40	4,4	6647,1	10021,2	715,9	1641,8	5,4
9	40	4,4	11002,0	15982,4	965,5	2584,1	7,3
9	40	4,4	10276,4	18512,9	1205,8	2690,2	9,1
9	40	4,4	9601,4	16857,4	914,6	1963,9	6,9
ortalama			9381,7	15343,5	950,4	2220,0	7,2

Çizelge A.5: 17 inç CCS disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
3	yardımsız	-	9484,0	14004,8	402,2	919,7	8,6
3	yardımsız	-	8156,7	13328,4	315,3	928,3	4,7
3	yardımsız	-	7324,0	12530,9	267,4	1061,2	6,9
3	yardımsız	-	6955,1	14504,4	281,0	1040,3	11,8
3	yardımsız	-	9133,8	21220,8	356,8	1329,5	13,2
	ortalama		8210,7	15117,8	324,5	1055,8	9,0
5	yardımsız	-	10932,4	19425,7	695,4	1784,9	3,1
5	yardımsız	-	13414,5	25608,5	561,9	2334,1	2,9
5	yardımsız	-	6366,6	14814,7	456,0	1196,2	5,4
5	yardımsız	-	8432,1	16008,7	638,5	1699,7	3,5
	ortalama		9786,4	18964,4	587,9	1753,7	3,7
7	yardımsız	-	9166,5	15325,1	949,7	2188,8	4,6
7	yardımsız	-	14112,9	22637,4	920,2	2107,8	3,4
7	yardımsız	-	8956,4	17318,8	904,6	1508,5	3,6
7	yardımsız	-	10867,4	20541,4	813,0	2349,0	3,0
7	yardımsız	-	9951,6	18015,5	766,5	2047,4	3,5
	ortalama		10611,0	18767,6	870,8	2040,3	3,6
9	yardımsız	-	12933,2	23677,8	1339,8	2617,8	2,7
9	yardımsız	-	13381,8	26826,5	1499,8	3135,8	2,7
9	yardımsız	-	9164,6	20470,4	1106,7	2613,5	2,9
9	yardımsız	-	10886,4	19531,5	1031,6	3202,2	4,8
	ortalama		11591,5	22626,5	1244,5	2892,3	3,3

Çizelge A.6: 17 inç CCS disk keski ile arkoz numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
3	80	26,7	4297,0	13820,7	304,6	1572,8	4,6
3	80	26,7	3572,2	8027,2	206,0	647,1	7,2
3	80	26,7	6098,4	11096,9	304,8	732,3	7,5
3	80	26,7	6048,3	11589,9	340,8	1234,1	8,2
3	80	26,7	4880,1	12138,0	302,8	1038,2	5,0
3	80	26,7	5156,6	10537,9	354,9	1202,6	8,9
ortalama			5008,7	11201,7	302,3	1071,2	6,9
5	80	16,0	9613,3	20838,0	658,7	1487,6	5,6
5	80	16,0	8739,5	19633,7	520,6	1776,8	3,1
5	80	16,0	8514,5	15795,6	554,9	1635,4	4,0
5	80	16,0	5026,4	9390,2	333,7	1096,1	1,6
5	80	16,0	8178,5	14780,6	731,7	1624,3	2,3
5	80	16,0	6580,3	14333,3	443,8	1219,2	3,3
5	80	16,0	13049,4	16769,3	661,8	1666,5	6,1
ortalama			8528,9	15934,4	557,9	1500,9	3,7
7	80	11,4	7743,7	14265,8	745,7	1760,2	3,7
7	80	11,4	9444,6	15622,3	879,3	1876,5	7,2
7	80	11,4	6918,0	13377,7	621,2	1592,0	2,3
7	80	11,4	10944,2	24637,7	940,1	2442,7	2,8
7	80	11,4	7931,2	18718,1	753,2	1811,8	2,4
7	80	11,4	9474,6	17003,4	965,6	2142,8	2,2
7	80	11,4	8884,9	16485,8	866,7	1889,7	1,8
7	80	11,4	11971,8	22760,7	996,9	2403,1	5,1
ortalama			9164,1	17858,9	846,1	1989,8	3,5
9	80	8,9	11133,9	15644,1	1155,9	1751,3	3,8
9	80	8,9	13808,2	21461,5	1375,4	1960,0	4,2
9	80	8,9	10916,1	17151,3	989,7	2320,0	2,3
9	80	8,9	9970,7	12942,7	687,8	1152,8	2,1
9	80	8,9	9463,8	17429,0	1063,6	2562,8	3,3
9	80	8,9	10239,5	13373,4	1040,7	1520,8	6,5
9	80	8,9	11153,6	15725,3	1320,9	2107,8	4,2
9	80	8,9	10048,5	15212,0	1162,3	1812,2	5,4
9	80	8,9	13621,2	21744,9	1279,8	2759,2	5,0
ortalama			11150,6	16742,7	1119,6	1994,1	4,1

Çizelge A.7: 13 inç CCS disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri.

d	s	s/d	FN	F'N	FR	F'R	SE
(mm)	(mm)		(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kWh/m³)
5	yardımsız	-	4513,1	7488,4	468,0	1003,4	7,9
5	yardımsız	-	4412,9	6253,5	476,8	935,3	5,2
	ortalama		4463,0	6870,9	472,4	969,4	6,6
7	yardımsız	-	5234,9	6833,6	752,4	1071,0	5,2
7	yardımsız	-	5248,4	7887,7	813,0	1331,0	5,0
	ortalama		5241,6	7360,7	782,7	1201,0	5,1
9	yardımsız	-	6319,5	9442,0	1079,8	1561,1	3,0
9	yardımsız	-	7162,9	9499,4	1197,8	1733,3	3,5
	ortalama		6741,2	9470,7	1138,8	1647,2	3,3

Çizelge A.8: 13 inç CCS disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
4	80	20,0	4388,1	7239,5	452,6	886,2	3,9
4	80	20,0	4903,4	7024,4	654,1	1043,7	5,6
4	80	20,0	3869,6	9429,4	476,9	1307,0	4,1
4	80	20,0	3629,9	7868,5	352,4	873,6	3,0
4	80	20,0	3570,8	5982,2	362,4	635,9	3,1
4	80	20,0	3031,0	5905,7	284,9	761,0	4,0
ortalama			3898,8	7241,6	430,5	917,9	3,9
6	80	13,3	5492,0	11047,1	630,8	1294,4	3,6
6	80	13,3	4129,1	8322,6	554,4	1031,5	3,1
6	80	13,3	6678,8	9263,8	777,4	1220,9	4,4
6	80	13,3	2980,1	8200,5	417,8	1179,8	2,4
6	80	13,3	4040,5	8813,0	568,6	1107,5	3,2
6	80	13,3	4228,3	8113,4	548,5	1097,5	3,1
ortalama			4591,5	8960,1	582,9	1155,3	3,3
8	80	10,0	5854,0	11217,4	872,6	1759,8	3,7
8	80	10,0	4950,6	9525,1	765,4	1522,1	3,3
8	80	10,0	3661,9	8225,6	538,4	1331,4	2,3
8	80	10,0	4065,3	7685,0	639,2	1285,6	2,7
8	80	10,0	4294,9	6215,2	713,5	1089,1	3,0
8	80	10,0	5027,2	8222,9	701,5	1441,9	3,0
ortalama			4642,3	8515,2	705,1	1405,0	3,0
5	100	20,0	3704,4	6813,8	475,9	845,0	2,6
5	100	20,0	3837,0	7821,0	447,3	1177,7	2,4
5	100	20,0	3213,9	7147,1	467,1	990,8	2,5
5	100	20,0	3290,1	5163,8	482,0	699,7	2,6
ortalama			3511,3	6736,5	468,1	928,3	2,6
7	100	14,3	4180,0	7087,7	582,9	1000,9	2,3
7	100	14,3	4352,4	9209,0	592,0	1343,2	2,3
7	100	14,3	3691,4	6869,3	614,4	1146,2	2,4
7	100	14,3	4232,4	6208,0	603,9	954,2	2,4
ortalama			4114,1	7343,5	598,3	1111,1	2,3
9	100	11,1	4630,5	14267,2	716,0	2357,0	2,2
9	100	11,1	4696,2	8400,5	773,7	1622,5	2,3
9	100	11,1	4724,7	8297,5	769,6	1532,6	2,3
9	100	11,1	4463,3	8242,1	753,3	1731,7	2,3
ortalama			4628,7	9801,8	753,2	1810,9	2,3

Çizelge A.9: 15 inç tip V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
5	yardımsız	-	3128,5	4365,2	408,4	611,7	4,1
5	yardımsız	-	2885,7	4875,5	357,5	686,7	3,8
5	yardımsız	-	3252,4	4317,6	437,4	680,3	4,4
	ortalama		3088,9	4519,4	401,1	659,6	4,1
7	yardımsız	-	3860,9	6140,4	491,5	759,6	4,2
7	yardımsız	-	3794,1	5904,5	468,8	740,8	3,3
7	yardımsız	-	4009,8	6967,8	492,5	771,9	3,9
	ortalama		3888,3	6337,6	484,3	757,4	3,8
9	yardımsız	-	5944,6	8318,8	821,2	1122,9	3,3
9	yardımsız	-	5666,7	9289,0	828,0	1369,2	2,9
	ortalama		5805,6	8803,9	824,6	1246,1	3,1

Çizelge A.10: 15 inç V tip disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

d	s	s/d	FN	F'N	FR	F'R	SE
(mm)	(mm)		(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kWh/m³)
7	80	11,4	2704,1	4892,3	319,8	783,0	1,6
7	80	11,4	3994,2	6643,0	512,8	805,1	5,0
7	80	11,4	4023,7	5870,2	507,6	732,3	2,0
7	80	11,4	3368,7	5767,3	431,0	761,3	1,9
7	80	11,4	3235,6	5159,0	408,7	663,7	2,5
7	80	11,4	3865,7	6649,3	495,9	748,9	1,9
	ortalama		3532,0	5830,2	445,9	749,1	2,5
9	80	8,9	4597,6	7816,2	642,8	1125,5	1,9
9	80	8,9	5013,8	8769,6	755,4	1173,6	2,1
9	80	8,9	4267,4	6899,9	646,8	938,1	2,4
9	80	8,9	4763,3	8143,8	715,9	1294,2	2,2
9	80	8,9	4912,1	7258,3	683,9	1067,6	2,2
9	80	8,9	4173,3	7904,4	610,3	1166,8	2,0
	ortalama		4621,3	7798,7	675,8	1127,6	2,1
12	80	6,7	4554,6	6916,7	812,5	1375,6	1,9
12	80	6,7	4606,5	6139,7	755,5	1113,1	1,7
12	80	6,7	5812,5	8988,0	1021,1	1610,7	2,6
12	80	6,7	5970,1	10359,3	1085,0	1795,6	3,0
12	80	6,7	5821,7	10512,6	1014,6	1700,2	2,4
12	80	6,7	6454,8	10365,6	1093,4	1741,5	2,9
	ortalama		5536,7	8880,3	963,7	1556,1	2,4

Çizelge A.11: 17 inç CCS disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
5	yardımsız	-	5389,0	10561,8	395,9	1065,0	2,5
5	yardımsız	-	5187,0	7018,0	313,4	540,6	3,3
5	yardımsız	-	5680,2	9121,2	378,9	840,5	4,3
5	yardımsız	-	5481,1	8852,3	361,5	678,2	2,7
	ortalama		5434,3	8888,3	362,4	781,1	3,2
7	yardımsız	-	5300,0	7832,2	495,5	869,5	2,3
7	yardımsız	-	6526,9	9932,5	655,1	1115,3	2,9
7	yardımsız	-	6476,3	10332,7	630,3	1019,4	3,1
7	yardımsız	-	5873,9	10721,3	612,4	1009,2	2,3
7	yardımsız	-	6418,3	9999,2	719,8	1152,8	3,1
	ortalama		6119,1	9763,6	622,6	1033,2	2,7
9	yardımsız	-	7485,2	12114,0	937,9	1599,6	3,0
9	yardımsız	-	7537,8	11911,0	987,0	1718,9	2,1
9	yardımsız	-	7563,1	9627,3	889,4	1338,1	2,7
9	yardımsız	-	7615,4	12219,9	1008,2	1731,3	2,3
9	yardımsız	-	6986,6	10006,5	900,2	1362,8	2,7
9	yardımsız	-	7207,0	10421,2	879,4	1354,3	2,6
	ortalama		7399,2	11050,0	933,7	1517,5	2,6

Çizelge A.12: 17 inç CCS disk keski ile şeyl numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

d	s	s/d	FN	F'N	FR	F'R	SE
(mm)	(mm)		(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kWh/m³)
5	80	16,0	3533,8	5924,0	257,4	489,5	2,7
5	80	16,0	3626,6	6519,2	214,8	538,9	2,6
5	80	16,0	4659,4	8310,7	293,5	624,5	2,4
5	80	16,0	4549,5	6019,0	365,1	634,7	2,1
5	80	16,0	4526,9	6578,7	290,9	561,5	3,0
5	80	16,0	4899,6	9092,2	377,8	1048,8	2,8
5	80	16,0	3977,0	6562,0	381,7	705,5	2,1
ortalama			4253,3	7000,8	311,6	657,6	2,5
7	80	11,4	5559,9	11614,5	623,8	1537,9	2,5
7	80	11,4	6264,0	9673,7	646,4	1203,0	2,5
7	80	11,4	5463,9	8144,7	458,0	926,1	2,5
7	80	11,4	5754,5	9752,0	574,2	1140,0	2,2
7	80	11,4	5069,9	8679,0	482,7	1225,6	1,9
7	80	11,4	5131,6	8948,0	562,3	1092,3	2,6
7	80	11,4	5560,6	9801,3	504,3	984,5	2,8
7	80	11,4	6160,6	8990,7	621,6	988,3	2,9
7	80	11,4	5005,8	8119,3	488,5	925,7	2,2
ortalama			5552,3	9302,6	551,3	1113,7	2,4
9	80	8,9	7380,1	12287,3	961,8	2024,8	2,6
9	80	8,9	7655,6	10308,1	932,9	1302,3	2,6
9	80	8,9	6558,1	9606,3	752,2	1442,0	2,2
9	80	8,9	6367,4	16610,5	778,4	2244,6	2,6
9	80	8,9	7647,4	10746,7	1032,2	1658,4	2,3
9	80	8,9	7769,1	10934,5	981,3	1616,7	2,3
9	80	8,9	6686,6	10491,5	906,9	1670,3	2,3
9	80	8,9	6639,6	10194,2	852,4	1539,6	2,4
ortalama			7088,0	11397,4	899,8	1687,3	2,4

Çizelge A.13: 13 inç CCS disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
5	yardımsız	-	5558,0	10076,2	503,6	1017,7	8,7
5	yardımsız	-	4755,0	6875,2	613,5	1040,3	9,8
5	yardımsız	-	4751,4	9664,4	559,0	1249,5	7,0
	ortalama		5021,5	8871,9	558,7	1102,5	8,5
7	yardımsız	-	5786,1	11066,2	653,6	1315,0	5,2
7	yardımsız	-	7632,6	13425,7	1012,6	1811,9	7,5
7	yardımsız	-	7043,5	13128,7	801,4	1688,0	7,1
	ortalama		6820,7	12540,2	822,5	1605,0	6,6
9	yardımsız	-	8270,5	16026,8	1081,6	2342,8	5,8
9	yardımsız	-	7826,0	12523,5	1357,0	2026,5	7,6
9	yardımsız	-	8073,5	13528,7	1465,8	2408,3	7,2
	ortalama		8056,7	14026,3	1301,5	2259,2	6,9

Çizelge A.14: 13 inç CCS disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
5	75	15,0	3453,9	5209,4	316,2	511,1	4,4
5	75	15,0	6461,2	10665,6	749,5	1399,0	4,8
5	75	15,0	5070,1	9318,5	586,4	1148,7	3,4
	ortalama		4995,0	8397,8	550,7	1019,6	4,2
7	75	10,7	6105,8	12262,1	765,8	1388,9	2,6
7	75	10,7	7133,2	16600,3	942,6	2115,1	3,8
7	75	10,7	5447,6	10131,0	691,4	1509,9	2,2
	ortalama		6228,9	12997,8	799,9	1671,3	2,9
9	75	8,3	6309,0	14166,9	1116,9	2623,3	3,0
9	75	8,3	7754,3	22067,8	1353,0	3345,3	3,7
9	75	8,3	6675,6	16020,2	1236,7	2861,5	3,6
	ortalama		6913,0	17418,3	1235,5	2943,4	3,4

Çizelge A.15: 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri.

d	s	s/d	FN	F'N	FR	F'R	SE
(mm)	(mm)		(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kWh/m ³)
5	yardımsız	-	6438,6	10338,3	516,3	1067,1	6,7
5	yardımsız	-	8073,5	12072,2	643,8	1137,8	3,5
	ortalama		7256,1	11205,3	580,0	1102,5	5,1
7,5	yardımsız	-	6349,4	10191,3	714,6	1309,1	2,2
7,5	yardımsız	-	12931,2	18611,6	1204,1	2386,5	5,5
7,5	yardımsız	-	11558,4	19306,7	987,7	2090,8	6,9
	ortalama		10279,7	16036,5	968,8	1928,8	4,9
10	yardımsız	-	13547,5	19876,5	1851,8	2942,0	5,7
10	yardımsız	-	11713,5	18820,2	1735,4	3765,8	6,6
10	yardımsız	-	12701,3	20882,4	1593,9	2667,6	5,0
	ortalama		12654,1	19859,7	1727,0	3125,1	5,8
12	yardımsız	-	8928,8	14198,1	827,9	2592,6	5,2
12	yardımsız	-	12196,9	20229,3	1688,2	3158,4	3,5
	ortalama		10562,8	17213,7	1258,1	2875,5	4,3

Çizelge A.16: 15 inç V tip disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
5	75	15,0	4791,3	9251,9	367,1	786,0	3,6
5	75	15,0	4081,6	8413,3	358,4	842,6	3,6
5	75	15,0	4371,1	9484,3	372,7	830,3	4,4
5	75	15,0	6616,4	11295,9	624,9	900,6	4,6
5	75	15,0	6177,5	10649,8	551,8	1030,1	4,9
ortalama			5207,6	9819,0	455,0	877,9	4,2
7,5	75	10,0	7039,7	12417,3	821,9	1456,5	5,8
7,5	75	10,0	9057,1	13753,6	983,6	1658,0	4,3
7,5	75	10,0	7360,2	14707,7	542,6	1271,2	1,6
7,5	75	10,0	4898,8	11531,8	441,1	1350,4	4,1
7,5	75	10,0	7439,0	14058,1	816,7	1643,9	3,0
7,5	75	10,0	8759,1	15210,3	1036,6	2472,1	4,7
ortalama			7425,6	13613,1	773,7	1642,0	3,9
10	75	7,5	10635,1	16597,7	1219,2	2357,5	4,0
10	75	7,5	11342,5	18263,7	1574,4	2586,2	4,2
10	75	7,5	8462,7	18239,9	1225,6	2201,1	4,0
10	75	7,5	8506,2	17118,5	922,8	1880,8	2,7
ortalama			9736,6	17555,0	1235,5	2256,4	3,7
12	75	6,3	9528,8	13692,7	952,9	1956,2	2,4
12	75	6,3	10579,8	19179,3	1402,0	3020,8	2,7
12	75	6,3	9420,7	18445,0	1318,9	2852,5	5,6
ortalama			9843,1	17105,7	1224,6	2609,8	3,5
15	75	5,0	5959,9	14424,2	810,7	2365,6	1,9
15	75	5,0	9733,2	17959,2	1422,2	2810,7	3,2
15	75	5,0	7174,8	11856,6	1244,5	2084,8	5,8
ortalama			7622,6	14746,7	1159,1	2420,4	3,6

Çizelge A.17: 17 inç CCS disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımsız kesme deneyleri.

d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
5	yardımsız	-	13840,9	19263,3	895,3	1390,0	7,4
5	yardımsız	-	14311,4	20703,8	822,4	1730,8	3,9
5	yardımsız	-	9696,9	17315,2	571,8	1543,4	2,9
	ortalama		12616,4	19094,1	763,1	1554,8	4,7
7	yardımsız	-	15608,6	23883,7	1316,4	2638,2	2,4
7	yardımsız	-	11080,5	16776,5	933,7	1779,4	4,6
7	yardımsız	-	12438,8	16443,7	1276,5	1810,1	4,2
	ortalama		13042,7	19034,6	1175,5	2075,9	3,7
9	yardımsız	-	12233,7	18989,9	1334,3	3039,5	2,0
9	yardımsız	-	15967,2	25784,6	1609,3	2960,7	3,3
	ortalama		14100,4	22387,3	1471,8	3000,1	2,6

Çizelge A.18: 17 inç CCS disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımcı kesme deneyleri.

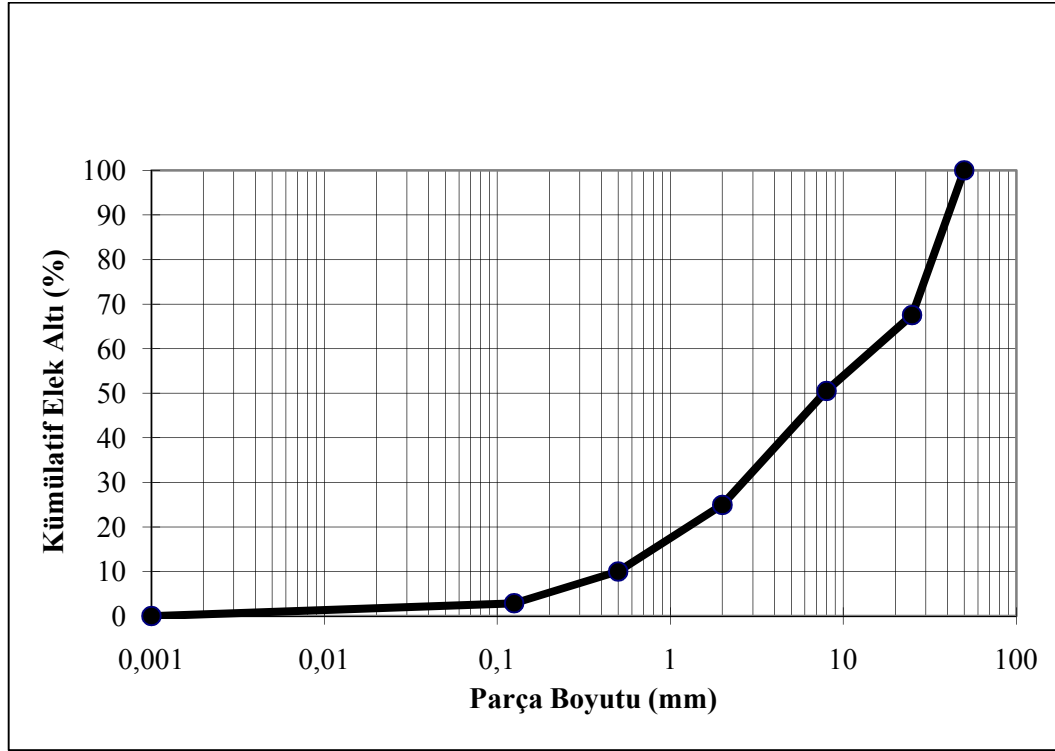
d (mm)	s (mm)	s/d	FN (kgf)	F'N (kgf)	FR (kgf)	F'R (kgf)	SE (kWh/m³)
5	75	15,0	6275,7	11224,5	435,6	755,3	3,2
5	75	15,0	6988,7	14195,5	513,7	1367,0	2,1
5	75	15,0	8146,6	11196,2	435,6	800,9	2,0
5	75	15,0	5883,3	12393,2	410,7	1005,4	1,8
5	75	15,0	6447,0	12633,9	498,8	1217,1	3,0
5	75	15,0	5258,6	11606,5	452,1	1134,0	2,7
5	75	15,0	5504,0	7273,2	502,0	747,2	1,8
5	75	15,0	6178,5	11423,1	485,4	1019,8	2,5
ortalama			6335,3	11493,2	466,7	1005,8	2,4
7	75	10,7	8605,1	18773,9	710,7	2188,4	2,5
7	75	10,7	9850,3	16086,3	815,8	2026,5	2,3
7	75	10,7	8102,4	14067,2	791,9	2001,8	1,9
7	75	10,7	8276,8	16090,7	779,3	2035,0	1,8
7	75	10,7	8131,1	15201,1	783,1	2005,6	2,0
7	75	10,7	9859,7	22158,9	960,6	2126,6	2,4
7	75	10,7	8708,4	14794,4	695,0	1604,3	2,2
7	75	10,7	7455,5	15863,7	687,7	1945,5	1,5
ortalama			8623,7	16629,5	778,0	1991,7	2,1
9	75	8,3	14167,0	19180,6	1130,3	2036,7	2,8
9	75	8,3	13425,9	19211,8	1324,4	2467,8	2,2
9	75	8,3	11302,5	21167,8	1250,4	1968,1	3,1
9	75	8,3	7610,5	14924,9	904,6	2116,4	2,4
9	75	8,3	11919,6	23731,4	963,2	1880,8	2,3
9	75	8,3	11920,3	19145,8	1341,9	2224,1	2,2
9	75	8,3	12445,9	21362,1	1312,6	2276,1	2,3
ortalama			11827,4	19817,8	1175,3	2138,6	2,5
7	90	12,9	8906,0	16480,0	882,8	2120,2	2,6
7	90	12,9	9274,4	25293,1	886,3	2157,3	2,3
7	90	12,9	9366,8	23327,6	696,6	2099,3	2,3
7	90	12,9	9809,9	25140,1	671,5	2014,6	2,4
7	90	12,9	9920,3	17481,9	672,2	1773,0	2,3
ortalama			9455,5	21544,5	761,9	2032,9	2,4
9	90	10,0	10551,7	18504,9	1031,3	1891,4	1,9
9	90	10,0	11395,3	21110,6	1258,8	2733,6	2,5
9	90	10,0	10583,3	22732,4	1174,2	2712,8	2,3
9	90	10,0	10328,6	24934,9	1041,4	3027,2	2,3
9	90	10,0	9404,8	18702,8	1172,7	2763,0	2,0
9	90	10,0	10762,4	16341,5	829,0	1733,0	2,1
9	90	10,0	9367,8	17166,6	1127,8	2368,1	1,7
9	90	10,0	9262,6	19079,1	934,4	2406,9	1,8
9	90	10,0	9862,8	15003,2	1136,0	2257,4	3,0
ortalama			10168,8	19286,2	1078,4	2432,6	2,2

Çizelge A.18: (devam)17 inç CCS disk keski ile fosilli kireçtaşı numunesi üzerinde yapılan yardımlı kesme deneyleri.

12	90	7,5	11232,3	17307,9	1652,1	2937,7	2,5
12	90	7,5	14630,6	24605,8	1890,2	3376,9	2,7
12	90	7,5	12318,2	20194,2	1393,1	3245,7	2,5
12	90	7,5	11191,1	21979,1	1609,6	3187,3	2,3
12	90	7,5	12215,4	23805,4	1571,5	3223,1	2,6
ortalama			12317,5	21578,5	1623,3	3194,1	2,5

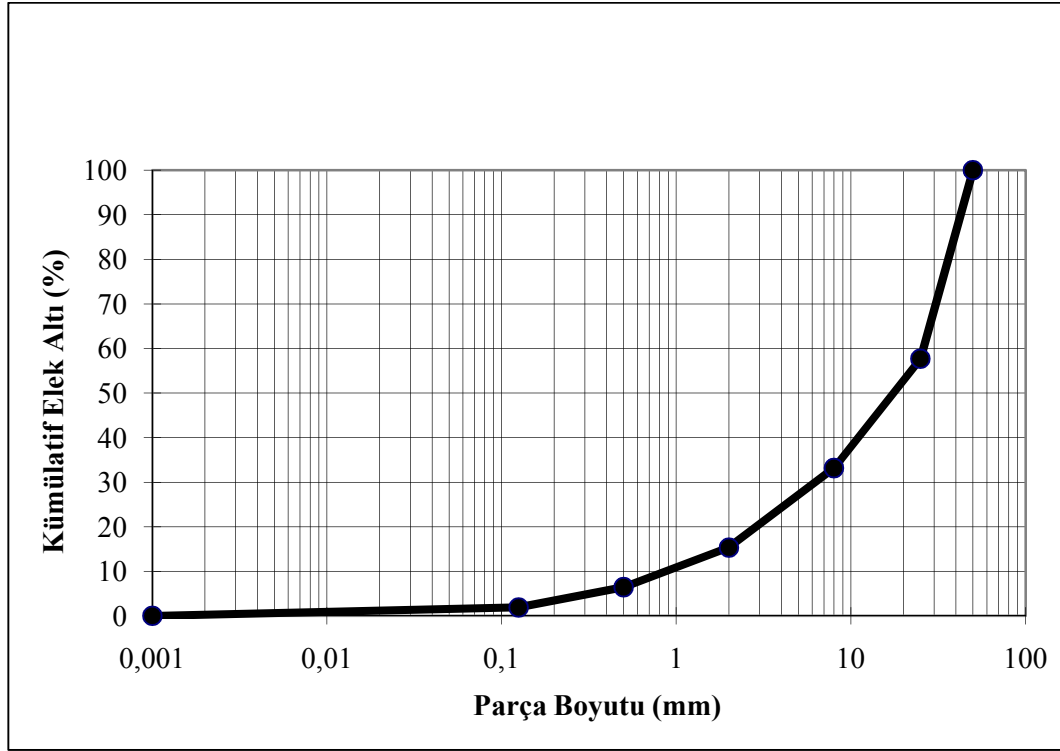
EK. B:**Çizelge B.1:** Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=3mm).

