T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZOR KOŞULLARDA TBM İLE AÇILAN TÜNELLERİN PERFORMANS ANALİZİ: SİLVAN VE NURDAĞI TÜNELLERİ

Deniz AYDIN

DOKTORA TEZİ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Eylül – 2019

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZOR KOŞULLARDA TBM İLE AÇILAN TÜNELLERİN PERFORMANS ANALİZİ: SİLVAN VE NURDAĞI TÜNELLERİ

Deniz AYDIN

DOKTORA TEZİ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Eylül – 2019

T.C

DİCLE UNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Deniz AYDIN tarafından yapılan "Zor Koşullarda TBM ile Açılan Tünellerin Performans Analizi: Silvan ve Nurdağı Tünelleri" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Maden Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyesinin

Ünvanı Adı Soyadı

Başkan: Prof. Dr. Mustafa AYHAN

Üye : Prof. Dr. Ahmet Mahmut KILIÇ

Üye : Doç. Dr. Ümit ÖZER

Üye : Doç. Dr. Askeri KARAKUŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erhan ÇETİN

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 13/09/2019

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../20

Prof. Dr. Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Tez konusu seçiminde beni doğru bir alana yönlendiren, doktora çalışmam süresince kendisini tanıma fırsatı bulduğum, bilgi birikimini benimle paylaşan tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa AYHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma konumda bana yol gösteren ve deneyimlerini aktaran Doç. Dr. Ömür Acaroğlu ERGÜN'e teşekkürü borç bilirim.

Jeolojik tanımlamalarda desteğini esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi M. Şefik İMAMOĞLU'na teşekkür ederim.

Silvan Tüneli çalışma sahasında işimi kolaylaştıran, sorduğum her soruya sabırla cevap veren, işin pratiğini anlamama yardımcı olan İnşaat Yüksek Mühendisi Mustafa ÇOĞALAN, İnşaat Mühendisi Cebrail KAYA, Maden Mühendisi Nevzat ÜNLÜ, Jeoloji Mühendisi Şerafettin BOZKURT ve ismini sayamadığım diğer tüm değerli proje çalışanlarına içten teşekkürlerimi sunarım.

Nurdağı Tüneli çalışma sahasından bilgi alabilmemi sağlayan ve katkısını esirgemeyen Jeoloji Mühendisi Fatih SİYAHLI'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmasına yeni bir pencereden bakmamı sağlayan Prof. Dr. Daniele Peila ve dost canlısı ekibine teşekkürü borç bilirim.

Kullanılan bilgisayar programı konusunda destek sağlayan Dr. Mustafa CANSIZ, Arş. Gör. Bilal Umut AYHAN, Dr. Öğretim Üyesi M. Ali ARSERİM ve Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak doktora sürem boyunca her türlü duygu durum değişikliğime sabır gösteren, motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan, her türlü derdimi dinleyen, çözüm olmaya çalışan, elini taşın altına koyan tüm dostlarıma ve tüm bunlarla beraber içimde hayata karşı umudun yeşermesine sebep olan sevgili Behzat GEREN'e ve tabii ki her biri ayrı ayrı canımın içi olan annem Emine AYDIN, babam Ayhan Hıdır AYDIN ve ablam Pınar AYDIN'a benim ailem oldukları için en candan teşekkürlerimi sunarım.

Deniz AYDIN

Eylül 2019-Diyarbakır

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR …….. I

İÇİNDEKİLER…….. II

ÖZET…….. VII

ABSTRACT…… VIII

ÇİZELGE LİSTESİ…….. IX

ŞEKİL LİSTESİ…… XI

KISALTMA VE SİMGELER…….. XX

1. GİRİŞ……. 1

1.1. Tünel Tanımı ve Tünelciliği Gerektiren Sebepler …….. 1

1.2. Tünelciliğin Tarihi……..... 2

1.3. Tünel Çeşitleri……..... 4

1.4. Tünel Açımında Karşılaşılabilecek Problemler…….. 5

1.4.1. Kaya Patlamaları……..…….. 5

1.4.2. Kemerlenme……...…...……. 5

1.4.3. Aşırı Sökülme……...……..…. 5

1.4.4. Su Sorunu……. ……...……... 5

1.4.5. Isı Sorunu……. ……...……... 7

1.4.6. Gaz Sorunu……..…..……. 7

1.4.7. Sıkışan Zemin……. 8

1.4.8. Tünel Güzergah Zemininde Kırıkların Bulunması……. 8

1.5. Tünel Açma Yöntemleri……. 9

1.5.1. Aç Kapa Yöntemi……... 10

1.5.2. Batırma Yöntemi…… 10

1.5.3. Klasik Tünel Açma Yöntemi ile Tünel Açımı……... 11

1.5.4. Mekanize Kazı……..…..…… 13

1.5.4.1. Kısmi Kesitli Tünel Açma Makineleri ile Tünel Açılması (Kollu Galeri Açma Makinesi) ……..…...…… 13

1.5.4.2. Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri ile Tünel Açılması (TBM) …… 14

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR……..... 15

2.1. TBM Tarihsel Gelişimi……..……..……... 15

2.2. TBM Seçim ve Tasarım Parametreleri……..……..…… 16

2.3. TBM Genel Özellikleri……..……..……... 17

2.4. TBM'in Ana Unsurları……..……..…… 17

2.4.1. Kazı Sistemi……..……..…… 17

2.4.2. Güç Nakil, İtme ve Tutunma Sistemleri……..……..…….. 18

2.4.3. Pasa Toplama ve Taşıma Sistemi……..……..…… 19

2.4.4. Destekleme (Tahkimat) Sistemi……..……..…….. 19

2.5. TBM Tipleri……..……..…… 20

2.5.1. Kalkansız Tip Tünel Açma Makineleri……..……. 21

2.5.2. Kalkanlı (Shielded) Tip……..……..…….. 22

2.5.2.1. Tek Kalkanlı TBM……..……..…….. 22

2.5.2.2. Çift (Teleskopik) Kalkanlı TBM……..……... 23

2.5.2.3. Ayna Basınçlı (Kapalı) TBM…..……..…….. 24

- Pasa Basınçlı TBM (EPB) …..……..……... 25
- Hava Basınçlı (Compressed Air) TBM…..…..…… 25
- Çamur Basınçlı (Slurry) TBM…..……..…… 26
- Kombine (Mixshield) TBM…..……..…… 26

2.6. TBM'lerde Kazı Performansına Etki Eden Parametreler…… 27

2.6.1. Tünel Geometrisi……..……..……..... 28

2.6.2. Tek Eksenli Basınç Dayanımı..……..……..... 28

2.6.3. Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açısı..……..... 29

2.6.4. İtme Kuvveti (Baskı/Thrust) ……..……..... 29

2.6.5. Tork……..……..……..…… 30

2.6.6. Güç……..……..……..……. 31

2.6.7. Dakikadaki Devir Sayısı……..……..……... 31

2.6.8. Spesifik Enerji……..……..…….. 32

2.6.9. Net Kazı Hızı……..……..……. 33
2.6.10. Ortalama İlerleme Miktarı…….....…….. 33
2.6.11. Makineden Faydalanma Oranı (MFO) …….....……... 33
2.7. TBM Performans Tahmin Modelleri…….....…….. 33
2.7.1. Analitik Modeller..…….....……. 34
2.7.1.1. Colorado School of Mines (CSM) …….....…….. 34
2.7.1.2. Gehring Modeli……..…….....……. 38
2.7.2. Ampirik Modeller…..…….....……. 43
2.7.2.1. NTNU Modeli…..…….....……... 43
- NTNU Testleri…….. 44
- Net Penetrasyon Oranı…….. 51
- Keski Tüketimi……. 58
- Brüt İlerleme Oranı…… 62
2.7.2.2. Kaya Kütle Parametrelerine Dayalı Modeller…….....……..... 63
- Alber, 1996…… 64
- Alverez ve ark., 2000…… 66
- Yağız, 2008…… 68
- Gong ve Zhao, 2009…….. 68
- Hassanpour ve ark., 2011…… 69
- Farrokh ve ark., 2012…… 71
2.7.2.3. Kaya Kütlesi Sınıflamasına Dayalı Yöntemler…….....……..... 71
2.8. Farklı Modellerin Karşılaştırılması…….....……. 76
2.9. TBM Performansı Üzerine Yapılmış Tez Çalışmaları…….....…… 79
3. MATERYAL VE METOT……... 85
3.1. Materyal……. 85
3.1.1. Silvan Tüneli…..…….. 85
3.1.1.1 Proje Alanı Jeolojisi……... 86
- Şelmo Formasyonu……..…….…….. 87
- Silvan Formasyonu…….…….…..... 87

- Midyat Formasyonu…..…… 87
- Gercüş Formasyonu…… 88
- Üst Sinan Formasyonu……..…… 88
3.1.1.2. Silvan Tüneli Kazısında Kullanılan TBM…….. 90
3.1.1.3. Silvan Tünelinde Karşılaşılan Problemler…….. 94
- Su Problemi…… 94
- Gaz Problemi…….. 99
3.1.2. Nurdağı Tüneli……... 103
3.1.2.1. Çalışma Alanı Jeolojisi……..…..... 104
- Hidrojeoloji……...……. 106
- Mühendislik Jeolojisi……...…….. 110
3.1.2.2. Nurdağı Tünelinde Karşılaşılan Problemler……... 112
3.2. Metot…….. 113
4. BULGULAR VE TARTIŞMA……. 115
4.1. Silvan Tüneli TBM Performans Değerlendirmesi…….. 115
4.1.1. Silvan Tüneli Tek Değişkenli TBM Performans Değerlendirmesi…… 115
4.1.1.1 Şelmo Formasyonu……..…….. 115
4.1.1.2. Silvan Formasyonu ……..……... 122
4.1.1.3. Midyat Formasyonu……...…… 128
4.1.1.4. Gercüş Formasyonu … …….. 136
4.1.2. Silvan Tüneli TBM Genel Performansı Değerlendirmesi…….. 142
4.1.3. Silvan Tüneli'nde Performans Tahmin Modellerinin Uygulanması…….. 150
4.1.4 Silvan Tünelinde Yaşanan Su Gelirinin Performansa Etkisi……. 152
4.1.5. Silvan Tünelinde Yaşanan Metan Parlamasının Performansa Etkisi……. 152
4.2. Nurdağı Tüneli Performans Değerlendirmesi…… 154
4.3. Silvan ve Nurdağı Tünellerinde Çift Değişkenli Performans Değerlendirmesi. 166
4.3.1. Penetrasyona Ait Değerlendirmeler……..…. 167
4.3.2 Spesifik Enerjiye Ait Değerlendirmeler…..…….. 184
5. SONUÇ VE ÖNERİLER…….. 203

6. KAYNAKLAR…….. 207

ÖZGEÇMİŞ……. 219

ÖZET

ZOR KOŞULLARDA TBM İLE AÇILAN TÜNELLERİN PERFORMANS ANALİZİ: SİLVAN VE NURDAĞI TÜNELLERİ

DOKTORA TEZİ

Deniz AYDIN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2019

Tünel Açma Makinesi (TBM) ile zor koşullarda tünel açma konusunda yeterince çalışma yapılmadığı ve yapılan çalışmaların sınırlı düzeyde kaldığı literatür çalışmalarından görülmüştür. Zor kazı koşulları; TBM ile açılan tünellerin kazı performansını, konvansiyonel yöntemle açılan tünellere oranla çok daha fazla etkilemektedir. TBM'in kazı koşullarına göre sonradan yeniden tasarlanmasının mümkün olmaması durumu göz önünde bulundurulduğunda, jeoteknik çalışmanın sağlıklı yapılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bunun yapılmadığı tünellerde telafisi mümkün olmayan sorunlarla karşılaşılmaktadır.

Bu çalışmada TBM ile zor koşullarda açılan Silvan ve Nurdağı tünellerinde yaşanan problemler ve bu problemlerin kazı performansına etkileri ayrıntılı incelenmiş, uygulanan çözüm yöntemlerine geniş yer verilmiştir. Bununla birlikte çalışma parametreleri ve formasyon özelliklerinin TBM performansına etkisi analiz edilmiştir. Bu kapsamda öncelikle Silvan ve Nurdağı tünellerinin açılan kısımları boyunca itme, tork, tork/itme oranı, penetrasyon, penetrasyon indeksi, kesici kafa dönüş hızı değişimleri incelenmiştir. Daha sonra formasyon bazında itme kuvveti ve penetrasyon, tork ve penetrasyon, kesici kafa dönüş hızı ve rpm, penetrasyon ve spesifik enerji arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Son olarak da MATLAB programı ile, bu parametrelerin penetrasyon ve spesifik enerji üzerine ikili etkileri ortaya konmuştur.

Birinci bölümde; tünel çeşitleri, tünel açma yöntemleri ve tünel açımında karşılaşılabilecek problemler hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde; TBM tipleri, TBM performansına etki eden parametreler, performans tahmin yöntemleri ve daha önce yapılmış tez çalışmaları ayrıntılı verilmiştir. Üçüncü bölümde; Diyarbakır Silvan sulama tüneli ve Gaziantep Nurdağı hızlı tren tüneli projeleri geniş bir biçimde ele alınmış, bu tünellerin yapım çalışmaları sırasında karşılaşılan problemler ile bu problemlerin çözümleri için uygulanan yöntemler analiz edilmiştir. Dördüncü bölümde, iki tünelde yaşanan problemlerin kazı performansına etkisi (itme kuvveti, tork, spesifik enerji) ve keski tüketimi değerlendirilmiştir. Beşinci bölümde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: TBM, tünelcilik, gazlı zemin, karstik boşluk, TBM performansı.

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF TUNNELS OPENED WITH TBM UNDER DIFFICULT CONDITIONS: SILVAN AND NURDAGI TUNNELS

PhD THESIS

Deniz Aydın

DEPARTMENT OF MINING ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2019

It has been seen from the literature that there are not enough studies on tunneling under difficult conditions with TBM and the studies are limited. Difficult excavation conditions affect the excavation performance of tunnels opened by TBM much more than conventional tunnels. Considering that it is not possible to redesign the TBM according to the excavation conditions later, it becomes necessary to carry out the geotechnical study in a comprehensive way. In the tunnels where comprehensive geotechnical studies are not done, irreparable problems are encountered.

In this study, the problems experienced in Silvan and Nurdağı tunnels opened under difficult conditions with TBM and the effects of these problems on excavation performance are examined in detail and the solution methods applied are given widely.

In addition, the effect of study parameters and formation characteristics on TBM performance was analyzed. In this context, firstly, thrust, torque, torque / thrust ratio, penetration, penetration index and rpm changes were examined along the opening parts of Silvan and Nurdağı tunnels for each formation. Then, the relations between thrust and penetration, torque and penetration, torque and rpm, penetration and specific energy were investigated. Finally, the double effects of these parameters on penetration and specific energy have been presented with MATLAB program.

In the first chapter; types of tunnels, tunneling methods and problems that may be encountered in tunneling are given. In the second chapter; types of TBMs, parameters affecting TBM performance, performance estimation methods and previous studies are given in detail. In the third chapter; Diyarbakır Silvan irrigation tunnel and Gaziantep Nurdağı high speed train tunnel projects are discussed thoroughly and the problems encountered during the construction of these tunnels and the methods used to solve those problems are analyzed. In the fourth chapter, the effects of the problems experienced in two tunnels on the excavation performance (thrust force, torque, specific energy) and disc consumption are evaluated. In the fifth chapter, results and recommendations are given.

Key Words: TBM, tunnelling, gassy ground, karstic, TBM performance.

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 2.1.	Kazı makinelerinin performansını etkileyen parametreler	27
Çizelge 2.2.	Gehring denkleminde kullanılan a ve b sabitleri	39
Çizelge 2.3.	Tünel ekseniyle yapılan kırılma açısı α ve çatlak aralığı J_s nin bir fonksiyonu olarak düzeltme faktörü k_2	41
Çizelge 2.4.	Net penetrasyon oranını belirleyen parametreler	52
Çizelge 2.5.	Eklem ve çatlaklar için kırık sınıfları	53
Çizelge 2.6.	$k_{s,i}$ için değerlendirme denklemi	54
Çizelge 2.7.	i_0 değerlendirmesi için eşitlikler	58
Çizelge 2.8.	Keski ömrünü etkileyen parametreler	58
Çizelge 2.9.	Veritabanının özelliği	64
Çizelge 2.10.	Projelerin veri tabanına dayalı ampirik tahmin modelleri	64
Çizelge 2.11.	Farklı kayalar için ortalama ortalama stres σ_m foksiyonu olarak CAI	66
Çizelge 2.12.	CFF kodu	67
Çizelge 2.13.	Dizayn parametreleri	70
Çizelge 2.14.	Kaya tipi kod	71
Çizelge 2.15.	RQD kodu	71
Çizelge 2.16.	Modellerin tanımlandığı veri tabanlarının özellikleri	76
Çizelge 2.17.	Kaya kütle sınıflandırmasına dayalı ampirik tahmin modelleri	76
Çizelge 2.18.	Tahmin modelleri özeti: tahmin edilen parametreler	77
Çizelge 2.19.	Tahmin modelleri özeti: kaya parametreleri	77
Çizelge 2.20.	Tahmin modelleri özeti: kaya kütle parametreleri	78
Çizelge 2.21.	Tahmin modelleri özeti: disk ve kesici kafa parametreleri	78
Çizelge 3.1.	İnceleme alanındaki yeraltı suyu kaynakları	86
Çizelge 3.2.	Tünel güzergahında açılan temel sondajları	89
Çizelge 3.3.	Tünel güzergahında geçilmesi beklenen formasyonların fiziksel ve mekanik özellikleri	90
Çizelge 3.4.	Silvan tünelinde kullanılan TBM'in teknik özellikleri	91

Çizelge 3.5. 28/04/2015 tarihli tünel içi gaz ölçüm değerleri 100

Çizelge 3.6. 29/04/2015 tarihli tünel içi gaz ölçüm değerleri 100

Çizelge 3.7. Nurdağı Tüneli'nde kullanılan TBM'in genel özellikleri 104

Çizelge 3.8. Güzergâh jeolojisi boyunca geçilecek birim ve kilometreleri 106

Çizelge 3.9. Tünel güzergahında açılan sondajlar ve geçilen birimler 107

Çizelge 3.10. Tünel giriş portalı Km: 3+653 ile Km: 4+900 arasının kaya kütle sınıflamaları ve jeoteknik tasarım parametreleri 110

Çizelge 3.11. Km: 4+900 ile Km: 12+380 arasının kaya kütle sınıflamaları ve jeoteknik tasarım parametreleri 111

Çizelge 3.12. Km: 12+380 ile çıkış portalı (Km: 13+453) arası tasarım parametreleri 111

Çizelge 4.1. Silvan tünelinde geçilen formasyonlarda performans parametrelerinin ortalama değerleri 143

Çizelge 4.2. Silvan tünelinde keski tüketiminin formasyonlara göre dağılımı 150

Çizelge 4.3. Kullanılan performans tahmin metodları ile elde edilen ve gerçekleşen penetrasyon değerleri 151

Çizelge 4.4. Disklerin değişim sayısı (Çoktan aza) 164

Çizelge 4.5. Çift değişkenli performans değerlendirilmesinde kullanılan parametreler için belirlenen kısaltmalar 166

Çizelge 4.6. Seçili çift değişkenlerin formasyonların penetrasyon değeri üzerine etkisi 167

Çizelge 4.7. Nurdağı tünelinde kullanılan TBM'in genel özellikleri 184

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 2.1.	TBM'in ana unsurları	17
Şekil 2.2.	Yapılarına göre TBM tipleri	20
Şekil 2.3.	Tipik bir Gripper TBM'in kesiti	22
Şekil 2.4.	Tipik bir tek kalkanlı TBM'in kesiti	23
Şekil 2.5.	Çift kalkanlı TBM kesiti	23
Şekil 2.6.	EPB kesiti	25
Şekil 2.7.	Mixshield TBM kesiti	26
Şekil 2.8.	Normal disk kuvveti (FN) ile keskinin altında oluşturulan basınç zonu	28
Şekil 2.9.	Kayanın basınç dayanımının keski kuvvetlerine ve penetrasyon üzerine etkileri, (FN, FR; normal ve yuvarlanma disk kuvvetleri)	29
Şekil 2.10.	Keskiler arası mesafe/kesme derinliği (s/d) oranı ile spesifik enerji ilişkisi	33
Şekil 2.11.	Kaya / kesici uç ara yüzeyinde basınç dağılımı ve model parametreleri	37
Şekil 2.12.	Farklı kaya gücünde 17" disk kesicili TBM'nin çalışma sınırları	38
Şekil 2.13.	Kırılma enerjisinin (W_f) bir fonksiyonu olarak p_{200} penetrasyonu	40
Şekil 2.14.	Spesifik kırılma enerjisi w_f'nin bir fonksiyonu olarak k_1 düzeltme faktörü	40
Şekil 2.15.	Çatlak aralığının etkisi	41
Şekil 2.16.	Tünel ekseniyle yapılan kırılma açısı α'nın etkisi	41
Şekil 2.17.	Kesiciler arasındaki boşlukların bir fonksiyonu olarak düzeltme faktörü k_5	42
Şekil 2.18.	Gevrek değeri testinin düzeni	44
Şekil 2.19.	S_{20} ve σ_c arasındaki korelasyon	45
Şekil 2.20.	S_{20} ve $I_{s,50}$ arasındaki korelasyon	45
Şekil 2.21.	Sievers minyatür matkap testinin şeması	46
Şekil 2.22.	SJ ve CAI arasındaki korelasyon	46
Şekil 2.23.	AV / AVS testlerinin ana hatları	47
Şekil 2.24.	AV ve CAI arasındaki korelasyon	48
Şekil 2.25.	AVS ve CAI arasındaki korelasyon	48
Şekil 2.26.	DRI değerlendirmesi için diyagram	49