No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	122,34	32,45	122,34	32,5	Pasa
2	-25 + 8	64,13	17,01	186,47	49,5	İrilik
3	-8 + 2	96,4	25,57	282,87	75,0	Katsayısı
4	-2 + 0,5	56,42	14,97	339,29	90,0	444
5	-0,5 + 0,125	26,87	7,13	366,16	97,1	
6	-0,125	10,83	2,87	376,99	100,0	

**Şekil B.1:** Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=3mm).

Çizelge B.2: Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm).

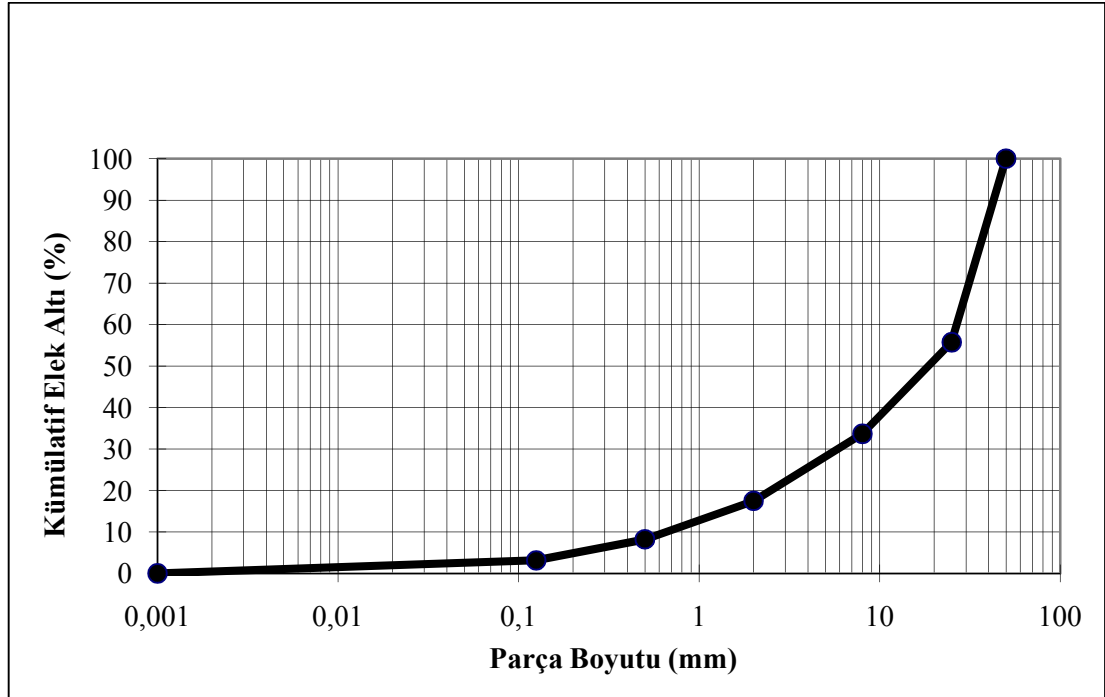
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	442,88	42,32	442,88	42,3	Pasa
2	-25 + 8	256,42	24,50	699,30	66,8	İrilik
3	-8 + 2	186,87	17,86	886,17	84,7	Katsayısı
4	-2 + 0,5	92,85	8,87	979,02	93,5	485
5	-0,5 + 0,125	47,8	4,57	1026,82	98,1	
6	-0,125	19,73	1,89	1046,55	100,0	



Şekil B.2: Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm).

Çizelge B.3: Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm).

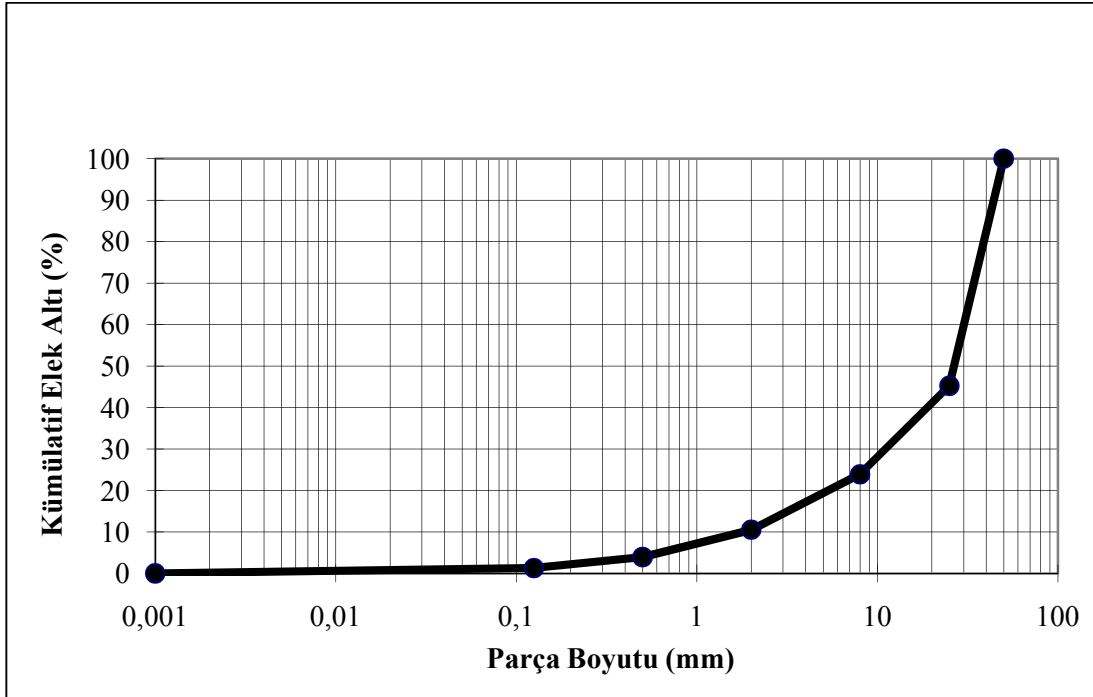
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	906,05	44,27	906,05	44,3	Pasa
2	-25 + 8	451,76	22,07	1357,81	66,3	İrilik
3	-8 + 2	331,4	16,19	1689,21	82,5	Katsayısı
4	-2 + 0,5	189,14	9,24	1878,35	91,8	482
5	-0,5 + 0,125	104,2	5,09	1982,55	96,9	
6	-0,125	64,08	3,13	2046,63	100,0	



Şekil B.3: Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm).

Çizelge B.4: Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=3mm).

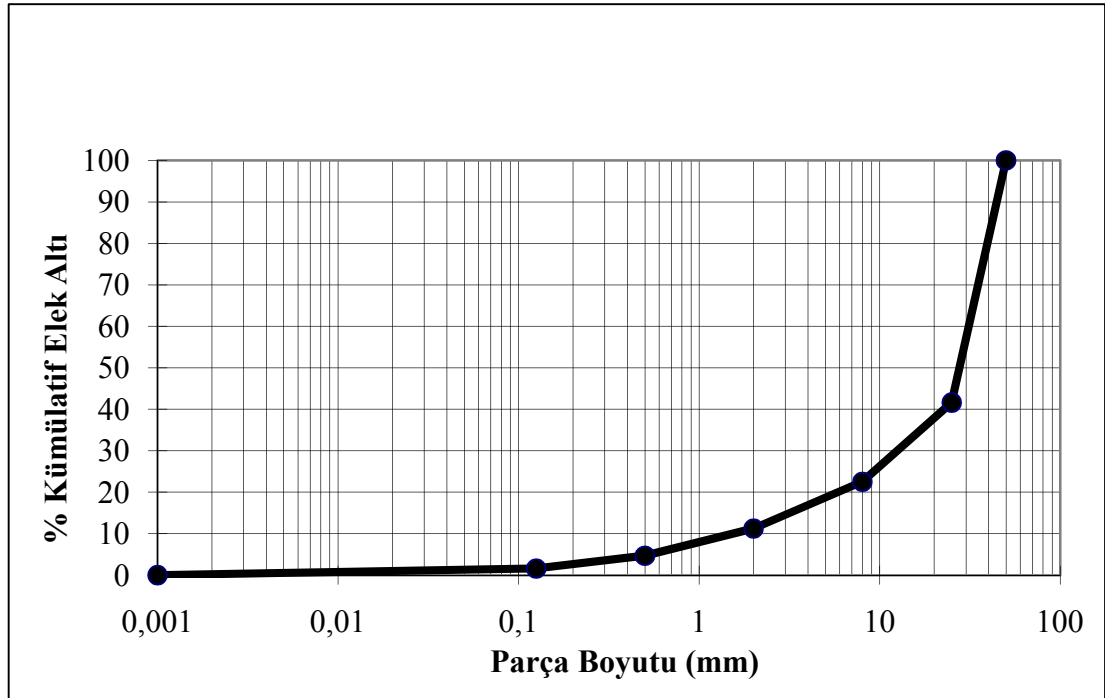
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	691,34	54,77	691,34	54,8	Pasa
2	-25 + 8	269,25	21,33	960,59	76,1	İrilik
3	-8 + 2	168,67	13,36	1129,26	89,5	Katsayısı
4	-2 + 0,5	83,23	6,59	1212,49	96,1	515
5	-0,5 + 0,125	33,51	2,65	1246,00	98,7	
6	-0,125	16,29	1,29	1262,29	100,0	



Şekil B.4: Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=3mm).

Çizelge B.5: Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=5mm).

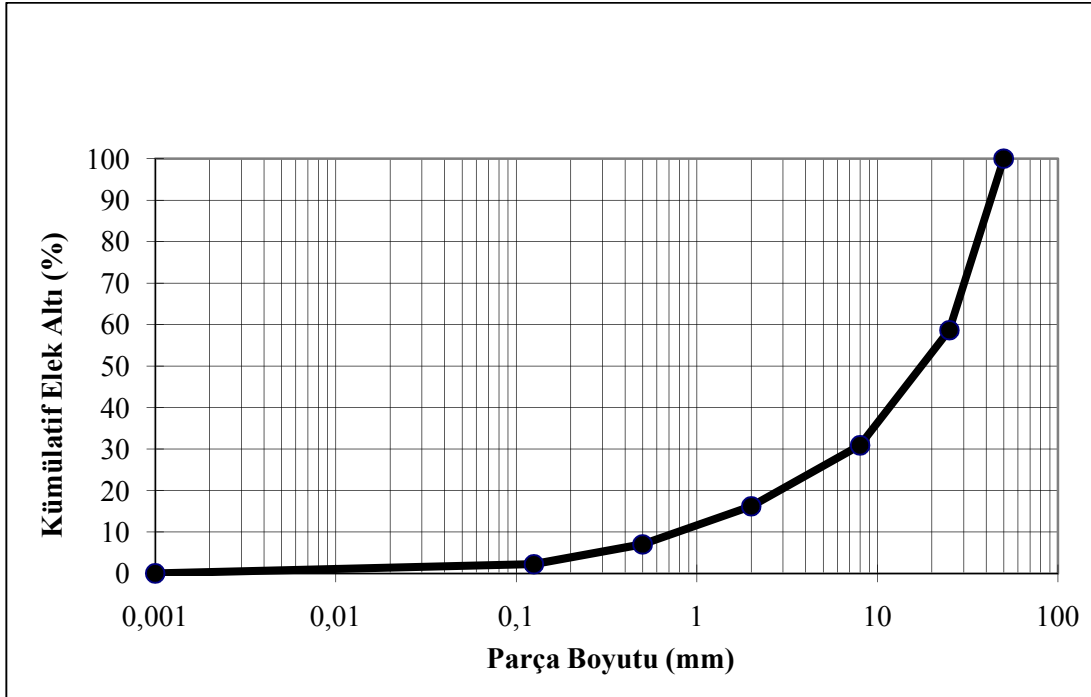
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1609,52	58,39	1609,52	58,4	Pasa
2	-25 + 8	526,04	19,08	2135,56	77,5	İrilik
3	-8 + 2	311,04	11,28	2446,60	88,8	Katsayısı
4	-2 + 0,5	180,43	6,55	2627,03	95,3	518
5	-0,5 + 0,125	85,31	3,10	2712,34	98,4	
6	-0,125	44,01	1,60	2756,35	100,0	



Şekil B.5: Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=5mm).

Çizelge B.6: Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=7mm).

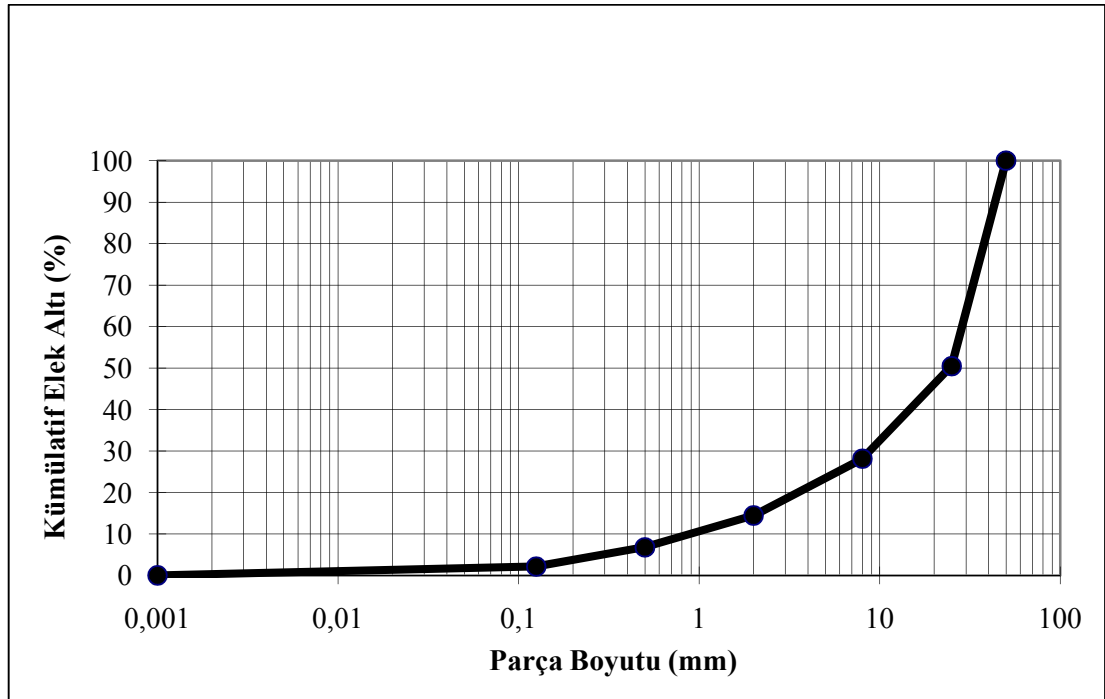
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	868,1	41,36	868,10	41,4	Pasa
2	-25 + 8	582,83	27,77	1450,93	69,1	İrilik
3	-8 + 2	307,92	14,67	1758,85	83,8	Katsayısı
4	-2 + 0,5	193,2	9,21	1952,05	93,0	485
5	-0,5 + 0,125	100,09	4,77	2052,14	97,8	
6	-0,125	46,68	2,22	2098,82	100,0	



Şekil B.6: Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=70mm d=7mm).

Çizelge B.7: Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm).

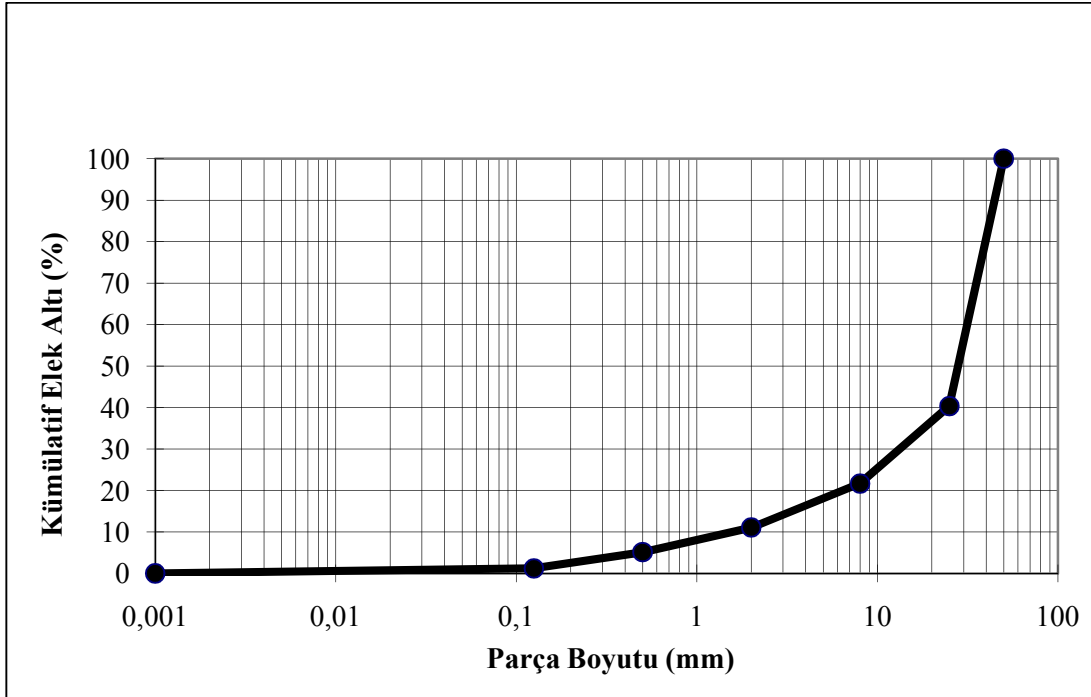
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1073,02	49,54	1073,02	49,5	Pasa
2	-25 + 8	484,01	22,34	1557,03	71,9	İrilik
3	-8 + 2	296,19	13,67	1853,22	85,6	Katsayısı
4	-2 + 0,5	166,52	7,69	2019,74	93,2	498
5	-0,5 + 0,125	100,04	4,62	2119,78	97,9	
6	-0,125	46,39	2,14	2166,17	100,0	



Şekil B.7: Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm).

Çizelge B.8: Arkoz elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm).

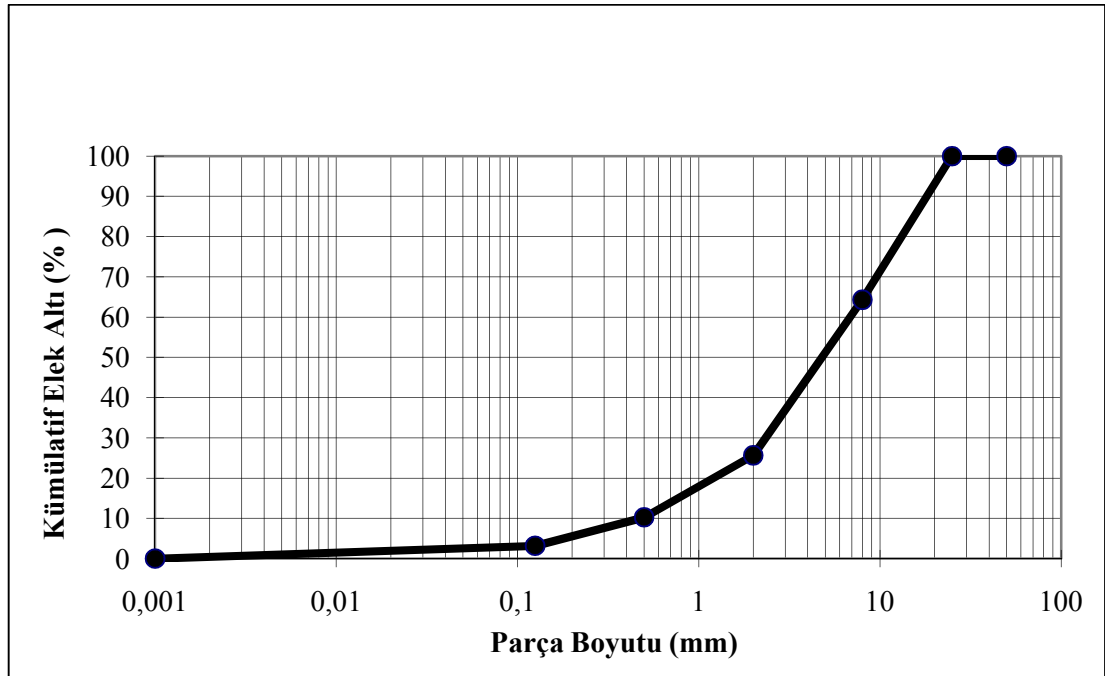
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	3665,24	59,65	3665,24	59,7	Pasa
2	-25 + 8	1146,97	18,67	4812,21	78,3	İrilik
3	-8 + 2	651,63	10,61	5463,84	88,9	Katsayısı
4	-2 + 0,5	365,16	5,94	5829,00	94,9	521
5	-0,5 + 0,125	239,97	3,91	6068,97	98,8	
6	-0,125	75,23	1,22	6144,20	100,0	



Şekil B.8: Arkoz yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm).

Çizelge B.9: Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=3mm).

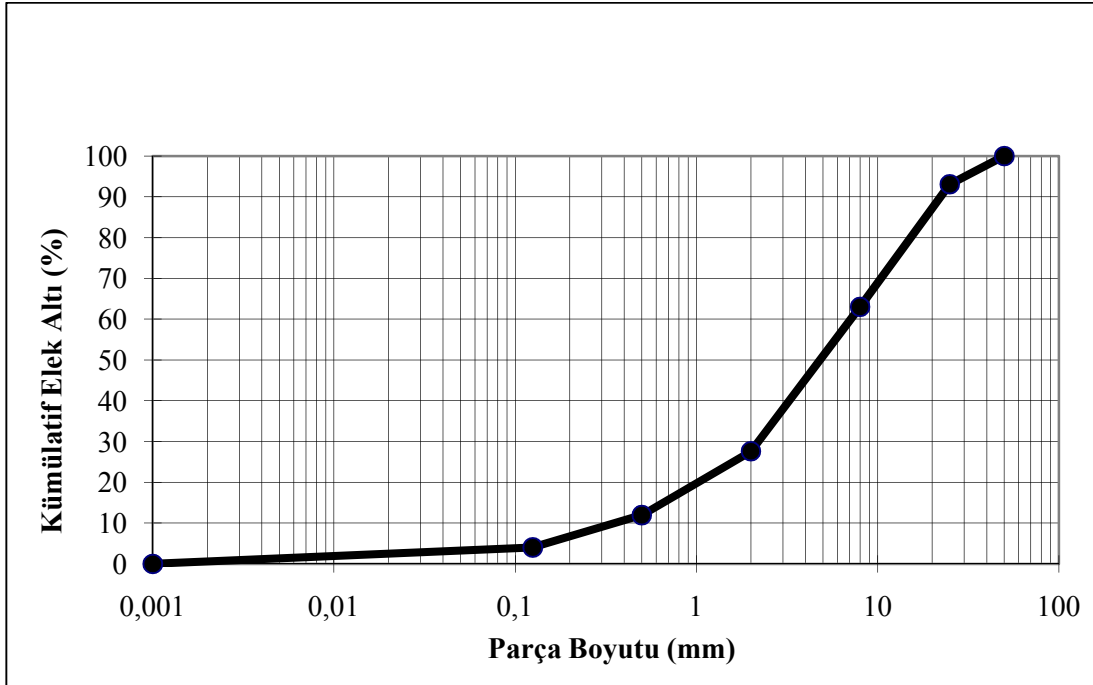
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	0,00	0,00	0,00	0,0	Pasa
2	-25 + 8	103,03	35,70	103,03	35,7	İrilik
3	-8 + 2	111,49	38,63	214,52	74,3	Katsayısı
4	-2 + 0,5	44,48	15,41	259,00	89,7	397
5	-0,5 + 0,125	20,41	7,07	279,41	96,8	
6	-0,125	9,17	3,18	288,58	100,0	



Şekil B.9: Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=3mm).

Çizelge B.10: Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=5mm).

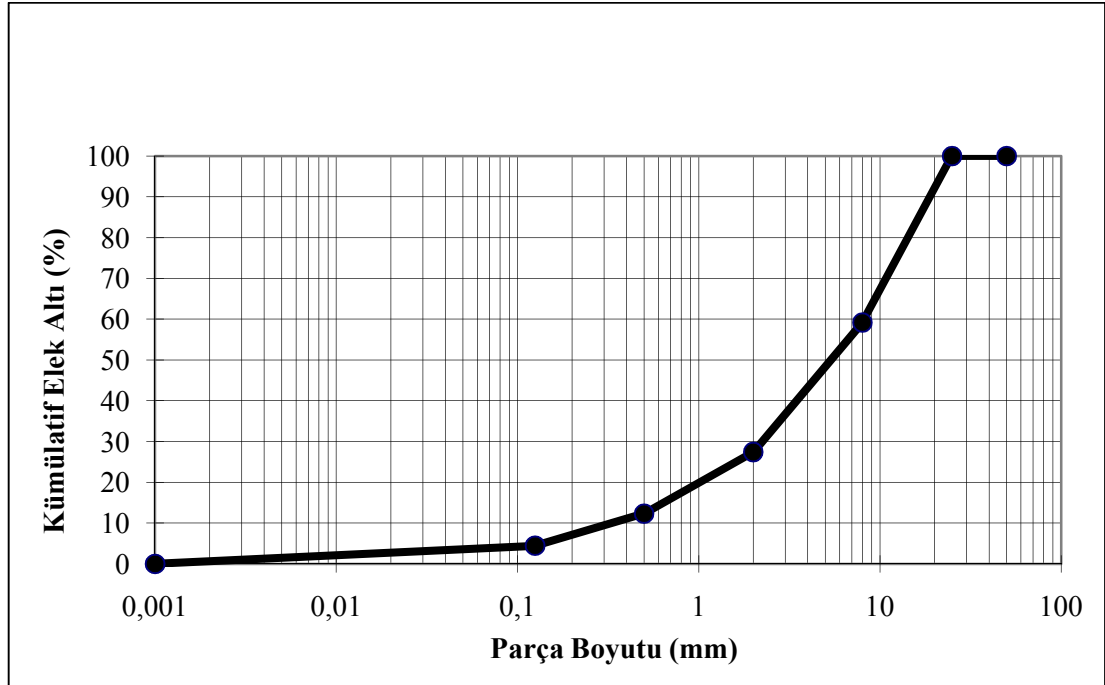
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	41,52	6,93	41,52	6,9	Pasa
2	-25 + 8	180,26	30,08	221,78	37,0	İrilik
3	-8 + 2	212,06	35,39	433,84	72,4	Katsayısı
4	-2 + 0,5	93,77	15,65	527,61	88,0	400
5	-0,5 + 0,125	47,50	7,93	575,11	96,0	
6	-0,125	24,15	4,03	599,26	100,0	



Şekil B.10: Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=5mm).

Çizelge B.11: Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7mm).

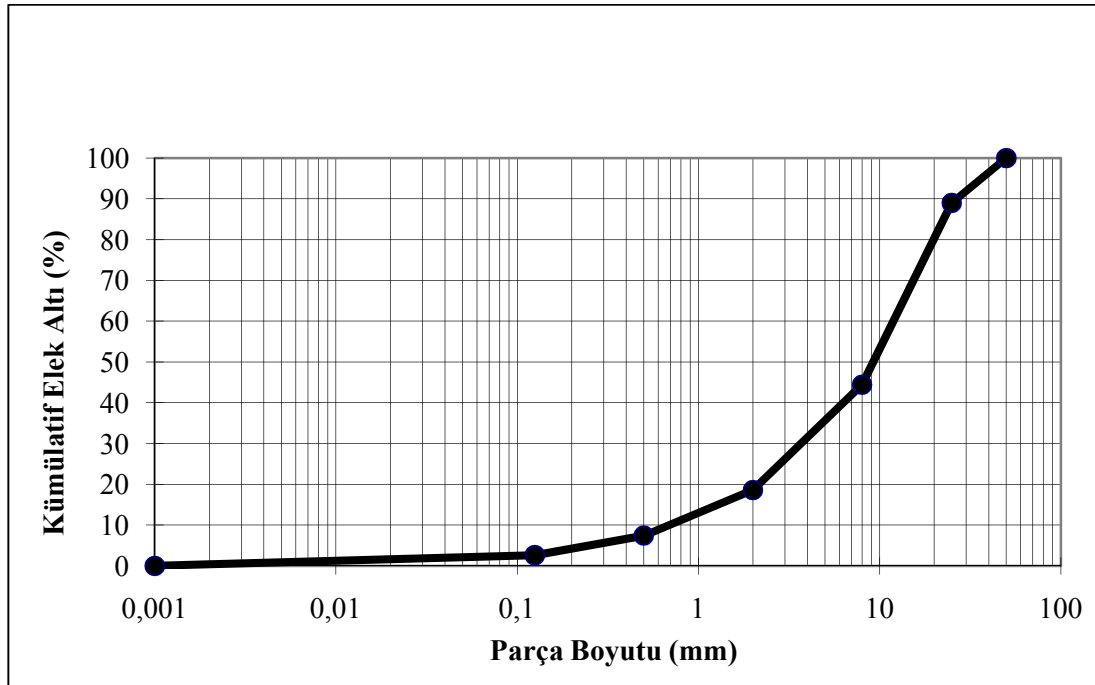
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	0	0,00	0,00	0,0	Pasa
2	-25 + 8	682,38	40,83	682,38	40,8	İrilik
3	-8 + 2	530,37	31,74	1212,75	72,6	Katsayısı
4	-2 + 0,5	252,44	15,11	1465,19	87,7	397
5	-0,5 + 0,125	131,82	7,89	1597,01	95,6	
6	-0,125	74,09	4,43	1671,10	100,0	



Şekil B.11: Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7mm).