Şekil 2.27.	Bazı kaya tipleri için DRI varyasyonu	50
Şekil 2.28.	BWI değerlendirmesi için diyagram	50
Şekil 2.29.	Bazı kayaç tipleri için CLI varyasyonu	51
Şekil 2.30.	Bazı kayaç tipleri için CLI varyasyonu	52
Şekil 2.31.	Farklı çatlak ve eklem sınıfları $k_{s,i}$ için değerlendirme diyagramı	54
Şekil 2.32.	k_{DRI} değerlendirmesi için diyagram	55
Şekil 2.33.	k_{por} değerlendirmesi için diyagram	55
Şekil 2.34.	k_d değerlendirilmesi için diyagram	56
Şekil 2.35.	k_a değerlendirmesi için diyagram	56
Şekil 2.36.	i_0 değerlendirmesi için diyagram	57
Şekil 2.37.	H_0 değerlendirmesi için diyagram	59
Şekil 2.38.	k_Φ değerlendirmesi için diyagram	60
Şekil 2.39.	k_Q değerlendirmesi için diyagram	60
Şekil 2.40.	Çapı bilinen bir TBM için ortalama rotasyon hızını elde etmek için diyagram	61
Şekil 2.41.	Çapı bilinen bir TBM için ortalama kesici sayısını elde etmek için diyagram	61
Şekil 2.42.	T_a, T_{TBM} ve T_{bak} değerlendirmesi için diyagram	63
Şekil 2.43.	σ_{cm}' nin bir fonksiyonu olarak SP	65
Şekil 2.44.	Farklı kaya tipleri için ortalama stresin bir fonksiyonu olarak CAI	65
Şekil 2.45.	Ağırlık fonksiyonları kullanılarak yapılan ROP hesaplaması	67
Şekil 2.46.	Kaya kütle özelliklerinden FPI tahmini	70
Şekil 2.47.	ROP ve RMR arasındaki ilişki	74
Şekil 2.48.	RMR'nin bir fonksiyonu olarak ROP	75
Şekil 2.49.	RMR'ın bir fonksiyonu olarak FPI	75
Şekil 3.1.	Proje alanını gösterir yer bulduru haritası	85
Şekil 3.2.	Tünel güzergahı boyunca geçilmesi öngörülen jeolojik formasyonlar	89
Şekil 3.3.	Herrenknecht marka S-794 model sert kaya çift kalkanlı tam cephe tünel açma makinası	92
Şekil 3.4.	Kesici kafa montajı	92

Şekil 3.5.	TBM montaj çalışmaları	93
Şekil 3.6.	Konvansiyonel tünel kazısı	93
Şekil 3.7.	TBM'in tünel aynasına mesafesi	94
Şekil 3.8.	Yaşanan ani su geliri problemi sebebiyle tünelde su birikimi	95
Şekil 3.9.	Silvan-Midyat formasyon dokanağında geçilen birinci karstik boşluk	95
Şekil 3.10.	Midyat formasyonunda geçilen ikinci karstik boşluk	95
Şekil 3.11.	Karstik boşluklardan tünele yığılan sediman	96
Şekil 3.12.	Tünel içindeki su seviyesi	96
Şekil 3.13.	A, B, C ve D anoları ve enjeksiyon işlemi ile bariyer oluşturulması	97
Şekil 3.14.	Kimyasal enjeksiyon kuyu yerleri	97
Şekil 3.15.	Çift pistonlu hava tahrikli enjeksiyon pompası	98
Şekil 3.16.	Poliüretan uygulamalara yönelik özel hazırlanmış tij ve paker	99
Şekil 3.17.	Enjeksiyon uygulaması sonrası görünüm	99
Şekil 3.18.	Kaza öncesi tünel havalandırma sistemi	100
Şekil 3.19.	Kaza sonrası yeniden düzenlenen tünel havalandırma sistemi	101
Şekil 3.20.	Tünel içinde çekim yapılan ex-proof özellikteki fotoğraf makinesi	101
Şekil 3.21.	Tünel güzergahında açılan TPAO sondajları	102
Şekil 3.22.	Tünel boyunca kesilecek birimlerin kalınlık ve derinlikleri	103
Şekil 3.23.	Gaz sızıntısına neden olan gerilme çatlakları	103
Şekil 3.24.	Yeni veriler ışığında tekrar çizilen jeolojik kesit	103
Şekil 3.25.	Proje alanını gösterir yer bulduru haritası	104
Şekil 3.26.	Tünel güzergahı jeolojik kesiti	105
Şekil 4.1.	Şelmo formasyonunda itme kuvveti değişimi	116
Şekil 4.2.	Şelmo formasyonunda tork değişimi	116
Şekil 4.3.	Şelmo formasyonunda penetrasyon değişimi	117
Şekil 4.4.	Şelmo formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi değişimi	118
Şekil 4.5.	Şelmo formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksi değişimi	118
Şekil 4.6.	Şelmo formasyonuna ait tork/itme oranı değişimi	119
Şekil 4.7.	Şelmo formasyonunda ilerleme hızı değişimi	119

Şekil 4.8. Şelmo formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki 120

Şekil 4.9. Şelmo formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki 120

Şekil 4.10. Şelmo formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki 121

Şekil 4.11. Şelmo formasyonunda spesifik enerji ile penetrasyon arasındaki ilişki 121

Şekil 4.12. Şelmo formasyonunda TBM ilerleme, durma ve segment döşeme oranları 122

Şekil 4.13. Silvan formasyonunda itme kuvveti değişimi 123

Şekil 4.14. Silvan formasyonunda tork değişimi 123

Şekil 4.15. Silvan formasyonunda penetrasyon değişimi 124

Şekil 4.16. Silvan formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksinin değişimi 124

Şekil 4.17. Silvan formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksinin değişimi 125

Şekil 4.18. Silvan formasyonunda tork/itme oranı değişimi 125

Şekil 4.19. Silvan formasyonunda ilerleme hızı değişimi 126

Şekil 4.20. Silvan formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki 126

Şekil 4.21. Silvan formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki 127

Şekil 4.22. Silvan formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki 127

Şekil 4.23. Silvan formasyonunda spesifik enerji ile penetrasyon arasındaki ilişki 128

Şekil 4.24. Silvan formasyonunda TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları 128

Şekil 4.25. Midyat formasyonunda itme kuvveti değişimi 129

Şekil 4.26. Midyat formasyonunda tork değişimi 130

Şekil 4.27. Midyat formasyonunda penetrasyon değerlerinin değişimi 130

Şekil 4.28. Midyat formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksinin değişimi 131

Şekil 4.29. Midyat formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksinin değişimi 131

Şekil 4.30. Midyat formasyonunda tork/itme kuvveti oranının değişimi 132

Şekil 4.31. Midyat formasyonunda ilerleme hızının değişimi 132

Şekil 4.32. Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerinde itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki 133

Şekil 4.33. Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerinde tork ve penetrasyon arasındaki ilişki 133

Şekil 4.34. Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerinde tork ile rpm arasındaki ilişki 134

Şekil 4.35. Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerinde spesifik enerji ve penetrasyon arasındaki ilişki 134

Şekil 4.36. Midyat formasyonu sağlam kayada TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları 135

Şekil 4.37. Midyat formasyonu karstik boşluk içeren kesimlerinde TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları 135

Şekil 4.38. Gercüş formasyonunda itme kuvvetinin değişimi 136

Şekil 4.39. Gercüş formasyonunda torkun değişimi 137

Şekil 4.40. Gercüş formasyonunda penetrasyonun değişimi 137

Şekil 4.41. Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksinin değişimi 138

Şekil 4.42. Gercüş formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksinin değişimi 138

Şekil 4.43. Gercüş formasyonunda tork/itme kuvveti oranı değişimi 139

Şekil 4.44. Gercüş formasyonunda ilerleme hızının değişimi 139

Şekil 4.45. Gercüş formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki 140

Şekil 4.46. Gercüş formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki 140

Şekil 4.47. Gercüş formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki 141

Şekil 4.48. Gercüş formasyonunda spesifik enerji ile penetrasyon arasındaki ilişki 141

Şekil 4.49. Gercüş formasyonunda TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları 142

Şekil 4.50. Formasyonların RMR değerleri ile spesifik enerji değerleri arasındaki ilişki 145

Şekil 4.51. Formasyonların RMR değerleri ile keski başına düşen itme kuvveti değerleri arasındaki ilişki 145

Şekil 4.52. Formasyonların RMR değerleri ile keski başına düşen yuvarlanma kuvveti değerleri arasındaki ilişki 146

Şekil 4.53. Formasyonların RMR değerleri ile kesme katsayısı değerleri arasındaki ilişki 146

Şekil 4.54. Formasyonların RMR değerleri ile delinebilirlik indeksi değerleri arasındaki ilişki 147

Şekil 4.55. Formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile spesifik enerji değerleri arasındaki ilişki 147

Şekil 4.56. Formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile keski başına düşen itme kuvveti değerleri arasındaki ilişki 148

Şekil 4.57. Formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile keski başına düşen yuvarlanma kuvveti değerleri arasındaki ilişki 148

Şekil 4.58. Formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile kesme katsayısı değerleri arasındaki ilişki 149

Şekil 4.59. Formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile delinebilirlik indeksi değerleri arasındaki ilişki 149

Şekil 4.60. Silvan tüneli kazısı sırasında her formasyonda tüketilen disk miktarları 150

Şekil 4.61. Silvan tünelinde gerçekleşen ve hesaplanan penetrasyon değerleri 151

Şekil 4.62. Metan parlaması sonrası kesici kafa motorlarının durumu 153

Şekil 4.63. Tünel taç kısmında gözlenen yanmaya bağlı beton dökülmeleri 154

Şekil 4.64. Kızlaç formasyonunda itme kuvvetinin değişimi 155

Şekil 4.65. Kızlaç formasyonunda torkun değişimi 155

Şekil 4.66. Kızlaç formasyonunda tork/itme kuvveti oranının değişimi 156

Şekil 4.67. Kızlaç formasyonunda penetrasyonun değişimi 156

Şekil 4.68. Kızlaç formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksinin değişimi 157

Şekil 4.69. Kızlaç formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksinin değişimi 157

Şekil 4.70. Kızlaç formasyonunda ilerleme hızının değişimi 158

Şekil 4.71. Kızlaç formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki 158

Şekil 4.72. Kızlaç formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki 159

Şekil 4.73. Kızlaç formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki 159

Şekil 4.74. Kızlaç formasyonunda penetrasyon ve spesifik enerji arasındaki ilişki 160

Şekil 4.75. Normal (uniform) disk aşınması 161

Şekil 4.76. Tek yönlü disk aşınması 161

Şekil 4.77. Normal ve tek yönlü disk aşınması 162

Şekil 4.78. Kırılmış disk 162

Şekil 4.79. Kazı boyunca geçilen birimlerde gözlenen keski tüketimi (adet/m^3) 163

Şekil 4.80. Nurdağı tünelinde disk aşınma tiplerinin dağılımı 163

Şekil 4.81. Disklerin kesici kafa üzerindeki konumları 164

Şekil 4.82. Nurdağı tünelinde keski tüketimi ile Cerchar Aşındırıcılık İndeksi arasındaki ilişki 165

Şekil 4.83. Nurdağı tünelinde keski tüketimi ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki 165

Şekil 4.84. Nurdağı tünelinde keski tüketimi ile çekme dayanımı arasındaki ilişki 166

Şekil 4.85. Şelmo formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 168

Şekil 4.86. Şelmo formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 168

Şekil 4.87. Şelmo formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 169

Şekil 4.88. Şelmo formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi 170

Şekil 4.89. Şelmo formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 170

Şekil 4.90. Silvan formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 171

Şekil 4.91. Silvan formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 172

Şekil 4.92. Şelmo formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 172

Şekil 4.93. Silvan formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi. 173

Şekil 4.94. Silvan formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi. 174

Şekil 4.95. Midyat formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 174

Şekil 4.96. Midyat formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 175

Şekil 4.97. Midyat formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 176

Şekil 4.98. Midyat formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi 176

Şekil 4.99. Midyat formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 177

Şekil 4.100. Gercüş formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 178

Şekil 4.101. Gercüş formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 178

Şekil 4.102. Gercüş formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 179

Şekil 4.103. Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi 180

Şekil 4.104. Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 180

Şekil 4.105. Kızlaç formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 181

Şekil 4.106. Kızlaç formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 182

Şekil 4.107. Kızlaç formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi 182

Şekil 4.108. Kızlaç formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi 183

Şekil 4.109. Kızlaç formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi 184

Şekil 4.110. Şelmo formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 185

Şekil 4.111. Şelmo formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 186

Şekil 4.112. Şelmo formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 186

Şekil 4.113. Şelmo formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 187

Şekil 4.114. Şelmo formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 188

Şekil 4.115. Silvan formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 188

Şekil 4.116. Silvan formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 189

Şekil 4.117. Silvan formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 190

Şekil 4.118. Silvan formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 190

Şekil 4.119. Silvan formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisi 191

Şekil 4.120. Midyat formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 192

Şekil 4.121. Midyat formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 192

Şekil 4.122. Midyat formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 193

Şekil 4.123. Midyat formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 194

Şekil 4.124. Midyat formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisi 194

Şekil 4.125. Gercüş formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 195

Şekil 4.126. Gercüş formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 196

Şekil 4.127. Gercüş formasyonunda tork/itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 196

Şekil 4.128. Gercüş formasyonunda penetrasyon ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisi 197

Şekil 4.129. Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisi. 198

Şekil 4.130. Kızlaç formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 198

Şekil 4.131. Kızlaç formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 199

Şekil 4.132. Kızlaç formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkis 200

Şekil 4.133. Kızlaç formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi 200

Şekil 4.134. Kızlaç formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisi 201

KISALTMA VE SİMGELER

A : Tünel kesiti

a : Eklem yönelimi

a : Eklemler ve tünel eksenleri arasındaki açı

a_f : Zayıflık düzleminin eğim açısı

a_s : Zayıflık düzlemlerinin tabaka yönü açısı

a_t : Tünel ekseninin yönü

AV : Aşınma değeri

AVS : Aşınma değeri karbon çelik

BWI : Bit aşınma indeksi

C : Tork

CAI : Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (Cerchar Abrasivity Index)

CFF : Çekirdek kırılma frekansı kodu

CL : Maksimum kesici ömrü

CLI : Kesici ömrü indeksi

CSM : Colorado School of Mines

d : Kesme derinliği

DRI : Delme ömrü indeksi

DSİ : Devlet Su İşleri

D_{TBM} : TBM çapı

EPB : Pasa Basınçlı TBM (Earth Pressure Balance)

ES : Spesifik enerji

FER : Köpük genleşme oranı

FIR : Köpük enjeksiyon oranı

f_1 : Sürtünme kaybı katsayısı

f_L : Sürtünme kayıpları

FN : Normal kuvvet

FPI : Kaya kütlesinin delinebilirliği

FR : Dönme kuvveti

F_R : Keski başına ortalama yuvarlanma kuvveti

$F_{top,disk}$: Keskilere etkiyen toplam kuvvet

$F_{top,itme}$: Teorik toplam itme kuvveti

GIS : Coğrafi Bilgi Sistemi (Geographical Information System)

GSI : Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index)

H_h : Ortalama keski ömrü

H_0 : Temel kesici halka ömrü

i_0 : Net penetrasyon oranı

i_0 : Temel penetrasyon oranı

ICR : Net kazı hızı

ITA : Uluslararası Tünel Derneği (International Tunnelling Association)

J_s : Eklem aralığı

$I_{s,50}$: Nokta yükü dayanımı

k : Enerji transfer oranı

k_1 : Kırılma enerji için düzeltme faktörü

k_2 : Süreksizlik aralığı ve yönelimi için düzeltme faktörü

k_3 : Stres durumu için düzeltme faktörü

k_4 : Kesici disk çapı için düzeltme faktörü

k_5 : Kesici aralığı için düzeltme faktörü

k_a : Ortalama keskiler arası mesafe faktörü

k_d : Disk çapı faktörü

k_{ekv} : Eşdeğer kırılma faktörü

k_N : Disk kesicilerin sayısı için düzeltme faktörü

k_{RPM} : Kesici kafanın dönme hızı için düzeltme faktörü

$k_{s,top}$: Toplam kırılma faktörü

k_Q : Kaya tipolojisi ile ilgili aşındırıcılık ve kuvars içeriği için düzeltme faktörü

k_Φ : TBM çapı ve şekli için düzeltme faktörü

$L_{ort,disk}$: Bir kesici tarafından alınan ortalama yol

LCM : Doğrusal kesme makinası (Lineer Cutting Machine)

L_i : Kesici tarafından kaplanan iz

M_0 : Keski başına brüt itme kuvveti

M_{ekv} : Eşdeğer itme

MFO : Makineden faydalanma oranı

NATM : Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (New Austrian Tunnelling Method)

N_c : Disk sayısı

n_{kesici} : Kesici sayısı

NTNU : Norwegian University of Science and Technology

P	: Optimum şartlarda tüketilen enerji miktarı
p	: Penetrasyon
$P_{kesicikafa}$	: Teorik güç ihtiyacı
P'	: Taban basıncı
p_{200}	: Keski başına 200 kN itme kuvvetinde devir başına penetrasyon
R	: Disk yarıçapı
RC	: Normal kuvvet ve yuvarlanma kuvveti arasındaki oranı gösterir katsayı
RMR	: Kaya Kütle Oranı (Rock Mass Rating)
RPM	: Dakikadaki devir sayısı
RQD	: Kaya kütle değeri (Rock Quality Designation)
ROP	: Makine çalışırken metre/saat cinsinden net ilerleme
ROP_0	: Net penetrasyon oranı
RSR	: Kaya yapı değerlendirmesi
s	: Keskiler arası mesafe
S	: Makine tarafından sağlanan baskı kuvveti
S_{20}	: Kırılganlık değeri
SE	: Spesifik enerji
SJ	: Sievers'ın J-değeri
SP	: Spesifik penetrasyon
T	: Tork
$\mathcal{T}$	: Kesici kalınlığı
TBM	: Tünel açma makinası (Tunnel Boring Machine)
TF	: Toplam itme kuvveti
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu
UF	: TBM kullanım faktörü
v	: İlerleme hızı
$\vartheta_{lin,disk}$	: Kesicilerin lineer hız limiti
ϑ_{rot}	: Dakikadaki dönüş sayısı
v_s	: Kesicilerin ilerleme sırasında uğradığı spesifik ağırlık kaybı
w	: Kesici kafanın saniyedeki hızı
W_f	: Kırılma enerjisi
w_f	: Spesifik kırılma enerjisi
σ_c	: Tek eksenli basınç dayanımı

σ_t : Çekme dayanımı

σ_θ : Kayma gerilmesi

Φ: : Temas açısı

ϕ_{disk} : Disk çapı

ϕ_{TBM} : Kesici kafa çapı

ΔG_i : Kesicinin toplam ağırlık kaybı

ΔL_c : Bir diskin değişmesi gerekeceği ortalama tünel uzunluğu

ΔL_i : Bir diskin aşınma gerçekleşene kadar kat edeceği yol

ΔV_c : Kesici başına kazılan kayaç net hacmi

1. GİRİŞ

Artan nüfusun artan ihtiyaçları, şehirlerin mevcut yapısının değişime zorlanmasına ve teknolojinin de gelişmesi ile yerüstünde insanların kullanımına açık alanların yeraltına çekilerek alternatif alanlar oluşturulmasına sebep olmuştur. Özellikle ulaşım ve altyapı ihtiyaçları için yeni yeraltı projelerinin hayata geçirilmesi kaçınılmaz olmuştur.

Yoğun yapılaşmanın sebep olduğu ulaşım ve altyapı projelerinin yeraltına taşınması zorunlu tercihi, tünel tasarım ve uygulamalarını da beraberinde getirmiştir. İlk çağlarda insanların en öncelikli ihtiyaçlarından biri olan barınma ihtiyacını dahi karşılayan tünel yapımı, o dönemden bugüne değin barındırdığı birçok metot ile büyük ilerleme ve gelişme kaydetmiştir.

Tünel inşasında sıkça kullanılan konvansiyonel yöntemler yerlerini hızla gelişen mekanize kazıya bırakmıştır. Mekanize kazı düşük maliyet, güvenli ve hızlı kazı gibi avantajları sayesinde, tünel açımında daha yoğun tercih edilir olmuştur. Bahsedilen avantajlardan yararlanmak için kazının yapılacağı zeminin jeolojik ve jeoteknik tanımlamalarının iyi yapılmış olması, karşılaşılabilecek risklerin belirlenmesi ve bunlara karşı önlem alınması elzemdir. Aksi takdirde çok büyük zaman ve ekonomik kayıplar yaşanması kaçınılmaz olacaktır.

Bu çalışmada TBM ile zor koşullarda açılan (yüksek su geliri, metan gazı varlığı, zemin şişmesi ve kafa düşme problemleri gözlenen) Silvan ve Nurdağı tünellerinde yaşanan problemler ve bu problemlerin kazı performansına etkileri ayrıntılı incelenmiş, uygulanan çözüm yöntemlerine geniş yer verilmiştir. Bununla birlikte çalışma parametreleri ve formasyon özelliklerinin TBM performansına etkisi analiz edilmiştir. Bununla birlikte başarılı bir tünel imalatı için projelendirme sürecinde jeoteknik etüdün önemi vurgulanmıştır.

1.1.Tünel Tanımı ve Tünelciliği Gerektiren Sebepler

Tüneller; yeraltı açıklıkları olarak tanımlanmakta olup bu açıklıkların eni ve boyu tünelin yapılış amacına göre değişmektedir (Dayanç 2011). Diğer bir tanımıyla tünel demiryolu, karayolu, yaya yolu, kanal, metro gibi taşıma yolunun bir kısmının

yeryüzünden geçirilmesinin teknik veya ekonomik açıdan uygun olmadığı durumlarda bu bölümün yeraltından geçirilmesi için başvurulan sanat yapılarıdır (Emiroğlu 2010). Maden mühendisliği açısından ise tüneller; kazı ve destekleme yapılabilen yeraltı kaya yapılarıdır (Köse ve ark. 2007). İki ucu açık olan tünellerden farklı olarak tek ucu açık yeraltı kazılarına ise galeri denilmektedir (Ünlü 2010).

Tünel inşaatını gerektiren nedenler:

- Dağlık arazide, yeryüzünden aşılamayan sırt ve tepelerin geçilmesi,
- Toprak kaymaları, kaya yuvarlanmaları veya çığdan korunmak,
- Demiryollarında, dağlık bir arazide yükseklik kazanmak,
- İnşaatı ve bakım masrafı yüksek, kendini tutamayan zeminlerde büyük yarmalardan kurtulmak,
- Gaz boruları, elektrik ve telefon kabloları gibi tesisleri yeraltına almak,
- Su getirme yapılarında kirli ve temiz suların izolesi,
- Yolların genişletilmesi ve yeni yolların açılmasının uygun olmadığı durumlar,
- Metro inşaatları,
- Birbirlerinden doğal engellerle ayrılmış bölgelerin birleştirilmesi (Emiroğlu 2010).

Özetle; tünelciliğin gerekliliği ve getirdiği faydalar göz ardı edilemeyecek kadar çoktur. Trafiği yeraltına çekmek, yeryüzündeki yaşam kalitesini arttırır ve ekonomik açıdan da fayda sağlar. Depolama, su arıtma ve güç tesisleri, sivil savunma gibi ihtiyaçlar için yeraltındaki boşlukların kullanımı; sınırlı alan, güvenlik ve çevre koruma gibi durumlar nedeniyle zorunluluk olarak değerlendirilebilir. Bununla beraber tünel kazıları riskli ve pahalı olup yüksek seviyede teknik yeterliliğe ihtiyaç duyulan işlerdir (Kolymbas 2005).