Çizelge B.12: Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=3mm).

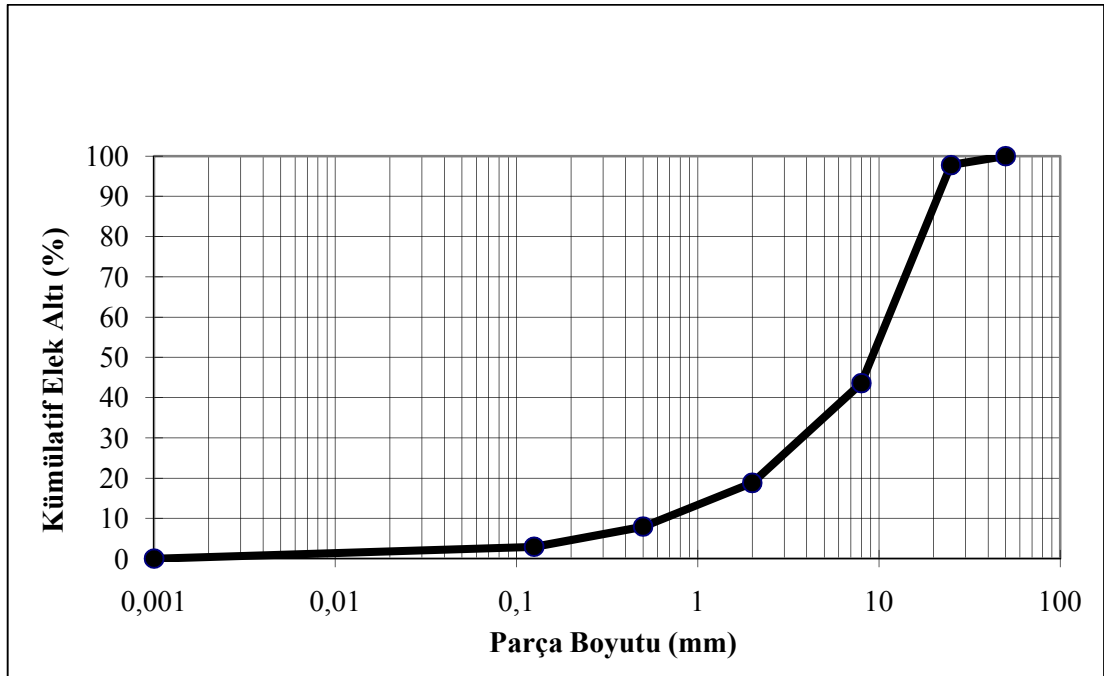
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	85,08	11,02	85,08	11,0	Pasa
2	-25 + 8	344,07	44,57	429,15	55,6	İrilik
3	-8 + 2	199,11	25,79	628,26	81,4	Katsayısı
4	-2 + 0,5	86,43	11,20	714,69	92,6	438
5	-0,5 + 0,125	37,09	4,80	751,78	97,4	
6	-0,125	20,14	2,61	771,92	100,0	



Şekil B.12: Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=3mm).

Çizelge B.13: Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=5mm).

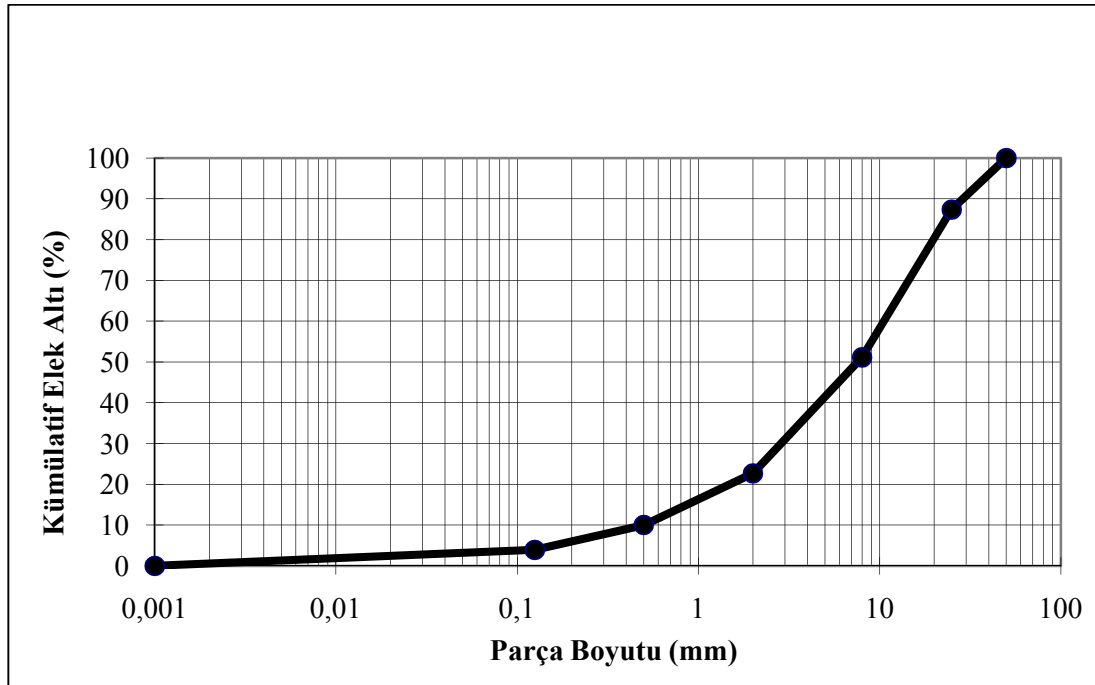
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	29,50	2,23	29,50	2,2	Pasa
2	-25 + 8	718,49	54,21	747,99	56,4	İrilik
3	-8 + 2	327,99	24,74	1075,98	81,2	Katsayısı
4	-2 + 0,5	143,99	10,86	1219,97	92,0	429
5	-0,5 + 0,125	66,52	5,02	1286,49	97,1	
6	-0,125	38,99	2,94	1325,48	100,0	



Şekil B.13: Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=5mm).

Çizelge B.14: Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=7mm).

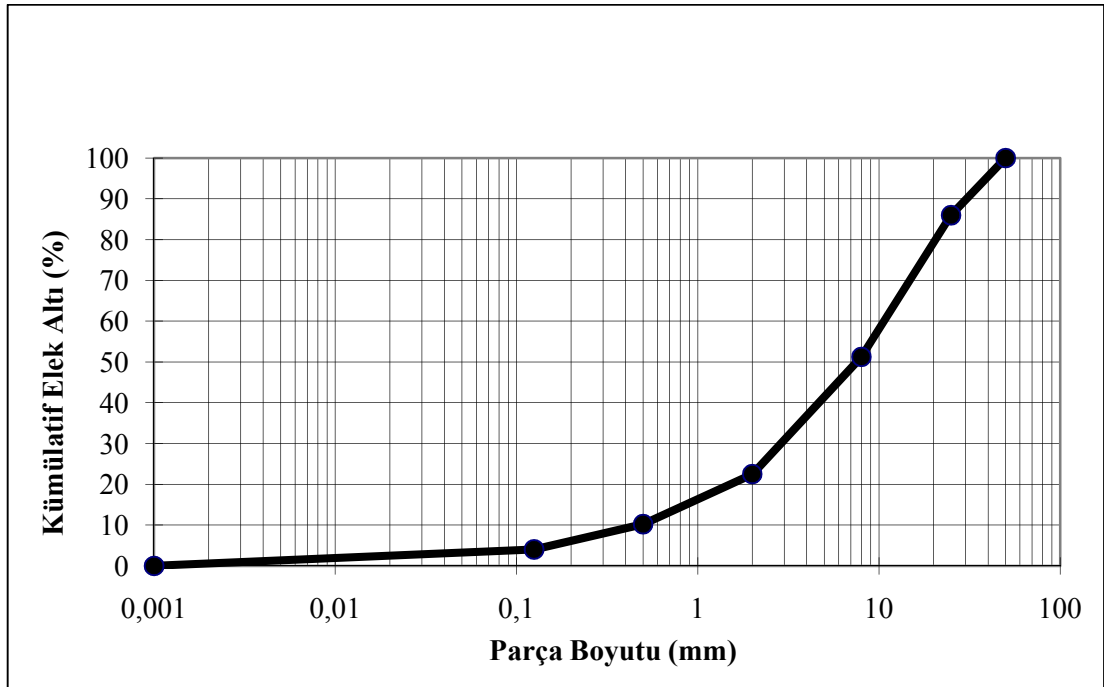
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	346,14	12,63	346,14	12,6	Pasa
2	-25 + 8	993,52	36,25	1339,66	48,9	İrilik
3	-8 + 2	779,11	28,43	2118,77	77,3	Katsayısı
4	-2 + 0,5	347,78	12,69	2466,55	90,0	425
5	-0,5 + 0,125	167,07	6,10	2633,62	96,1	
6	-0,125	107,11	3,91	2740,73	100,0	



Şekil B.14: Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=7mm).

Çizelge B.15: Arkoz elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=9mm).

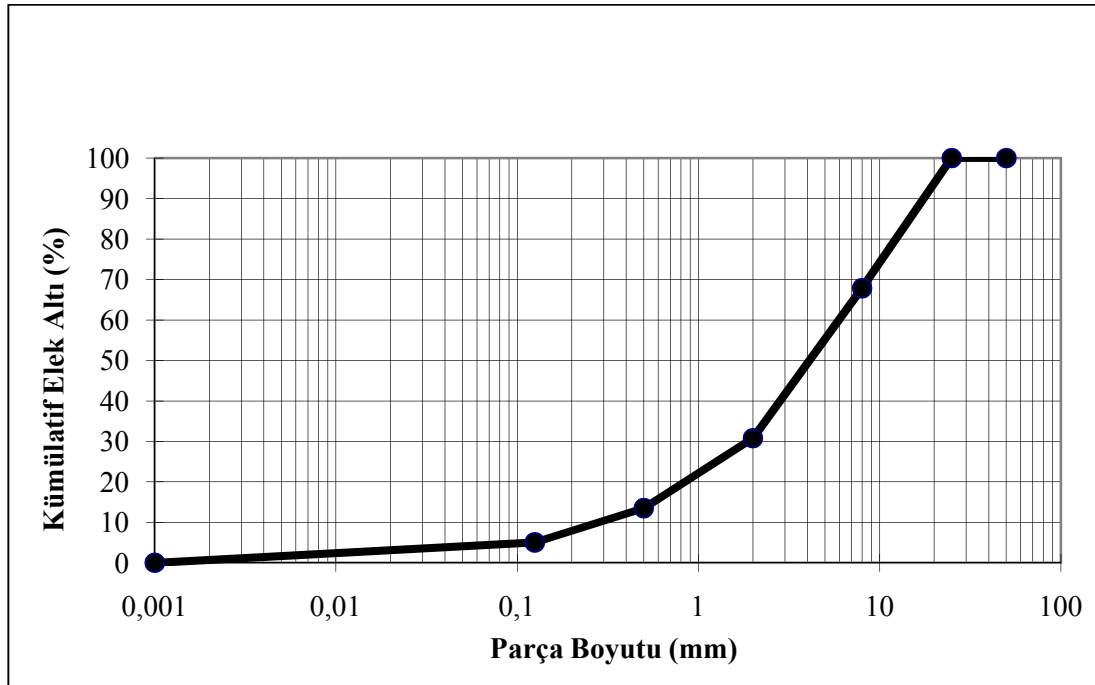
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	220,63	14,03	220,63	14,0	Pasa
2	-25 + 8	546,46	34,74	767,09	48,8	İrilik
3	-8 + 2	451,84	28,73	1218,93	77,5	Katsayısı
4	-2 + 0,5	193,03	12,27	1411,96	89,8	426
5	-0,5 + 0,125	97,61	6,21	1509,57	96,0	
6	-0,125	63,23	4,02	1572,80	100,0	



Şekil B.15: Arkoz yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=40mm d=9mm).

Çizelge B.16: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=3mm).

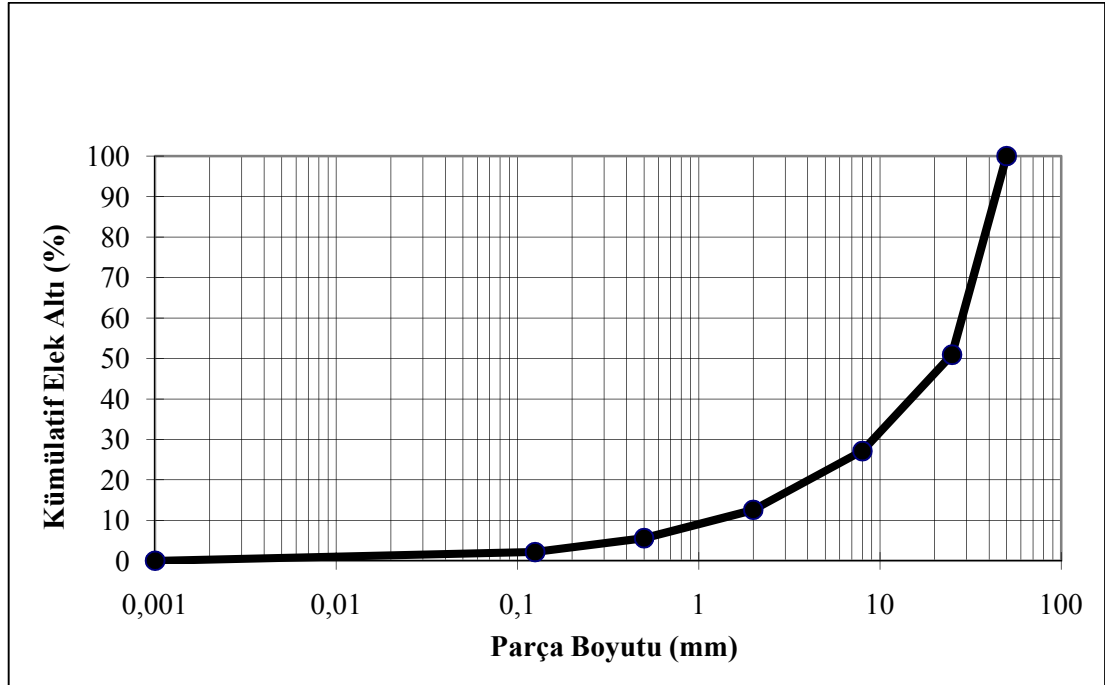
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	0,00	0,00	0,00	0,0	Pasa
2	-25 + 8	178,28	32,15	178,28	32,1	İrilik
3	-8 + 2	205,48	37,05	383,76	69,2	Katsayısı
4	-2 + 0,5	95,91	17,30	479,67	86,5	383
5	-0,5 + 0,125	46,82	8,44	526,49	94,9	
6	-0,125	28,05	5,06	554,54	100,0	



Şekil B.16: Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=3mm).

Çizelge B.17: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm).

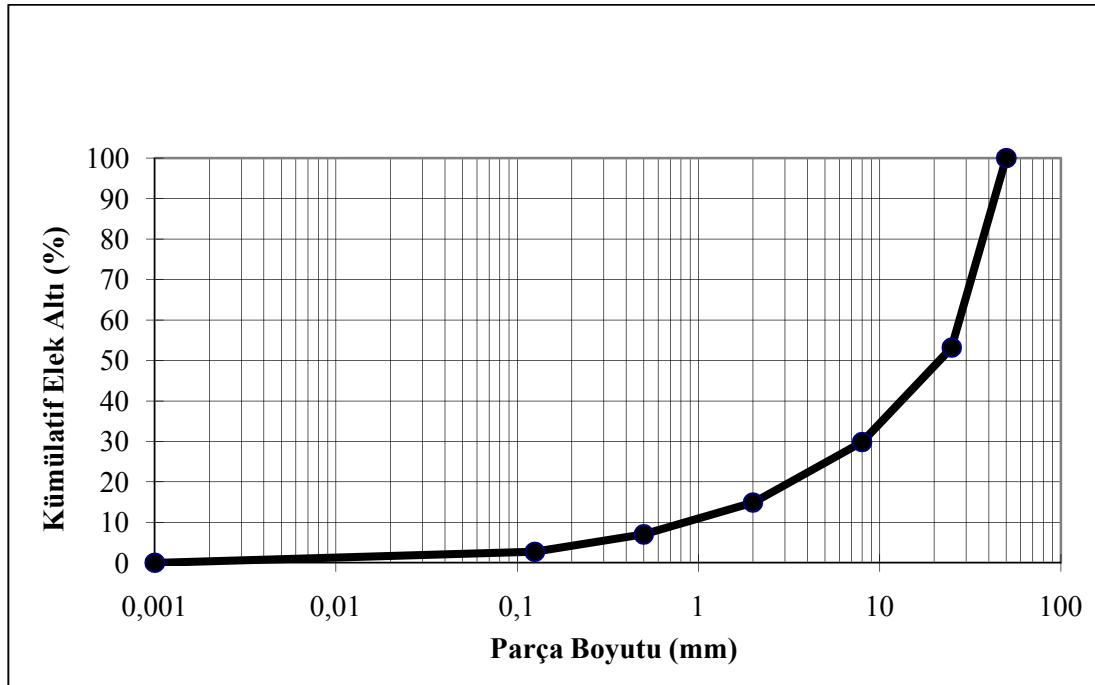
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1898,24	49,07	1898,24	49,1	Pasa
2	-25 + 8	920,87	23,81	2819,11	72,9	İrilik
3	-8 + 2	561,78	14,52	3380,89	87,4	Katsayısı
4	-2 + 0,5	270,13	6,98	3651,02	94,4	502
5	-0,5 + 0,125	132,90	3,44	3783,92	97,8	
6	-0,125	84,13	2,17	3868,05	100,0	



Şekil B.17: Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm).

Çizelge B.18: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm).

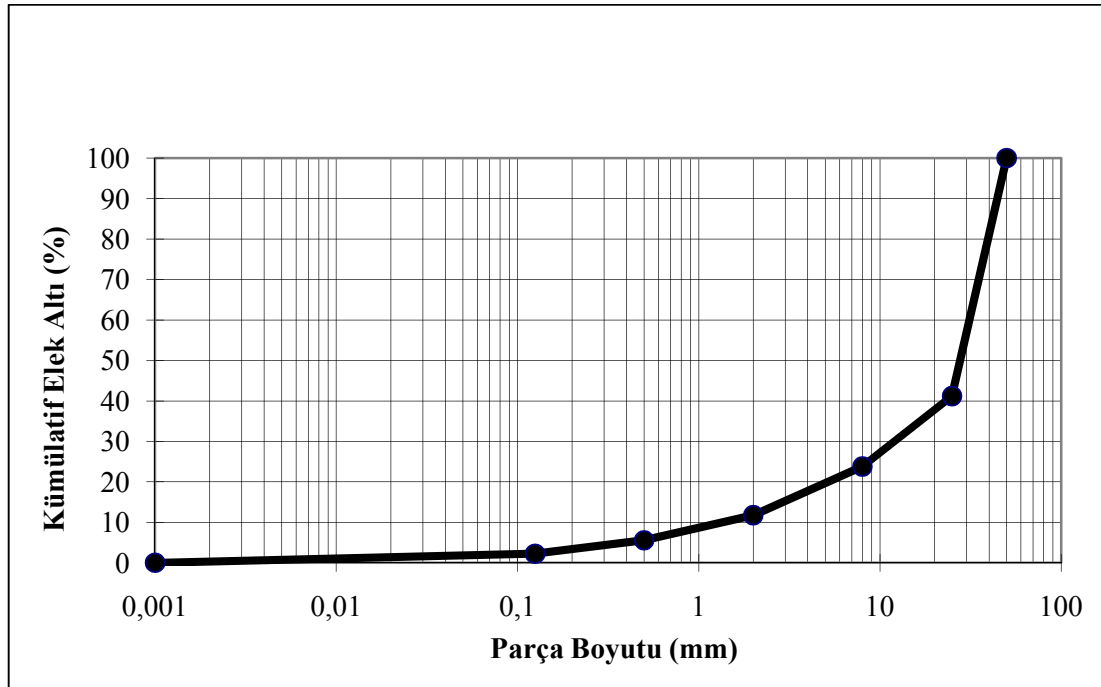
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	2557,34	46,83	2557,34	46,8	Pasa
2	-25 + 8	1274,28	23,33	3831,62	70,2	İrilik
3	-8 + 2	816,03	14,94	4647,65	85,1	Katsayısı
4	-2 + 0,5	429,94	7,87	5077,59	93,0	492
5	-0,5 + 0,125	234,15	4,29	5311,74	97,3	
6	-0,125	149,35	2,73	5461,09	100,0	



Şekil B.18: Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm).

Çizelge B.19: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm).

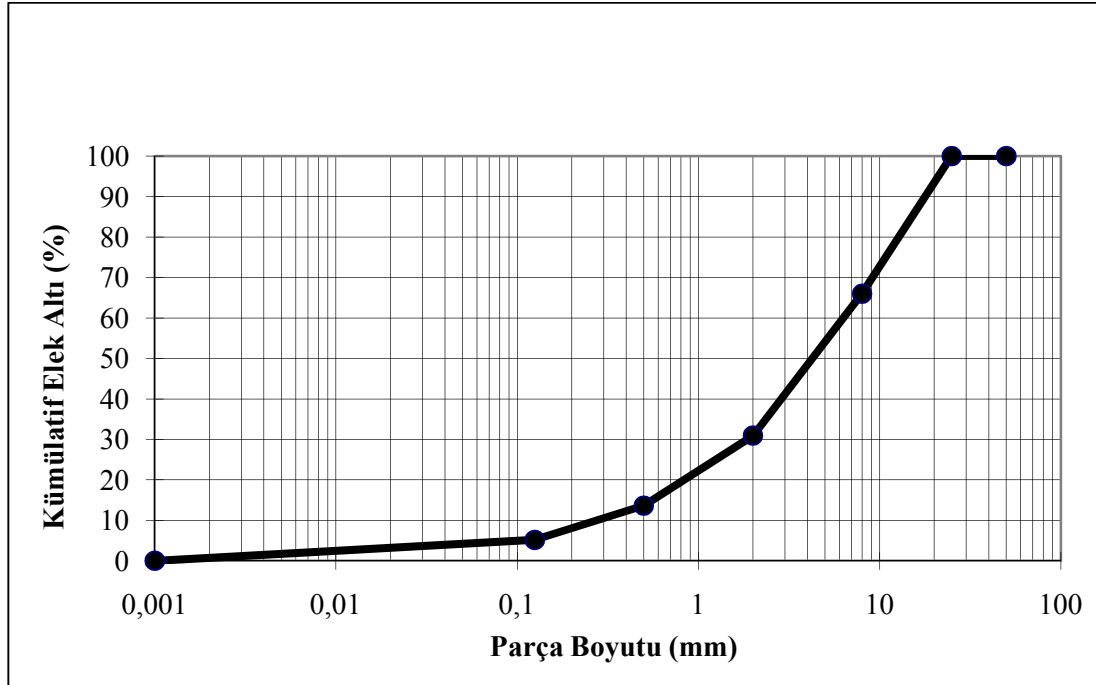
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	2879,59	58,80	2879,59	58,8	Pasa
2	-25 + 8	852,59	17,41	3732,18	76,2	İrilik
3	-8 + 2	588,53	12,02	4320,71	88,2	Katsayısı
4	-2 + 0,5	303,24	6,19	4623,95	94,4	515
5	-0,5 + 0,125	163,28	3,33	4787,23	97,7	
6	-0,125	110,27	2,25	4897,50	100,0	



Şekil B.19: Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm).

Çizelge B.20: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=3mm).

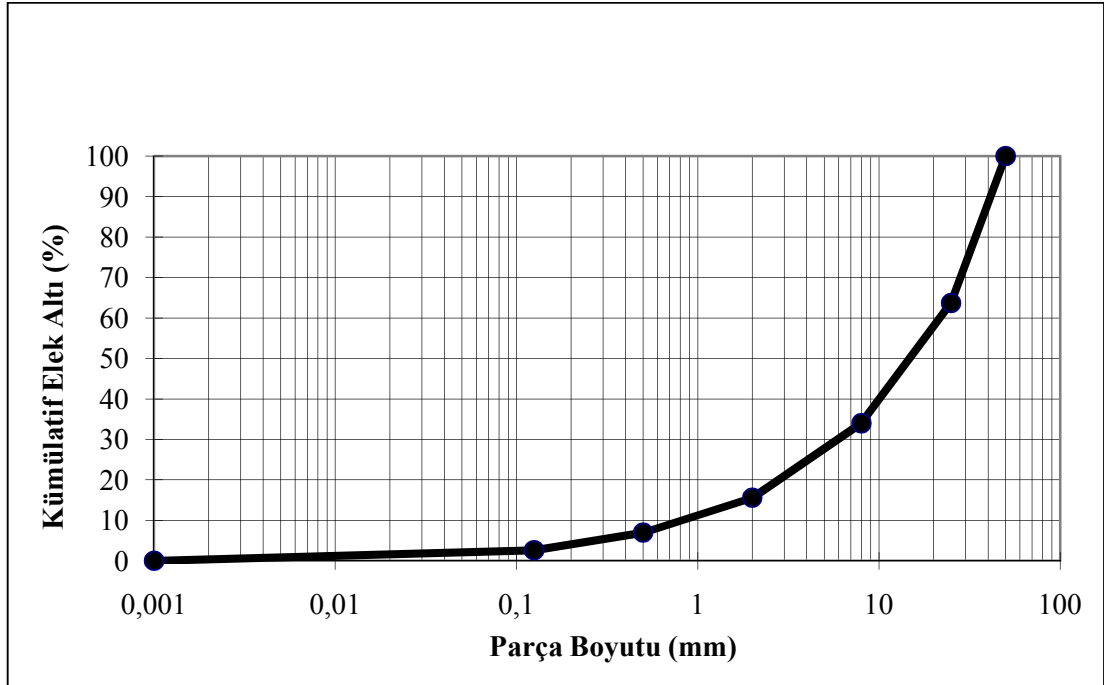
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	0,00	0,00	0,00	0,0	Pasa
2	-25 + 8	192,28	34,00	192,28	34,0	İrilik
3	-8 + 2	198,25	35,05	390,53	69,1	Katsayısı
4	-2 + 0,5	97,82	17,30	488,35	86,4	384
5	-0,5 + 0,125	47,87	8,46	536,22	94,8	
6	-0,125	29,32	5,18	565,54	100,0	



Şekil B.20: Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=3mm).

Çizelge B.21: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm).

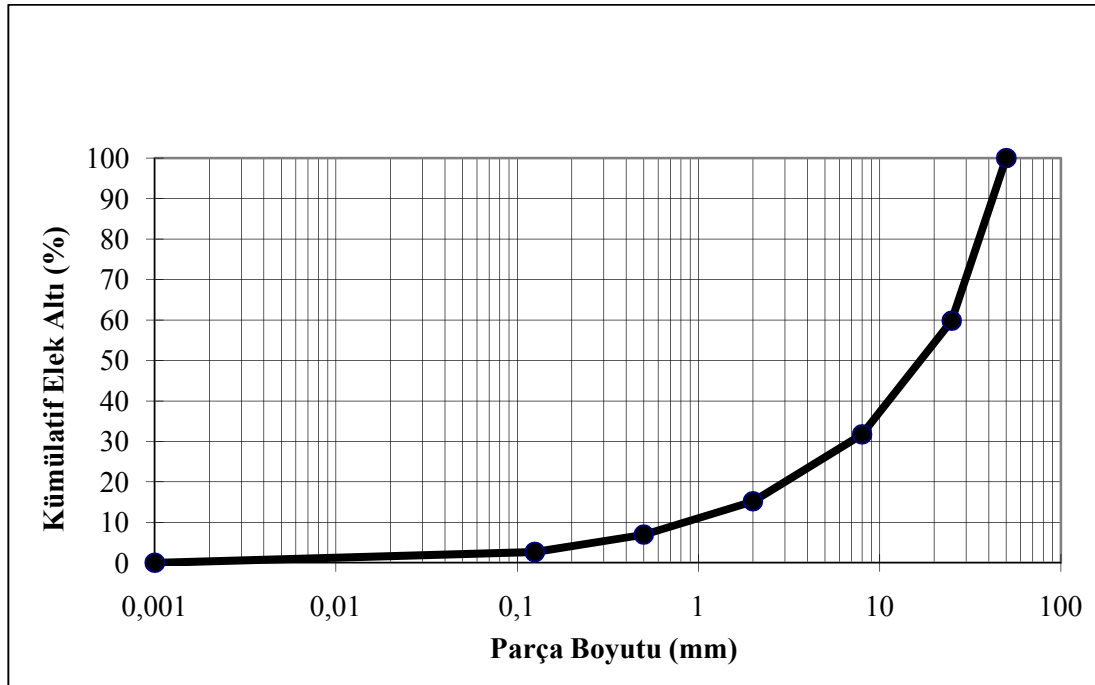
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1843,96	36,32	1843,96	36,3	Pasa
2	-25 + 8	1506,88	29,68	3350,84	66,0	İrilik
3	-8 + 2	934,47	18,41	4285,31	84,4	Katsayısı
4	-2 + 0,5	436,72	8,60	4722,03	93,0	477
5	-0,5 + 0,125	221,88	4,37	4943,91	97,4	
6	-0,125	132,56	2,61	5076,47	100,0	



Şekil B.21: Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm).

Çizelge B.22: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm).

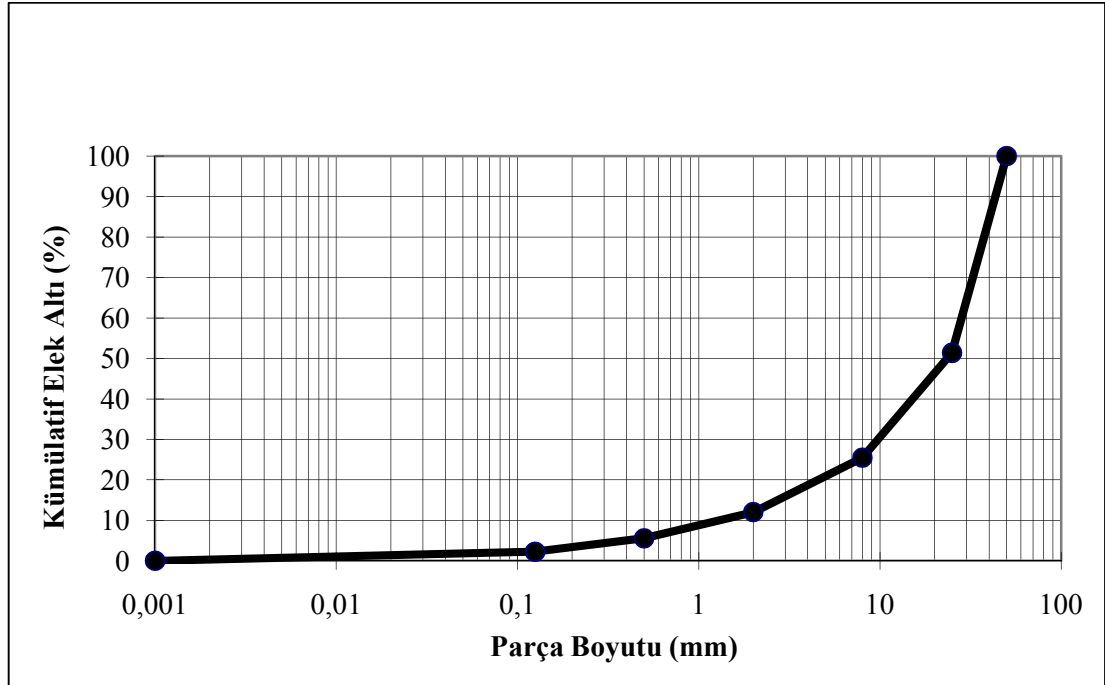
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	4242,30	40,20	4242,30	40,2	Pasa
2	-25 + 8	2962,38	28,07	7204,68	68,3	İrilik
3	-8 + 2	1744,05	16,53	8948,73	84,8	Katsayısı
4	-2 + 0,5	867,22	8,22	9815,95	93,0	484
5	-0,5 + 0,125	453,72	4,30	10269,67	97,3	
6	-0,125	282,29	2,68	10551,96	100,0	



Şekil B.22: Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm).

Çizelge B.23: Arkoz elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=9mm).

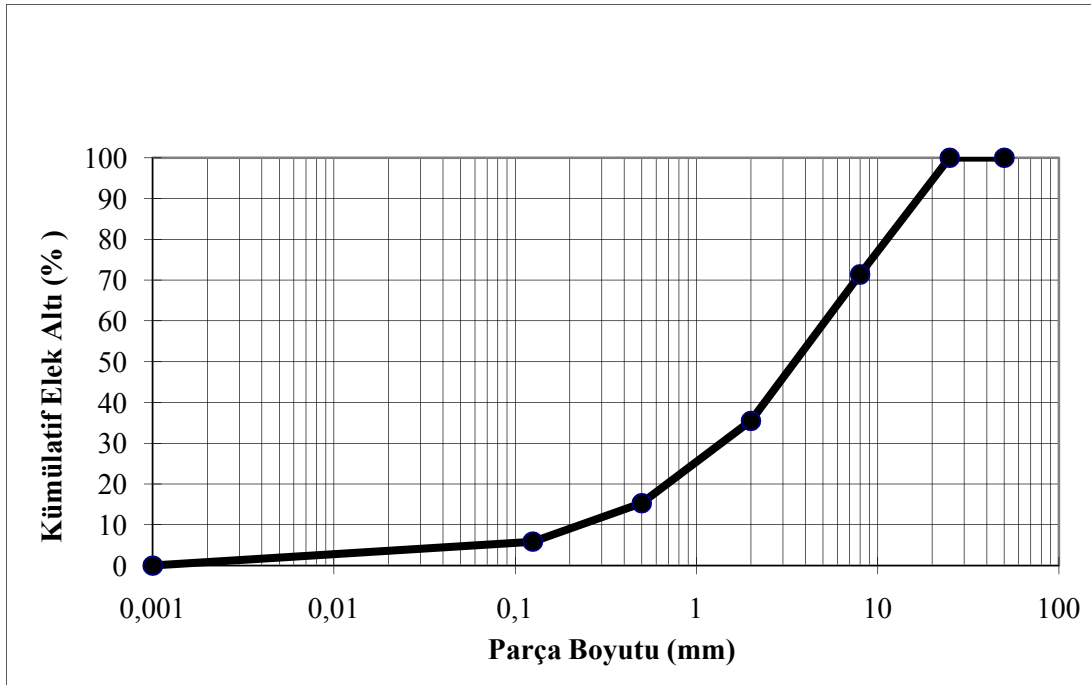
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	2346,35	48,61	2346,35	48,6	Pasa
2	-25 + 8	1250,77	25,91	3597,12	74,5	İrilik
3	-8 + 2	648,51	13,44	4245,63	88,0	Katsayısı
4	-2 + 0,5	311,56	6,46	4557,19	94,4	503
5	-0,5 + 0,125	161,20	3,34	4718,39	97,8	
6	-0,125	108,24	2,24	4826,63	100,0	



Şekil B.23: Arkoz yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=9mm).

Çizelge B.24: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm).

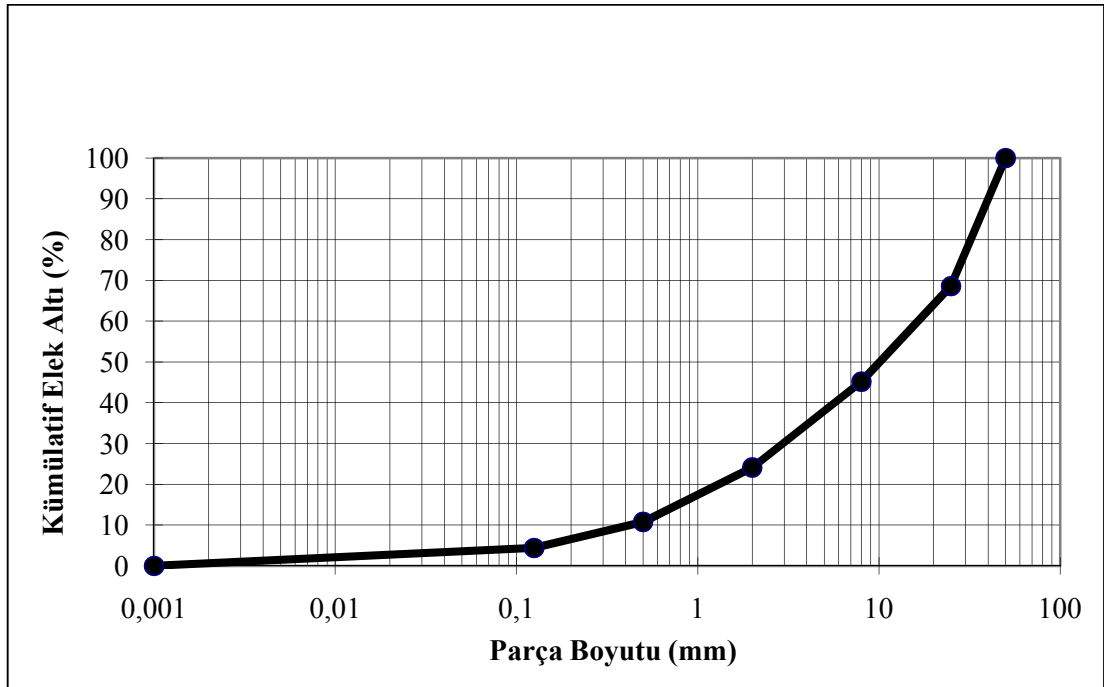
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	0,00	0,00	0,00	0,0	Pasa
2	-25 + 8	100,58	28,61	100,58	28,6	İrilik
3	-8 + 2	126,24	35,91	226,82	64,5	Katsayısı
4	-2 + 0,5	70,97	20,19	297,79	84,7	372
5	-0,5 + 0,125	33,18	9,44	330,97	94,1	
6	-0,125	20,57	5,85	351,54	100,0	



Şekil B.24: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm).

Çizelge B.25: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm).

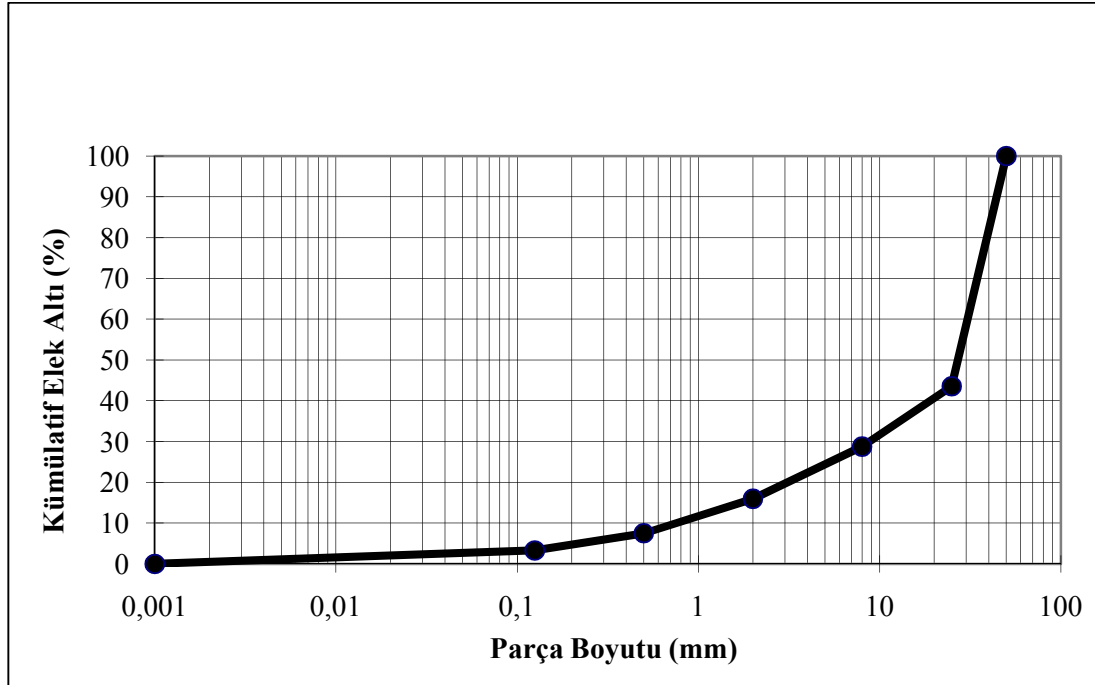
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	243,21	31,39	243,21	31,4	Pasa
2	-25 + 8	181,60	23,44	424,81	54,8	İrilik
3	-8 + 2	163,04	21,04	587,85	75,9	Katsayısı
4	-2 + 0,5	103,45	13,35	691,30	89,2	447
5	-0,5 + 0,125	49,34	6,37	740,64	95,6	
6	-0,125	34,09	4,40	774,73	100,0	



Şekil B.25: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm).

Çizelge B.26: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm).

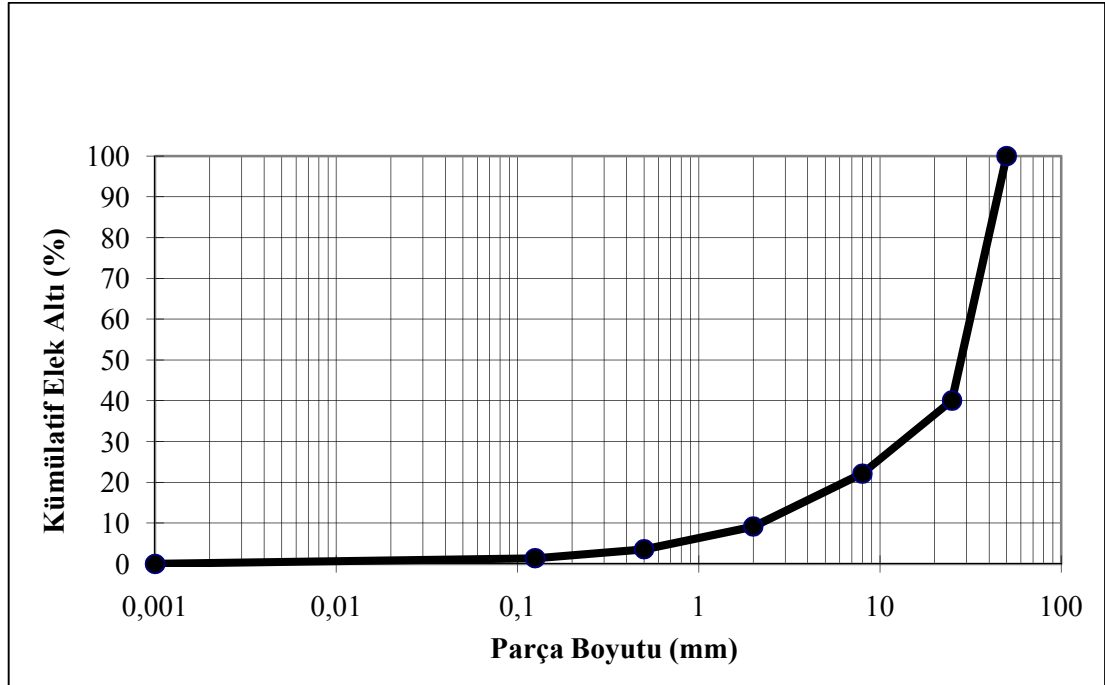
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1236,32	56,48	1236,32	56,5	Pasa
2	-25 + 8	323,14	14,76	1559,46	71,2	İrilik
3	-8 + 2	280,33	12,81	1839,79	84,0	Katsayısı
4	-2 + 0,5	185,23	8,46	2025,02	92,5	501
5	-0,5 + 0,125	92,25	4,21	2117,27	96,7	
6	-0,125	71,81	3,28	2189,08	100,0	



Şekil B.26: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm).

Çizelge B.27: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=4mm).

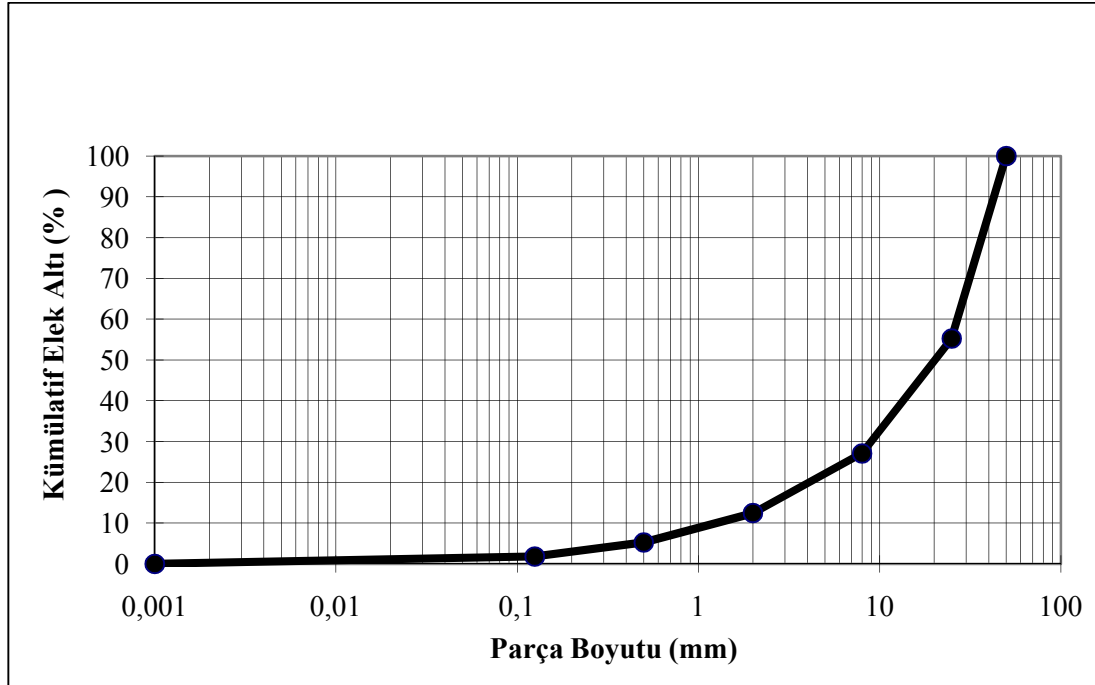
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1119,38	59,94	1119,38	59,9	Pasa
2	-25 + 8	334,85	17,93	1454,23	77,9	İrilik
3	-8 + 2	242,28	12,97	1696,51	90,8	Katsayısı
4	-2 + 0,5	104,18	5,58	1800,69	96,4	524
5	-0,5 + 0,125	40,91	2,19	1841,60	98,6	
6	-0,125	25,98	1,39	1867,58	100,0	



Şekil B.27: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=4mm).

Çizelge B.28: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=6mm).

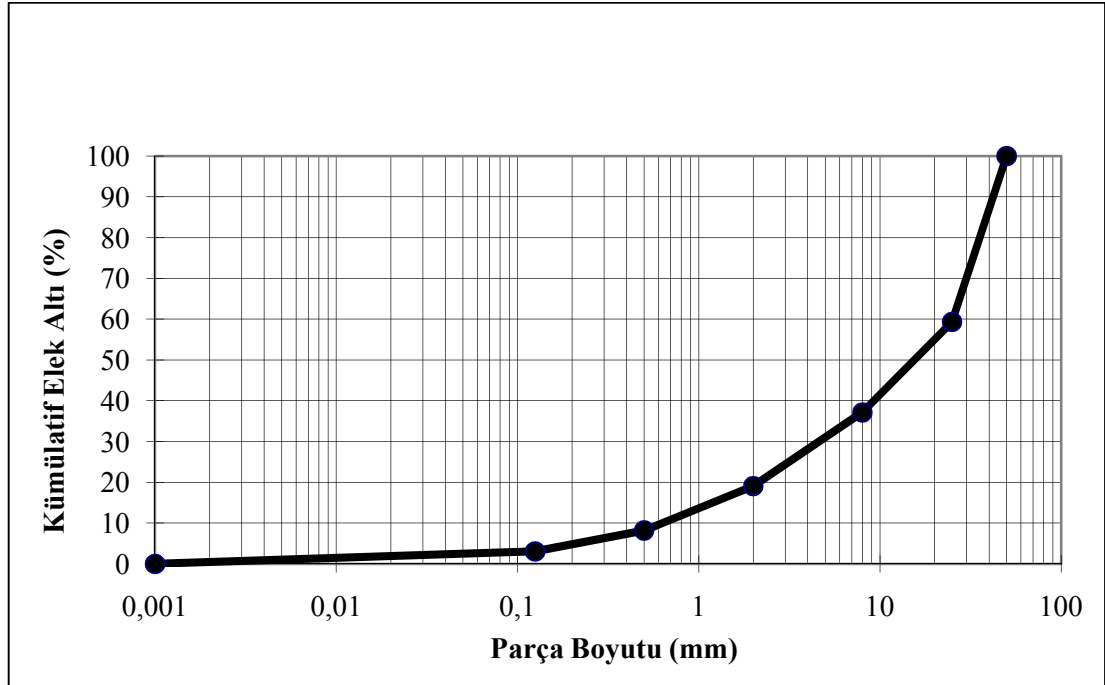
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	916,20	44,77	916,20	44,8	Pasa
2	-25 + 8	576,15	28,15	1492,35	72,9	İrilik
3	-8 + 2	299,46	14,63	1791,81	87,6	Katsayısı
4	-2 + 0,5	147,39	7,20	1939,20	94,8	498
5	-0,5 + 0,125	70,58	3,45	2009,78	98,2	
6	-0,125	36,82	1,80	2046,60	100,0	



Şekil B.28: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=6mm).

Çizelge B.29: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=8mm).

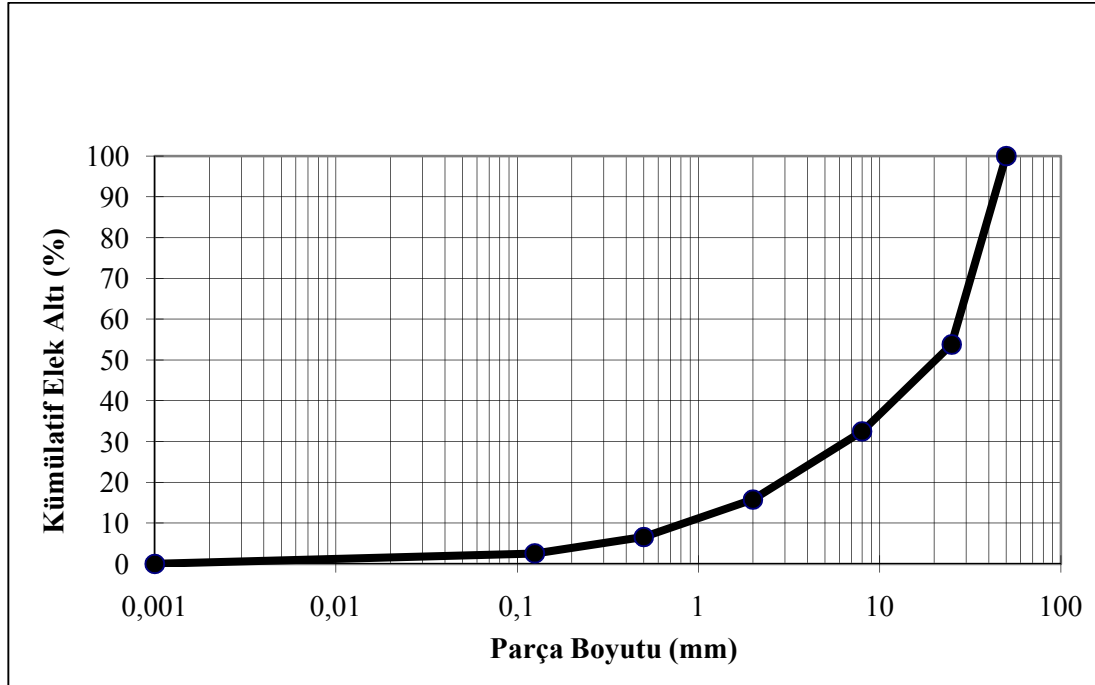
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	633,00	40,67	633,00	40,7	Pasa
2	-25 + 8	345,32	22,19	978,32	62,9	İrilik
3	-8 + 2	281,17	18,07	1259,49	80,9	Katsayısı
4	-2 + 0,5	169,56	10,90	1429,05	91,8	473
5	-0,5 + 0,125	79,78	5,13	1508,83	97,0	
6	-0,125	47,41	3,05	1556,24	100,0	



Şekil B.29: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=8mm).

Çizelge B.30: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=5mm).

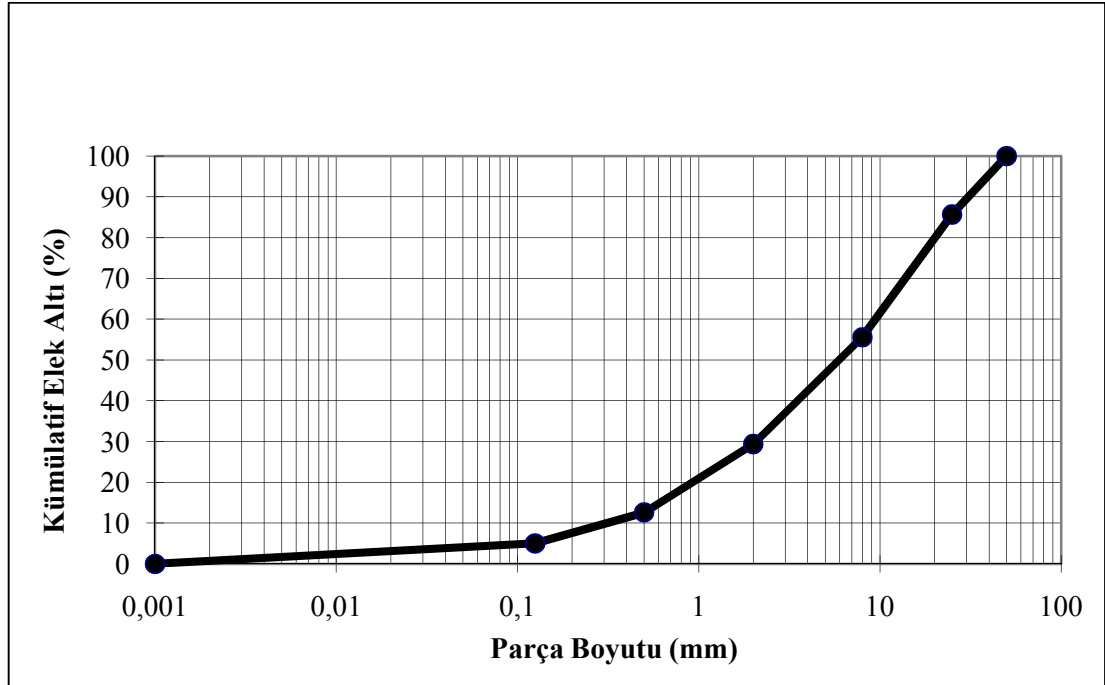
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	456,18	46,20	456,18	46,2	Pasa
2	-25 + 8	210,52	21,32	666,70	67,5	İrilik
3	-8 + 2	164,92	16,70	831,62	84,2	Katsayısı
4	-2 + 0,5	90,79	9,20	922,41	93,4	489
5	-0,5 + 0,125	39,71	4,02	962,12	97,4	
6	-0,125	25,25	2,56	987,37	100,0	



Şekil B.30: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=5mm).

Çizelge B.31: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=7mm).

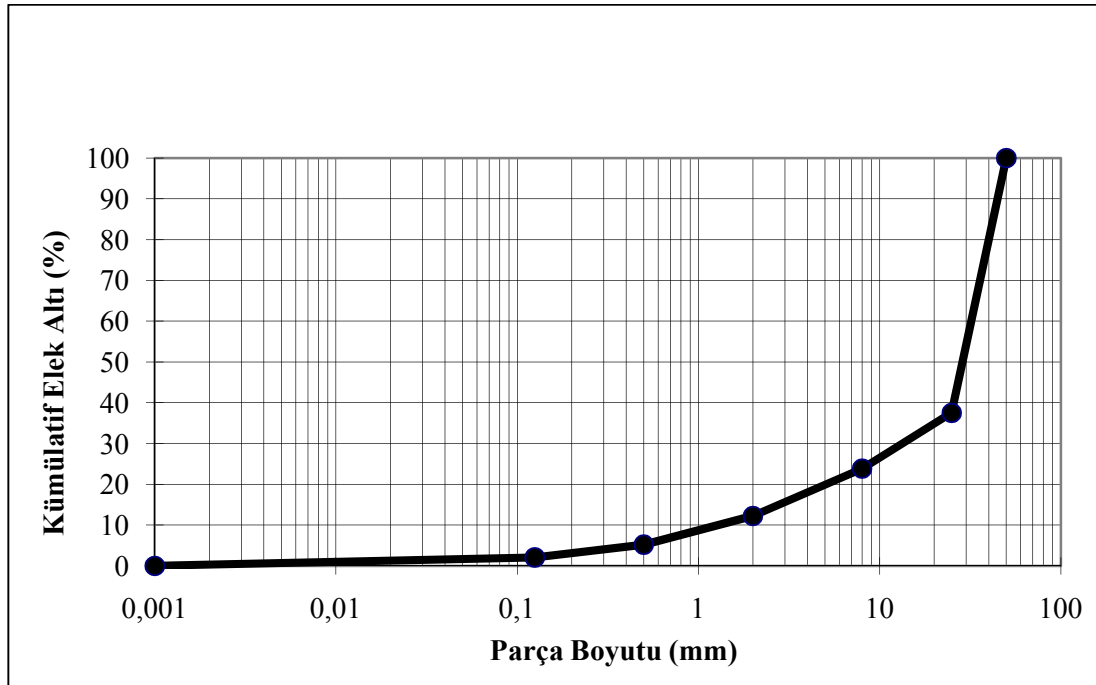
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	180,49	14,33	180,49	14,3	Pasa
2	-25 + 8	379,33	30,11	559,82	44,4	İrilik
3	-8 + 2	329,64	26,17	889,46	70,6	Katsayısı
4	-2 + 0,5	211,33	16,78	1100,79	87,4	412
5	-0,5 + 0,125	95,60	7,59	1196,39	95,0	
6	-0,125	63,32	5,03	1259,71	100,0	



Şekil B.31: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=7mm).