1.2.Tünelciliğin Tarihi

Günümüzde ilk maden kazısı olarak değerlendirilen bulgulara Svaziland'da rastlanmıştır. Bu kazı neandertal insanlar tarafından el ile gerçekleştirilmiş olup tarihi M.Ö. 40000 yılına dayanmaktadır. Daha sonra ateşin kullanılmasıyla el ile kazı yöntemi geliştirilmiştir. Bulgulara göre kayaca yakın bir yerde ateş yakılıp ardından aniden söndürülmesi ile kaya kütlesinin kırılması sağlanmaya çalışılmıştır.

Zaman içerisinde farklı medeniyetler tüneller ve yeraltı alanlarını kazmaya devam etmiştir. Kimi zaman Mısırlılar'da olduğu gibi dini bir rol oynayabilecek olan bu kazılar kimi zaman da Dicle ve Fırat nehirleri arasında M.Ö. 10. yy'da inşa edilen kanallarda olduğu gibi su kaynaklarının şehirlere taşınması için hidrolik işler amaçlıdır (ITA 2018).

Helenistik dünyanın üç harikasından biri olarak kabul edilen 1 km uzunluğundaki su taşıma tüneli M.Ö. 530 yılında Samos adasında mühendis Eupalinos de Magara öncülüğünde kazılmıştır (ITA 2018).

Kömürlü ve Kesimal (2013), Mısırlıların ve Romalıların madencilik faaliyetleri için yaklaşık 200 m derinliklere kadar yeraltı kazıları gerçekleştirdiğini, M.Ö. 6. yy'a ait verilerin sert kayada yılda 9-10 m gibi çok düşük ilerlemeler ile kazı yapıldığına işaret ettiğini, ancak M.Ö. 36 yılında 11 yıl süren çalışmanın ardından tamamlanan 1,4 km uzunluğundaki Pausilippo tünelinin zaman içinde ilerleme hızında ne denli bir artış olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir.

Roma devrinde, İstanbul'da tarihi yarımada altında kaçış amaçlı sayısız tünel inşa edilmiştir. Osmanlı döneminde, 2. Abdülhamit devrinde Galata ve Beyoğlu arasındaki ilk demiryolu tüneli 1874 tarihinde Fransız Mühendis Eugene Henri Gavand tarafından inşa edilmiştir (Yıldırım 2009).

Madencilikteki ilerleme ve Kapadokya'da bulunan ve 10000 kişiye ev sahipliği yapan Derinkuyu yeraltı köyünde olduğu gibi savunma amaçlı yeraltı kalelerinin inşa edilmesi Roma döneminden sonra orta çağa ait tünelcilikteki gelişimi göstermektedir (ITA 2018).

1679 yılında açılan 156 m uzunluğundaki Malpas tüneli, tarihte ilk defa silah tozuyla kazılan tünel olma özelliğindedir. Böylelikle tünel açma mühendisliğinde patlayıcıların kullanılması başlamıştır. Çoğu İngiltere ve Fransa'da olmak üzere birçok kanal tüneli açılmış ve edinilen tecrübe, sanayi devrimi ve demiryolu taşımacılığındaki patlama ile tünel inşaatındaki büyük gelişmenin yolunu açmıştır (ITA 2018).

İlk demiryolu tüneli 1825 yılında Fransa'da Roanne-Andrezieux hattında açılan 1.474 m uzunluğundaki Terre-Noir tünelidir. Bunu 1826–29 yılları arasında İngiltere'de Liverpool-Manchester arasında açılan 5 km ve 1.6 km uzunluğundaki tüneller takip etmiştir (ITA 2018).

1843 yılında mühendis Marc Brunnel Thames nehri altında kalkan tekniğinin ilk kez uygulandığı tüneli bitirdi. 1869 ve 1871 yıllarında da ABD'nin Chicago kentinde nehrin altında iki tünel açılmıştır.

1851-1875 yılları arasında inşası süren 7.64 km uzunluğundaki Hoosac demiryolu tünelinde ilk kez nitrogliserin kullanılmıştır (ITA 2018).

1863 yılında Londra metrosunun inşa edilmesi, toplu taşımada hızlı yenilenmenin başlama noktası olmuştur. Bu gelişmeyi Paris, Viyana, Stockholm, Washington, Glasgow gibi birçok şehir takip etmiştir (ITA 2018).

1988 yılında Japonya'da hizmete açılan iki adayı birleştiren Seikan tüneli 53.85 km uzunluğunda olup bunun 23.3 km si okyanusun altından geçmektedir. İngiltere ve Fransa'yı birbirine bağlayan 50.5 km uzunluğundaki Channel tüneli 1994 yılında hizmete açılmıştır (Yıldırım 2009).

2007 yılında 34.5 km uzunluğundaki Lötschberg tüneli İsviçre'de, 28.4 km uzunluğundaki Guadarrama tüneli ise İspanya'da hizmete girmiştir (Yıldırım 2009).

2.9 km uzunluğundaki Bolu Dağı Tüneli 14 yıllık çalışmanın ardından 2007 yılında hizmete açılmıştır.

3.778 km uzunluğu ile Türkiye'nin en uzun karayolu tüneli olarak inşa edilen Nefise Akçelik tüneli 2006 yılının sonunda hizmete açılmış, günümüzde ise bu unvan 2018 itibariyle 14.346 km uzunluğundaki Ovit Dağı tünelinin olmuştur. 2013 yılında hizmete açılan 1.8 km uzunluğundaki Marmaray Tüneli ile 2016'dan beri faaliyet gösteren 5.4 km uzunluğundaki Avrasya Sualtı Karayolu Tüneli de Türkiye'de bulunan önemli tünel projelerindendir.

1.3. Tünel Çeşitleri

Tüneller açılış amaçlarına göre aşağıda verildiği gibi sınıflandırılabilir; (Köse ve ark. 2007)

- Ekonomik mineral ve maden yataklarına ulaşma amacıyla açılan tüneller
- Ulaştırma maksatlı açılan tüneller (Yayalar için geçiş tünelleri, karayolu ve demiryolu tünelleri)
- Su tünelleri
- Askeri maksatlı tüneller

- Yeraltı boşluklarına ulaşmak için açılan araştırma, derivasyon, drenaj, kuvvet tünelleriyle su alma yapıları için açılan şaft ve tüneller, denge bacaları, kablo ve servis gibi yeraltı boşlukları
- Sığınak amaçlı tüneller
- Haberleşme nakit hatları, gaz, su, elektrik nakilleri gibi maksatlar için açılan tüneller.

1.4. Tünel Açımında Karşılaşılabilecek Problemler

1.4.1. Kaya Patlamaları

Kaya patlamaları; kaya içinde depolanan enerjinin aniden açığa çıkması olayıdır. Kaya patlamasına etki eden faktörler; jeolojik karakteristikler, kazı hızı ve yöntemi ve deformasyon enerjisi olarak sıralanabilir (Tokgöz 1998).

1.4.2. Kemerlenme

Tünel içi gerilmelerine bağlı olarak, kayaların tünel boşluğuna doğru hareket etme isteği yine kayaların birbirlerine destek vererek kurdukları denge vasıtasıyla bir derece engellenir. Kayaçların tavan ve yan duvarlarda desteksiz durabilme özelliğine kemerlenme denir. Kemerlenme; tabakaların yapısı, fay, şistozite, çatlak ve desteksiz kalacak kısmın boyutlarına bağlı olarak değişim gösterir (Canik 1997).

1.4.3. Aşırı Sökülme

Tünel kazılarında profil fazlası kazılar “aşırı sökülme” olarak tanımlanır. Aşırı sökülme kayacın cinsine, ayrışma derecesine, süreksizliklere, tünel çapına, tünel açma tekniğine, inşaat yapma yöntemine, kullanılan patlayıcının cinsine, etkisine, destek şekline, destek ile patlatma arasında bırakılan mesafeye bağlı olarak değişir (Canik 1997).

1.4.4. Su Sorunu

Tünel açımı ile yeraltı suları; duvar ve tavandan sızıntı, sürekli bir akıntı ya da yüksek basınç altında tünel içine akarak tünel açma işlemlerinin zorlaşmasına, zeminde şişme, kabarma ve akmaya neden olmaktadır. Su gelişinin öngörülenden fazla olduğu tünellerde en önemli sorun eğim yönünde çalışmaktır. Bu durum özel ve pahalı pompalama çalışmalarını gerektirmektedir. Ayna önünde sürekli biriken su özellikle

zayıf kesimde ve faylı bölgelerde tünel stabilitesini bozabilir. Bu gibi ortamlarda su, zemin basıncıyla birleşince beklenmedik göçüklere neden olabilir. Ayrıca yeraltı suları, yapılacak olan beton kaplama üzerinde kemirici etkileri olan, Kalsiyum Sülfat ($CaSO_4$), Sodyum Sülfat (Na_2SO_4), Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) gibi kükürt tuzları ya da Hidrojen Sülfür (H_2S)gibi asitleri de bünyelerinde taşıyabilmektedirler (Yalçın ve Vardar 2006; Genç 1983). Aşağıda su gelirinin kazıyı olumsuz etkilediği bazı vakalar verilmiştir.

Avusturya'da bulunan 13.5 km uzunluğundaki Amlach Tünelinde TBM'den yararlanma oranı su geliri 40 l/s den düşük olduğunda %65 iken, su gelirinin 100 l/s'ye çıkmasıyla %35'e düşmüştür (Barton 2000).

İngiltere Channel Tüneli'nde kırıklı birimlerden gelen tuzlu su TBM'in elektriksel operasyonlarında problem meydana getirmiş, aynı zamanda su basıncından kaynaklı fazla kazı yapılmasına sebep olmuştur. Bu da ring döşenmesinde zorluklar ve kazıda beklenilmeyen gecikmelerin yaşanmasına sebep olmuştur (Barton 2000).

Taiwan'daki Pinglin Tüneli'nde 750 l/s ve 18 bar basınçta bir su geliri tanımlanmıştır (Tseng ve ark. 1998). Dul Hasti Hidroelektrik Santrali'nde yüksek basınçla gelen su 8m çaptaki TBM'i 40 cm geri atmaya yetmiş ve buradaki en yüksek su geliri 165 gün boyunca 1166 l/s olmuştur. Suyu drane etmek için yeni bir tünele ihtiyaç duyulmuştur (Barton 2000).

İran'ın batısındaki Zagros Su iletim Tüneli'nde, 3700-13846. metreler arasında serbest akifer görevi gören antiklinal şeklindeki Garou birimleri sebebiyle farklı miktarlarda su geliri gözlemiştir. 110 l/s olan ilk su geliri daha sonra 315 l/s'ye yükselmiş, son olarak da 900 l/ s seviyesine ulaşmıştır (Khave 2014).

Fransa ve İtalya arasında açılan Mont Blanc Tüneli'de 600 m genişliğinde güçlü tektonize fay zonunda bulunan kataklastik kayanın kesilmesiyle 1084 l/s su geliri yaşanmış ve 4 ay boyunca ilerlemenin durmasına sebep olmuştur (Mare´chal ve Etcheverrya 2003).

1970'lerde İsviçre'de Gothard ve Aar Masiflerinde açılan ve çoğunlukla granit, kristalize şist ve gnays kesilen Gothard Karayolu Tüneli'nde 270 l/s su geliri yaşanmış ve beton kaplamasında büyük sorunlara sebep olmuştur (Mare´chal ve Etcheverrya 2003).

Gnays, mika ve şistlerden geçen Cleuson-Dixence hidroelektrik galeride kataklastik kaya geçişi sırasında 330 l/s'lik önemli bir su geliri gözlenmiştir (Buergi C. ve ark. 1999).

1.4.5. Isı Sorunu

Derin tünellerde karşılaşılan bir sorundur. Yüzeyde her 33 m derine inildiğinde ısı 1°C artar. Sığ tüneller için bu risk yoktur, ancak çalışma noktalarındaki iş makinelerinin sıcaklığı ve çıkardıkları ağır gazlar sıcaklığı nispeten yüksek tutar, bu sorunda iyi bir havalandırma sistemi ile ortadan kaldırılabilir (Genç 1983).

1.4.6. Gaz Sorunu

Tünel açımı esnasında çalışanların hayatını tehlikeye sokabilecek gazlarla karşılaşılabilmektedir. Volkanik saha, sıcak kaynak bölgeleri, petrol bölgeleri civarındaki tünellerde patlayıcı özeliği olan Metan (CH_4), zehirli özellikteki Karbonmonoksit (CO) ve betona etki eden Hidrojen Sülfür (H_2S) ile Sodyumdioksit (SO_2) gibi gazlara rastlanmaktadır (Genç 1983).

Gaz akımının düzenli olması durumunda gaz giriş yerini betonla kapatmak uygun olabilmektedir. Ayrıca gazların ve kazı sırasında oluşan tozun dışarı atılması için, gerekli olan temiz hava miktarı hesaplanarak bir havalandırma sistemi oluşturulması, bu sayede tünel içinde gaz ve toz yoğunluğunun insan sağlığına zarar vermeyecek düzeye indirilmesi sağlanabilmektedir (Kolymbas 2005).

Aşağıda tünel açımı esnasında gaz problemi yaşanan bazı vakalar verilmiştir.

1971'de Los Angeles'ta 8.85 km uzunluğunda bir su tüneli, 6.8 m çaplı sert kaya TBM ile açılırken gaz patlaması olayı gerçekleşmiş ve 17 işçi ölmüştür. Olay sonrası tünelin petrol sahasından geçtiği anlaşılmıştır (Proctor 2002).

1978'de Japonya'da sert kaya TBM ile açılan tünelde jeolojik süreksizliklerin bol olduğu bir antiklinalde biriken metanın patlaması sonucu 9 işçi ölmüş, 2 işçi yaralanmıştır. Olayda metan dedektörü alarm vermiş ancak otomatik olarak güç kesme gerçekleşememiştir (Kitajima 2010).

1984'te İngiltere'de yeraltı suyu içersinde çözünerek tünele giren metan, boşluklarda birikip patlama değerlerine ulaşarak 16 kişinin ölümüne ve 28 kişinin yaralanmasına sebep olmuştur (Lockyer ve Howcroft 1997).

1993 Japonya EPB-TBM ile açılacak tünel için hazırlanmış jeolojik raporda, metan varlığı öngörülmemiş ve makine üzerindeki metan gaz sensörünün tünelin taç kısmından 90 cm aşağıya yerleştirilmiş olmasından dolayı patlamadan önce gaz varlığı tespit edilememiştir (Kitajima 2010).

İspanya' da 10 m çapında çift kalkanlı TBM ile açılan Abdalajis hızlı tren tünel projesinde tünelin bir kesimindeki kil formasyonlarından kaynaklanan bir metan vakası yaşanmıştır. TBM'in önünde yapılan sondajlardan birinde, gaz basıncı 11 bar olarak ölçülmüştür (Grandori 2006).

2007'de çift kalkanlı TBM ile açılan 26 km uzunluğunda ve 6.73 m çapındaki Zagros tünelinde, yüksek oranda H_2S ve CH_4 gazları geliri yaşanmış ve bunun sonucunda kazı çalışması 4 ay durdurulmuştur (Shahriar ve ark. 2009).

2010 yılında EPB-TBM ile açılan İstanbul-Selimpaşa Atıksu tünelinde metan patlaması meydana gelmiştir. Patlamanın, duraklama anında EPB-TBM'in kazı odasında bulunan pasanın metanın çıkışına engel olması nedeniyle birikmesi ve metanın patlama limitlerine ulaşarak konveyör açıklığından pasa ile birlikte tünele püskürmesi sırasında, burgu konveyör ile muhafaza borusu arasındaki sürtünmeden çıkan kıvılcımla buluşup meydana geldiği düşünülmektedir (Çopur ve ark. 2012).

1.4.7. Sıkışan Zemin

Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu sıkışmayı; kayanın kesme dayanımının aşılması sonucu tünel çevresinde oluşan büyük deformasyonlar olarak tanımlamıştır (Barla 2001). Bu deformasyonlar, yerindeki basınçlar, gözenek basınçlarını da içine alacak şekilde kesme dayanımının aşılmasıyla oluşmaktadır (Einstein ve Bobet 1997). Tünel inşası sırasında sonlanabilen ya da uzun bir süre boyunca devam edebilen deformasyon; düşük mukavemet gösteren mikaşist, kalkşist, grafitşist, kiltaşı, killişist, marnlı kil gibi zayıf kaya kütleleri ile ilgilidir (Barla 2001).

TBM kazısında sıkışma gözlenmesi halinde; aynada stabilite problemleri, yetersiz kazı çapı, itme kuvvetinde artış ve makine doğrultusunun sağlanmasında zorluklar gözlenir (Barla ve ark. 2000).

1.4.8. Tünel Güzergah Zemininde Kırıkların Bulunması

Yerkabuğunda bulunan ve kayaç davranışını doğrudan etkileyecek kırıkların tünel inşasından önce ayrıntılı olarak araştırılması, bunların aktif olup olmadığı, eğim ve doğrultuları, açılacak tünele etkileri, genişlikleri ve dolgu malzemelerinin cinsi gibi özelikleri belirlenmelidir. Kırık bölgesindeki örselenmiş malzemenin davranışı kayaçtan çok yumuşak zemine benzemekte ve tünel açımı esnasında bu malzeme tünel içine akarak tünel stabilitesini bozabilmektedir. Kil ile de dolu kırıklarda ise kilin su alma ve şişme özelliğinden dolayı daha yapım esnasında tünel iksasının yer değiştirmesine ya da tünelde göçüğe bile neden olabilmektedir. Tünelin aktif bir fayı kesmesi durumunda ya güzergah değiştirilmeli, ya da tünel yapımı terk edilerek mümkün ise bölge açık yarma ile geçilmelidir (Arıoğlu ve Yılmaz 2006).

1.5. Tünel Açma Yöntemleri

Tünelcilik genel olarak; kazı, tahkimat, pasanın taşınması ve kaplama, izolasyon, drenaj, havalandırma işlemlerinin birlikte ve birbiriyle uyumlu bir şekilde yürütüldüğü çok yönlü bir çalışmadır. Birbirini takip eden bu aşamaların toplamına kazı döngüsü adı verilir (Rostami ve ark. 1994).

Tünel açma işlemleri başlangıçtan bitime kadar olan aşamaları aşağıda verildiği gibi özetlemek mümkündür (Bell 1994).

- Tünelin açılacağı bölgenin jeolojik yapısı tespit edildikten sonra, tünelin konumu, güzergahı ve derinliği belirlenmelidir.
- Belirlenen güzergahdaki kaya ya da zemin özellikleri, dayanım parametreleri, kırık, eklem takımı, fay vb gibi yapısal bozukluklar ve yer altı su durumu belirlenmelidir.
- Yapılan hesaplamalar ve geçmiş deneyim ışığında elde edilen verilere göre, tünel kazı kesiti, kazı yöntemi, kazıyı yapacak makinenin cinsi, kullanılacak tahkimat elemanları ve gerekli ise drenaj yöntemleri ortaya konmalıdır.

- Yapısal bir model oluşturulmalı; elde edilen veriler, farklı zemin koşulları ve farklı tahkimat elemanları kullanılarak modele uygulanmalıdır. Bu uygulamalarda güvenlik faktörlerine önem verilmelidir.
- Gerilme ve deformasyona bağlı hazırlanan sistemin güvenilirliği kontrol edilmelidir.
- Tünel açımına paralel olarak yerinde ve sürekli ölçümler yapılmalı; elde edilen deformasyon değerlerinin zamana ve ilerlemeye bağlı olarak değişmediği sonucuna ulaşılıyorsa imalata devam edilmelidir.

Jeolojik-hidrolojik şartlar, tünelin şekil ve genişliği; bir yerde tünel açılırken bu işlemlerin ne şekilde uygulanacağı, hangi yöntemlerin benimseneceğini etkiler. Bu yöntemler dört grupta toplanılabilir:

- Aç-kapa yöntemi
- Batırma yöntemi
- Klasik tünel açma yöntemi
- Mekanize yöntem

1.5.1. Aç-Kapa Yöntemi

Yeryüzüne yakın (sığ) kotlarda açılacak tünellerde; örtü tabakasının ince olması sebebiyle uygulama rahatlığı sağlayacağından daha çok aç-kapa yöntemi tercih edilmektedir (Esmer 2017). Bu yöntemde kazı boşluğunun yanları betonarme, kazık veya beton duvar perdesi ile desteklendikten sonra, iş makineleri ile yüzeyden daha geniş bir kanal açılır. Daha sonra bu kanalın üzeri beton ile kapatılır. Betonun üzeri de toprak ya da kaya ile doldurularak temel oluşturulur.

Yeraltı suyu durumu yapım ve işletmecilik aşamalarında; drenaj ve izolasyon basamaklarında iş zorluğu ve maliyet açısından önemlidir (Oğul 2017). Yeraltı suları yüzeye yakınsa su seviyesi düşürülmesi ya da suyun derin kuyulara drene edilmesi gerekir. Kenar ayaklar açık havadaki duvar örme ile aynı şekilde yapılır. Tavanın oluşturulmasında yeryüzünden yeteri kadar derinlik varsa bir kemer oluşturulur, yoksa betonarme bir tavan oluşturulabilir. Yöntem basit ve ekonomik bir yöntem olsa da yerleşim alanları içerisinde gürültü ve trafiği engellemesi gibi sebeplerle çok tercih

edilmez (Ünlü 2010).

1.5.2. Batırma Yöntemi

Bu yöntem ilk defa 1893 yılında ABD Boston'da kanalizasyon kazısında, ardından 1910 yılında Detroit Nehri geçişinde kullanılmıştır. Türkiye'de de İstanbul Boğazı altından geçen ve yapımı 2013 yılında tamamlanan Marmaray Projesi dünyada en derin batırma tünel olması açısından önemli örneklerden biridir. Batırma tüp tüneli; prefabrik betonarme tüpün yeryüzünde imal edilmesi, tüpün su altında yerleştirileceği yerin hazırlanması, tüpün batırılması ve birleştirmesi ve ardından dolgu yapılması işlemlerinin sırasıyla yapılması ile inşa edilir (Ünlü 2010).

Batırma tünel uygulamalarında hidrografik ve GPS (global positioning system/küresel konumlama sistemi) ölçümlerden yararlanılır. Tünel güzergâhının batı metrik veya hidrografik haritalarının hazırlanması, tüplerin deniz dibinde yerleştirilecekleri kanalın hazırlanması (dredging) sırasında gerekli ölçme işlemleri, tüplerin yerleştirilmesi (immersing) sırasında yapılacak ölçme işlemleri, güzergahın deniz dibi haritasının (batı metrik veya hidrografik harita) hazırlanması, su dibinde yerleştirilmesi uygulamanın önemli aşamalarıdır.