Çizelge B.32: Şeyl elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=9mm).

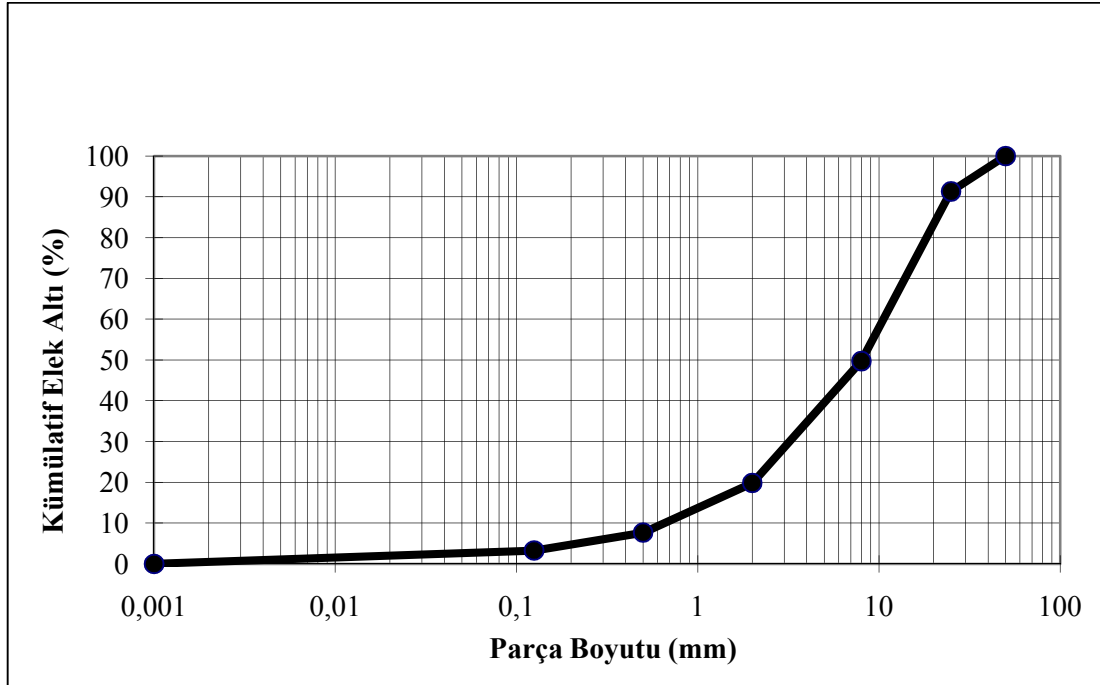
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+2 5	1790,53	62,48	1790,53	62,5	Pasa
2	-25 + 8	392,40	13,69	2182,93	76,2	İrilik
3	-8 + 2	332,23	11,59	2515,16	87,8	Katsayısı
4	-2 + 0,5	201,54	7,03	2716,70	94,8	519
5	-0,5 + 0,125	90,16	3,15	2806,86	97,9	
6	-0,125	59,11	2,06	2865,97	100,0	



Şekil B.32: Şeyl yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=100mm d=9mm).

Çizelge B.33: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=5mm).

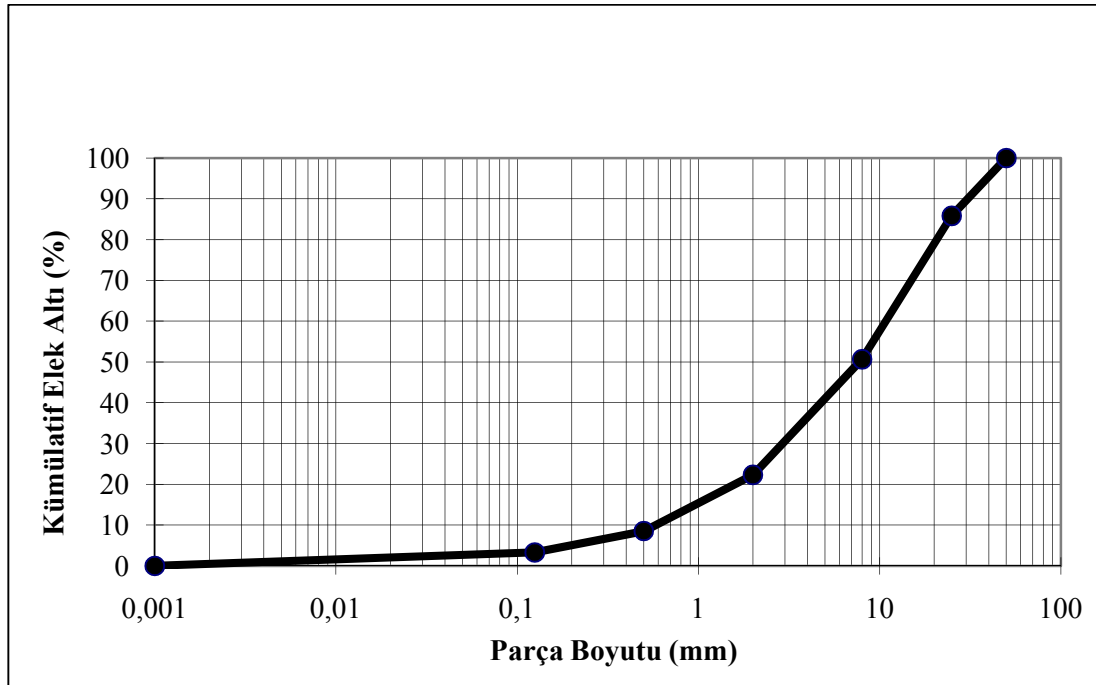
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	47,83	8,67	47,83	8,7	Pasa
2	-25 + 8	229,48	41,61	277,31	50,3	İrilik
3	-8 + 2	164,72	29,87	442,03	80,2	Katsayısı
4	-2 + 0,5	67,18	12,18	509,21	92,3	428
5	-0,5 + 0,125	24,18	4,38	533,39	96,7	
6	-0,125	18,05	3,27	551,44	100,0	



Şekil B.33: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=5mm).

Çizelge B.34: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7mm).

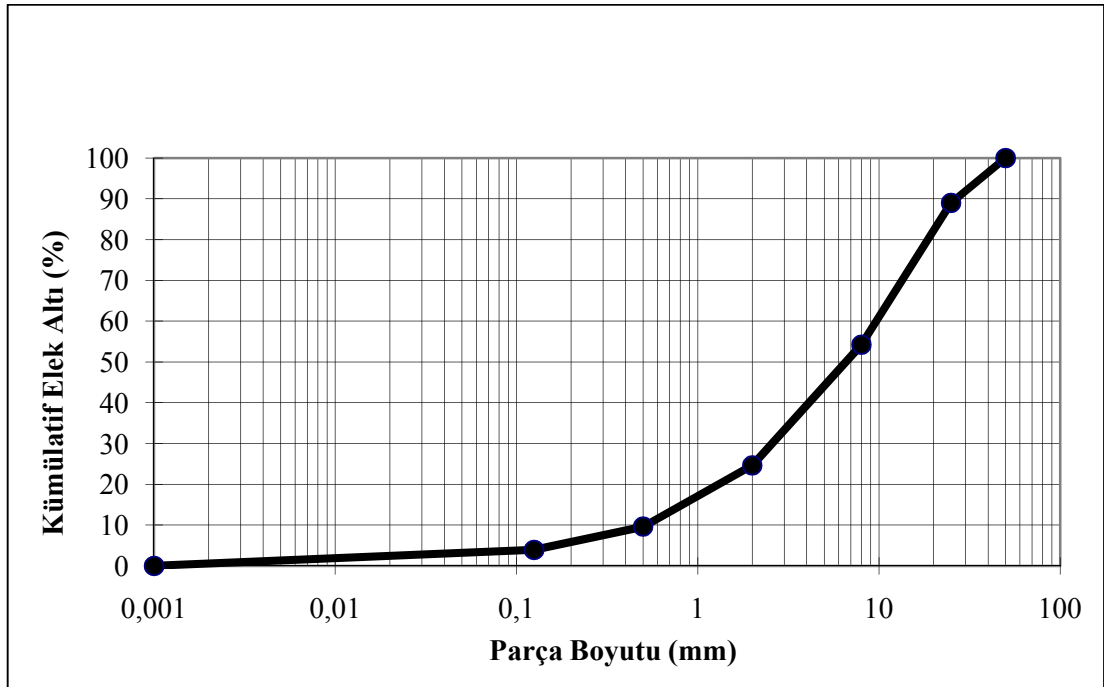
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	107,46	14,17	107,46	14,2	Pasa
2	-25 + 8	266,64	35,17	374,10	49,3	İrilik
3	-8 + 2	214,98	28,35	589,08	77,7	Katsayısı
4	-2 + 0,5	104,50	13,78	693,58	91,5	429
5	-0,5 + 0,125	39,67	5,23	733,25	96,7	
6	-0,125	24,97	3,29	758,22	100,0	



Şekil B.34: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7mm).

Çizelge B.35: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=9mm).

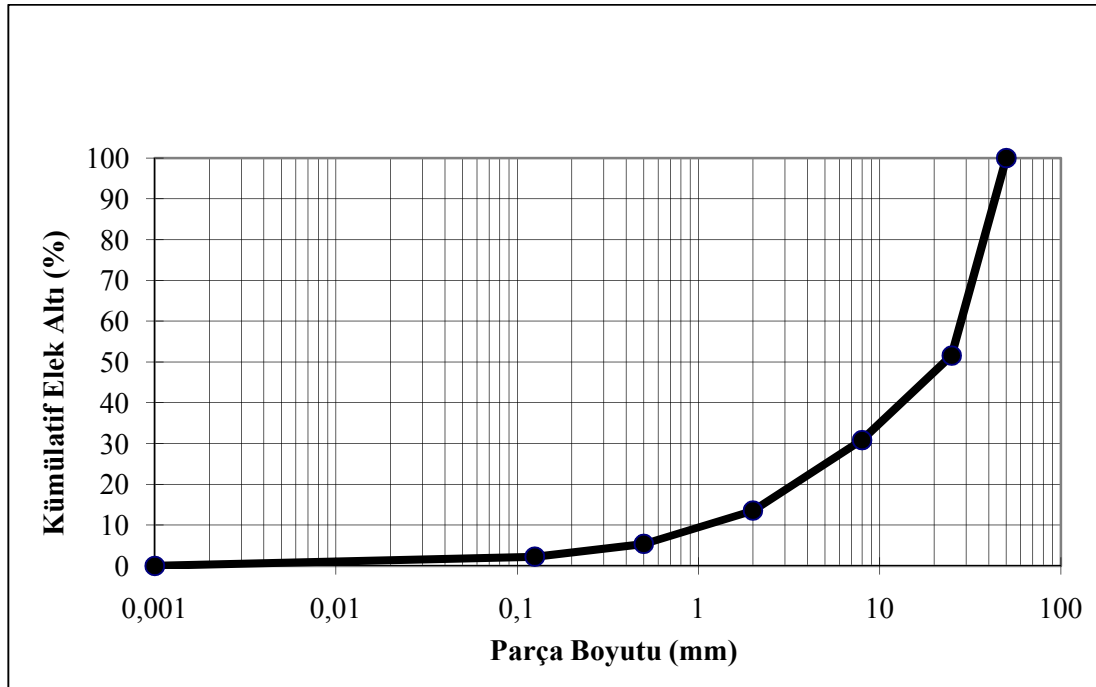
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	131,75	11,01	131,75	11,0	Pasa
2	-25 + 8	415,84	34,76	547,59	45,8	İrilik
3	-8 + 2	353,93	29,59	901,52	75,4	Katsayısı
4	-2 + 0,5	179,67	15,02	1081,19	90,4	419
5	-0,5 + 0,125	68,09	5,69	1149,28	96,1	
6	-0,125	46,88	3,92	1196,16	100,0	



Şekil B.35: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=9mm).

Çizelge B.36: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=5mm).

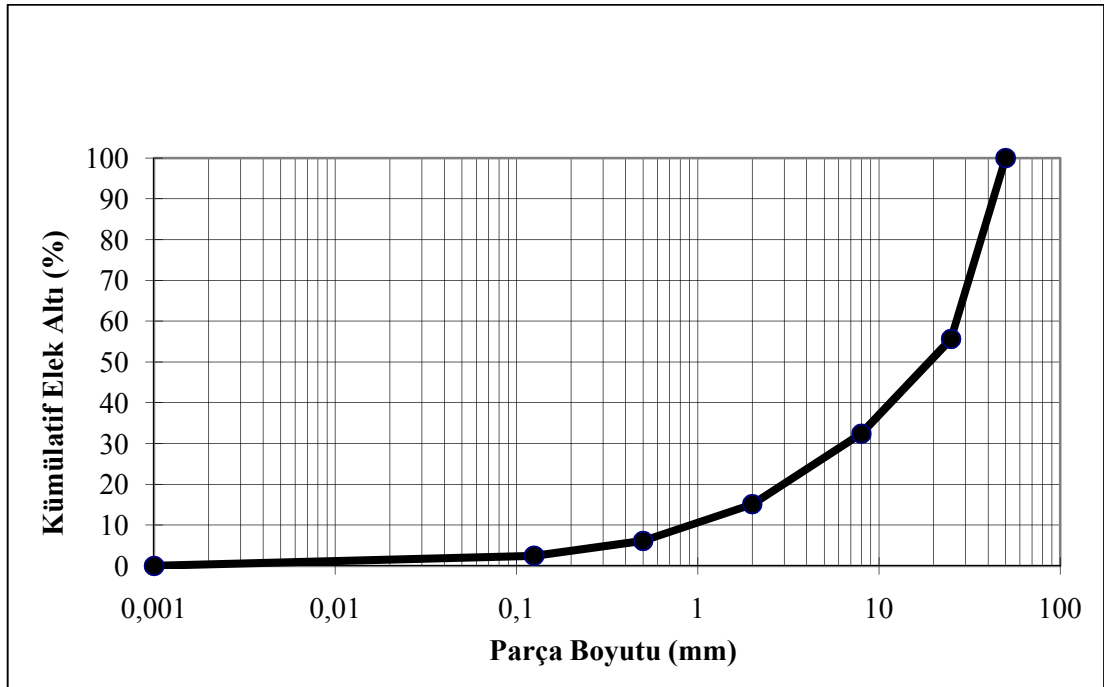
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1387,19	48,44	1387,19	48,4	Pasa
2	-25 + 8	593,48	20,72	1980,67	69,2	İrilik
3	-8 + 2	495,01	17,28	2475,68	86,4	Katsayısı
4	-2 + 0,5	234,39	8,18	2710,07	94,6	496
5	-0,5 + 0,125	89,41	3,12	2799,48	97,7	
6	-0,125	64,53	2,25	2864,01	100,0	



Şekil B.36: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=5mm).

Çizelge B.37: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=7mm).

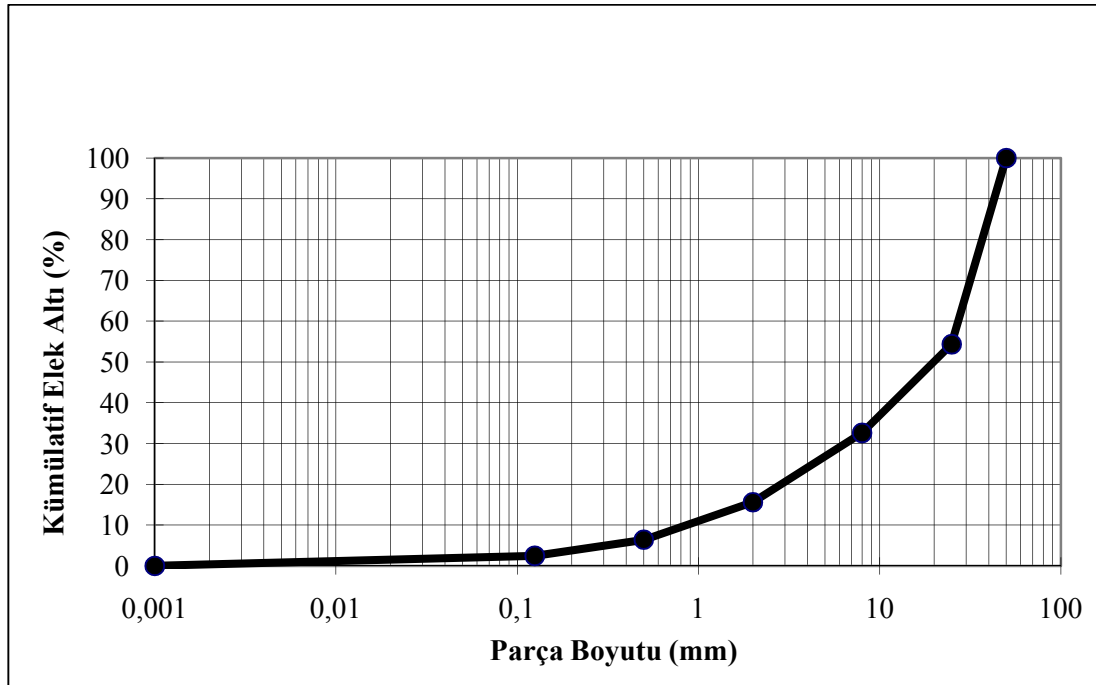
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	2064,74	44,37	2064,74	44,4	Pasa
2	-25 + 8	1079,94	23,21	3144,68	67,6	İrilik
3	-8 + 2	804,55	17,29	3949,23	84,9	Katsayısı
4	-2 + 0,5	419,21	9,01	4368,44	93,9	488
5	-0,5 + 0,125	169,69	3,65	4538,13	97,5	
6	-0,125	115,11	2,47	4653,24	100,0	



Şekil B.37: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=7mm).

Çizelge B.38: Şeyl elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=9mm).

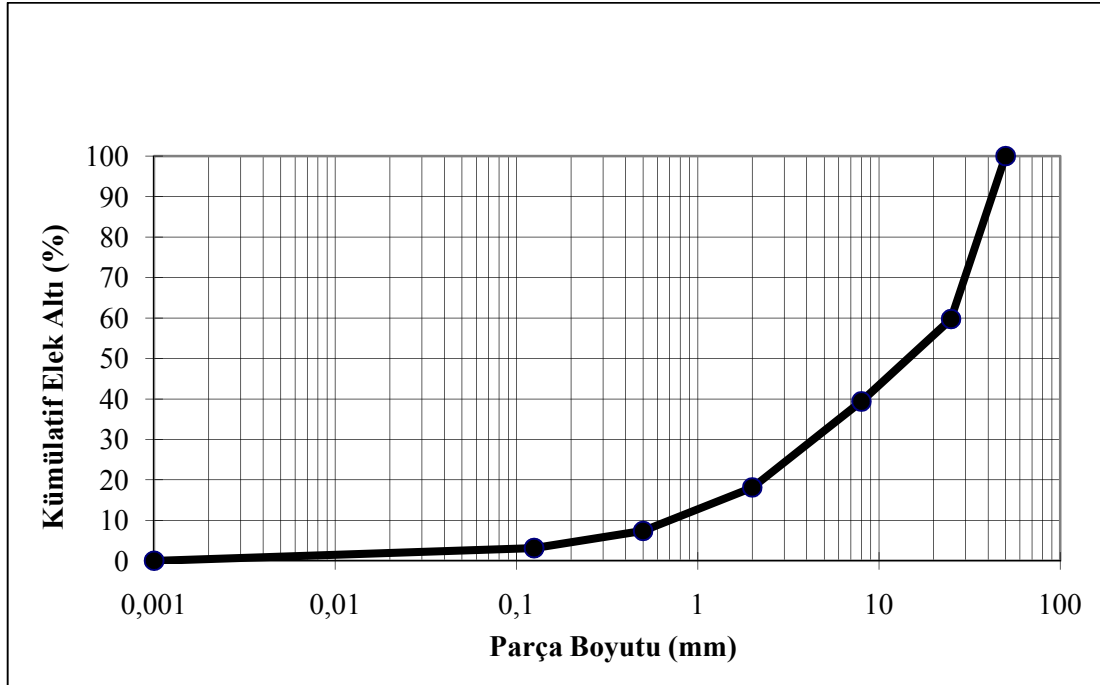
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	3184,63	45,66	3184,63	45,7	Pasa
2	-25 + 8	1516,26	21,74	4700,89	67,4	İrilik
3	-8 + 2	1183,88	16,98	5884,77	84,4	Katsayısı
4	-2 + 0,5	643,32	9,22	6528,09	93,6	489
5	-0,5 + 0,125	275,64	3,95	6803,73	97,6	
6	-0,125	170,49	2,44	6974,22	100,0	



Şekil B.38: Şeyl yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=80mm d=9mm).

Çizelge B.39: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm).

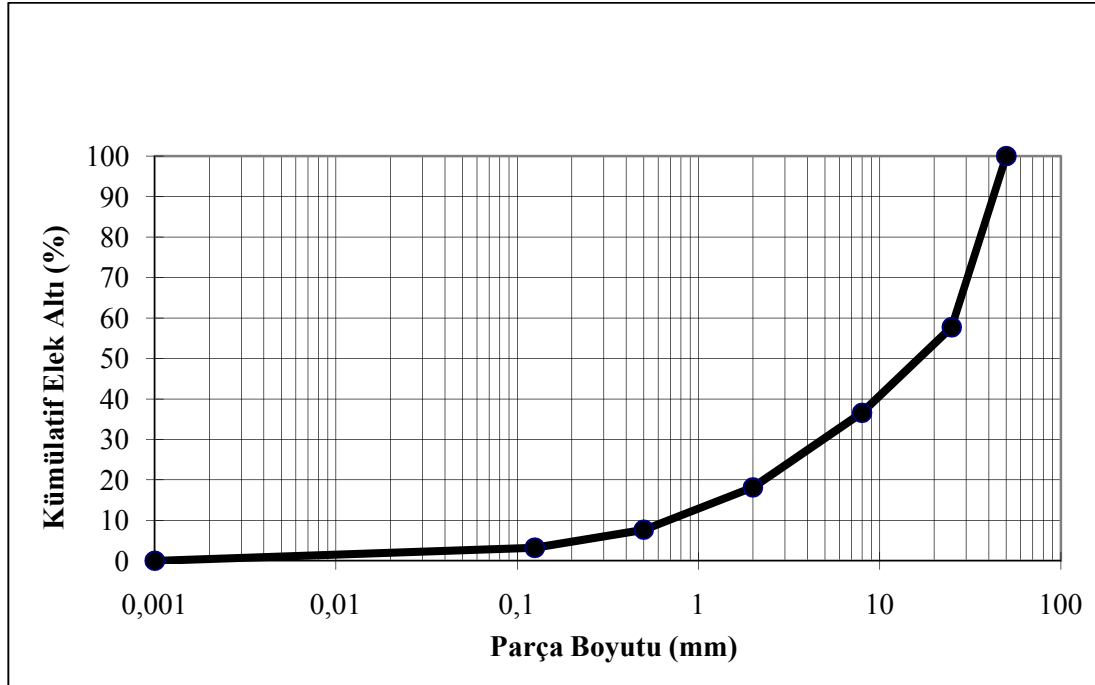
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	915,86	40,29	915,86	40,3	Pasa
2	-25 + 8	462,37	20,34	1378,23	60,6	İrilik
3	-8 + 2	483,23	21,26	1861,46	81,9	Katsayısı
4	-2 + 0,5	243,95	10,73	2105,41	92,6	472
5	-0,5 + 0,125	96,66	4,25	2202,07	96,9	
6	-0,125	71,38	3,14	2273,45	100,0	



Şekil B.39: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm).

Çizelge B.40: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm).

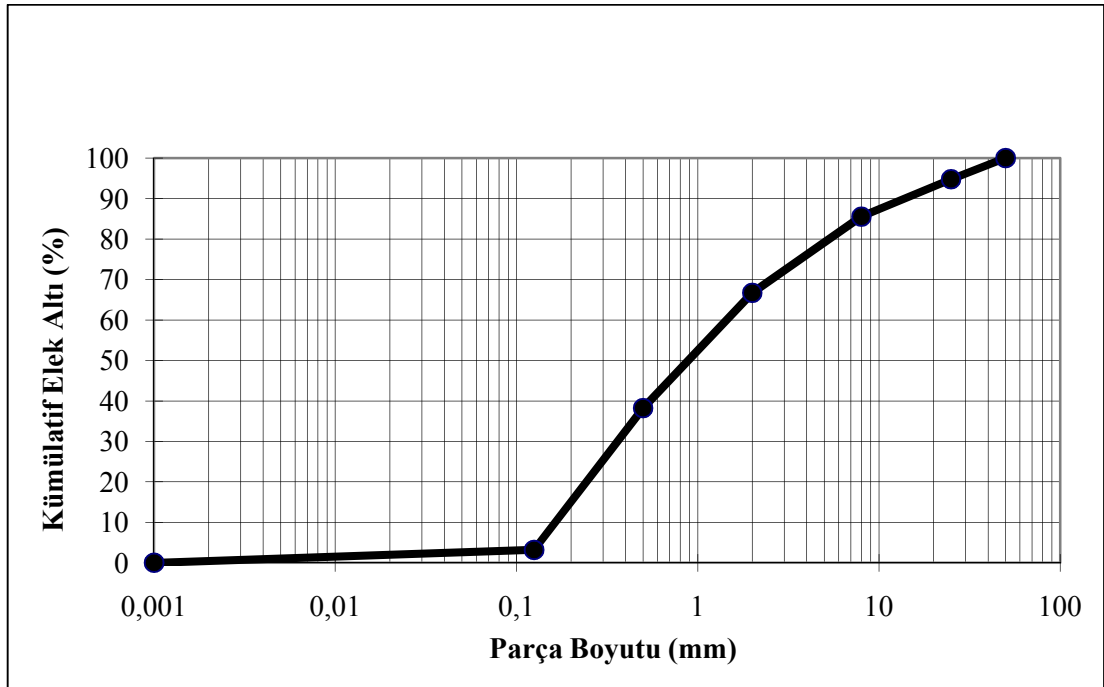
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1901,16	42,27	1901,16	42,3	Pasa
2	-25 + 8	951,06	21,15	2852,22	63,4	İrilik
3	-8 + 2	829,35	18,44	3681,57	81,9	Katsayısı
4	-2 + 0,5	470,72	10,47	4152,29	92,3	477
5	-0,5 + 0,125	200,31	4,45	4352,60	96,8	
6	-0,25	145,09	3,23	4497,69	100,0	



Şekil B.40: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm).

Çizelge B.41: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm).

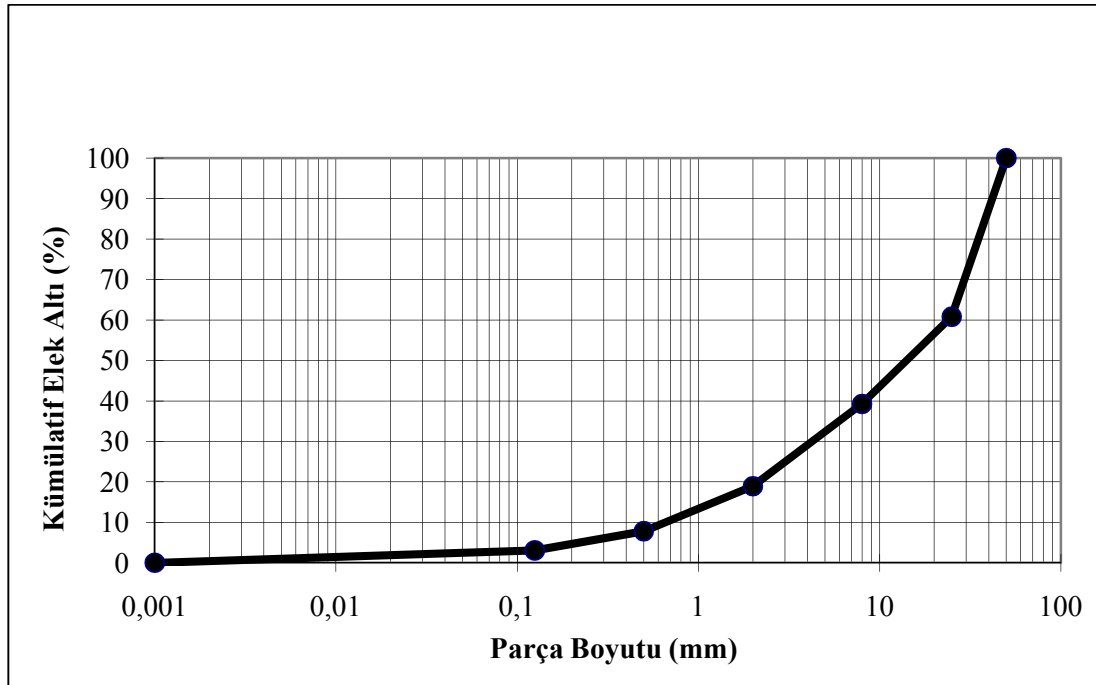
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	278,27	5,22	278,27	5,2	Pasa
2	-25 + 8	492,87	9,25	771,14	14,5	İrilik
3	-8 + 2	1002,45	18,81	1773,59	33,3	Katsayısı
4	-2 + 0,5	1517,07	28,47	3290,66	61,7	312
5	-0,5 + 0,125	1867,31	35,04	5157,97	96,8	
6	-0,125	171,09	3,21	5329,06	100,0	



Şekil B.41: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm).