1.5.3. Klasik Tünel Açma Yöntemi ile Tünel Açımı

Klasik tünel açma yönteminde tünel kazısı, delme-patlatma aracılığıyla yapılmaktadır. Tünel arınında ilerleme kaya zeminin durumuna bağlı olarak tek ayna ya da parçalı ayna kademelerde yapılabilir (Ünlü 2010). Yaygın olarak kullanılan ve emniyet tedbirleri alındığında güvenli bir yöntemdir. Kazılması mekanize yöntemler ile zor ve maliyetli olan kaya şartlarında uygulanmaktadır. Delme patlatma ile tünel açımı, sırasıyla aşağıdaki yöntemleri içeren devrelerin tekrarı şeklindedir (Dayanç 2011).

- Jeoloji ve çevresel şartlar göz önüne alınarak projelendirilmiş paternde aynada patlatma deliklerinin delinmesi.
- Patlayıcı maddenin deliklere tünel geometrisi ve çevresel etkiler göz önünde bulunarak şarj edilmesi.
- Deliklerin ateşlenmesi
- Patlatma sonucunda ortaya çıkan gazın tahliye edilmesi

- Düşme tehlikesi olan gevşemiş kayaların düşürülmesi
- Yeni ilerlenen kısıma gerekiyorsa tahkimat yapılması
- Pasanın taşınması

Delme ve patlatma yöntemi ile tünel açmanın avantajları;

- Uzun yıllardır uygulanıyor olmasından gelen tecrübe
- İlk yatırım maliyetinin düşük olması
- Her türlü kaya şartlarında uygulanabilmesidir

Delme ve patlatma yöntemi ile tünel açmanın dezavantajları:

- Uzun zaman alır ve ilerleme yavaş olur.
- Aşırı sökülmenin önüne geçilemediğinden tünel çapını ve şeklini korumak hemen hemen imkansızdır.
- Ne kadar hassasiyet gösterilirse gösterilsin, patlamanın sebep olduğu gevşemelerden kaçınılmaz (Emiroğlu 2010).

Delme- patlatmanın yanı sıra galeri açma makineleri ile de klasik tünel kazıları yapılmaktadır. Kaya zeminlerin mekanik özelliklerini tanımlayarak tahkimat önerilerinde bulunan kaya kütle sınıflama sistemlerinin öğretilerinden yola çıkılarak geliştirilen Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (New Austrian Tunnellin Method-NATM) nun ilk uygulamalarından biri 1969 yılında açılan Frankfurt Metrosu'dur (Ünlü 2010).

NATM ile tüneller; delme-patlatma yönteminin uygulanmasına imkan vermeyen zayıf kayalarda, hidrolik veya kollu kırıcıların kullanılmasıyla açılır. Bu yöntemde amaç kemerlenme imkanı yaratarak kayayı ya da zemini kendisine taşıtmaktır. Kazı yapıldıktan sonra, hesaplar yardımıyla belirlenen en uygun destek sistemi kullanılarak kazı kesiti tamamlanmış olur ve tünelde kemerlenme sağlanır (Esmer 2017).

Yöntemin Avantajları:

- Farklı zemin şartlarına uyum sağlayabilir,
- Farklı en ve kesitler için esnek uygulanabilir,
- Gerekli tahkimat boyutlandırmasında ekonomik olarak optimizasyon yapılabilir,

- Kısa ve küçülmüş bölümler için ekonomik uygulama sağlayabilir,
- Tam kesit galeri açma makineleri ile kombinasyonlar sağlanabilir.

Yöntemin Dezavantajları:

- Yeraltı suyunun altında uygulanabilmesi için ek ölçümlere ihtiyaç duyar,
- İlerleme oranı nispeten düşüktür,
- Personelin eğitimi ve istenilen seviyeye gelmesi zordur,
- Projeyi yaptıran ve yapan açısından anlaşma ve risk dağılımı zordur,
- Otomasyon olanağı sınırlıdır,
- Yöntem de ihtiyaç duyulan materyallerinin kalitesinin yüksek olması gereklidir (Emiroğlu 2010).

1.5.4. Mekanize Kazı

Tünel açma makineleri tünel içerisinde yaptığı kazı şekline göre ikiye ayrılmaktadır:

- Kısmi kesitli tünel açma makineleri ile tünel açma (Kollu galeri açma makinesi).
- Tam cepheli tünel açma makineleri ile tünel açma (TBM).

1.5.4.1. Kısmi Kesitli Tünel Açma Makineleri ile Tünel Açılması (Kollu Galeri Açma Makinesi)

Bu makineler kazı arının tamamında aynı anda kazı yapamamaları sebebiyle bu ismi alırlar. Kollu galeri açma makineleri genellikle yumuşak ve orta-sert kayaçların kazılarında kullanılır. Madencilikte üretim, tünelcilikte ise kazı amaçlı kullanılırlar. Bu makineler; bum ünitesi, malzeme yükleme ünitesi, malzeme aktarma ünitesi ile hidtolik ve elektrik ünitesi olmak üzere 5 ana bölümden oluşurlar.

Kollu galeri açma makinelerinin çalışma prensibi; kesici kafanın aynaya dayanması ve dönmeye başlaması ile başlayan dalma işlemi ve kazı yüzeyinde oluşan derinliğin tüm kazı yüzeyi boyunca genişletilmesi olan kesme işlemi olmak üzere iki aşamada incelenir. Dalma işleminden sonra ayna yüzeyinde serbest bir yüzey oluştuğu için kesme işleminde harcanan enerji, dalma işleminde harcanan enerjiden azdır (Caner 2010).

Bu makineler kesici kafa tipi ve makine ağırlığı olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılırlar. Kesici kafa tipine göre; aksiyel (dönme ekseni bum eksenine paralel) ve travers (dönme ekseni bum eksenine dik) olarak iki gruba ayrılan kollu galeri açma makineler ağırlıklarına göre ise hafif, orta ve ağır olarak üç sınıfta incelenir.

1.5.4.2. Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri ile Tünel Açılması (TBM)

Tünel açma makineleri (Tunnel Boring Machine-TBM), klasik metodlarla açılamayan ve yüksek ilerleme hızı beklenen projelerde tercih edilir. Bu yöntemde; tünel çapı ile aynı çapa sahip TBM ile tünel ayna boyunca tam cephe çalışarak eksen boyunca kesintisiz ilerleme sağlar (Tüysüz 2012).

İlk yatırım maliyeti yüksek olan TBM'ler tasman oluşumunu önleme, sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışma özellikleri sebebiyle günümüzde sıkça tercih edilen kazı makineleri olmuştur. Sertten akıcı formasyonlara kadar her türlü kazı ortamına uygun dizayn edilebilen kesici kafa ve keski tipleri, makine dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, pasa taşıma sistemleri çeşitli yönlerden farklılıklar göstermektedir (Tunçdemir 1998).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde TBM'in tarihsel gelişimi, TBM tipleri, TBM performansına etki eden parametreler, performans tahmin yöntemleri ve daha önce yapılmış tez çalışmalarına yer verilmiştir.

2.1. TBM Tarihsel Gelişimi

1800'lü yılların başında endüstride dünya genelinde meydana gelen hızlı gelişme, artan nüfus ve kırsaldan şehre gerçekleşen göç nedeniyle şehirlerde ulaşım ve alt yapı hizmetlerinde birçok tünele ihtiyaç duyulmuştur (Maidl ve ark. 2008). Bu kapsamda dikkati çeken ilk tünel projesi İngiltere'nin Londra şehrinde 1825 yılında Thames nehri altında Rotherhithe ile Wapping arasında açılmış olan tünel projesidir (King 2000). Mark Isambard Brunel tarafından tasarlanan ve yumuşak zemin koşullarında, tünel açma makinesinin öncülü kabul edilen bu kalkanlı makine, içerisinde bir çok bölme bulunan dikdörtgen biçiminde bir tüpten oluşmaktadır (O'Carroll 2005). Tünel işçileri bu bölmelerde kazı yapmaktadır. Tünel kaplaması ise kalkanın hemen arkasından başlayarak tuğla ile yapılmaktadır.

Basınçlı havanın arına su gelirinin önlenmesi ve arın denge durumunun korunması amaçlayan ve tünelcilikte ilk defa 1874 yılında De Witt Haskins tarafından Newyork'ta Hudson nehri altında açılan Antwerp Docks adlı tünel projesinde kullanılan tasarımın patenti Lord Cochrane'e aittir. (Cornejo 2001). Tünel projesi kapsamında 2.4 bar hava basıncında kazı gerçekleştirilmiştir (Cornejo 2001). Günümüz kapalı mod tünelcilik yöntemlerinin de bu sayede temeli atılmıştır.

1851 yılında Hoosac tünel projesi için Amerikalı mühendis Charles Wilson tarafından geliştirilmiş tünel açma makinesinin patenti "Wilson patentli kaya kesme makinesi" adıyla alınmıştır (Balcı ve ark. 2007). Bu tasarımın önemi bilinen ilk tam cephe kaya formasyonlar için geliştirilmiş ve döner bir kesici kafaya sahip tünel açma makinesi olmasıdır (Maidl 2008). Bu makine daire şeklinde döner bir kafaya, konsantrik daireler çizen keskilere, itme ve pasa uzaklaştırma mekanizmalarına sahip olup 3 m ilerleme yapmayı başarmıştır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Günümüzde kullanılan tünel açma makinelerinde olduğu gibi döner bir kesici kafaya ve bu kesici kafanın üstünde yer alan tırnak ve/veya disk keskilere sahip ve

sürekli kazı yapabilen bir tasarıma benzer ilk TBM 1952 yılında Robbins firması tarafından 7.85 metre çapta ve şeyl formasyonda kazı yapabilmek üzere üretilmiştir. Bu TBM tasarımında tek eksenli basınç dayanımı düşük kaya formasyon kazılarında kullanılan tırnak keskiler kullanılmıştır. 1956 yılında ilk sağlam kaya tünel makinesi yine Robbins firması tarafından tasarlanmış ve kullanılmıştır. 3.3 metre çapında ve kesici disklere sahip bu makina Kanada'da Humber atık su tünel projesinde kullanılmıştır. Bu tasarımda önce tırnak keskiler ile beraber disk keskiler de kullanılmış fakat tünel güzergahı boyunca tırnak keskilerin sık sık değiştirilmesi gerekmiş ve bu değişimlerin makine yararlanma oranlarını düşürmesinden ötürü tırnak keskiler tamamen disk keskiler ile değiştirilmiştir (Balcı ve ark. 2007).

2.2. TBM Seçim ve Tasarım Parametreleri

Açılacak yeraltı boşluğu boyunca geçilecek formasyonların önceden tespiti, kullanılacak makinenin seçiminde en önemli faktörlerden biri olmaktadır (Tunçdemir 1998).

Zeminin jeolojik ve jeoteknik özellikleri tünel açılması için en önemli parametrelerdir. Zemin kaya ise süreksizlikler ve bu süreksizlikleri dolduran malzemenin dayanımı; zemin toprak ise tane boyu, kohezyon gibi parametreler makinanın verimini, kazının ilerleyişini doğrudan etkileyen faktörlerdir (Tüysüz 2012).

Tünel ekseni boyunca hangi jeolojik birimlerin geçileceği, bu birimlere ait jeoteknik sınıflamalar, basınç dayanımları, süreksizlik durumları ve su ihtivası gibi temel parametreler araştırılır. Belirlenen bu özelliklere göre, projenin bütünlüğü de göz önüne alınmak şartıyla bir tünel açma makinesinin tipi ve özellikleri belirlenir.

TBM'ler zeminin durumuna göre, bazen sadece kazıcı uçlardan, bazen de zeminin çökmesi ya da benzer sebeplerin inşaata zarar vermesini önlemek amacıyla kalkanlı olarak üretilir. Bu kalkanlar, zemine geçici tahkimat desteği sağlamak, çalışma alanındaki çalışanları ve ekipmanı korumak amacıyla kullanılır.

Çeşitli tip ve özellikte olan TBM'ler projeye göre özel olarak üretilir. Standart bir modele sahip olmayan bu makineler, kullanılacak işin niteliğine bağlı olarak dizayn edilir. Bu sebeple, TBM üretici firmalar, verilen proje parametreleri doğrultusunda kullanılacak TBM'i o proje için tasarlar (Tüysüz 2012).

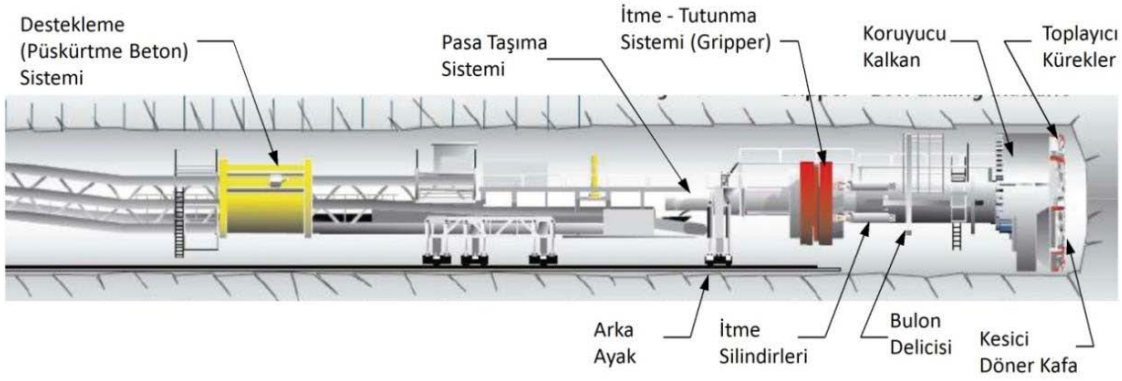
2.3. TBM Genel Özellikleri

Tünel açma makinelerinin ana parçalarını; kesici kafa, itme silindirleri, yönlendirme silindirleri, kilitleme pabuçları (gripper), kesici kafayı döndüren motorlar ve beton tahkimat elemanlarını yerleştiren erektörler oluşturur. Tünel açma makinelerinin destek donanımlarını içeren sistemler ise hidrolik güç üniteleri, elektrik trafoları, tavan cıvataları için delici, havalandırma fanları, pasa nakliyatı için bant konveyör ve vagonlardan oluşur. Bunlarla beraber su gelirini önleme amaçlı enjeksiyon ekipmanları da ihtiyaç halinde kullanılmak üzere bu bölümde yer alır. Devamlı olarak süreksizlik içeren zeminlerde kullanılan makinelerde opsiyonel olarak kazı yapılmadan önce jeoloji hakkında belirli bir mesafeye kadar bilgi edinmeyi sağlayan kılavuz sondaj (Probe Drilling) ekipmanları bulunur (Dollinger ve Raymer 2002).

2.4. TBM'in Ana Unsurları

TBM'in ana parçalarını oluşturan sistemler 4 grupta toplanabilir (Şekil 2.1).

- Kazı sistemi
- Güç nakil, itme ve tutunma sistemi
- Pasa toplama ve iletme sistemi
- Destekleme sistemi



Şekil 2.1. TBM'in ana unsurları (Yüksel 2014).

2.4.1. Kazı Sistemi

Kazı sistemini; disk ve/veya kazma uçlu kesiciler, bu kesicilerin monte edildiği yuvalar ve bu yuva ve kesicilerin de yer aldığı dairesel biçimli kafa oluşturur. Kesici kafa üzerindeki kesici cinsi, kazı ortamına göre değişmekle beraber ayrı ya da birlikte

kullanılabilir. Genel bir kural olarak, sert kaya ortamlarda genellikle disk kesiciler kullanılırken, zemin ortamlarda kazma türü kesiciler, çok çatlaklı ya da yumuşak kayalarda ise her iki tip kesiciler birlikte kullanılmaktadır (Yüksel 2014).

Kesici kafaya takılmış bulunan disk kesiciler kesici kafanın dönmesi sırasında dairesel bir yörüngede kaya yüzeyinde yuvarlanırken, aynaya doğru yapılan itme hareketi sonucu diske iletilen kuvvet diskin kaya yüzeyine değdiği noktada basınç yığılması meydana getirir. Bu basıncın yoğunlaşması ile diskin hemen altındaki kaya ezilirken, komşu iki disk arasında kalan bölgede oluşan çekme gerilmesinin etkisiyle kaya oval levhalar şeklinde yüzeyden çatlayarak kopar. Disk kesiciler vasıtasıyla ayna yüzeyinde gerçekleşen bu olay, kaya ortamlarda TBM ile kazı işleminin esasını oluşturmaktadır (Yüksel 2014).

Zemin türü farketmeksizin kazı sırasında en düşük enerji sarfiyatı ile kontrollü bir şekilde homojen ve sürekli pasa akışının sağlanması büyük önem taşımaktadır. Bu noktada tünel kazısı için kesici kafa tasarımının önemi ortadadır. Bu tasarım içinde kafanın açıklık oranı, açıklıkların geometrileri ve bu açıklıkların kesici kafadaki dağılımları ile kesici kafada kullanılacak olan keskilerin boyutları, sayıları ve kesici kafadaki dağılımları gibi parametreler üretici firmaların geçmiş tecrübelerinden yararlanılarak yapılmaktadır (Arıoğlu 2010).

2.4.2. Güç Nakil, İtme ve Tutunma Sistemleri

Güç nakil üniteleri kesici kafanın dönmesini ve ilerlemesini sağlamaktadır. Kesici kafayı döndüren motorlar TBM'lerde kesici kafanın hemen arkasında elektrik veya hidrolik güç ile çalışmakta ve yüksek enerji sarfiyatına sebep olmaktadır. Elektik gücü ile çalışan motorlar genel olarak sağlam kaya formasyonlarda ya da düşük torka ihtiyaç duyulan formasyonlarda tercih edilirken hidrolik motorlar yüksek tork ihtiyacı olan killi, siltli zeminlerde veya kırıklı çatlaklı kaya formasyonların kazılarında kullanılmaktadırlar (Arıoğlu 2010).

TBM'lerde kazının istenilen hızda yapılabilmesini sağlamak için motorların yanı sıra kesici kafanın ilerlemesini sağlayan itme düzenekleri de büyük önem taşımaktadır. İtme ve tutunma sistemi TBM'in kazı sırasında ileriye doğru hareketini sağlar. İtme kuvveti TBM'in performansı üzerinde etkili olan en önemli parametrelerden biridir (Yüksel 2014). TBM'lerin ilerletilmesi ya "Gripper" (pabuç) ya da "hidrolik piston"

yardımıyla yapılır. Pabuçlar; kesici kafanın arkasında tek veya çift sıra halinde sağlı sollu iki veya çapraz dört hidrolik pistonun önlerinde yer alır ve tünel cidarlarına bastırılarak makinenin ilerlemesini sağlarlar. Kalkanlı tip TBM'lerde ise ilerleme kalkan içine döşenen segment halkalarına bir dizi hidrolik pistonun basması yardımıyla yapılır (Arıoğlu 2010). Toplam itme kuvveti, her bir diske gelen kuvvet ve ileri doğru hareket esnasında kalkan yüzeyinde oluşan sürtünme kuvvetinin toplamına eşittir (Yüksel 2014).

2.4.3. Pasa Toplama ve Taşıma Sistemi

Aynadan kazılan kaya ya da zemin parçaları, kesici kafada yer alan sıyırıcılar tarafından toplanarak yine kafa yüzeyindeki açıklıklardan kesici kafanın arkasına geçer. Kesici kafanın dönmesiyle kazılan malzeme makine gerisinden toplayıcı kürekler vasıtasıyla kesici kafanın merkez kısmına kadar uzanan kısa bir bantlı bir taşıyıcıya, buradan da makinenin arka kısmına kadar uzanan ikinci bir banta dökülür. Zemin ve zayıf kaya ortamlarda kısa bantın yerine, zemin basıncının dengesini kontrol ederek pasayı dışarı almayı sağlayan burgulu bir konveyör yer alır. Banta gelen pasa, vagonlara taşınarak tünel dışına atılır. Vagon dizisi, geri dönüşte enjeksiyon ve destekleme segmentlerini taşımak için kullanılır. Bazı TBM'lerde pasa malzemesi tünel içerisine boydan boya monte edilen bantlar veya pasa kamyonları ile de taşınabilmektedir. Bulamaçlı tip makinelerde ise pasa, borular ile bulamaç halinde tünel dışına gönderilir (Yüksel 2014).

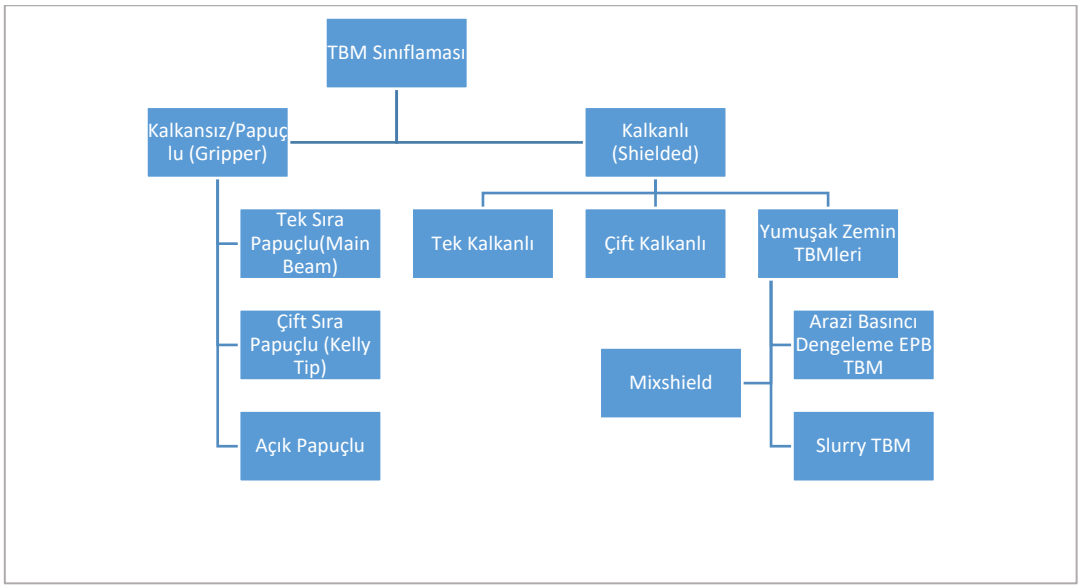
2.4.4. Destekleme (Tahkimat) Sistemi

Açılan bir tünelin kazı duvarı, ikincil gerilmelerin oluşması sonucu çevre kayacının kendi kendini tutma kapasitesinin azalmasına parelel olarak zaman içerisinde içe doğru kapanma eğilimine sahiptir. Dahası ortamın çatlaklılığına bağlı olarak, geçen zamanla tünel cidarında oluşan gevşeme ve sökülme sonucu kaya parçası ve blok düşmesi meydana gelir. Bu nedenle gerek deformasyonun önlenmesi gerekse iş güvenliğinin sağlanması için tünel duvarının kendini tutma süresi içerisinde desteklenmesi gereklidir. Çok sağlam ve sağlam kaya koşullarında TBM gövdesi cidarında herhangi bir koruyucu (kalkan) gerekmez. Ancak uzun vadedeki güvenliğin sağlanması için tünel cidarında hafif veya lokal şekilde destekleme önlemleri alınmalıdır. Bu önlem genellikle koruyucu, kapatıcı nitelikte ince bir tabaka halinde

püskürtme beton ve lokal kaya bulonu uygulaması şeklinde olabilir. Kaya koşullarının kötüleşmesi ile birlikte kayanın kendi kendini tutma süresi kısaldığı için, tavandan ve yanlardan düşebilecek kaya parçalarını tutmak için tünelin tavan kısmında, kesici kafanın arkasına ve yanlara kadar uzanan koruyucu bir kalkan (shield) gerekir. Kısmen daha kısa süre içinde olmak üzere tünel duvarının püskürtme beton, hasır çelik, çelik iksa, kaya bulonu, elemanlarından bazıları veya hepsi birden uygulanarak desteklemesi yapılır. Kayanın kendi kendini tutma süresinin daha da kısa olduğu, kötü-çok kötü kaya kaliteli kaya veya zemin ortamlarda, makine gövdesini çepeçevre ve uzunlamasına tamamen kapatan silindirik tüp şeklinde bir kalkan bulunur. Bu gereklilik destekleme işlevinin yanı sıra, yanal tutunma ve itme sisteminin işlevsiz kalması nedeniyle de ortaya çıkmaktadır. Böylesi durumlarda tutunma sisteminin (gripper) tünel duvarına basan ayakların oluşturduğu gerilme; zeminin/kayanın taşıma gücünden daha büyük olmakta ve duvara basan bu ayaklar tünel cidarına gömülmektedir. Kalkanlı TBM'lerde destekleme işlemi kalkanın en arka bölümündeki kuyruk kısmının içinde yapılmaktadır. Kalkanın iç yüzeyi, ön döküm beton veya çelik segment parçaların birleştirilmesi ile oluşturulan iksa halkasına (ring) kılavuzluk eder. Ancak, makinenin ilerlemesi sonrasında kazı yüzeyi ile destek elemanı arasında kalan boşluğun çimentolu bir enjeksiyon harcı ile doldurulması gerekir (Yüksel 2014).

2.5. TBM Tipleri

Tünel açma makineleri yapılarına göre 2 grupta incelenebilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Yapılarına göre TBM tipleri.

2.5.1. Kalkansız Tip Tünel Açma Makineleri

Sert ve kendini tutabilen formasyonlarda kullanılırlar. Bu tür makinelerde kalkan ihtiyacı yoktur (Şekil 2.3). TBM arkasından tavan civatası veya dairesel tahkimat yapılır (Caner 2010). Bu yöntemde geleneksel yöntemde kullanılan kaya saplamaları, püskürtme beton, çelik hasır gibi ön destek sistemleri kullanılarak kazı ilerlemesi gerçekleştirilir (Guglielmetti ve ark. 2008). Kalkansız tip TBM'lerde kazı esnasında ilerlemeyi ve kayacın kesilebilmesi için ihtiyaç duyulan kesme kuvveti pabuçlar aracılığı ile sağlanır. Kazı işlemi için gerekli olan toplam itme kuvveti; pabuçların tünel cidarlarına basarak makinenin arka kısmını sabitlemesi sonucu ilerleme yönünde hareketi sağlayan pistonlar yardımıyla elde edilmektedir. Formasyonun mekanik özelliklerine bağlı olarak farklı pabuç sistemleri kullanılmaktadır (Arıoğlu 2010).

"Main Beam" yani "Ana Kiriş" adlı tasarımda tek sıra pabuç sistemi kullanılması yardımıyla kazı işlemi gerçekleşmektedir. Tek sıra pabuçlu TBM'lerde kazı işlemine başlamadan makinenin her iki tarafında da bulunan pabuçların tünel cidarlarına basması ile makinenin arka kısmını sabitlenerek arka destek ayakları geri çekilir. İlerleme sağlandıktan sonra makinenin arka kısmını dengeleyecek arka destek ayakları tekrar tabana bastırılır. Daha sonra pabuçlar tünel cidarlarından geri çekilir ve bir sonraki konumlarına getirilir (Arıoğlu 2010).

Çift sıra papuç sisteminin kullanıldığı "Kelly tip" yönteminde ise ilerleme çift sıralı kıskaç sistemi yardımıyla sağlanmaktadır. Kazı işlemine başlanmadan önce çift sıralı kıskaçlar tünel cidarlarına, ön destek ayağı da tünel tabanına bastırılır. Makinenin sabitlenmesinin ardından arka destek ayakları ile ön tarafta kesici kafanın hemen arkasında yer alan taban sabitleme aparatı geri çekilir. İlerleme sağlandıktan sonra arka destek ayakları ile taban sabitleme aparatı tekrar tünel tabanına bastırılır ve makine sabitlenir. Ön destek ayağı ve çift sıralı kıskaçlar bir sonraki konumlarına getirilir (Arıoğlu 2010).



Şekil 2.3. Tipik bir Gripper TBM'in kesiti.

2.5.2. Kalkanlı (Shielded) Tip

Formasyondan gelebilecek suyun makine içine dolmasını, tünel cidarlarından kopabilecek parçaların personele ve makine donanımlarına zarar vermesini engellemek amacıyla kullanılan bu tip TBM'lerde ilerleme; kalkan içine döşenen ve tünelin nihai taşıma sistemini oluşturan segment halkalarına hidrolik güç ile çalışan bir dizi pistonun belli bir kuvvetle bastırması ile sağlanır. Bu segment halkalarının boyutları güzergâh boyunca geçilecek olan formasyonun mekanik özelliklerine, kullanılacak olan makinenin çapına, tipine ve ağırlığına göre değişmektedir (Arıoğlu 2010).

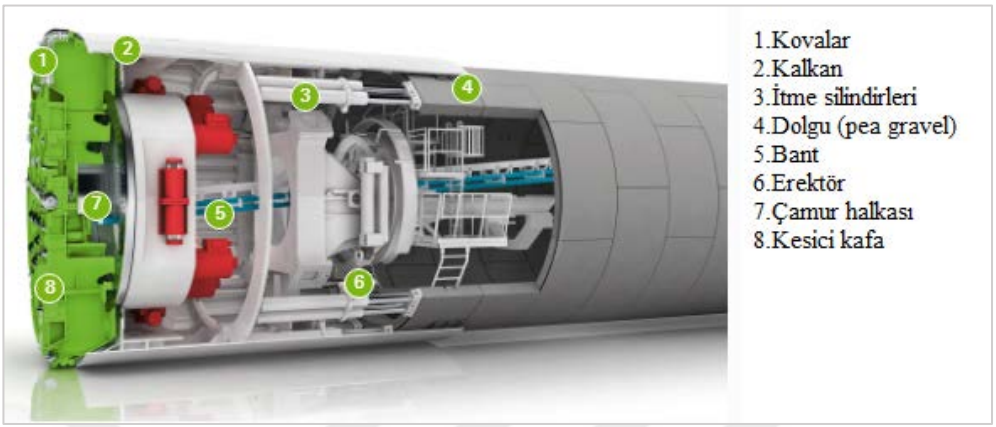
Mekanik veya vakum gücü ile çalışan segment erektörü ile montajı yapılan segment halkalarının yerleştirilme düzenleri tünel rotasını belirlemektedir. Kazı işlemi; en son döşenen segment halkasının yerleştirme düzenine ve kalkan ile segment arasında kalan boşluğa göre yapılır (Arıoğlu 2010). Kalkanlı tip TBM'ler tek kalkanlı, çift kalkanlı ve ayna basınçlı yöntem olmak üzere üç farklı başlıkta sınıflandırılmaktadır.

2.5.2.1. Tek Kalkanlı TBM

Tek kalkanlı TBM'ler, projenin çoğunun veya büyük bir bölümünün jeolojik olarak orta ve zayıf dayanımlı kaya kütlelerinde geçileceği veya tünel hattı boyunca fay zonu gibi olumsuz koşulların beklendiği durumunda kullanılır. Bu tür makineler, itme pistonlarıyla doğrudan mevcut tünel segmentinden destek alarak itilir (Maidl ve ark. 2008).

İlerleme segmentten alınan gücün hidrolik pistonlar vasıtasıyla tünel aynasına iletilmesi ile sağlanırken, kazılan malzeme de kesici kafadaki açıklıklardan nakliyat sistemine ulaşır. Bu döngünün sürekli tekrarlanması ile kazı işlemi

gerçekleştirilmektedir. Tek kalkanlı TBM'in ana amacı ikincil gerilmeler neticesinde oluşabilecek deformasyonu kısa süreliğine tutmak ve bu yükün segmentlere dağıtılmasını sağlamaktır. Tipik bir tek kalkanlı TBM'in kesiti Şekil 2.4'teki gibidir.

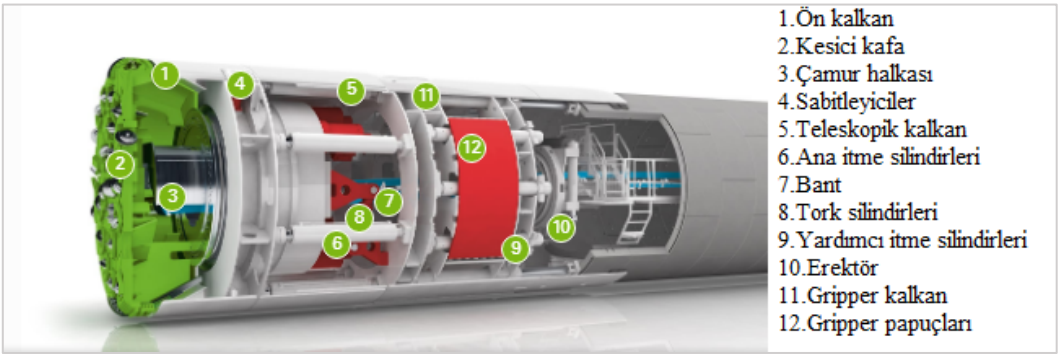


Şekil 2.4. Tipik bir tek kalkanlı TBM'in kesiti.

Tek kalkanlı TBM'lerde kazı ve tahkimat işlemi aynı anda gerçekleştirilememektedir. Bir döngü kazı işlemi ardından segmentler dizilmektedir. Her bir döngü ilerlemesinde TBM durdurulduğu için TBM kalkanına düşen yük artmakta ve kalkan ilerlemesi için gerekli itme kuvveti fazlalaşmaktadır bununla beraber ilerleme hızı da düşük olmaktadır (Sakcalı 2018).

2.5.2.2. Çift (Teleskopik) Kalkanlı TBM

Çift kalkanlı TBM'lerde kesici kafa ve kafanın dönmesini sağlayan motorların yer aldığı ön kalkan ve segment halkalarına basan yardımcı hidrolik pistonlar ile pabuçlar yer aldığı arka kalkan bulunmaktadır. İki kalkanın ortasında ise ana ilerleme pistonları yerleştirilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Çift kalkanlı TBM kesiti.

Bu makinelerde kazı işlemi için gerekli olan toplam itme kuvveti iki farklı yöntem ile elde edilebilmektedir. Kazı; pabuçların kullanılmasına elverişli olan formasyonlarda,

arka kalkanda bulunan pabuçların makineyi sabitlemesi ile başlar. Ardından segment halkasının montajına ve ana ilerleme pistonları yardımıyla kesici kafanın arına istenilen kuvvet ve hızda bastırılmasına başlanır. Ana ilerleme pistonlarının açılımının tamamlanmasının sonra pabuçlar tünel cidarlarından geri çekilir ve arka kalkan yardımcı hidrolik pistonların segment halkasına basması yardımıyla ileri itilir. Ön ve arka kalkan arasındaki boşluğun kapanmasının ardından bu işlemler tekrarlanır. Kazı esnasında yardımcı hidrolik pistonlar sadece montajı yapılan segment halkalarının yerinde durmasını sağlamaktadır. Formasyonun pabuçların kullanılmasına elverişli olmadığı; kırık ve çatlaklı olduğu durumlarda ise arka ve ön kalkanlar birbirlerine kenetlenerek tek kalkan olarak hareket etmektedir. Bu sebeple ilerleme için gerekli olan toplam itme kuvveti yardımcı hidrolik pistonların segment halkasına basması yardımıyla elde edilmektedir (Maidl ve ark. 2008).

Çift kalkanlı tip TBM'lerde her iki yöntemin de kullanılabilmesi sayesinde kazı esnasında segment halkası montajı yapılabilmektedir. Böylelikle makine yararlanma oranlarında çok ciddi artışlar sağlanmaktadır. Artan makine yararlanma oranları TBM'nin kazıda daha çok kalabilmesine ve buna bağlı olarak daha çok ilerleyebilmesine olanak tanımaktadır (Arıoğlu 2010).

2.5.2.3. Ayna Basınçlı (Kapalı) TBM

Kazı esnasında arının denge durumunun olmadığı, su gelirinin fazla olduğu, diğer tip TBM'lerin kullanılması halinde yararlanma oranlarına bağlı olarak ilerlemenin düşük olacağı koşullarda ayna basınçlı yöntemle kazı yapan TBM'ler kullanılmaktadır.

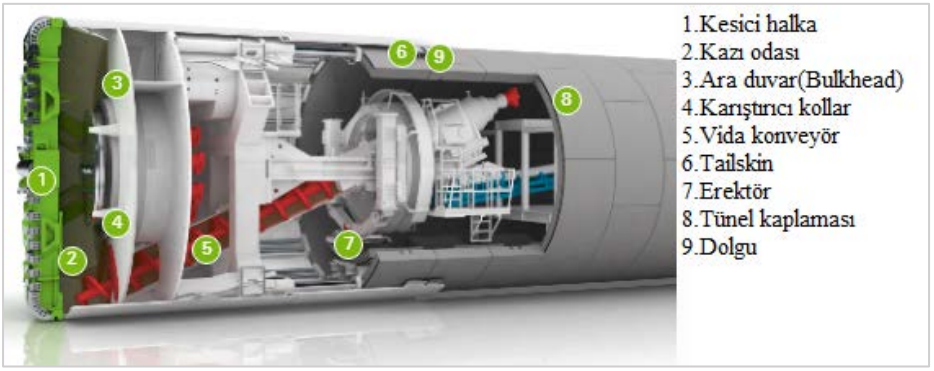
Kapalı yöntem kazılarında açığa çıkan pasa arazi basıncına eş bir basınçta kazı bölmesine girmek ve yine aynı basınçta kazı bölmesinden çıkmak zorundadır. Sondaj çalışmalarının her zaman formasyonun tamamını temsil edememesi, yağış rejimi ile yer altı su seviyesinde ciddi değişimler olabilmesi gibi sebeplerle önceden hesaplanan arazi basınçları ile kazı esnasında uygulanan basınçlar farklılık gösterebilmektedir. Eğer arazi basıncı düşük hesaplanmışsa, kazı esnasında arından gereğinden fazla pasa alınmasına ve özellikle sığ tünellerde yüzeyde ciddi oturmalara veya göçüklere neden olabilmektedir. Tersi durumda ise fazla hesaplanan arazi basıncı, kazı bölmesinden gereğinden az miktarda pasa alınarak pasanın sıkışmasına ve çok sığ tünellerde yüzeyde kabarmalara sebep olabilmektedir. Uygulanan arın basınçları ile beraber çıkan pasanın

miktarının bilinmesi ve takip edilmesi ayna basınçlı TBM'lerde hatalı uygulanan basıncın düzeltilebilmesi için çok büyük öneme sahiptir. Kesici kafa bölmesinin basınçlandırılması için; Pasa basınçlı (EPB), Hava basınçlı (Compressed Air), Çamur basınçlı (Slurry), Kombine (Mixshield) yöntemleri kullanılır (Arıoğlu 2010).

Pasa Basınçlı TBM (EPB)

Tünel aynasından elde edilen malzeme kullanılarak arazi basıncının dengelenmesi esasına dayanarak çalışan EPB (Earth Pressure Balance) makinelerde basıncı dengelemek için kesici kafanın arkasında basınç dengeleme odası yer alır. Buradaki malzeme ile aynayı dengeleyecek bir basınç oluşturulmaktadır Malzemenin basınç dengeleme odasına ve buradan da helezonik konveyöre geçişini kolaylaştırmak ve tıkanmaları önlemek amacıyla farklı kimyasalların kullanıldığı uygulamalar da vardır (Guglielmetti ve ark. 2008).

Bu kazı yönteminde açığa çıkan pasa kazı bölgesinden basınçlı olarak helezon konveyör yardımıyla çıkartılmaktadır. Pasa helezon konveyör içinde taşınırken, basıncı arazi basıncından nakledileceği ortam basıncına kadar düşürülmektedir. Buradaki amaç kazı bölmesinden çıkartılan pasa miktarını kontrol altında tutmak ve kazı bölmesinde yaşanabilecek ani basınç dalgalanmalarını önlemektir (Arıoğlu 2010). Şekil 2.6'da EPB'nin kesiti verilmiştir.



Şekil 2.6. EPB kesiti.

Hava Basınçlı (Compressed Air) TBM

Bu tip TBM'lerde kesici kafa kazı aracı olarak görülürken hidrostatik basıncı dengelemek için gerekli ayna desteği basınçlı hava ile sağlanmaktadır. Hava basınçlı TBM'lerde kesici kafa arkasında basınçlı oda bulunmaktadır. Malzeme döner hazne

kullanılarak basınçlı odadan çıkarılmakta ve direk nakliyat sistemine aktarılmaktadır (Guglielmetti ve ark. 2008).

Çamur Basınçlı (Slurry) TBM

Bu tip makineler kum ve çakıl ihtiva eden zeminlerde kullanılır. Ayna basıncının dengelenmesi hazır çamur karışımı yardımıyla yapılır. Kazılan malzeme ve çamur karışımı kesici kafa arkasındaki bölümde bulamaç haline gelir ve borular vasıtasıyla nakli gerçekleştirilerek ayna basıncı dengelenir. Bu TBM çeşidinin diğer TBM'lere göre dezavantajı çamur sağlanması için ayrı bir tesis kurulma ihtiyacının yarattığı artı maliyettir (Guglielmetti ve ark. 2008). Bununla beraber pasanın pasa işleme istasyonuna, bulamacın da kesici kafaya pompalanması çok yüksek enerji tüketimlerine sebep olmaktadır. Enerji tüketimi TBM çapına, ortalama ilerleme miktarına, açığa çıkan pasa hacmine, tünel uzunluğuna, kritik hıza, tünel eğimine ve derinliğine göre değişmektedir. Aynanın dengelenememesi durumunda basınçlı havayla desteklenebilecek farklı çamur basınç kalkanlı TBM'ler üretilmiştir (Arıoğlu 2010).

Kombine (Mixshield) TBM

Bu tip makinelerde kesici kafa bölmesi iki bölümden oluşmaktadır. Arın tarafındaki bölümde pasa ve bulamaç, makine tarafındaki bölümde ise pasa, bulamaç ve hava cebi mevcuttur. Değişen arın basınçlarında hava cebinin sıkışıp genleşmesi ile kazı esnasında çok düşük basınç dalgalanmaları sağlanmaktadır. Böylelikle hem anlık basınç düşmelerinde kesici kafa bölmesinden arın içine bulamaç kaçmasının hem de anlık basınç yükselmelerinde arından kesici kafa bölmesine kontrolsüz bir şekilde pasa akmasının önüne geçilmektedir (Arıoğlu 2010). Şekil 2.7'de bir Mixshield TBM kesiti verilmiştir.



Şekil 2.7. Mixshield TBM kesiti

2.6. TBM'lerde Kazı Performansına Etki Eden Parametreler

Tam cephe tünel açma makinelerinde performansa etki eden parametreler iki grupta toplanabilir. Bunlar; kazılacak olan jeolojik birimlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini içeren sabit parametreler ve kullanılan tünel açma makinesinin işletme parametreleri ve organizasyon ile ilgili olan tork, toplam itme (thrust) kuvveti, penetrasyon oranı, FER (köpük genleşme oranı), FIR (köpük enjeksiyon oranı), gibi değiştirebilir parametrelerdir. Bu parametrelerin değiştirilmeleri kazı maliyetini ve tünel çalışmalarının verimli olarak sürdürülmesini doğrudan etkileyecektir (Gürkan 2011). Ayrıca ekipman temin hızı, teknik personel kalitesi, işyeri organizasyonu gibi faktörler de işletme parametreleridir. Çizelge 2.1'de performansı etkileyen parametreler özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Kazı makinelerinin performansını etkileyen parametreler (Bilgin ve ark. 2014)

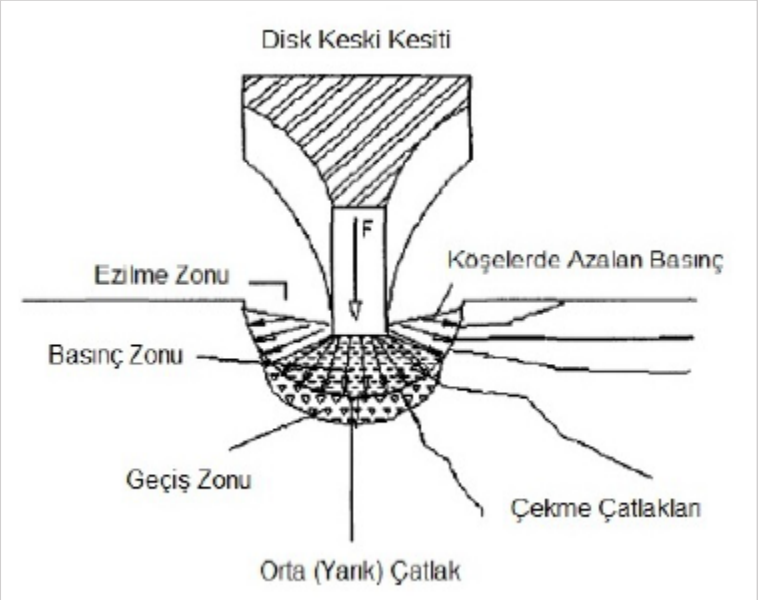
Makine Parametreleri	
	Makinenin tipi Makinenin ağırlığı ve boyutları İtme gücü ve tork kapasitesi Kesici kafa tipi Kesici kafa güç ve RPM Keski tipi ve boyutları, keski metalürjik özellikleri
Jeolojik – Jeoteknik Parametreler	
	Kaya kalite değeri (RQD) Tabakalanma, fay zonları Çatlak kümeleri (yönelim, dolgu, boşluk gibi Hidrojeolojik durum Olumsuz jeoloji
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	
	Kaya kesme parametreleri (spesifik enerji, kesme kuvvetleri) Dayanım özellikleri (basınç ve çekme dayanımı, kohezyon, elastik değeri) Kaya dokusu ve aşındırıcılık (porozite, sert mineral/kuvars içeriği, mikro çatlaklar, tane boyutu) Diğerleri (kırılganlık, su içeriği gibi)
Teknik Parametreler	
	Açıklık şekli ve boyutları Eğim ve rekuplar
Madencilik Parametreleri	
	Tahkimat (çelik bağ, püskürtme beton gibi) Pasa nakliye (konveyör, vagon gibi) Yararlanma (güç, su, hava temini) Zemin iyileştirme Vardiya durumu

2.6.1. Tünel Geometrisi

Kazı çapı seçimi yapılırken, tünel güzergahının geçeceği jeolojik birimlerin kabarma ve şişme özelliklerine bağlı olarak, olası bir sıkışmayı önlemek ve makine ile kazısı gerçekleştirilecek jeolojik birim arasındaki sürtünmeyi azaltmak için kesici kafa çapından biraz daha büyük şekilde kazı gerçekleştirilir ki buna fazla kesim denilmektedir (Sharlow ve ark. 2007). Bu işlem en çok şişme potansiyeline sahip jeolojik birime göre ve köşe keskiler sayesinde gerçekleşir. Tünel çapı, RPM, tork ve bununla birlikte toplam güç gereksinimi gibi birçok parametreyi etkiler. Genel olarak çap artışıyla tünel uzunluğu başına düşen penatrasyon oranı düşerken makinanın tork ihtiyacı ve güç gereksinimi artar (Grima ve ark. 2000).