Çizelge B.42: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm).

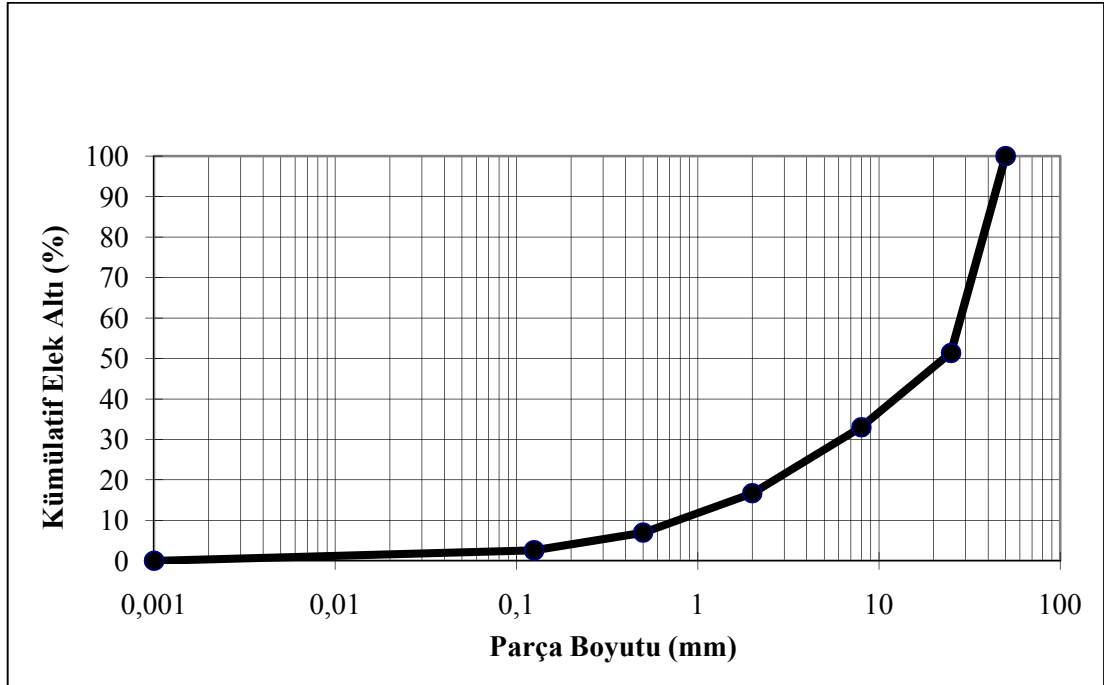
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1752,16	39,19	1752,16	39,2	Pasa
2	-25 + 8	963,43	21,55	2715,59	60,7	İrilik
3	-8 + 2	909,12	20,33	3624,71	81,1	Katsayısı
4	-2 + 0,5	497,12	11,12	4121,83	92,2	470
5	-0,5 + 0,125	212,22	4,75	4334,05	96,9	
6	-0,125	137,33	3,07	4471,38	100,0	



Şekil B.42: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=5mm).

Çizelge B.43: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm).

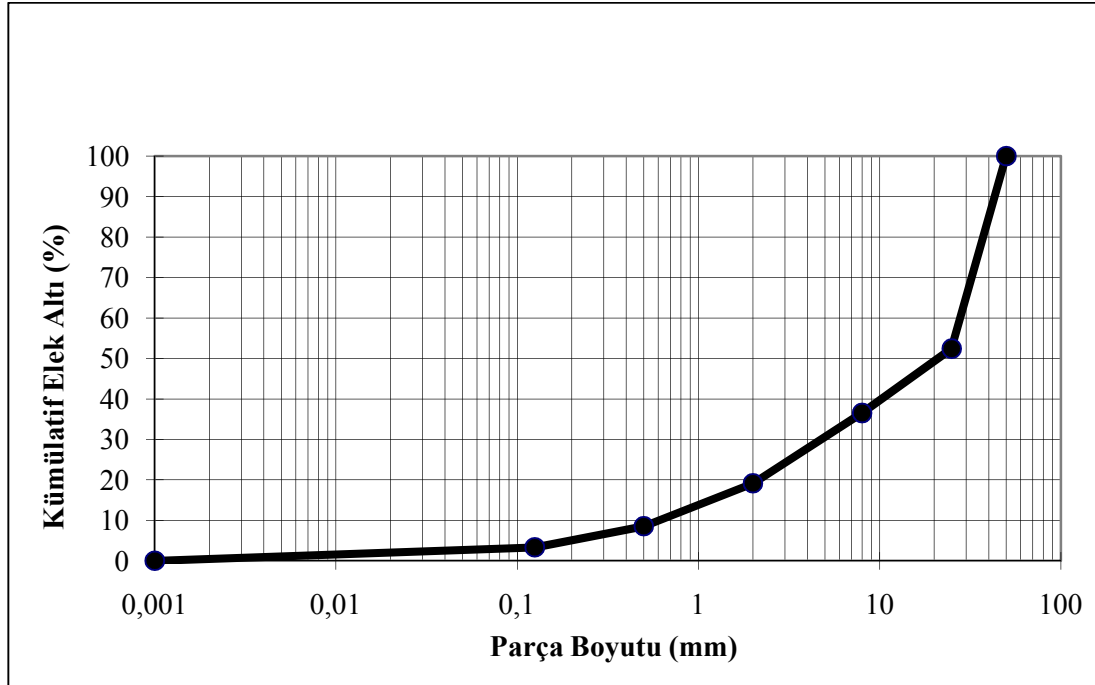
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	3665,24	48,62	3665,24	48,6	Pasa
2	-25 + 8	1383,25	18,35	5048,49	67,0	İrilik
3	-8 + 2	1229,92	16,32	6278,41	83,3	Katsayısı
4	-2 + 0,5	734,89	9,75	7013,30	93,0	489
5	-0,5 + 0,125	329,69	4,37	7342,99	97,4	
6	-0,125	195,02	2,59	7538,01	100,0	



Şekil B.43: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=7mm).

Çizelge B.44: Şeyl elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=9mm).

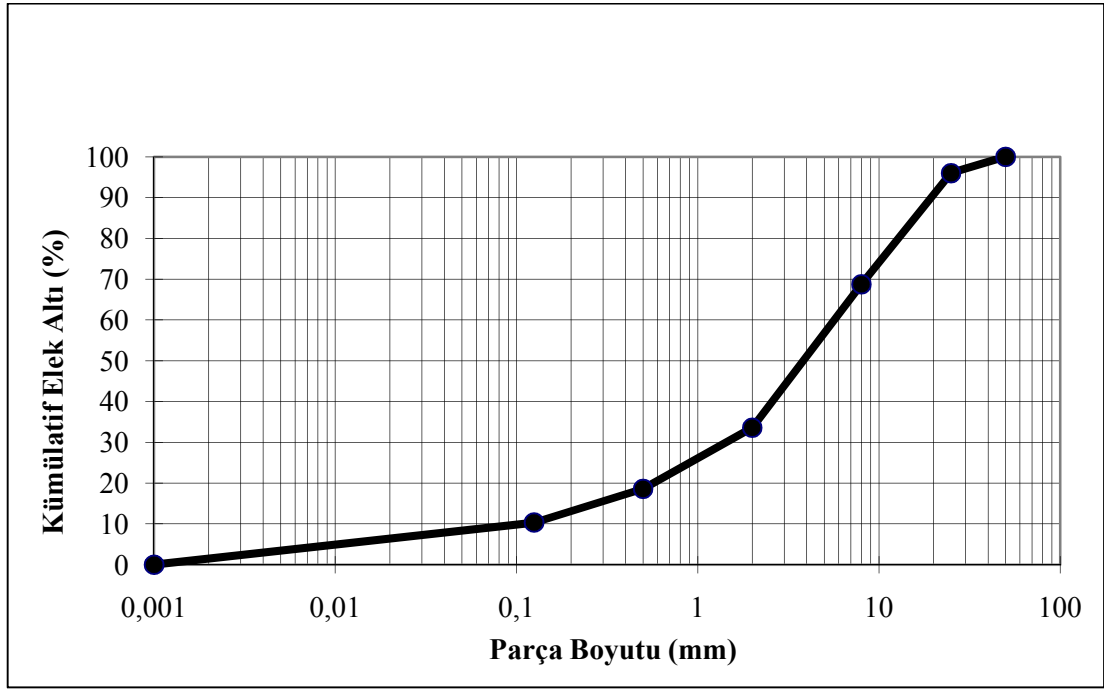
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	2503,70	47,56	2503,70	47,6	Pasa
2	-25 + 8	836,93	15,90	3340,63	63,5	İrilik
3	-8 + 2	915,49	17,39	4256,12	80,9	Katsayısı
4	-2 + 0,5	557,86	10,60	4813,98	91,5	480
5	-0,5 + 0,125	273,95	5,20	5087,93	96,7	
6	-0,125	176,10	3,35	5264,03	100,0	



Şekil B.44: Şeyl yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=80mm d=9mm).

Çizelge B.45: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm).

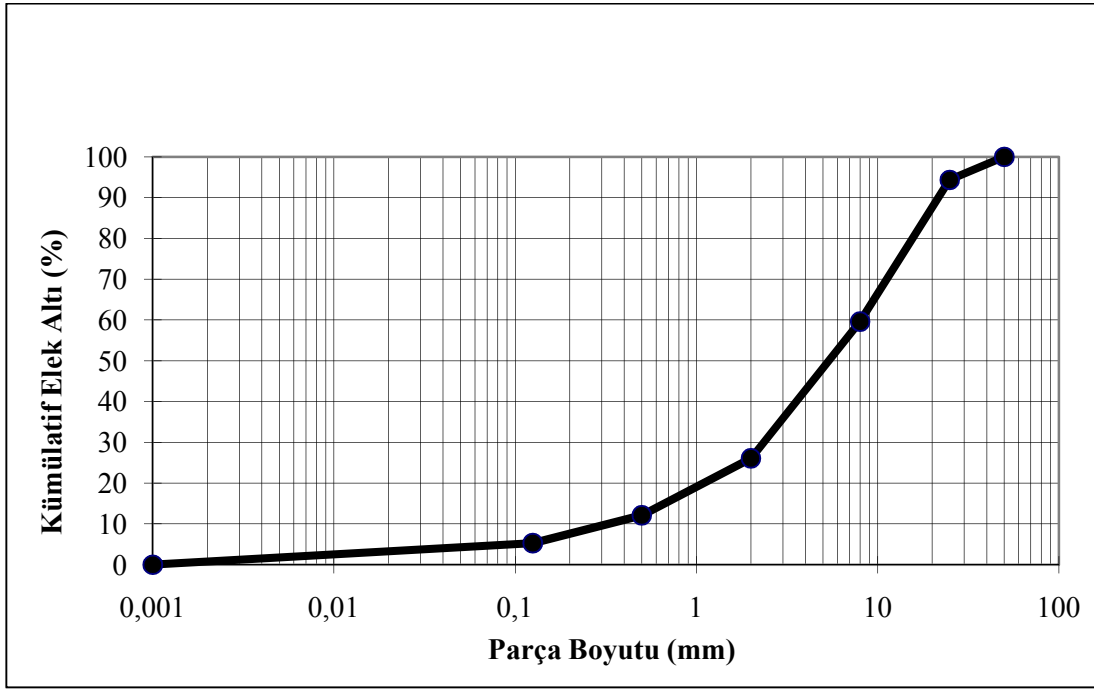
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	20,49	4,01	20,49	4,0	Pasa
2	-25 + 8	139,25	27,25	159,74	31,3	İrilik
3	-8 + 2	179,60	35,14	339,34	66,4	Katsayısı
4	-2 + 0,5	76,62	14,99	415,96	81,4	373
5	-0,5 + 0,125	42,28	8,27	458,24	89,7	
6	-0,125	52,81	10,33	511,05	100,0	



Şekil B.45: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=5mm).

Çizelge B.46: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımcısız d=7mm).

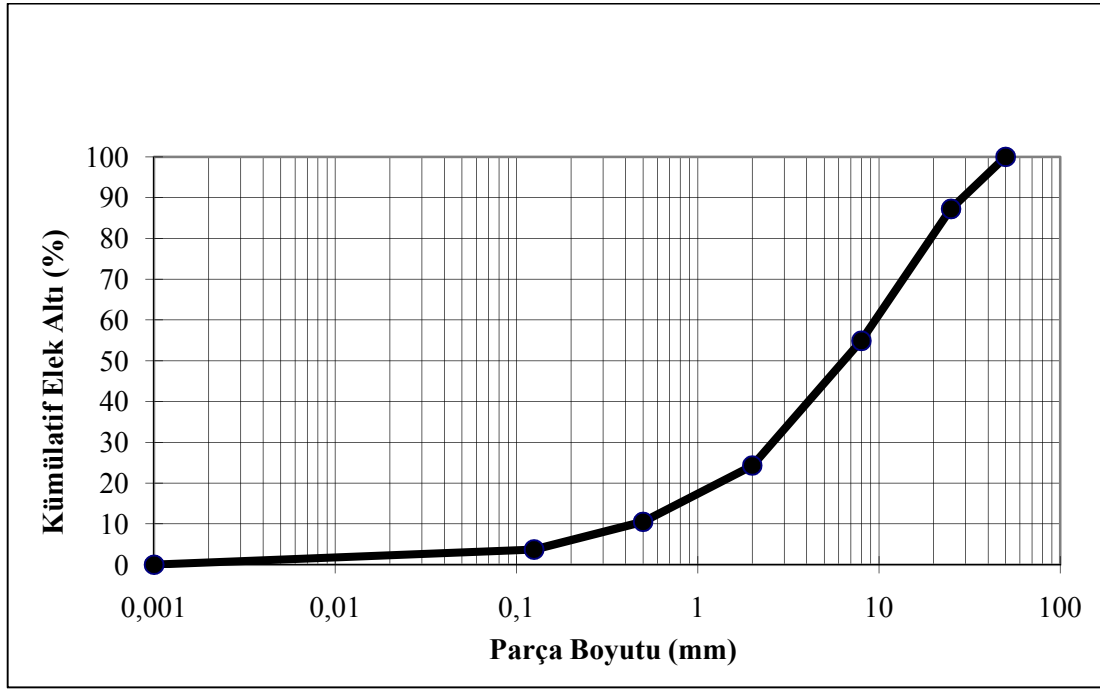
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	38,77	5,64	38,77	5,6	Pasa
2	-25 + 8	238,96	34,75	277,73	40,4	İrilik
3	-8 + 2	230,54	33,53	508,27	73,9	Katsayısı
4	-2 + 0,5	96,11	13,98	604,38	87,9	403
5	-0,5 + 0,125	46,91	6,82	651,29	94,7	
6	-0,125	36,32	5,28	687,61	100,0	



Şekil B.46: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımcısız d=7mm).

Çizelge B.47: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm).

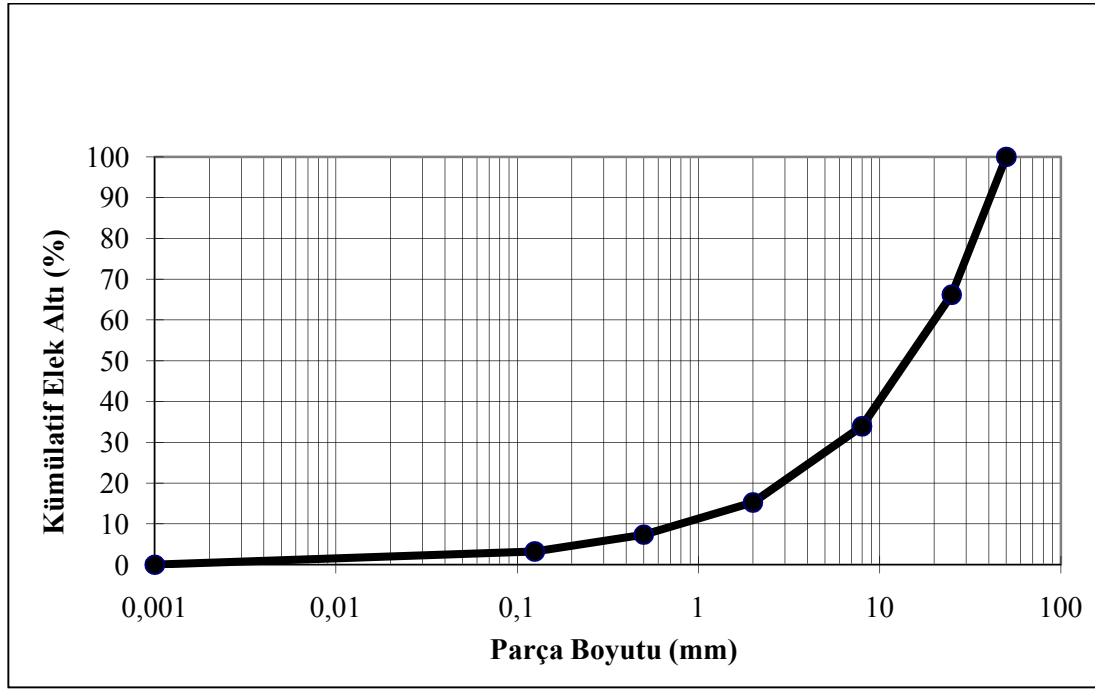
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	190,15	12,77	190,15	12,8	Pasa
2	-25 + 8	481,14	32,32	671,29	45,1	İrilik
3	-8 + 2	455,61	30,61	1126,90	75,7	Katsayısı
4	-2 + 0,5	205,24	13,79	1332,14	89,5	419
5	-0,5 + 0,125	101,05	6,79	1433,19	96,3	
6	-0,125	55,32	3,72	1488,51	100,0	



Şekil B.47: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=9mm).

Çizelge B.48: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=5mm).

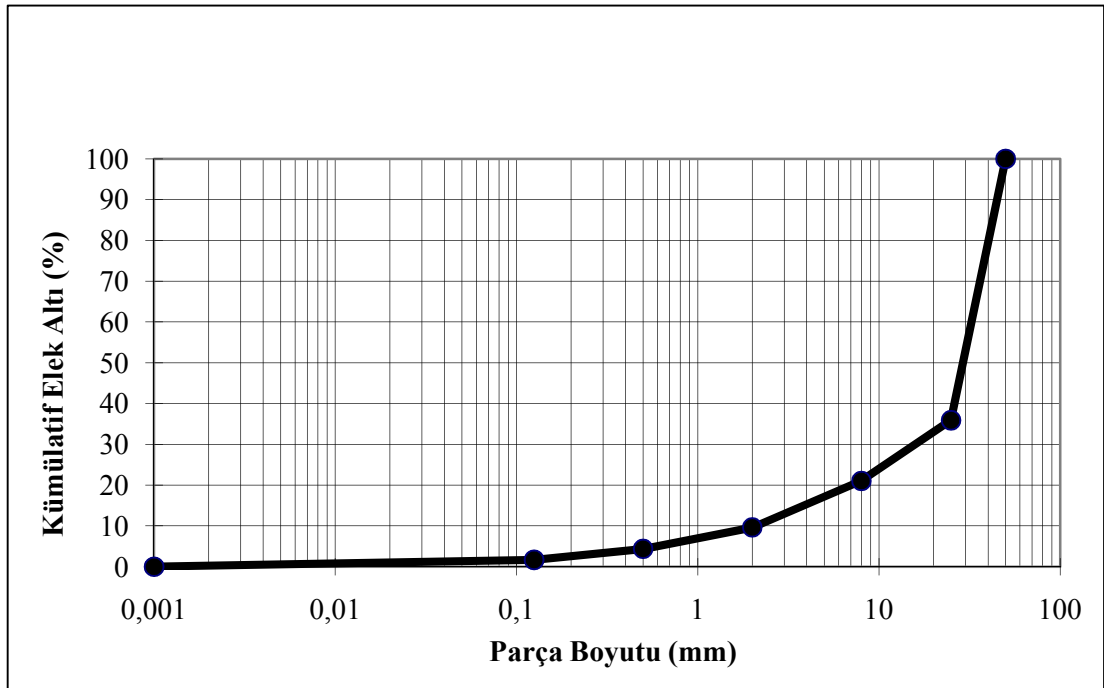
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	531,52	33,81	531,52	33,8	Pasa
2	-25 + 8	506,79	32,24	1038,31	66,1	İrilik
3	-8 + 2	293,93	18,70	1332,24	84,8	Katsayısı
4	-2 + 0,5	124,13	7,90	1456,37	92,7	474
5	-0,5 + 0,125	64,73	4,12	1521,10	96,8	
6	-0,125	50,77	3,23	1571,87	100,0	



Şekil B.48: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=5mm).

Çizelge B.49: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=7mm).

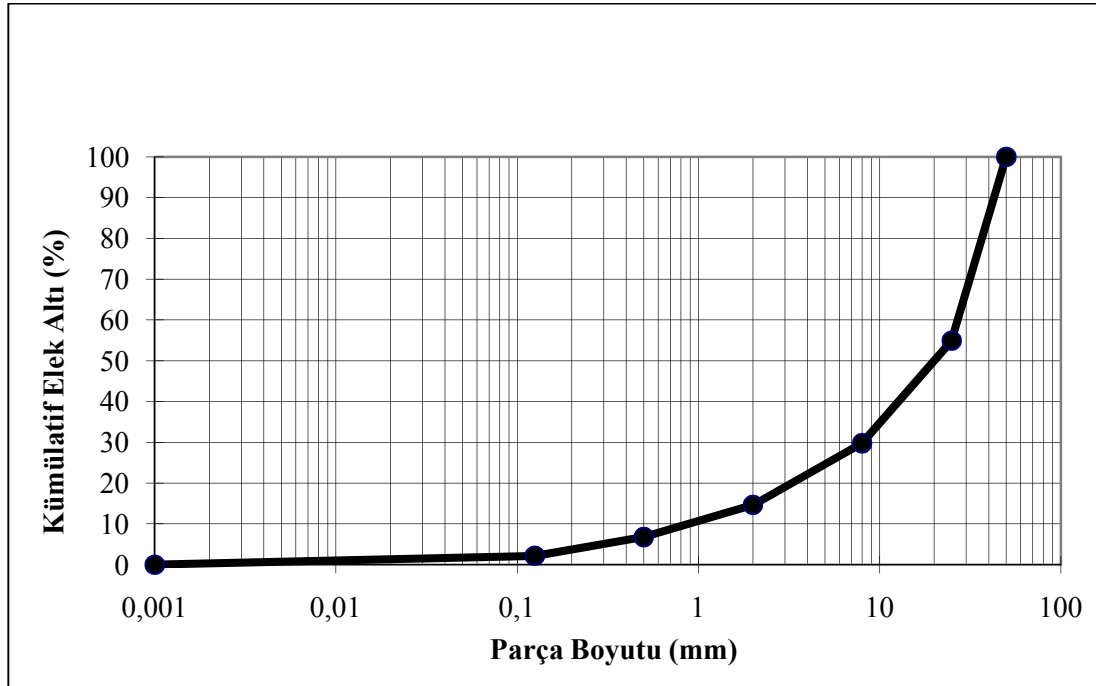
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1507,63	64,11	1507,63	64,1	Pasa
2	-25 + 8	349,66	14,87	1857,29	79,0	İrilik
3	-8 + 2	268,05	11,40	2125,34	90,4	Katsayısı
4	-2 + 0,5	123,64	5,26	2248,98	95,6	527
5	-0,5 + 0,125	63,45	2,70	2312,43	98,3	
6	-0,125	39,23	1,67	2351,66	100,0	



Şekil B.49: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=7mm).

Çizelge B.50: Fosilli kireçtaşı elek analizi (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=9mm).

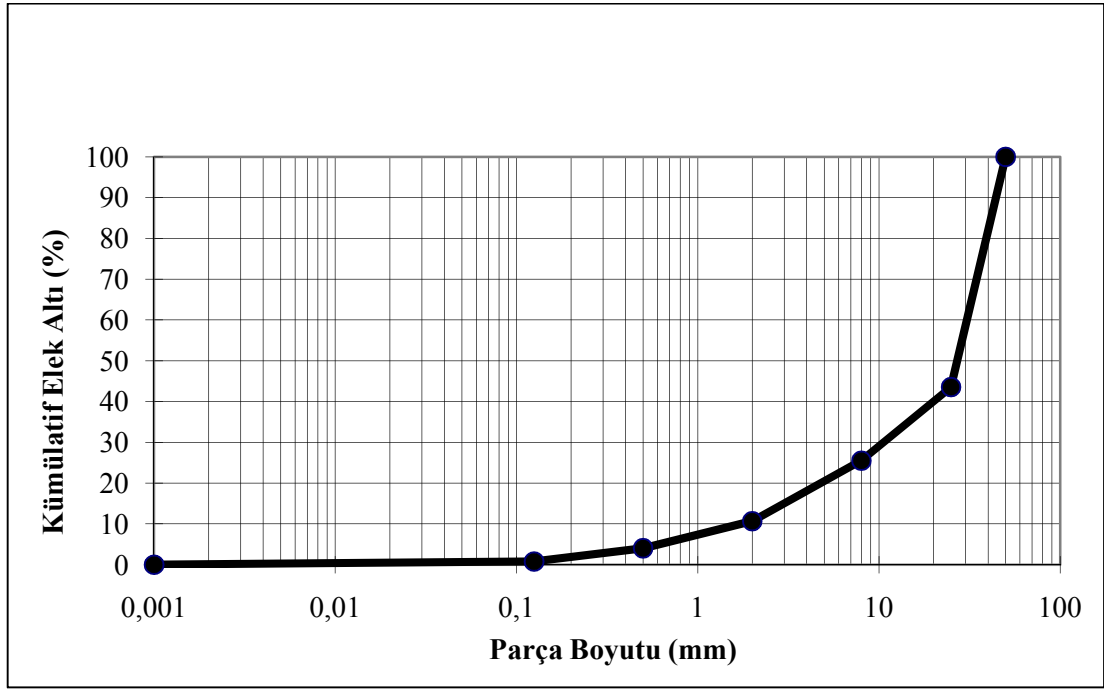
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1567,50	45,09	1567,50	45,1	Pasa
2	-25 + 8	873,53	25,13	2441,03	70,2	İrilik
3	-8 + 2	526,44	15,14	2967,47	85,4	Katsayısı
4	-2 + 0,5	273,00	7,85	3240,47	93,2	492
5	-0,5 + 0,125	160,35	4,61	3400,82	97,8	
6	-0,125	75,44	2,17	3476,26	100,0	



Şekil B.50: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (13 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=9mm).

Çizelge B.51: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımcısız d=5mm).

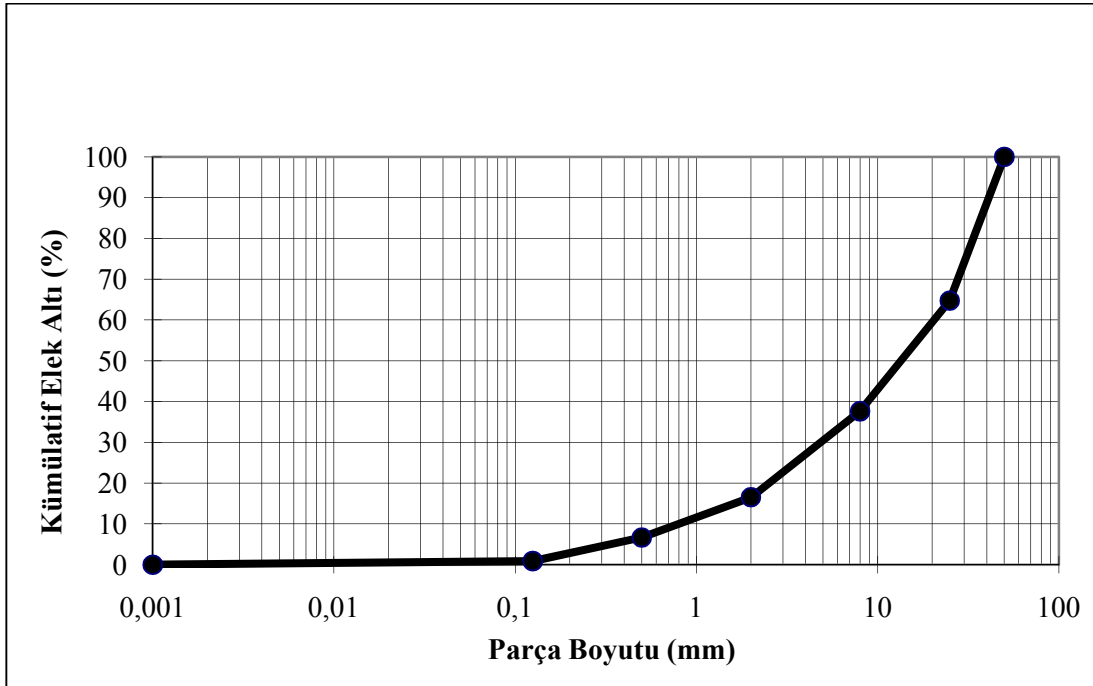
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	407,13	56,45	407,13	56,5	Pasa
2	-25 + 8	130,08	18,04	537,21	74,5	İrilik
3	-8 + 2	107,07	14,85	644,28	89,3	Katsayısı
4	-2 + 0,5	47,92	6,64	692,20	96,0	515
5	-0,5 + 0,125	23,37	3,24	715,57	99,2	
6	-0,125	5,6	0,78	721,17	100,0	



Şekil B.51: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımcısız d=5mm).