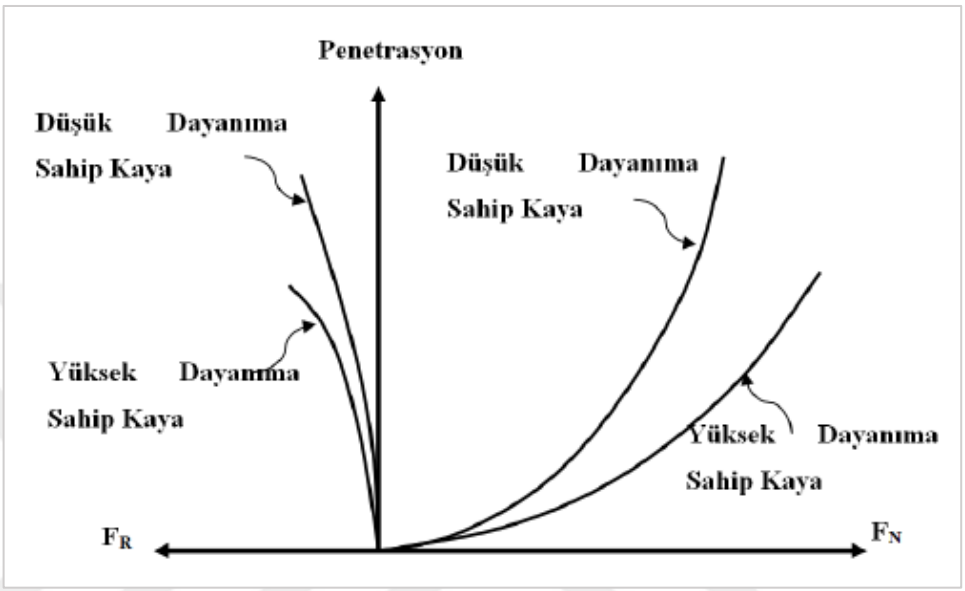
2.6.2. Tek Eksenli Basınç Dayanımı

Disk keskilerin arına baskı yapması ile oluşan normal kuvvet (FN) keskinin hemen altında basınç gerilmesinin meydana geldiği bir zon oluşturur (Şekil 2.8). Bu zonun çevresinde çekme çatlaklarının oluşabilmesi için diskin kayaya penetrasyonu sırasında uygulanan gerilmenin büyüklüğünün kayanın tek eksenli basınç dayanımına eşit veya ondan büyük olması gerekmektedir. Bununla beraber disk keskinin penetrasyonunu sağlamak için gereken disk kuvveti kaya numunesinin basınç dayanımı arttıkça artmaktadır (Rostami ve ark. 2002; Rostami 2008).



Şekil 2.8. Normal disk kuvveti (FN) ile keskinin altında oluşturulan basınç zonu ve etrafında oluşan çekme çatlakları.

TBM kazılarında hedeflenen penetrasyonu sağlamak için yüksek basınç dayanımına sahip kaya için daha büyük keski kuvvetlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 2.9). Aynı keski kuvveti ile düşük basınç dayanımlı kayada daha büyük penetrasyon sağlamakta ve yüksek TBM ilerleme hızlarına ulaşılabilmektedir (Nelson 1993; Ramezanzadeh 2005).



Şekil 2.9. Kayanın basınç dayanımının keski kuvvetlerine ve penetrasyon üzerine etkileri, (FN,FR; normal ve yuvarlanma disk kuvvetleri).

2.6.3. Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açısı

Zemin tanelerini bir arada tutan yapışma kuvveti kohezyon, malzemenin kesilmesi sırasında, kayma yüzeyinde etkili olan sürtünme katsayısının açısal ifadesi ise içsel sürtünme açısı olarak ifade edilmektedir (Köse ve Kahraman 2009). Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerinin artması taneler arası çekim kuvvetinin ve üç eksenli basınç dayanımının arttığını ifade eder. Penetrasyon oran sabit iken, üç eksenli basınç değeri arttıkça uygulanacak kesme kuvveti de artmaktadır. Kesme kuvvetinin yükselmesi ise, güç ihtiyacını dolayısı ile de enerji sarfiyatını arttıracaktır (Bilgin ve Balcı 2006).

2.6.4. İtme Kuvveti (Baskı/Thrust)

İtme kuvveti, keskilerin kazı arınına batmasını ve makinenin kendisini tünel eksenine paralel ilerletebilmesini sağlayan kuvvettir. Bu kuvvet, tünel arınındaki yatay deformasyonlardan kaçınmak için gerekli olan kuvveti, yer altı su basıncının makine

üzerindeki baskısını, TBM'in önündeki dikey yer altı oturmalarını bertaraf etmek için gerekli olan kuvveti, makine ile jeolojik birim arasındaki sürtünme kuvvetini karşılayacak seviyede olmalıdır. Sert kaya formasyonlarında kullanılan TBM için gerekli itme kuvveti ise; Eşitlik 2.1 ile bulunur.

$$FT = N_c . F_N . f_L \tag{2.1.}$$

Burada;

N_c : Disk sayısı, $adet$

F_N : Keski başına düşen ortalama baskı kuvvet

f_L : Sürtünme kayıpları

Keskilere dik yönlü etkiyen normal kuvvet, thrust kuvvetinin bir fonksiyonudur. Keski başına düşen itme kuvveti penetrasyon oranına en çok etkiyen faktördür (O'Carrol 2005). Keski başına düşen ortalama baskı kuvveti (FN), toplam itme gücü (TF) ve disk sayısı (N_c) cinsinden Eşitlik 2.2.'deki gibi ifade edilir. (Bilgin 1989; Balcı 2009).

$$FN = \frac{TF}{N_c . f_1} \, , kN/disk \tag{2.2}$$

Burada (f_1) sürtünme kaybı katsayısı olup 1,2 olarak alınmaktadır.

2.6.5. Tork

Kesici kafanın dönme momenti olan Tork, kazı işini gerçekleştirmek, kesici kafa ile kazı arını arasındaki sürtünmeyi ve TBM üzerine etki eden radial kuvvetleri yenmek, kesici kafanın arkasında ayna basıncını dengeleyen pasanın hareketini sağlamak zorundadır (Fernandez 2007).

Eşitlik 2.3, sert kaya formasyonlarında kullanılan TBM'lerin tork gereksinimlerinin hesaplanabilmesi için kullanılmaktadır (Balcı 2009);

$$T = \frac{N_c . F_R . D_{TBM} . (0{,}54) . f_L}{2} \, , kNm \tag{2.3}$$

Burada;

N_c : Disk sayısı, $adet$

F_R: Keski başına ortalama yuvarlanma kuvveti, kN

D_{TBM}: Kesici kafa çapı, m

0,54: Ortalama kuvvet moment kolu

f_L: Sürtünme kayıpları

Diskin kayaya değdiği noktada oluşan teğetsel kuvvet olan yuvarlanma kuvveti FR;

$$FR = \frac{4.T}{N_c.D_{TBM}.f_1} \, , kN/disk \tag{2.4}$$

denklemi ile belirlenir. Burada;

T: Kesici kafa torku, $kN.m$

D_{TBM}: Kesici kafa çapı, m

N_c: Kesici kafa üzerinde disk sayısı, $adet$

2.6.6. Güç

TBM'in toplam güç kapasitesi, makinenin gereksinim duyduğu tork ve itme kuvvetini karşılamak zorundadır (Bilgin ve ark. 2006). TBM'in güç gereksinimi, makinenin gereksinim duyduğu torkun bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir.

$$P = 2\pi.\frac{rpm}{60} \, .T \, , kW \tag{2.5}$$

2.6.7. Dakikadaki Devir Sayısı

Kesici kafanın dakikadaki dönüş sayısını ifade eden rpm değeri genel olarak tork ile ters orantılı olarak gözlenir (O'Carrol 2005). Sıkı zeminlerde tork gereksinimi yükselirken, makinanın mevcut tork değerini koruyabilmesi için rpm değeri düşürülür. Zayıf zemin kazısında ise yüksek tork değeri gerekli olmadığından, tork değeri düşürülür ve rpm değeri arttırılarak penetrasyon oranı dahilinde makinenin ilerleme hızı arttırılır. Torkun yanı sıra rpm değerini sınırlandıran bir diğer faktör de kazı çapıdır.

Keskilerin bir dönüşte aldıkları yol ve dolayısı ile kazı arınına temas miktarları, kesici kafa çapının merkezinden uzaklaştıkça artar. Bu durum aşınmaları da arttırmaktadır. Kesici kafanın dakikada yaptığı dönüş sayısı;

$$rpm = \frac{V}{\pi.D_{TBM}} \, , dev/dak \tag{2.6}$$

ile hesaplanabilir. Burada V m/dak cinsinden diskin çizgisel hızı olup imalatçının verdiği maksimum hız ile sınırlıdır (Yüksel 2014).

2.6.8. Spesifik Enerji

Spesifik enerji bir metreküp zeminin veya kayanın kazılması için gereken enerji olarak tanımlanır ve Eşitlik 2.7 ile tayin edilir (Cardu ve ark. 2006):

$$ES = (S/A) + (C.w/A.v) \quad (2.7)$$

Burada;

ES: Spesifik Enerji, MJ/m^3

S: Makine tarafından sağlanan baskı kuvveti, ton

C: Tork değeri, $(ton.m)$

w: Kesici kafanın saniyedeki hızı

A: Tünel kesiti, $(m3)$

v: Ilerleme hızı, (m/sn)

Optimum keskiler arası mesafe/kesme derinliği (s/d) oranı değerinde, birim hacimdeki kayacı kesmek için gerekli olan spesifik enerji en az olmaktadır (Şekil 2.10). Keskiler arası mesafe birbirine çok yakın olduğunda kesme pasa öğütülmüş olarak alınır. Bu koşulda spesifik enerji çok yüksektir ve kesme işlemi verimsizdir. Keskiler arası mesafe birbirine çok uzak olduğunda ise kesme hatları birbiri ile etkileşimli olmayacağından yine çok yüksek spesifik enerji değeri elde edilir ve verimsiz kesme işlemi olarak adlandırılır. Optimum keskiler arası mesafe koşullarında ise iki kesme hattı arasından iri parçalar kopartılabilir ve optimum spesifik enerji değerlerine ulaşılır (Balcı, 2009).

Rostami ve ark. (1994), Colorado School of Mines'da geliştirilen ve üzerinde disk keskiler bulunan tam boyutlu doğrusal kesme makinesi ile (LCM) spesifik enerji büyüklüğünü net kazı hızına bağlı olarak;

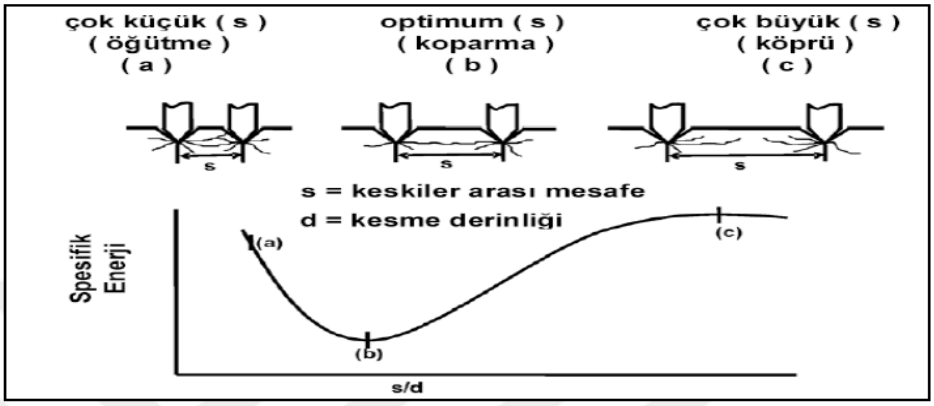
$$SE = k.\frac{P}{ICR}\ , kWh/m^3 \quad (2.8)$$

denklemini tanımlamışlardır. Burada;

ICR: Net kazı hızı, m^3/h

P: Optimum şartlarda tüketilen enerji miktarı, kW

k: Enerji transfer oranı (TBM'ler için=0,8-0,9)



Şekil 2.10. Keskiler arası mesafe/kesme derinliği (s/d) oranı ile spesifik enerji ilişkisi.

2.6.9. Net Kazı Hızı

Net kazı hızı, birim kazı süresinde TBM'in kazdığı miktar olarak ifade edilir ve şu şekilde ifade edilir (Rostami ve ark. 1994).

$$Net\ Kazı\ Hızı\ =\ TBM\ ilerlemesi\ \times\ TBM\ Çapı\ /\ Kazı\ süresi \qquad (2.9)$$

2.6.10. Ortalama İlerleme Miktarı

Bir günlük kazının saatlik ortalama ilerleme miktarı olan ortalama ilerlemenin net kazı hızından farkı duraklama sürelerinin de hesaba katılmış olmasıdır. Ortalama ilerleme, 24 saat çalışılan bir gün için Eşitlik 2.10 ile ifade edilir (Rostami ve ark. 1994).

$$Ortalama\ İlerleme\ =\ TBM'in\ günlük\ ilerlemesi\ /\ 24 \qquad (2.10)$$

2.6.11. Makineden Faydalanma Oranı (MFO)

TBM'in kazı yaptığı sürenin vardiya süresi içerisindeki yüzdesi olarak ifade edilen makineden faydalanma oranı için % 40- % 50 arası kabul edilebilir değerlerdir. MFO'nın hesaplanması için Eşitlik 2.11 kullanılır (Rostami ve ark. 1994).

$$MFO\ =\ (\ Toplam\ Kazı\ Süresi\ /\ Toplam\ Vardiya\ Süresi\ )\ \times\ 100 \qquad (2.11)$$

2.7. TBM Performans Tahmin Modelleri

TBM performansı için tahmin modelleri, 1950'lerin sonlarında sert kayaç TBM'deki disk kesicilerin ilk başarılı kullanımından bu yana kullanılmaktadır. Zemin özelliklerinin her noktada kesin olarak tayin edilememesi ve her zaman bu konularda belirsizlik olması sebebiyle sıfır riskli bir senaryo mümkün olmasa da bilinen jeolojik,

jeoteknik özellikler ve makine özellikleri ile elde edilen en olası senaryoya göre program ve maliyetleri ayarlamak zaman ve ekonomik kazanç sağlamaktadır. TBM performans tahmin modellerinin amacı, sadece zamanlamayı ve maliyeti değil, aynı zamanda bu belirsizliğin projedeki etkisini de ortaya koymaktadır (Nuti 2017).

Bu modeller teorik varsayımlardan başlayarak kurulan analitik modeller ve farklı projelerde toplanan bir veri kümesinin geri analizine dayanan ampirik modeller olarak sınıflandırılabilirler (Brino 2015).

2.7.1. Analitik Modeller

Analitik performans tahmin modelleri, mekanik parçalarla kaya parçalanma sürecinin derin bir incelemesi ile oluşturulmuştur. Bu modeller, doğrusal kesme testi ve delme penetrasyon testi gibi tam boy laboratuvar testlerinin sonuçlarından yola çıkarak TBM'nin itme kuvveti, tork ve güç gereksinimini ortaya koymayı amaçlar. Analitik modellerin ana sınırlamaları, kayaçları hesaba katmadan, tek eksenli basma (σc) ve çekme (σt) dayanımları gibi bozulmamış kaya karakteristiklerini; kesici çapı, aralığı ve uç şekli, keski başına itme kuvveti gibi bilgilerle ilişkilendirmesiyle ilgilidir.

2.7.1.1. Colorado School of Mines (CSM)

CSM modeli, Rostami ve Özdemir tarafından, lineer kesme testlerinin sonuçlarından ve kaya parçalanma sürecindeki matematiksel varsayımdan yola çıkılarak geliştirilmiştir (Rostami ve Özdemir 1993; Rostami ve ark. 1996).

Veri tabanı aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- 70< σc <200 MPa
- 4< σt < 18 MPa
- 15 < ϕdisk < 19 inç
- 2.5 < p < 30 mm

CSM modeli, dairesel kabul edilen kesici ucun hemen altında ezilme zonu olarak tanımlanan bölgenin basınç dağılımına göre geliştirilmiştir. Basınç, ezilme zonu üzerinde azalırken, maksimum stres konsantrasyonu kesicinin hemen altında bulunur. Ezilmiş bölge içindeki basınç dağılımı bilinmemektedir, ancak Rostami ve Özdemir modelin formülasyonunu kolaylaştırmak için ezilmiş bölge içindeki basınç dağılımının

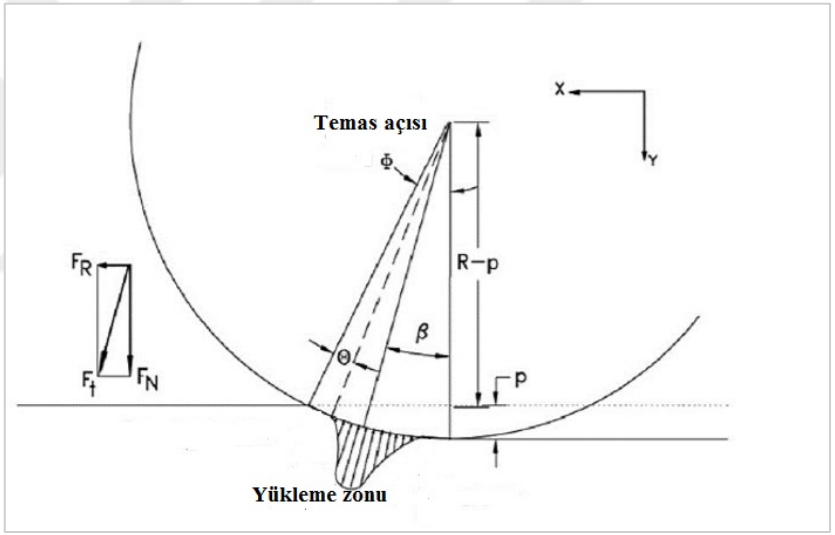
üniform olduğunu düşünmüşlerdir. Kırıkların uzunluğu, ezilmiş alandaki basıncın bir fonksiyonudur, ki bu da, kesici üzerinde etkili olan itme (FN) kuvvetinin normal bileşeninin bir fonksiyonudur. Basınç dağılımı, kaya ve kesicinin etkileşimde bulunduğu kesici boyunca görülür. Basınç dağılımı sabit olursa üçüncü boyuttaki kuvvetler dengeleneceği için model iki boyut olarak düşünülmüştür. Şekil 2.11'den, temas açısı Φ:

$$\Phi = cos^{-1}\left(\frac{R-p}{R}\right) \tag{2.12}$$

Burada;

R: Disk yarıçapı (mm)

p: Penatrasyon (mm/rev)



Şekil 2.11. Kaya / kesici uç ara yüzeyinde basınç dağılımı ve model parametreleri (Rostami ve Özdemir 1993; Rostami ve ark. 1996).

MPa cinsinden ifade edilen P basıncının büyüklüğü, yine MPa cinsinden ifade edilen taban basıncı P' nün ve normalden aynaya olan açının (θ) bir fonksiyonudur.

$$P = P' * \left(1 - \frac{\theta}{\Phi}\right)^{\psi} \tag{2.13}$$

Hipotezde basınç dağılımının şekline bağlı olarak farklı diskler için kullanılan ψ değeri, 0-1 arasında değişmektedir. V şekilli diskler için, sabit uç alanlı diskler için 0 kabul edilir. Temel basınç P', aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P' = 2.12\sqrt[3]{\frac{S*\sigma_c^2*\sigma_t}{\Phi*\sqrt{R*T}}} \quad (2.14)$$

Burada:

S: Kesiciler arasındaki mesafe (mm)

σ_c: Bozulmamış kayaçların tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

σ_t: Sağlam kayaların gerilme mukavemeti (MPa).

Çalışılan kaya örneklerinin tek eksenli basınç değerleri 70-200 MPa, kesici çapları ise 15-17 inç arasında değişmektedir. Kesiciler üzerinde etkili olan toplam kuvvet N cinsinden ifade edilen $F_{top,disk}$ aşağıda verilen eşitlikle bulunur. Burada T mm cininden kesici kalınlığını ifade eder.

$$F_{top,disk} = \frac{P'*R*T*\varphi}{\psi+1} \quad (2.15)$$

Basınç homojen kabul edildiği durumda ψ katsayısının sıfıra ve P nin de P' ne eşit olduğu kabul edilebilir.

$$F_{top,disk} = 2.12 * R * T * \varphi\sqrt[3]{\frac{S*\sigma_c^2*\sigma_t}{\varphi\sqrt{R*T}}} \quad (2.16)$$

$F_{top,disk}$ normal kuvvet (F_N) ve yuvarlanma kuvveti (F_R) olarak iki bileşenden oluşur.

$$F_N = F_{top,disk} * \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.17)$$

$$F_R = F_{top,disk} * \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.18)$$

Normal kuvvet ve yuvarlanma kuvveti arasındaki oran RC katsayısı:

$$RC = \frac{F_R}{F_N} = \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.19)$$

Performans tahminini tamamlamak için son adım, makine parametrelerinin tanımlanmasıdır:

- teorik toplam itme kuvveti ihtiyacı $F_{top,itme}$ kN cinsinden:

$$F_{top,itme} = n_{kesici} * F_N \quad (2.20)$$

n_{kesici}: Kesici sayısı

- teorik tork $M_{kesicikafa}$ kN cinsinden:

$$M_{kesicikafa} = 0.3 * F_R * \phi_{TBM} * n_{kesicikafa} \quad (2.21)$$

ϕ_{TBM}: m cinsinden kesici kafa çapı.