Çizelge B.52: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7,5mm).

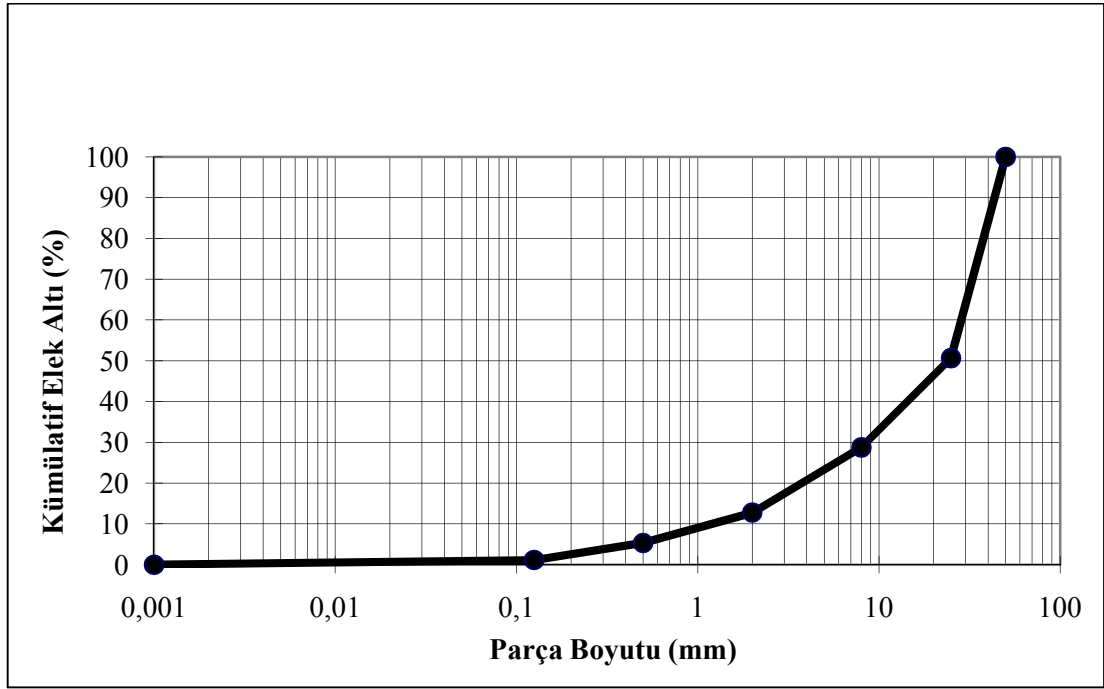
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	348,78	35,27	348,78	35,3	Pasa
2	-25 + 8	268,18	27,12	616,96	62,4	İrilik
3	-8 + 2	208,58	21,09	825,54	83,5	Katsayısı
4	-2 + 0,5	97,53	9,86	923,07	93,3	474
5	-0,5 + 0,125	57,02	5,77	980,09	99,1	
6	-0,125	8,84	0,89	988,93	100,0	



Şekil B.52: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=7,5mm).

Çizelge B.53: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımcısız d=10mm).

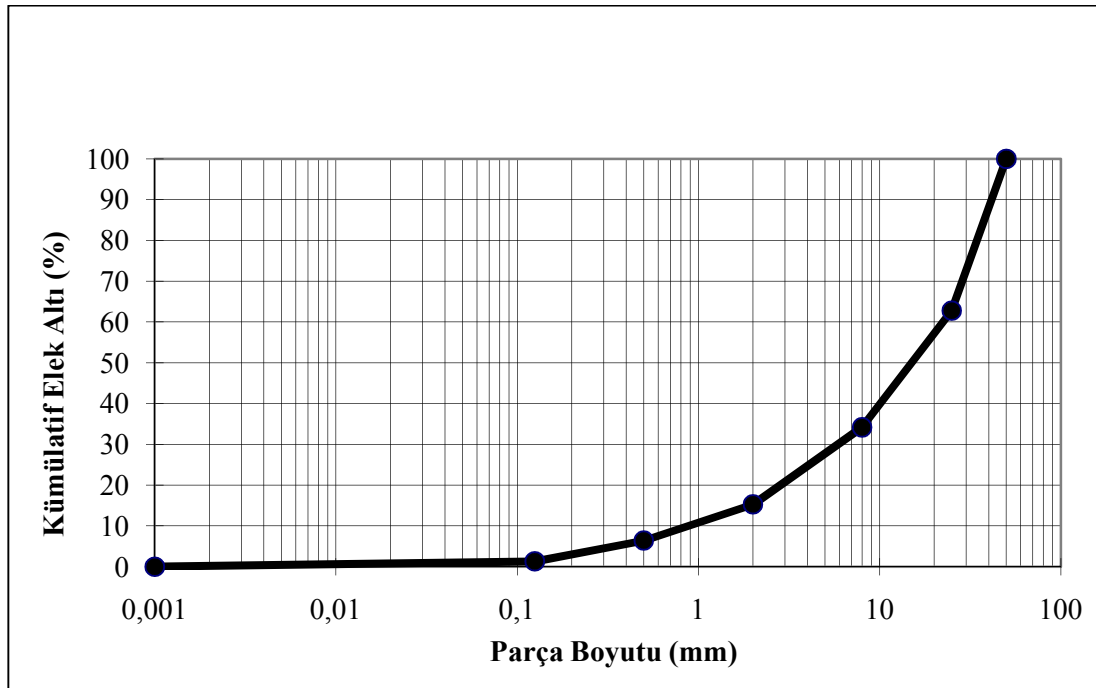
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1069,78	49,36	1069,78	49,4	Pasa
2	-25 + 8	474,47	21,89	1544,25	71,2	İrilik
3	-8 + 2	346,61	15,99	1890,86	87,2	Katsayısı
4	-2 + 0,5	160,97	7,43	2051,83	94,7	501
5	-0,5 + 0,125	90,91	4,19	2142,74	98,9	
6	-0,125	24,67	1,14	2167,41	100,0	



Şekil B.53: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımcısız d=10mm).

Çizelge B.54: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=12mm).

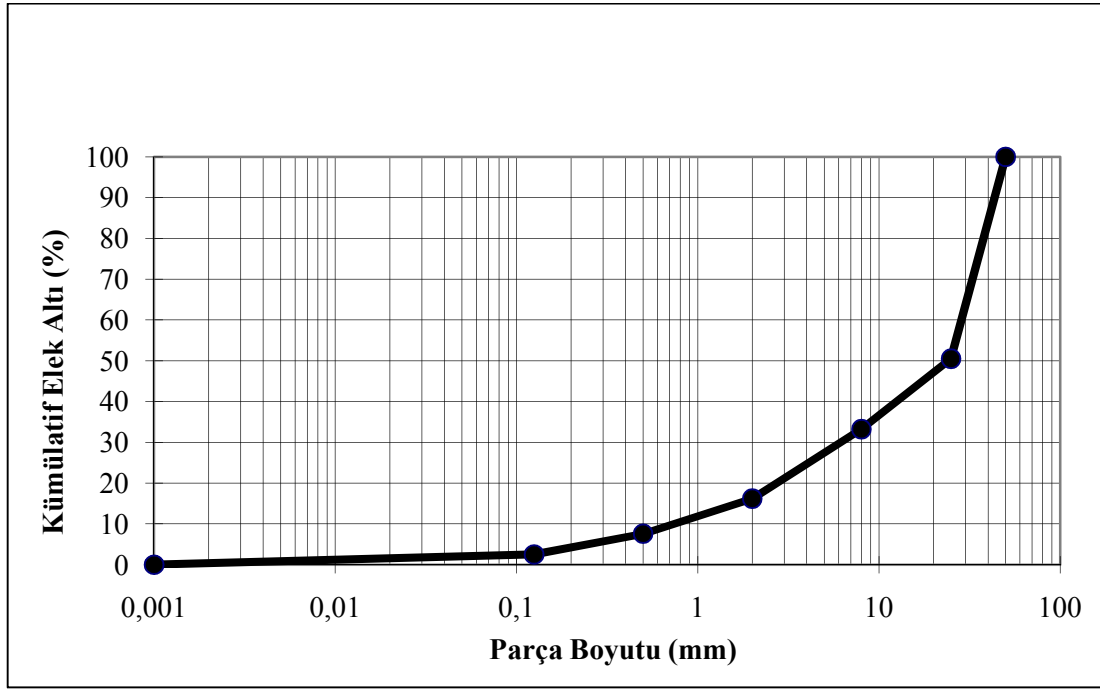
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	568,23	37,23	568,23	37,2	Pasa
2	-25 + 8	436,68	28,61	1004,91	65,8	İrilik
3	-8 + 2	288,25	18,88	1293,16	84,7	Katsayısı
4	-2 + 0,5	135,42	8,87	1428,58	93,6	480
5	-0,5 + 0,125	78,06	5,11	1506,64	98,7	
6	-0,125	19,77	1,30	1526,41	100,0	



Şekil B.54: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, yardımsız d=12mm).

Çizelge B.55: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=5mm).

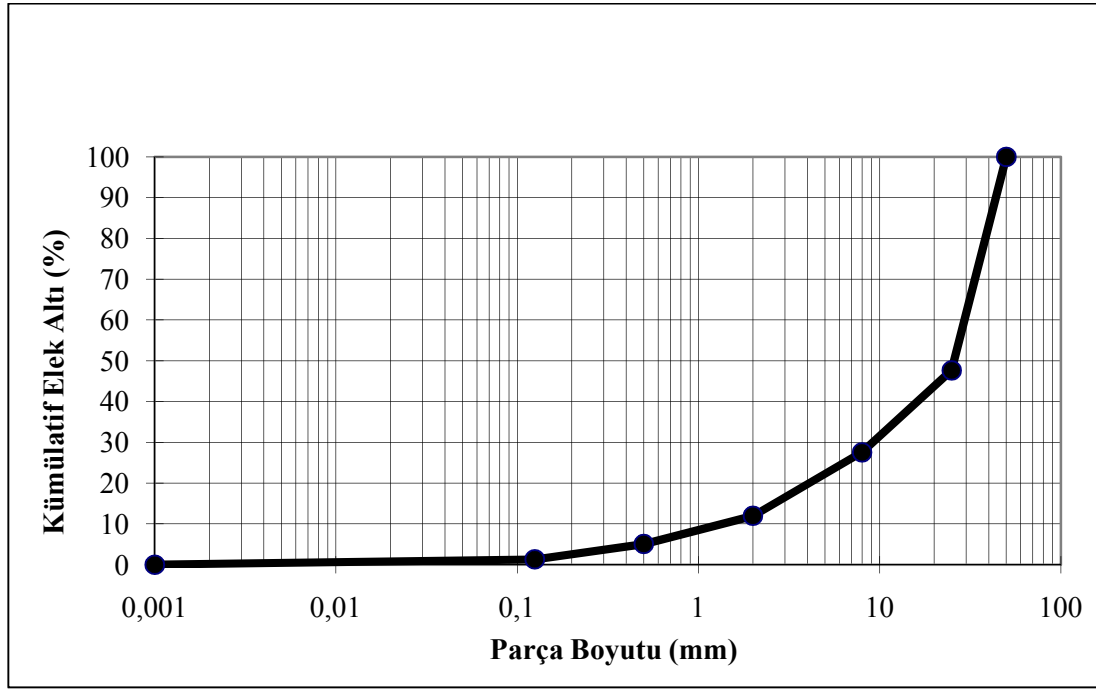
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	722,55	49,52	722,55	49,5	Pasa
2	-25 + 8	251,63	17,24	974,18	66,8	İrilik
3	-8 + 2	248,6	17,04	1222,78	83,8	Katsayısı
4	-2 + 0,5	125,67	8,61	1348,45	92,4	490
5	-0,5 + 0,125	73,99	5,07	1422,44	97,5	
6	-0,125	36,75	2,52	1459,19	100,0	



Şekil B.55: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=5mm).

Çizelge B.56: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=7,5mm).

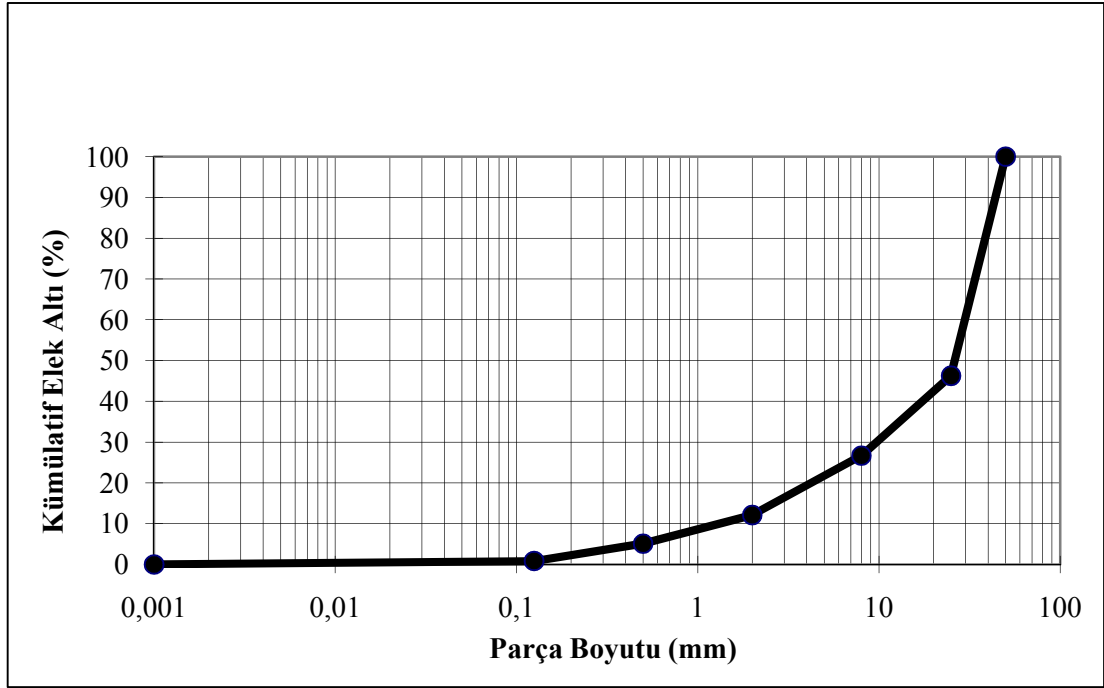
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1249,59	52,36	1249,59	52,4	Pasa
2	-25 + 8	479,81	20,10	1729,40	72,5	İrilik
3	-8 + 2	371,6	15,57	2101,00	88,0	Katsayısı
4	-2 + 0,5	164,92	6,91	2265,92	94,9	506
5	-0,5 + 0,125	89,6	3,75	2355,52	98,7	
6	-0,125	31,21	1,31	2386,73	100,0	



Şekil B.56: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=7,5mm).

Çizelge B.57: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=10mm).

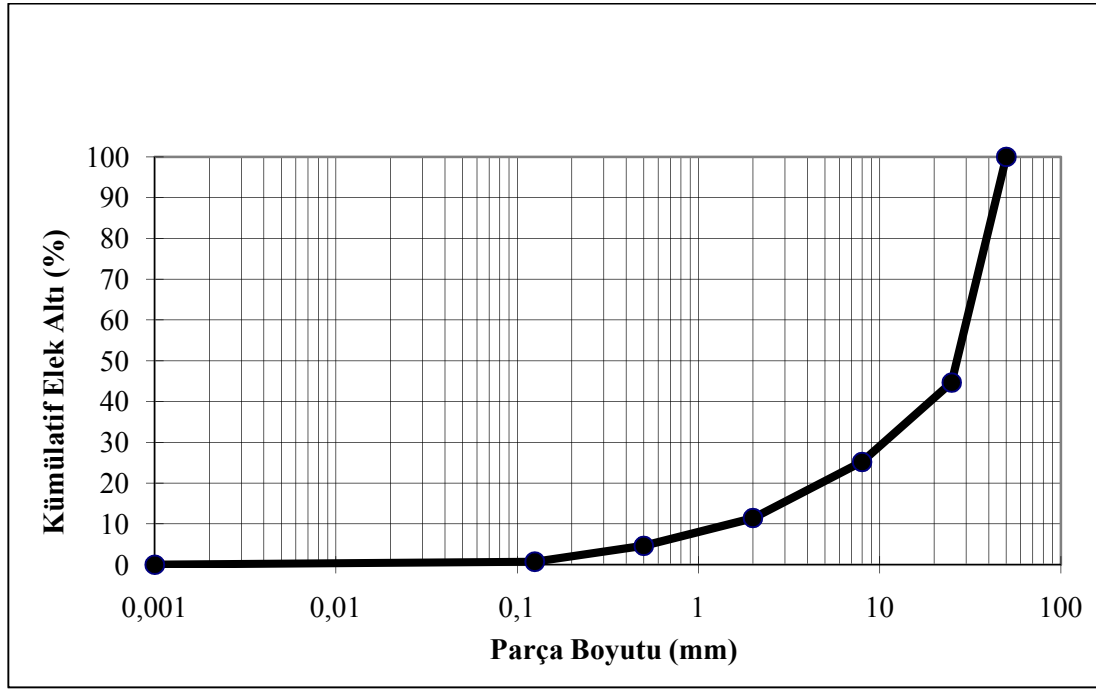
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1861,33	53,73	1861,33	53,7	Pasa
2	-25 + 8	679,3	19,61	2540,63	73,3	İrilik
3	-8 + 2	503,59	14,54	3044,22	87,9	Katsayısı
4	-2 + 0,5	243,34	7,02	3287,56	94,9	509
5	-0,5 + 0,125	147,78	4,27	3435,34	99,2	
6	-0,125	28,63	0,83	3463,97	100,0	



Şekil B.57: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=10mm).

Çizelge B.58: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=12mm).

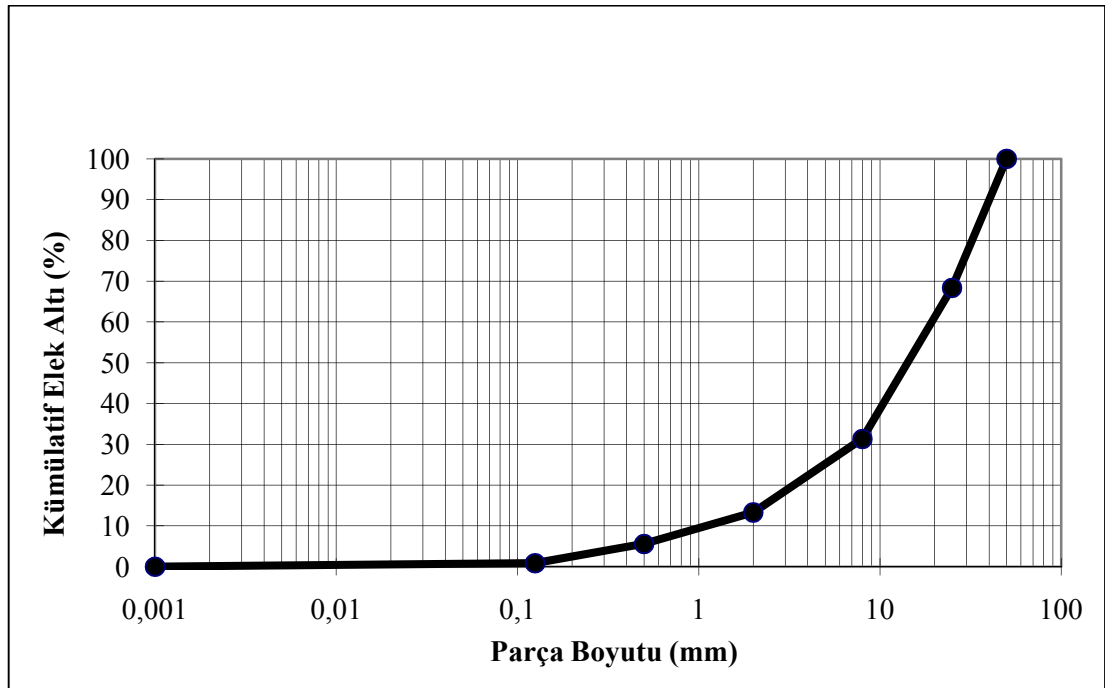
No	Elek Boyutu (mm)	Pasa Ağırlığı (gr)	Yüzde Elek Üstü (%)	Kümülatif Elek Üstü		
				Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1350,09	55,33	1350,09	55,3	Pasa
2	-25 + 8	475,5	19,49	1825,59	74,8	İrilik
3	-8 + 2	335,71	13,76	2161,30	88,6	Katsayısı
4	-2 + 0,5	166,06	6,81	2327,36	95,4	513
5	-0,5 + 0,125	95,2	3,90	2422,56	99,3	
6	-0,125	17,48	0,72	2440,04	100,0	



Şekil B.58: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=12mm).

Çizelge B.59: Fosilli kireçtaşı elek analizi (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=15mm).

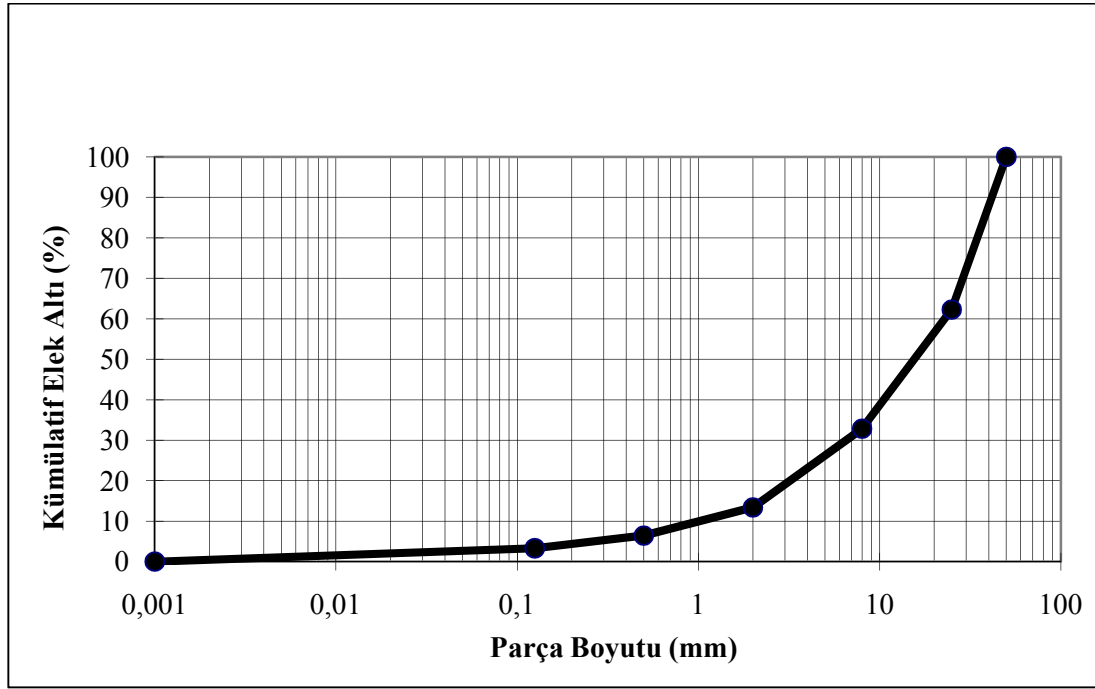
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	856,58	31,67	856,58	31,7	Pasa
2	-25 + 8	1001,29	37,02	1857,87	68,7	İrilik
3	-8 + 2	487,37	18,02	2345,24	86,7	Katsayısı
4	-2 + 0,5	208,84	7,72	2554,08	94,4	481
5	-0,5 + 0,125	127,55	4,72	2681,63	99,1	
6	-0,125	23,11	0,85	2704,74	100,0	



Şekil B.59: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (15 inç V tip disk keski, s=75mm d=15mm).

Çizelge B.60: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımcısız d=5mm).

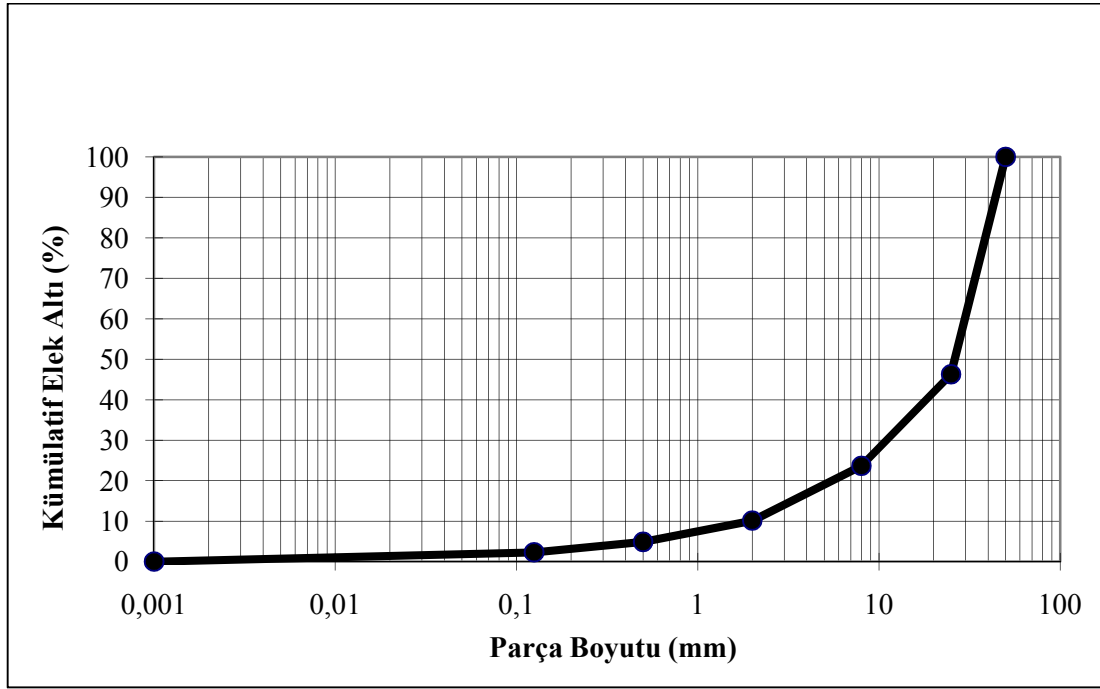
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	414,16	37,74	414,16	37,7	Pasa
2	-25 + 8	322,90	29,42	737,06	67,2	İrilik
3	-8 + 2	213,30	19,44	950,36	86,6	Katsayısı
4	-2 + 0,5	76,42	6,96	1026,78	93,6	482
5	-0,5 + 0,125	34,36	3,13	1061,14	96,7	
6	-0,125	36,31	3,31	1097,45	100,0	



Şekil B.60: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımcısız d=5mm).

Çizelge B.61: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm).