- Dakikadaki dönüş sayısı ϑ_{rot}:

$$\vartheta_{rot} = \frac{\vartheta_{lin,kesici}}{\pi * \phi_{TBM}} \quad (2.22)$$

$\vartheta_{lin,disk}$: kesicilerin lineer hız limiti (17'' kesici için 150 m/min)

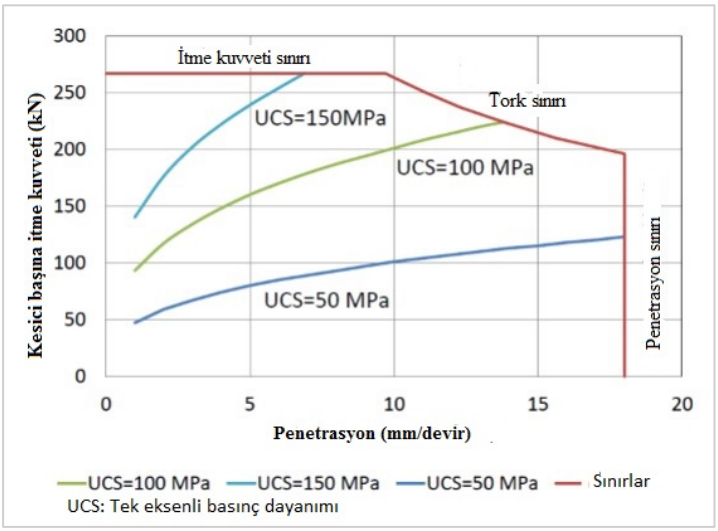
- MN cinsinden teorik güç ihtiyacı $P_{kesicikafa}$

$$P_{kesicikafa} = \frac{\pi}{30} * M_{kesicikafa} * \vartheta_{rot} \quad (2.23)$$

Son adım, teorik değerin bir verimlilik faktörü η ile bölünmesi vasıtasıyla kurulu güç ve itme kuvvetinin hesaplanmasıdır. Yazarların TBM'ler için önerdiği değer % 90 civarındadır. Kesici kafanın her dönüşünde keskilerin mm/devir cinsinden penetrasyonu (PR) ve makine çalışırken m/h cinsinden net ilerleme (ROP) aşağıdaki eşitlikten tahmin edilebilir.

$$ROP = PR * \vartheta_{rot} * \frac{60}{1000} \quad (2.24)$$

İtme, tork ve penetrasyon değerlerinin tek eksenli basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak hesaplanan belirli teknik limitleri karşılaması gerektiği Frenzel ve ark. (2008) tarafından ortaya konulmuştur (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Farklı kaya gücünde 17" disk kesicili TBM'nin çalışma sınırları (Frenzel ve ark.2008).

Rostami tarafından geliştirilen modelin yeni bir versiyonunda aynı zamanda Frenzel'in kesici aşınma tahminine de geliştirmiştir; bir diskin aşınma gerçekleşene kadar katedeceği disk uzunluğu, ΔL_i, CAI ve disk çapının (ϕ_{disk}) bir fonksiyonudur (Rostami ve ark. 2005):

$$\Delta L_i = \frac{6.75*\phi_{disk}}{17*CAI} \tag{2.25}$$

Burada ΔL_i 10^6 ft ve ϕ_{disk} inç cinsinden hesaplanır.

Frenzel tarafından yapılan en son korelasyon, toplam tüketim gerçekleşene kadar kesici başına net hacmin elde edilmesi için kullanılabilir. Yazarlar maksimum kesici ömrünü km, disk çapını mm cinsinden tanımladılar (Brino 2015).

$$CL = \frac{2057*\phi_{disk}}{CAI*432} \tag{2.26}$$

Kesici kafanın her dönüşü için bir kesicinin aldığı ortalama yol:

$$L_{ort,disk} = 0.6 * \pi * \phi_{TBM} \tag{2.27}$$

CSM modelindeki ana eksiklik, son çalışmaların belirtilen konuyu çözmeye çalışmasına rağmen, düzgün bir şekilde eklem aralığı ve yönelimini dikkate almadığı gerçeğidir.

Ramezanzadeh (2006) tarafından geliştirilen çalışmada, CSM modelinde dikkate alınmayan eklem aralığı (J_s)ve yönelimi (a) de denkleme dahil ederek şu eşitliği elde etmiştir. Ramezanzadeh, tahmini ROP_{CSM}'ye göre aşağıdaki ROP için aşağıdaki formülü sunmaktadır:

$$ROP = \frac{(ROP_{CSM})^{0.561}}{exp(0.00161*J_s+0.00307*|a-45|-0.596)} \tag{2.28}$$

burada J_s [cm], a [°] olarak ifade edilmiştir.

2.7.1.2. Gehring Modeli

Gehring (1995) yarı analitik tahmin modeli, Voest Alpine makine üreticisi ile işbirliği içinde, 90'lı yılların başından beri, Almanca konuşulan ülkelerde en çok kullanılan modellerden biridir. Modelin ihtiyaç duyduğu girdiler daha çok pratiktir. Gehring, modelinde basit ve hızlı bir şekilde uygulanabilecek benzer ve kolay yeniden üretilebilir parametreler sunmaktadır.

Veri tabanı, jeolojisi yüzeysel, metamorfik ve tortul kayaçlardan oluşan, Güney Afrika'da 2 ve Güney Kore'de 2 olmak üzere 4 projeden elde edilen verilerden oluşmaktadır.

TBM penetrasyon tahmini için temel fonksiyon, tek eksenli bozulmamış kaya basınç dayanımı σc'yi dikkate alır. Temel denklem aşağıdaki gibidir:

$$p_{200} = a * \sigma_c^{-b} \tag{2.29}$$

Burada p_{200} devir başına penetrasyon başka bir ifadeyle kesici başına düşen keski kuvvetinin 200 kN olduğu seviyede penetrasyon oranı, a ve b katsayılarından elde edilebilir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Gehring denkleminde kullanılan *a* ve *b* sabitleri.

Kaynak	***a* sabiti**	***b* sabiti**
Farmer	29	0.98
Graham	78	0.99
Hughes	2295	1.19
NTNU	3350	1.29
Sanyo	46	1.00
Gehring (ortalama)	**799**	**0.99**

Gehring tarafından yapılan çalışma keskiler arasındaki mesafenin 80 mm, disk çapının 17 inç, kesici kalınlığının 5-8 inç aralığında ve keski başına gelen itme kuvvetinin 200 kN olduğu koşullara dayanır. Ayrıca tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin 100-250 MPa arasında olduğu düşünülmüştür.

Yazar, aşağıda listelenen farklı düzeltme faktörleri aracılığıyla temel denklemi revize etmiştir.

$$p = PR = \frac{4*F_N}{\sigma_c} * k_1 * k_2 * k_3 * k_4 * k_5 \tag{2.30}$$

- Kırılma enerjisi için k_1 düzeltme faktörü: Gehring, Şekil 2.13'te gösterildiği gibi kırık oluşturmak için gerekli kırılma enerjisi ile temel penetrasyonu bağlayan bir ilişki bulmuştur.

$$p_{200} = 107 * W_f^{-0.81} \tag{2.31}$$

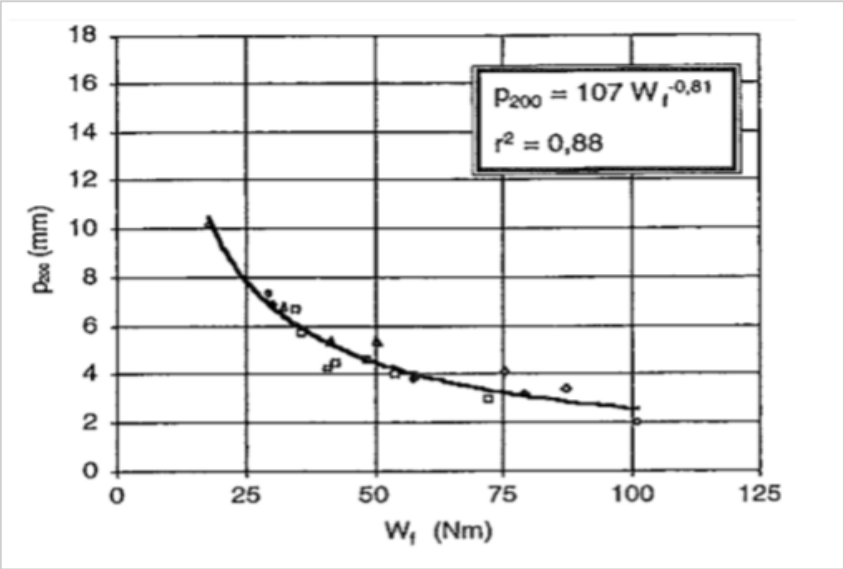
Burada p_{200} keski başına 200 kN itme kuvvetinde devir başına penetrasyon, W_f Nm cinsinden kırılma enerjisidir. k_1 düzeltme faktörü Şekil 2.14'te gösterildiği gibi,

[m.10^{-6}] cinsinden ifade edilen spesifik kırılma enerjisi w_f ile korelasyonu doğrultusunda 2.41'den hesaplanabilir:

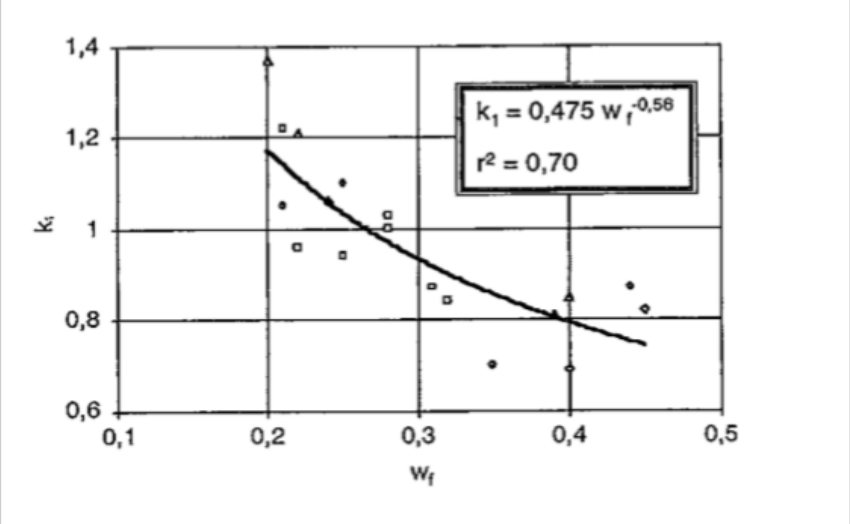
$$w_f = \frac{W_f}{\sigma_c} \tag{2.32}$$

buradan;

$$k_1 = 0.475 * w_f^{-0.56} \tag{2.33}$$



Şekil 2.13. Kırılma enerjisinin (Wf) bir fonksiyonu olarak p200 penetrasyonu (Brino 2015; Nuti 2017).



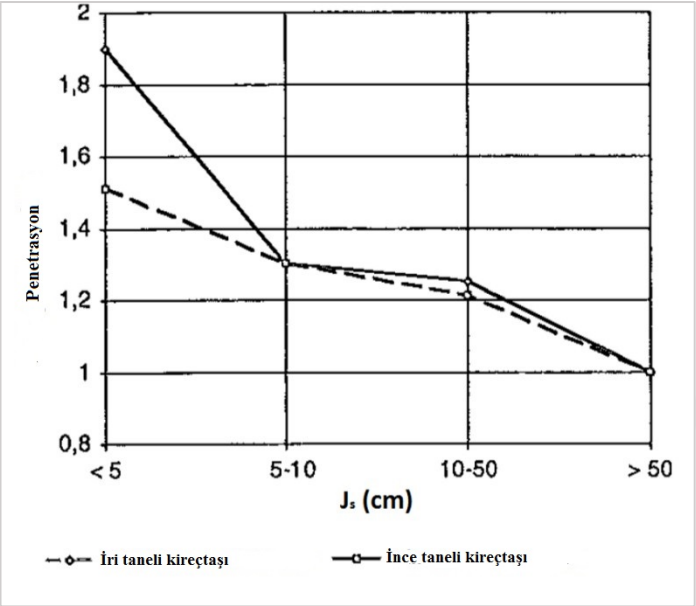
Şekil 2.14. Spesifik kırılma enerjisi wf'nin bir fonksiyonu olarak k1 düzeltme faktörü (Brino 2015; Nuti 2017).

- Çizelge 2.3'te görüldüğü gibi süreksizlik aralığı ve yönelimi için düzeltme faktörü k_2 için yazar hem çatlak aralığını (kaya daha kompaktsa penetrasyon

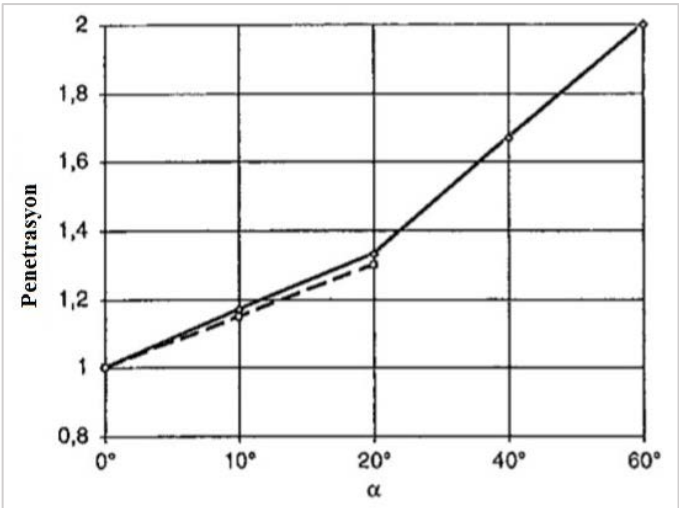
azalır, Şekil 2.15) hem de tünel ekseni ile ana eklemlerin yönünü dikkate alır (açı 60º'ye yaklaşırsa toplam penetrasyon artar, Şekil 2.16).

Çizelge 2.3. Tünel ekseniyle yapılan kırılma açısı α ve çatlak aralığı J_s nin bir fonksiyonu olarak düzeltme faktörü k_2 (Gehring 1995).

Çatlak aralığı J_s (cm)	**α'nın bir fonksiyonu olarak k_2 düzeltme faktörü**			
	0º	**30º**	**60º**	**90º**
>50	1.0	1.0	1.0	1.0
10-50	1.2	1.3	1.6	1.3
5-10	1.4	1.8	2.3	1.6
<5	1.7	2.3	3.0	2.0



Şekil 2.15. Çatlak aralığının etkisi (Brino 2015; Nuti 2017).



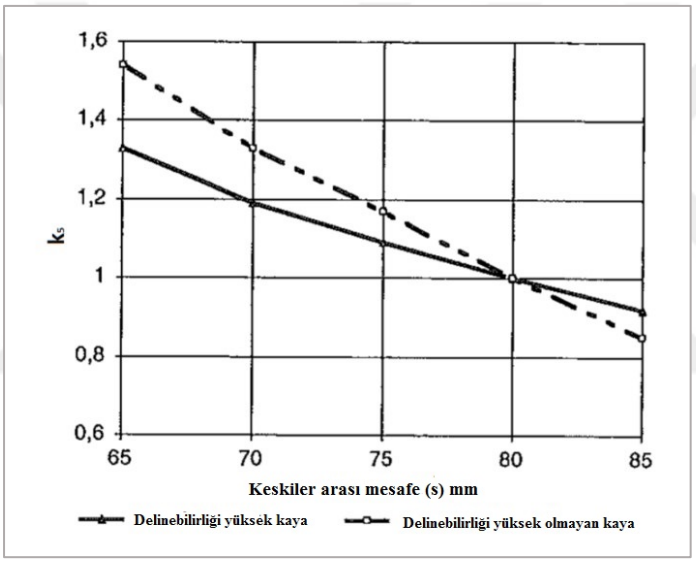
Şekil 2.16. Tünel ekseniyle yapılan kırılma açısı α nın etkisi (Brino 2015; Nuti 2017).

Stres durumu için düzeltme faktörü k_3: Gehring, aynadaki aşırı yükü ve gerilme durumunu hesaba katmayı önermiştir, ancak bu faktör için bir analitik denklem ifade etmemiştir.

- Kesici disk çapı için düzeltme faktörü k_4: Gehring, disk çapının bir fonksiyonu olarak (mm cinsinden ifade edilir) bir düzeltme faktörü k_4 önermiştir.

$$k_4 = \frac{432}{\Phi_{disk}} \tag{2.34}$$

- Kesici aralığı için düzeltme faktörü k_5: 80 mm'lik bir ortalama kesici aralığı orijinal Gehring modelini karakterize eder. k_4 için yapıldığı gibi, düzeltme faktörü k_5, veri tabanının orijinal durumundan sapmayı dikkate alır ve Şekil.2.17'den hesaplanabilir.



Şekil.2.17. Kesiciler arasındaki boşlukların bir fonksiyonu olarak düzeltme faktörü k_5 (Brino 2015; Nuti 2017).

Gehring'in yöntemi, tasarımcıların disk kesici aşınmasını tahmin etmelerini sağlar. Tek bir kesicinin spesifik kaybı aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

$$v_s = \frac{\Delta G_i * p_{ort}}{L_{disk} * \pi * \Delta L_i} \tag{2.35}$$

$$\Delta L_{i=} \frac{\Delta G_i * p_{ort}}{L_i * \pi * v_s} \tag{2.36}$$

Burada;

- ΔL_i keski tüketimine kadar alınan yol [m]
- ΔG_i kesicinin toplam ağırlık kaybı [gr] (17'' keskiler için 3500 gr)
- p_{ort} ortalama penetrasyon [mm/rev]

- L_i kesici tarafından kaplanan iz, [m]
- υ_s kesicilerin ilerleme sırasında uğradığı spesifik ağırlık kaybı [mg/m]

Yazar, CAI ile birlikte [mg/m] cinsinden spesifik ağırlık kaybına bağlı bir korelasyon önermiştir.

$$\upsilon_s = 0.74 * CAI^{1.93} \tag{2.37}$$

Yukarıdaki eşitlikten Gehring bir diskin değişmesi gerekeceği ortalama tünel uzunluğunu elde etmiştir.

$$\Delta L_c = \frac{\Delta G_{disk} * p_{ort}}{L_{ort,disk} * \pi * \upsilon_s} * \frac{1}{n_{kesici}} \tag{2.38}$$

ve kesici başına kazılan kayaç net hacmi ΔV_c [m^3/disk]

$$\Delta V_c = \Delta L_c * \left(\frac{\pi * \Phi_{TBM}^2}{4}\right) \tag{2.39}$$

Bir kesici tarafından alınan ortalama yol eşitlik den tahmin edilebilir.

$$L_{ort,disk} = 0.6 * \pi * \Phi_{TBM} \tag{2.40}$$

2.7.2. Ampirik Modeller

Birçok model, genellikle üniversitelerdeki araştırma grupları tarafından toplanan ve sürekli olarak yeni projelerin verileriyle güncellenen geçmiş projelerin büyük veri tabanlarına dayanmaktadır. TBM performansını etkileyen farklı parametrelerin çok sayıda olması ve spesifik saha koşullarına bağlı yüksek değişkenlik, yeni modellerin sürekli gelişmesine neden olmaktadır. Bazı modeller kaya kütlesi özelliklerine dayanırken, diğer çalışmalar kaya mekaniğinde yaygın olarak kullanılan ana kaya kütle sınıflamaları ile korelasyonlar önermektedir (Nuti 2017).

2.7.2.1. NTNU Modeli

NTNU modeli, Trondheim Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat ve Ulaşım Mühendisliği Bölümü'nde geliştirilen bir tahmin modelidir. Model 1976'dan beri bir dizi yazar tarafından sürekli güncellenmiştir. Burada verilen versiyon, Amund Bruland'ın (1998) NTNU'daki doktora tezindeki sonuçlardan gelmektedir. Veri tabanı, son 40 yıldaki çalışma grubu tarafından toplanan tek eksenli basınç dayanımları 50-250 MPa arasında değişen İskandinavya kıvrımlı kayalarında 2.3 ila 8.5 m arasındaki

çaplara sahip ve toplam uzunluğu 250 kilometreden fazla olan tünellerden elde edilen verilerden oluşmaktadır (Bruland 2014).

Model, tasarımcının TBM tarafından mekanize tünel açmada makine performansını, tüketimini ve maliyetlerini tahmin etmesini sağlayan dört farklı parçadan oluşur:

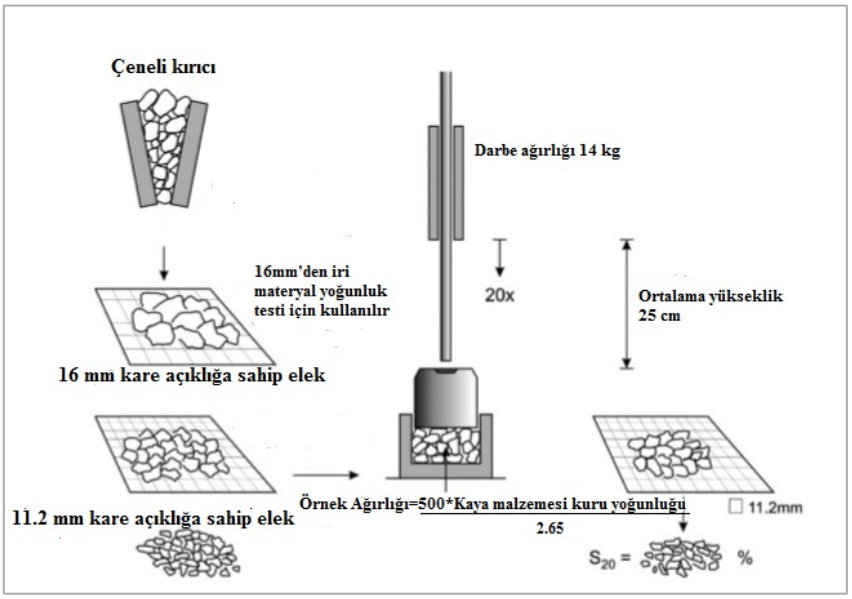
- Net penetrasyon oranı,
- Keski tüketimi,
- Brüt ilerleme oranı
- Kazı maliyeti

NTNU Testleri

NTNU prosedürü, kazılabilirliğe dayalı kaya kütle karakterizasyonu yapan bir dizi laboratuvar testine ihtiyaç duymaktadır.