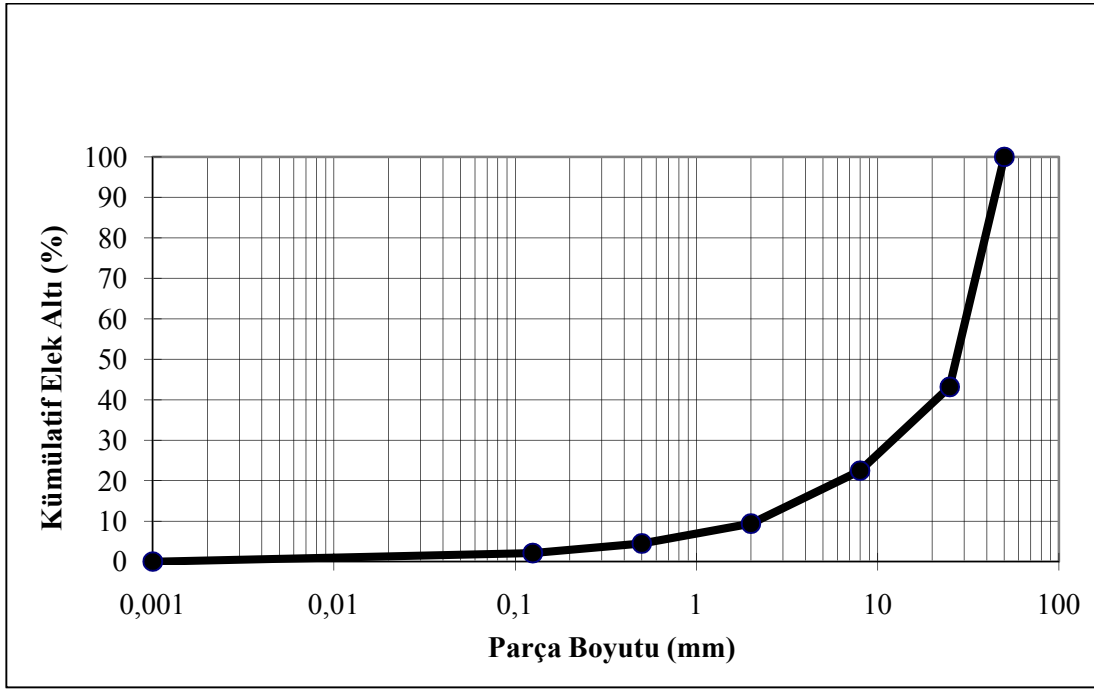
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1304,12	53,72	1304,12	53,7	Pasa
2	-25 + 8	549,10	22,62	1853,22	76,3	İrilik
3	-8 + 2	328,60	13,54	2181,82	89,9	Katsayısı
4	-2 + 0,5	127,10	5,24	2308,92	95,1	513
5	-0,5 + 0,125	62,67	2,58	2371,59	97,7	
6	-0,125	56,04	2,31	2427,63	100,0	



Şekil B.61: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımsız d=7mm).

Çizelge B.62: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, yardımcısız d=9mm).

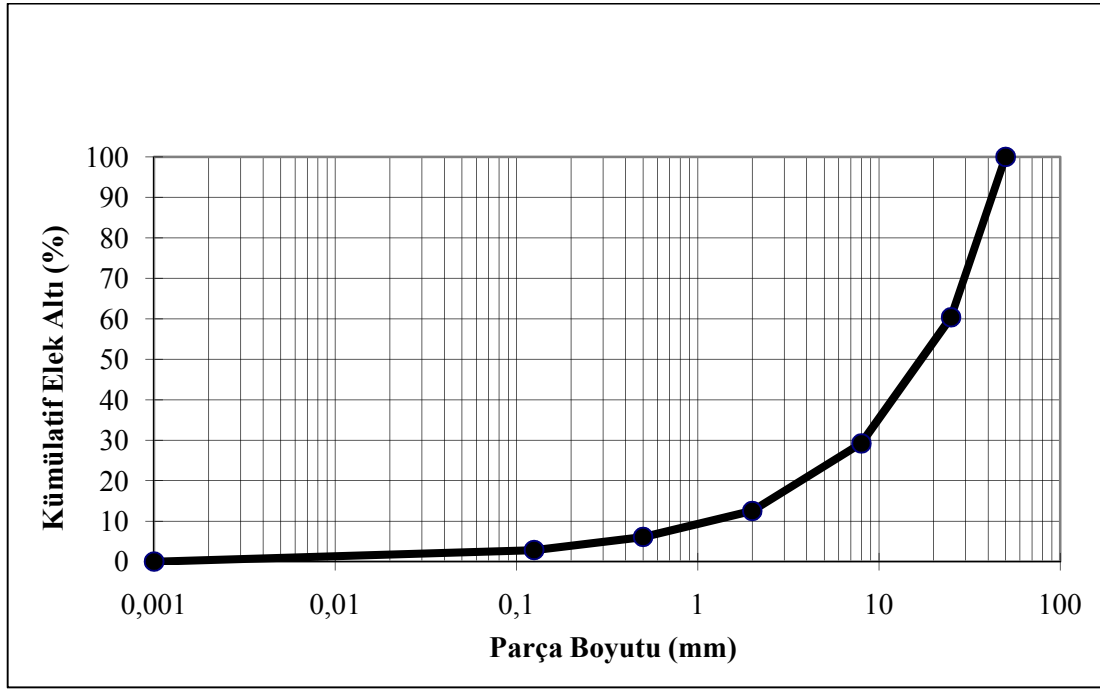
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1850,37	56,83	1850,37	56,8	Pasa
2	-25 + 8	674,06	20,70	2524,43	77,5	İrilik
3	-8 + 2	425,47	13,07	2949,90	90,6	Katsayısı
4	-2 + 0,5	160,42	4,93	3110,32	95,5	518
5	-0,5 + 0,125	76,90	2,36	3187,22	97,9	
6	-0,125	69,04	2,12	3256,26	100,0	



Şekil B.62: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, yardımcısız d=9mm).

Çizelge B.63: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=5mm).

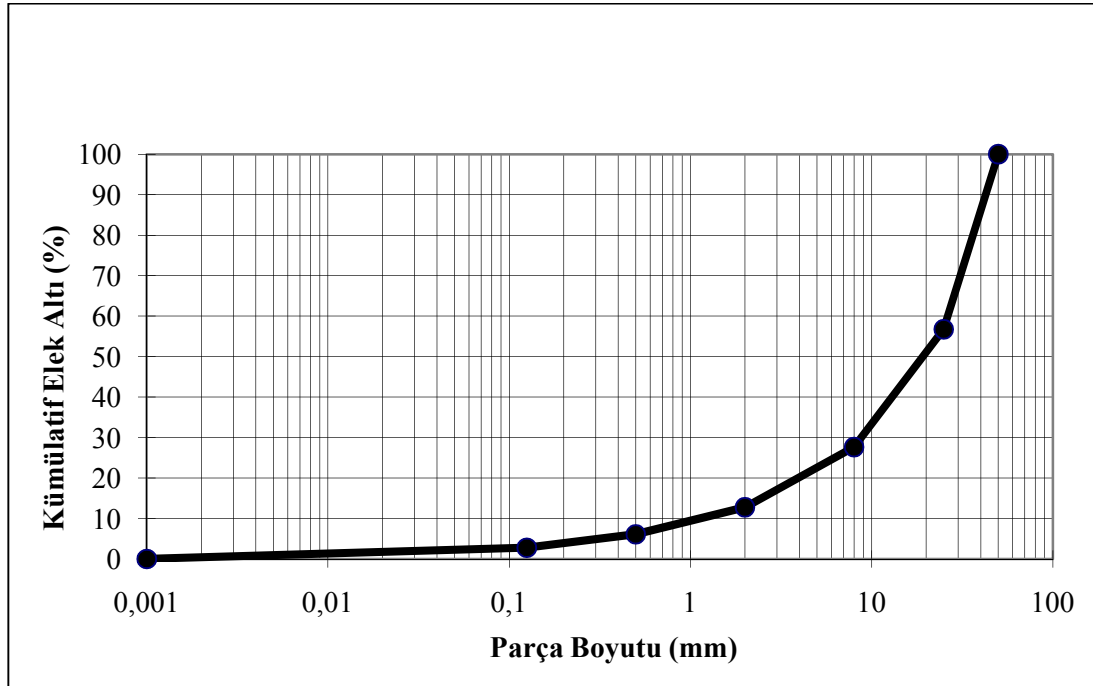
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1229,22	39,64	1229,22	39,6	Pasa
2	-25 + 8	965,66	31,14	2194,88	70,8	İrilik
3	-8 + 2	516,97	16,67	2711,85	87,5	Katsayısı
4	-2 + 0,5	200,28	6,46	2912,13	93,9	489
5	-0,5 + 0,125	100,37	3,24	3012,50	97,1	
6	-0,125	88,49	2,85	3100,99	100,0	



Şekil B.63: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=5mm).

Çizelge B.64: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=7mm).

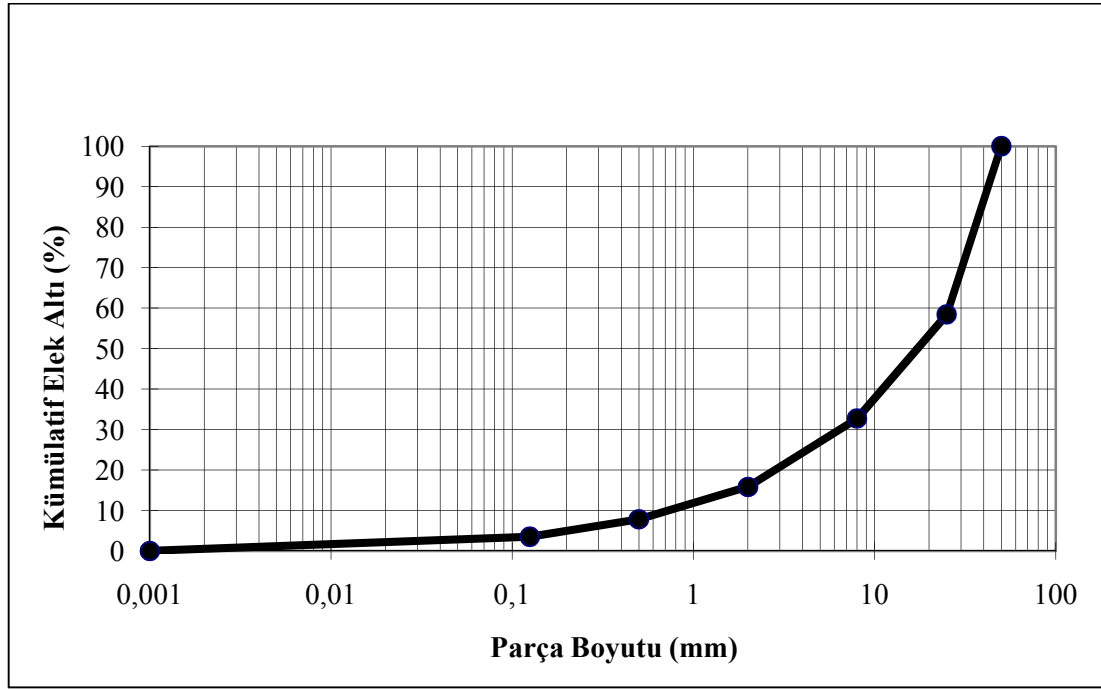
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	1745,53	43,25	1745,53	43,2	Pasa
2	-25 + 8	1175,03	29,11	2920,56	72,4	İrilik
3	-8 + 2	600,14	14,87	3520,70	87,2	Katsayısı
4	-2 + 0,5	269,03	6,67	3789,73	93,9	494
5	-0,5 + 0,125	134,72	3,34	3924,45	97,2	
6	-0,125	111,79	2,77	4036,24	100,0	



Şekil B.64: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=7mm).

Çizelge B.65: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=9mm).

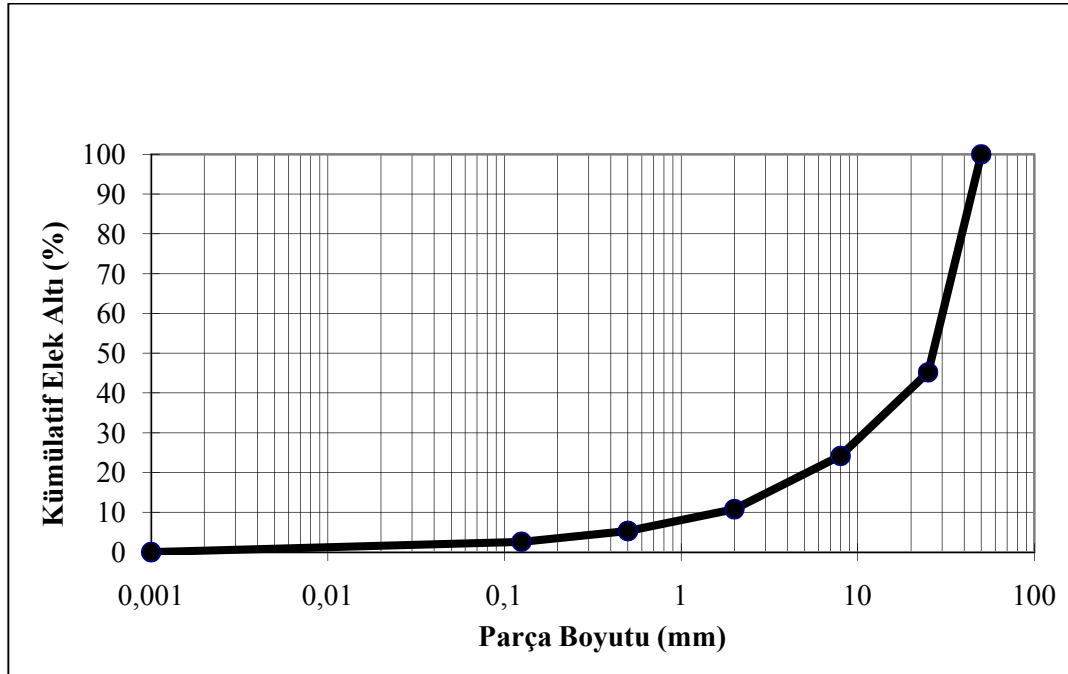
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	2276,60	41,57	2276,60	41,6	Pasa
2	-25 + 8	1406,97	25,69	3683,57	67,3	İrilik
3	-8 + 2	925,86	16,91	4609,43	84,2	Katsayısı
4	-2 + 0,5	438,52	8,01	5047,95	92,2	482
5	-0,5 + 0,125	235,78	4,31	5283,73	96,5	
6	-0,125	192,62	3,52	5476,35	100,0	



Şekil B.65: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=75mm d=9mm).

Çizelge B.66: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=7mm).

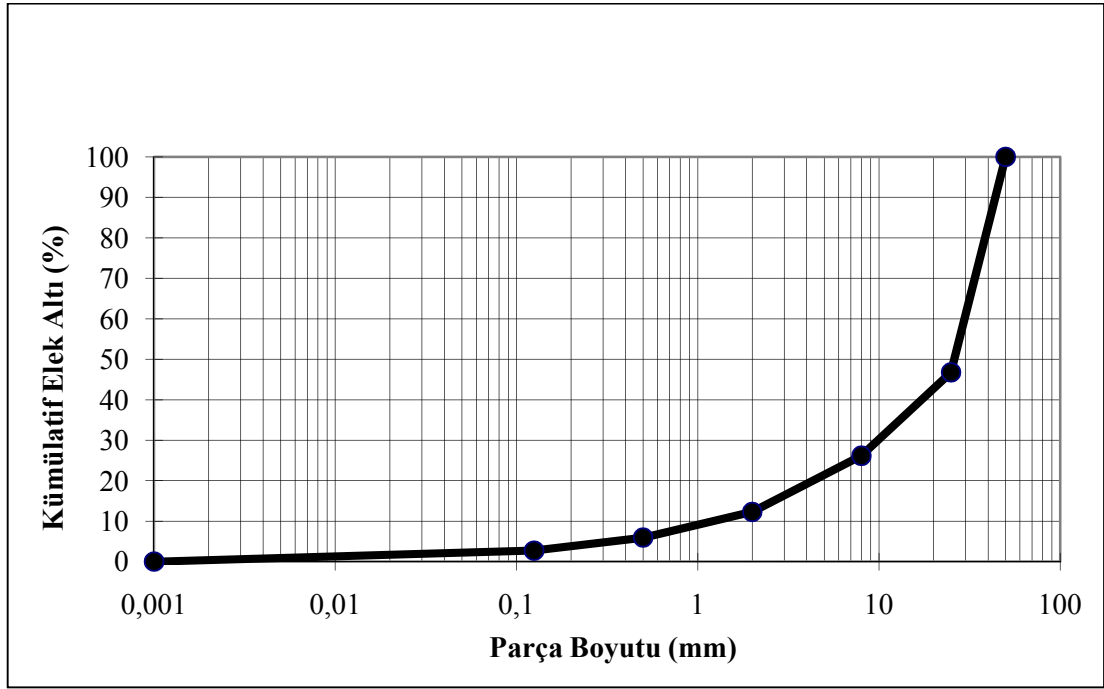
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	2236,89	54,80	2236,89	54,8	Pasa
2	-25 + 8	857,80	21,01	3094,69	75,8	İrilik
3	-8 + 2	547,19	13,40	3641,88	89,2	Katsayısı
4	-2 + 0,5	222,75	5,46	3864,63	94,7	512
5	-0,5 + 0,125	111,55	2,73	3976,18	97,4	
6	-0,125	105,84	2,59	4082,02	100,0	



Şekil B.66: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=7mm).

Çizelge B.67: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=9mm).

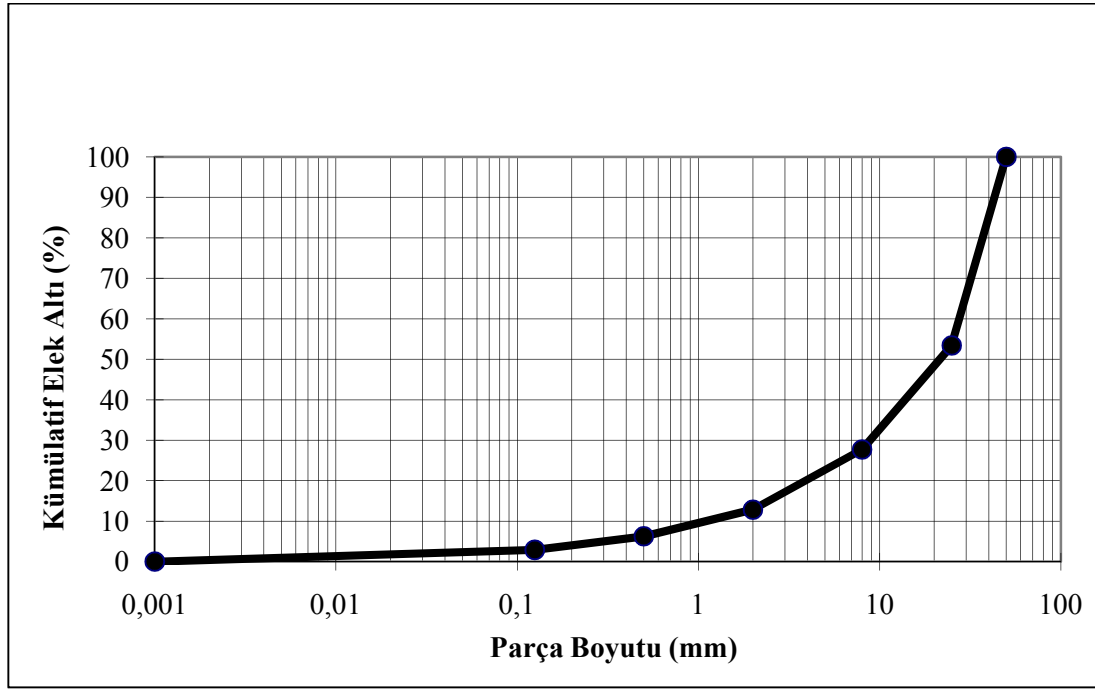
No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	4057,45	53,25	4057,45	53,3	Pasa
2	-25 + 8	1567,42	20,57	5624,87	73,8	İrilik
3	-8 + 2	1056,59	13,87	6681,46	87,7	Katsayısı
4	-2 + 0,5	485,67	6,37	7167,13	94,1	506
5	-0,5 + 0,125	243,79	3,20	7410,92	97,3	
6	-0,125	208,33	2,73	7619,25	100,0	



Şekil B.67: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=9mm).

Çizelge B.68: Fosilli kireçtaşı elek analizi (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=12mm).

No	Elek	Pasa	Yüzde	Kümülatif		
	Boyutu (mm)	Ağırlığı (gr)	Elek Üstü (%)	Ağırlık (gr)	Elek Üstü (%)	
1	+ 25	3549,70	46,61	3549,70	46,6	Pasa
2	-25 + 8	1957,56	25,70	5507,26	72,3	İrilik
3	-8 + 2	1130,21	14,84	6637,47	87,2	Katsayısı
4	-2 + 0,5	501,51	6,59	7138,98	93,7	497
5	-0,5 + 0,125	255,07	3,35	7394,05	97,1	
6	-0,125	221,53	2,91	7615,58	100,0	



Şekil B.68: Fosilli kireçtaşı yüzde elek altı grafiği (17 inç CCS tip disk keski, s=90mm d=12mm).

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Deniz TUMAÇ

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 20.12.1978

Adres: İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Ayazağa Yerleşkesi, Maslak İSTANBUL

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, 2001

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, 2003

Yayın Listesi:

- Copur, H., Balci, C., **Tumac, D.**, Bilgin, N., 2010: Field and laboratory studies on natural stones towards empirical performance prediction of chain saw machines, *Int J Rock Mech & Min Sci*, (under review)
- Balci, C., Bilgin, N., Copur, H., **Tumac, D.**, 2010: The selection and design of mechanical excavators and some recent projects from Turkey, *Proc. European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2010)*, Lousanne, Switzerland, 15-18 June.
- Bilgin, N., Balci, C., **Tumac, D.**, Feridunoglu, C., Copur, H., 2010: Development of a portable rock cutting rig for rock cuttability determination, *Proc. European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2010)*, Lousanne, Switzerland, 15-18 June.
- Copur, H., Balci, C., **Tumac, D.**, Bilgin, N., Avunduk, E., 2010: Field and laboratory studies on performance of chain saw machines, *Proc. European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2010)*, Lousanne, Switzerland, 15-18 June.
- Bilgin, N., Temizyürek, İ., Copur, H., Balci, C., **Tumac, D.**, 2010: TTK Amasra bölgesi kalın damarın kesilebilirlik özellikleri ve mekanize kazisi üzerine bazı görüşler, *Türkiye 17. Kömür Kongresi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Zonguldak*, 2-4 Haziran.
- Copur, H., Balci, C., **Tumac, D.**, ve Bilgin, N., 2009: Zincirli kesme makinalarının performans tahminine yönelik yapılan köşe kesme deneyleri ve yorumları, , İkinci Maden Makinaları Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Editörler: M. Erdiñ Bilir, Bülent Ekmekçi, ISBN 978-9944-89-810-2, 04-06 Kasım, ss. 61-70.
- **Tumac, D.**, Bilgin, N., Feridunoglu, C., and Ergin, H., 2007: Estimation of rock cuttability from shore hardness and compressive strength properties, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 40, no.5, pp. 477-490.
- Acaroglu, O., Feridunoglu, C., and **Tumac, D.**, 2006: Selection of roadheaders by fuzzy multiple attribute decision making method, *Mining Technology: IMM Transactions Section A*, Vol. 115, No. 3, pp. 91-98.
- Bilgin, N., **Tumac, D.**, and Feridunoglu, C., 2006: TBM cutting performance in Istanbul, *Tunnels & Tunneling International*, Feb 2006, pp. 11-17.
- Balci, C., **Tumac, D.**, Copur, H., Bilgin, N., Yazgan, S., Demir, E., and Aslabbas, G., 2009: Performance prediction and comparison with in-situ values of a TBM: a case study of Otogar-Bagcilar metro tunnel in Istanbul, *World Tunnel Congress*, Hungary.

- Balci, C., Bilgin, N., Copur, H., and **Tumac, D.**, 2008: The selection and design of rapid excavation systems using full and small scale laboratory rock cutting tests, some examples from Turkey, *3rd International Colloquium for Mechanical Extraction*, Freiberg, Germany.
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., **Tumac, D.**, Akgul, M., and Yuksel, A., 2008: The selection of a tbm using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in İstanbul Kozyatagi- Kadikoy metro tunnels, *World Tunnel Congress*, Agra India, pp. 1509-1517.
- Copur, H., Balci, C., Bilgin, N., and **Tumac, D.**, 2008: Laboratory cutting tests for performance prediction of chain saw machines, *21st World Mining Congress & Expo*, Kraków –Katowice – Sosnowiec Poland, pp. 97-107.
- Güçlücan, Z., Meriç, S., Palakçi, Bilgin, N., Balci, C., and **Tumac, D.**, 2008: The use of a tbm in difficult ground conditions in İstanbul (Beykoz – Kavacık) sewerage tunnel, *World Tunnel Congress*, Agra India, pp. 1630-1638.
- Copur, H., Balci, C., Bilgin, N., **Tumaç, D.**, and Düzyol, İ., 2007: Full –scale linear cutting tests towards performance prediction of chain saw machines, *20th International Mining Congress and Exhibition- IMCET 2007*, Turkey, pp. 161-169.
- Copur, H., Balci, C., Bilgin, N., **Tumac, D.**, Feridunoglu, C., and Dincer, T., 2006: Cutting performance of chain saws in quarries and laboratory, *Fifteenth International Symposium MPES 2006 on Mine Planning and Equipment Selection*, Torino Italy, pp. 1324-1329
- **Tumac, D.**, Feridunoglu, C., and Bilgin, N., 2006: Application of roadheader in high strength rock formations , *4th Asian Rock Mechanics Symposium*, ISBN: 981270437X, Singapore, pp. 470-476.
- Feridunoglu, C., **Tumac, D.**, and Bilgin, N., 2006: Tbm breakdown causes and effects on tunnelling performance in Tarabya sewerage tunnel, *4th Asian Rock Mechanics Symposium*, ISBN: 981270437X, Singapore, pp. 152-159.
- Bilgin, N., Feridunoglu, C., **Tumac, D.**, Copur, H., Balci, C., and Tuncdemir, H., 2006: Neural networks analysis for estimating rock cuttability from rock properties, *Proceedings of the 41st U.S. Rock Mechanics Symposium*, Colorado USA, pp. 1165-1173.
- Bilgin, N., **Tumac, D.**, Feridunoglu, C., Karakas, A.R., and Akgul, M., 2005: The performance of a roadheader in high strength rock formations in Küçüksu, *Proceedings of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress*, Istanbul Turkey, pp. 815-820.
- Bilgin, N., Feridunoglu, C., **Tumac, D.**, Cinar, M., Palakci, Y., Gunduz, O., and Ozyol, L., 2005: The performance of a full face tunnel boring machine (TBM) in Tarabya (İstanbul), *Proceedings of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress*, Istanbul Turkey, pp. 821-826.
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Tuncdemir, H., **Tumac, D.**, and Feridunoglu, C., 2005: Selection of a mechanical mining system for an underground chromite mine, *MPES - Mine Planning and Equipment Selection*, Canada, pp. 120-144.
- Çopur, H., Engin, M., Omaç, N., Balci, C., ve **Tumaç, D.**, 2007: Baltalimanı-Sarıyer arası sahil kuşaklama kollektörleri ve bağlantıları inşaatı mikrotünel kazıları, *Ulaşımda Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Yayın No: 138. İTÜ Ayazağa Kampüsü, SDKM, İstanbul, Editörler: N. Bilgin, H. Çopur, C. Balci, A.E. Yüce. ISBN 978-9944-89-400-5. 15-17 Kasım, ss. 129-138.
- Güçlücan, Z., Meriç, S., Gürsoy, C., Algan, A., Bilgin, N., Balci, C., ve **Tumaç, D.**, 2007: Zor zemin şartlarında Beykoz-Kavacık tünellerinde Tbm uygulaması, *Ulaşımda Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Yayın No: 138. İTÜ Ayazağa Kampüsü, SDKM, İstanbul, Editörler: N. Bilgin, H. Çopur, C. Balci, A.E. Yüce. ISBN 978-9944-89-400-5. 15-17 Kasım, ss.83-91.

- Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., **Tumaç, D.**, Akgül, M., Yüksel, A., ve Kahrıman, A., 2007: Kadıköy–Kartal metro tünellerinde kullanılacak tünel açma makinelerinin (TBM) bazı tasarım parametrelerinin kesme deneyleri ile belirlenmesi ve performans tahmini, *Ulaşım da Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Yayın No: 138. İTÜ Ayazağa Kampüsü, SDKM, İstanbul, Editörler: N. Bilgin, H. Çopur, C. Balcı, A.E. Yüce. ISBN 978-9944-89-400-5. 15-17 Kasım, ss. 63-71.
- Çopur, H., Balcı, C., Bilgin, N., **Tumaç, D.**, Düzyol, İ., ve Kekeç, N., 2007: Doğal taş madenciliğinde kullanılan zincirli kesme makinelerinin performansı, *Birinci Maden Makinaları Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Dumlupınar Üniv., Kütahya, Editör: C. Şensöğüt. ISBN 978-9944-89-277-3, 10-12 Mayıs, ss. 37-46
- Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., **Tumaç, D.**, ve Düzyol, İ., 2007: İstanbul’da yeraltı kazılarının dünü bugünü ve İtü kazı mekanizasyonu laboratuvarının gelişme öyküsü. *Birinci Maden Makinaları Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Dumlupınar Üniv., Kütahya, Editör: C. Şensöğüt. ISBN 978-9944-89-277-3, 10-12 Mayıs, ss. 115-124
- Balcı, C., Bilgin, N., Çopur, H., **Tumaç, D.**, ve Akgül, M., 2007: Tünel açma makinelerinin (Tbm) tam boyutlu kesme deneyi ile performans tahmini, *Birinci Maden Makinaları Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Dumlupınar Üniv., Kütahya, Editör: C. Şensöğüt. ISBN 978-9944-89-277-3, 10-12 Mayıs, ss. 61-70.