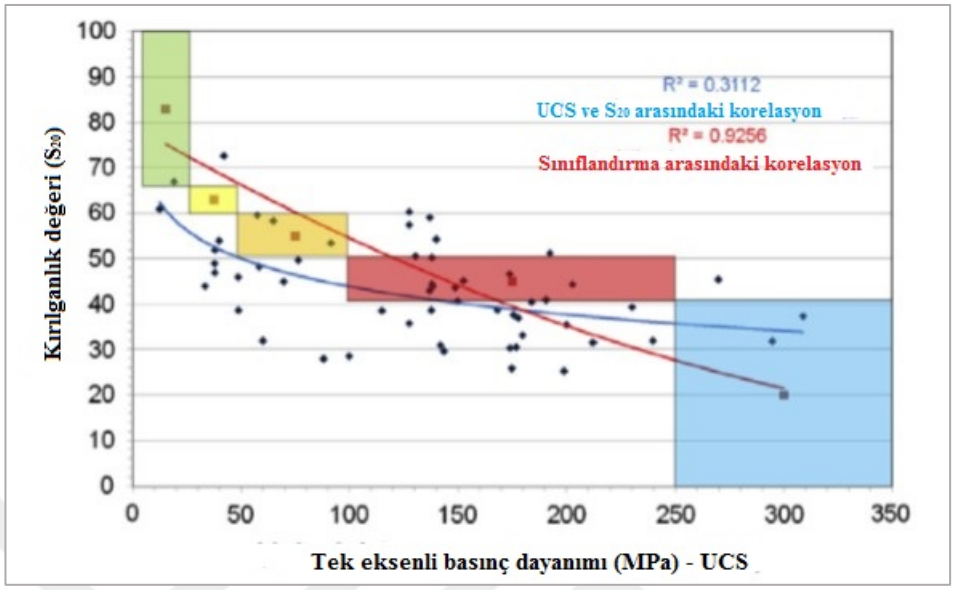
NTNU kestirim metodolojisinde kaya delinebilirliğini incelemek için kullanılan iki laboratuvar testi, Matern ve Hjelmer tarafından yapılan kırılganlık Değeri (S_{20}) Sievers'ın J-Değeri (SJ) minyatür delme testidir (Zare ve Bruland 2013).

S_{20}, kayanın tekrarlanan darbelerle ezilme kabiliyetinin bir ölçüsüdür ve Şekil 2.18'de gösterilen bir darbe aparatı kullanılarak ölçülür. S_{20}, 14 kiloluk ağırlığın 25 cm yükseklikten 20 defa bırakılmasının ardından 11.2 meşlik elekten geçen fraksiyonun yüzdesidir. Kabul edilen değer üç testin ortalamasıdır.

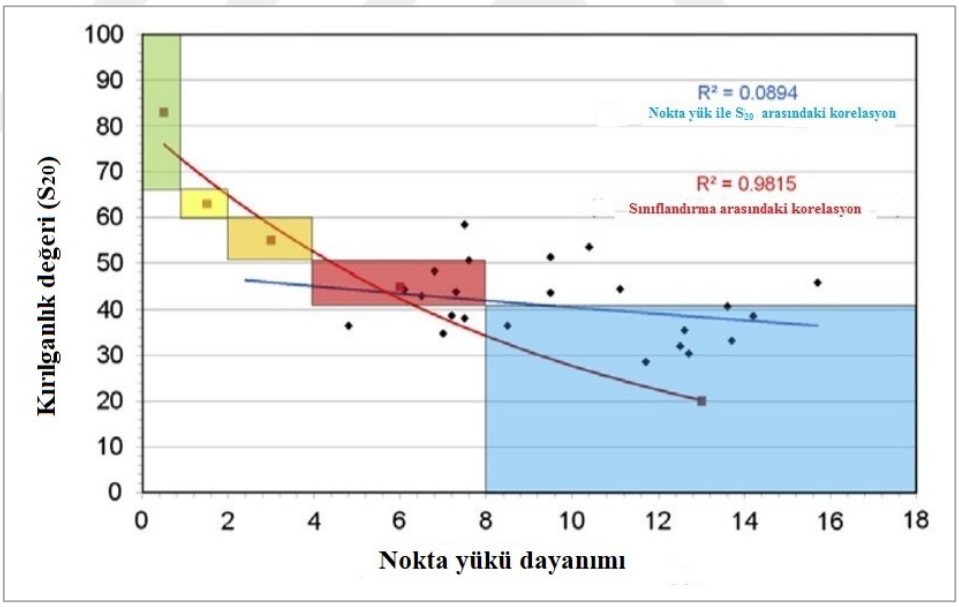


Şekil 2.18. Gevrek değeri testinin düzeni (Dahl 2012).

Dahl ve ark. (2012), S_{20} ve σ_c arasında (Şekil 2.19) ve S_{20} ile Nokta Yükü Dayanımı $I_{s,50}$ arasında bir korelasyon önermiştir (Şekil 2.20).



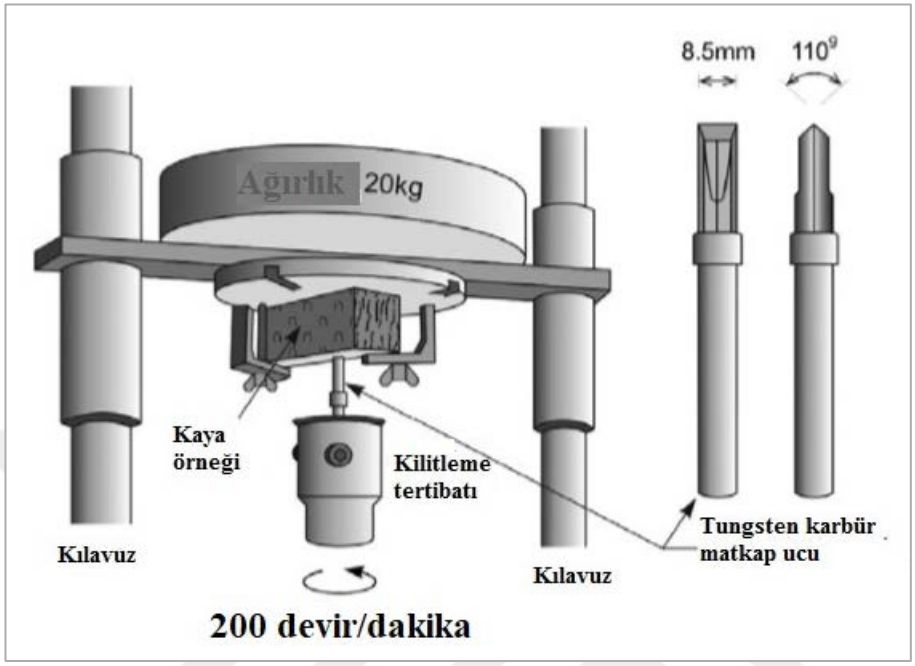
Şekil 2.19. S_{20} ve σ_c arasındaki korelasyon (Dahl 2012).



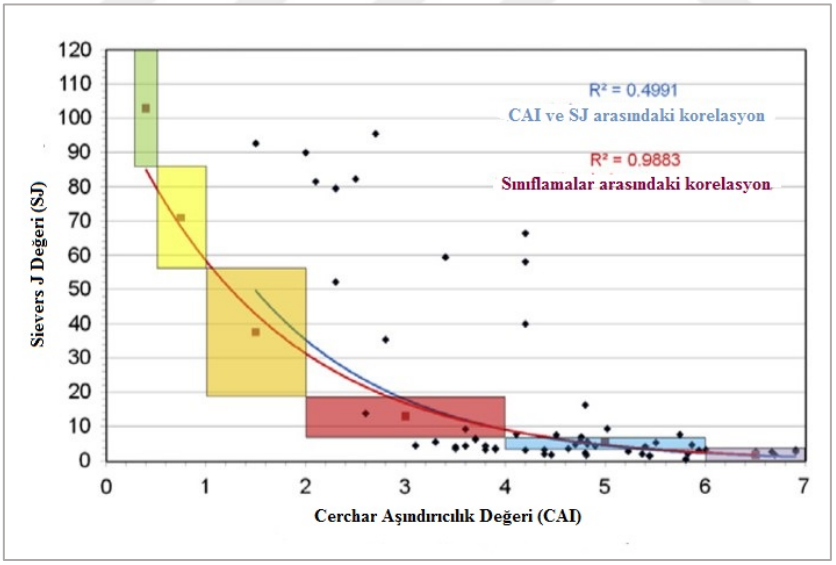
Şekil 2.20. S_{20} ve $I_{s,50}$ arasındaki korelasyon (Dahl 2012).

SJ, kaya yüzeyi sertliğinin bir ölçüsüdür ve Şekil 2.21'de gösterilen, 8.5 mm'lik bir minyatür matkap ucundan oluşan Sievers tarafından geliştirilen bir laboratuvar cihazı kullanılarak ölçülür. *SJ*, minyatür matkap ucunun 200 kere devrinden sonra, 1/10 mm cinsinden ölçülen delme derinliklerinin ortalama değeridir. Standart prosedür, numunenin önceden kesilmiş bir yüzeyinin, kayaçların yapraklanmasına dik olması,

dolayısıyla SJ'nin yapraklanmaya paralel olması ve testin 4-8 sondaj için yapılmasıdır. S_{20} için yapıldığı gibi, Dahl, SJ ve CAI arasında bir korelasyon bulmuştur (Şekil 2.22).



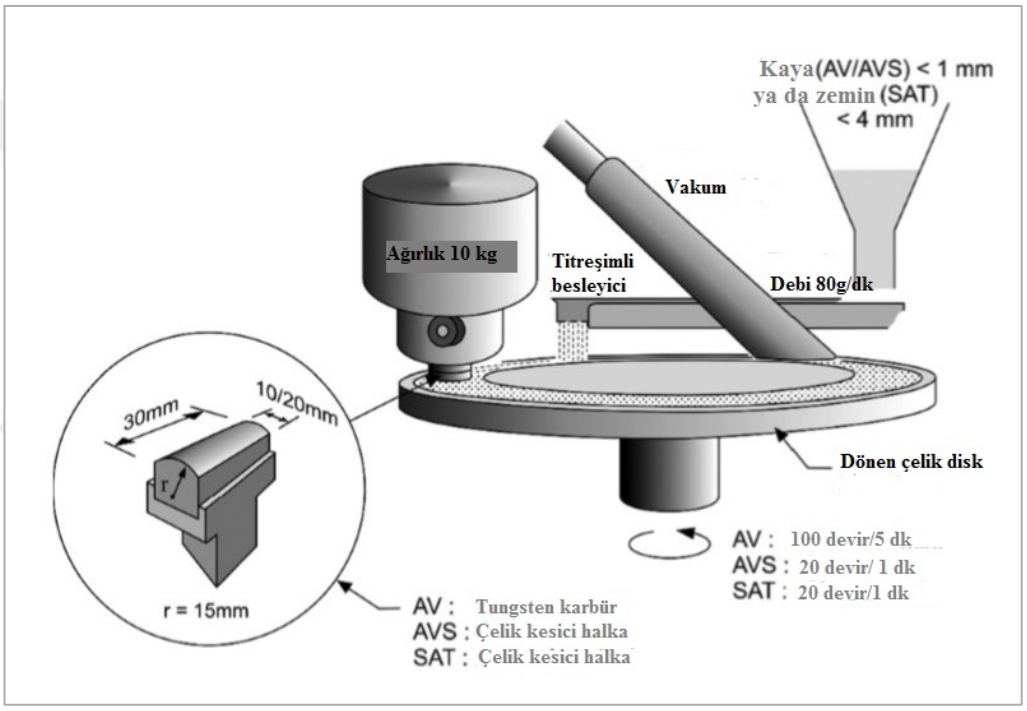
Şekil 2.21. Sievers minyatür matkap testinin şeması (Dahl 2012).



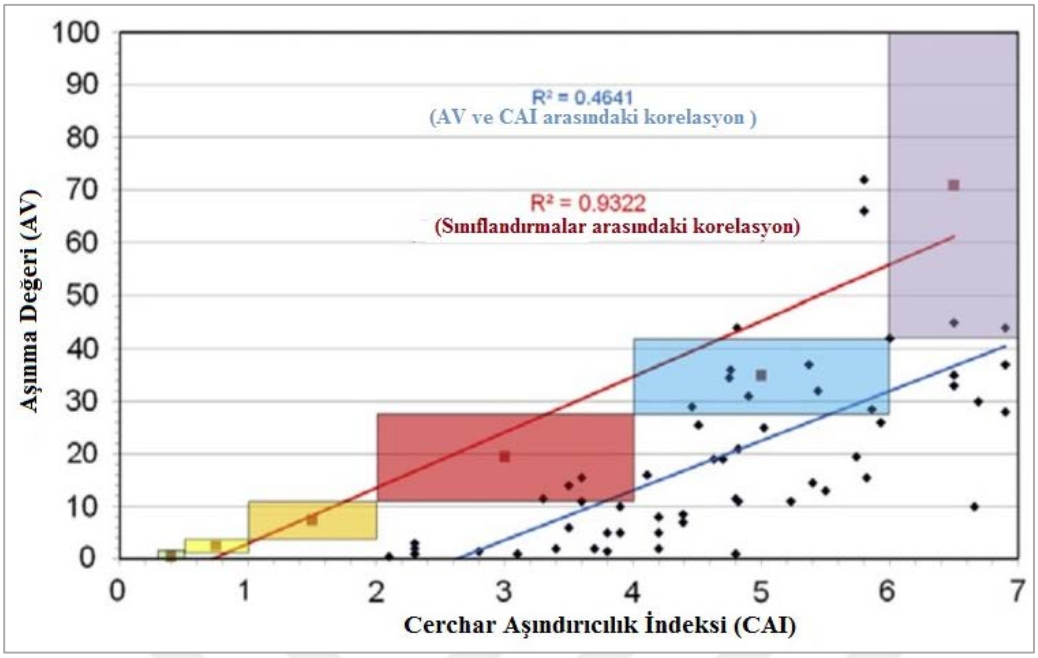
Şekil 2.22. SJ ve CAI arasındaki korelasyon (Dahl 2012).

Kaya aşındırıcılığı, ikisi de 1960'ların başında NTNU'da oluşturulan iki testin sonucu olarak tanımlanabilir: Aşınma Değeri (AV) ve Aşınma Değeri Karbon Çelik (AVS) testleri. Hem AV hem de AVS testi için kullanılan ekipman aynıdır; tek fark, kullanılan uç, AV testinde bir tungsten karbür aleti iken AVS testinde TBM kesici

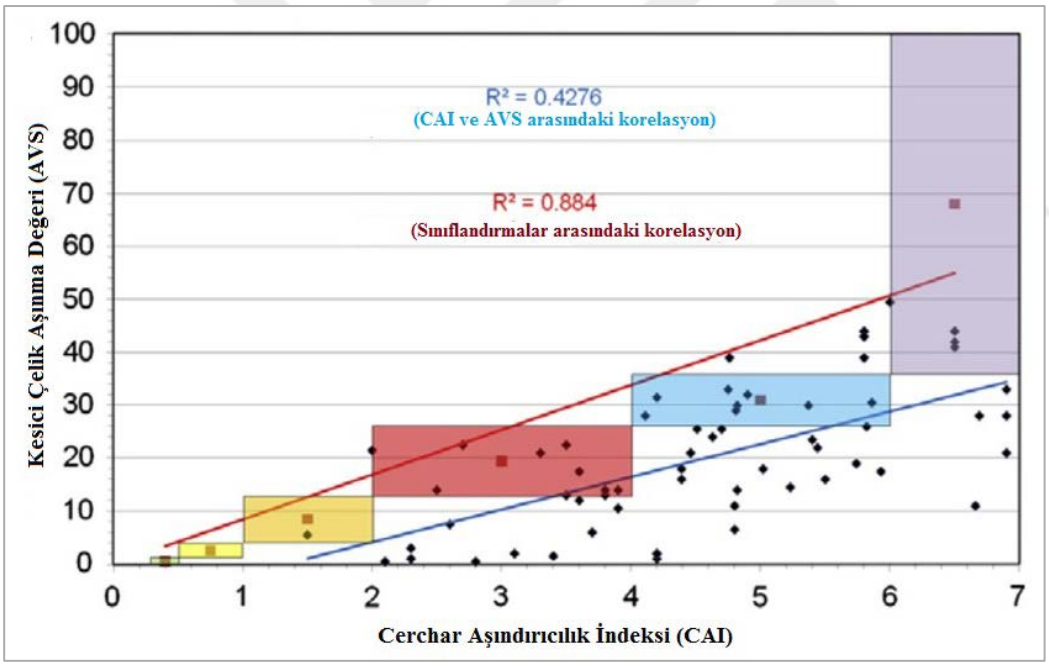
halkasından bir parça çeliktir. Alet, Şekil 2.23'te gösterildiği gibi, 10 kg'lık bir ağırlık ve rpm'ye eşit bir v_{rot} dönüş hızı ile 1mm kaya tozu (Φmax = 1 mm) ile kaplanmış dönen bir çelik diske karşı preslenir. AV değeri, 5 dakikalık testten sonra, miligram cinsinden ağırlık kaybı olarak tanımlanırken, AVS, testin 1 dakika sonunda miligram cinsinden ağırlık kaybı olarak tanımlanır. AV ve AVS testleri genel olarak 2-4 test parçası üzerinde gerçekleştirilir ve ortalama değer test sonucu olarak kabul edilir. Varyasyonun çok düşük olduğu ve testin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi durumunda ağırlık kaybının 5 birimi aşmaması gerekir. Dahl ve ark. (2012) AV ve AVS'yi CAI ile karşılaştırmak için grafikler önermişleridir (Şekil 2.24 ve Şekil 2.25).



Şekil 2.23. AV / AVS testlerinin ana hatları (Dahl 2012).



Şekil 2.24. AV ve CAI arasındaki korelasyon (Dahl 2012).



Şekil 2.25. AVS ve CAI arasındaki korelasyon (Dahl 2012).

Yukarıda belirtilen laboratuvar testinin sonuçlarından NTNU endeksleri elde edilebilir.

- Delme Oranı İndeksi (DRI), Şekil 2.26'daki diyagramı kullanılarak, Kırılganlık Değeri S_{20} ve Sievers J değeri SJ'den elde edilebilir. Yazarın bulduğu denklemler:

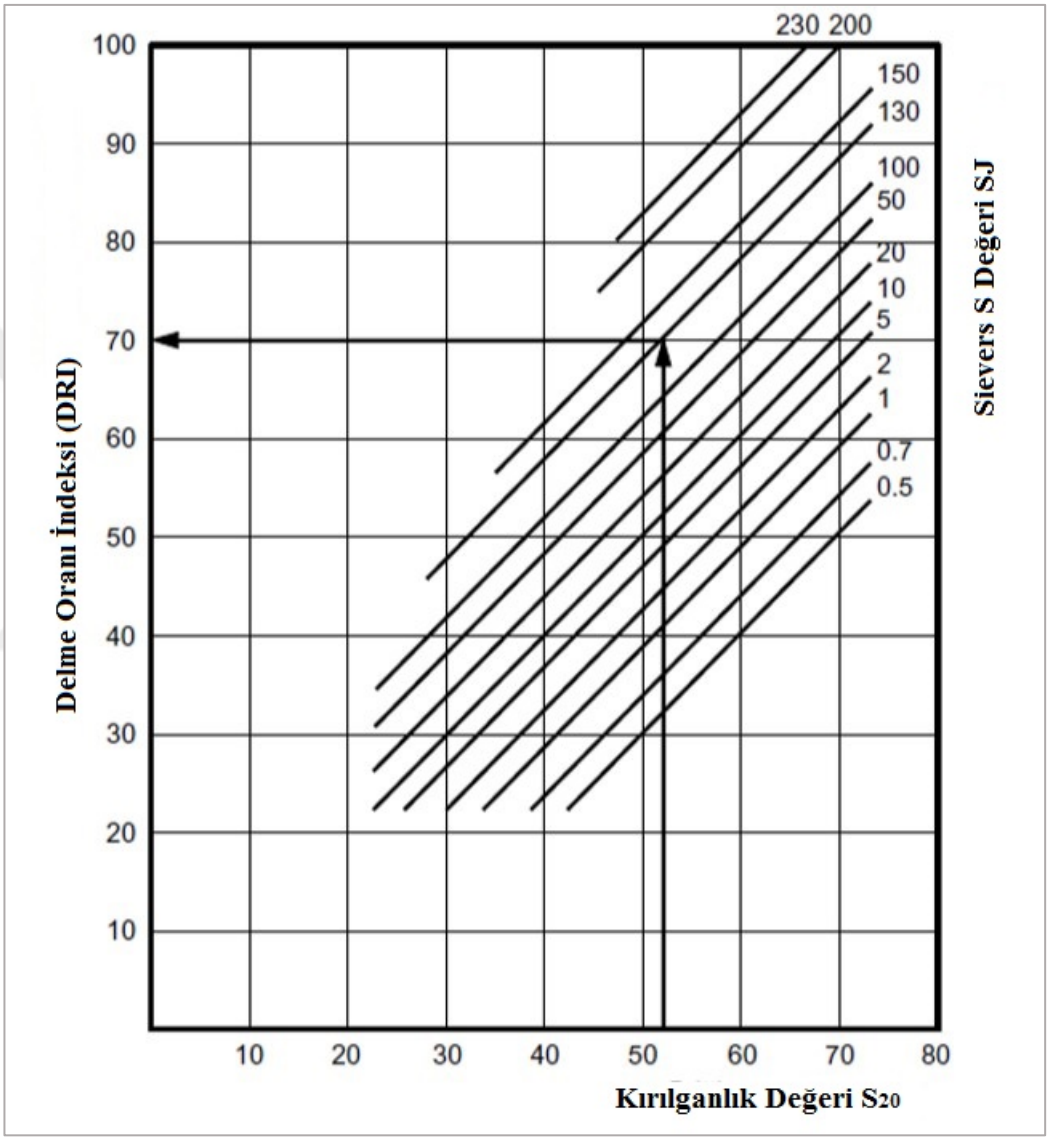
Eğer SJ < 50 ise;

$$DRI = (0.13 * SJ + 2.33) + S_{20} \quad (2.41)$$

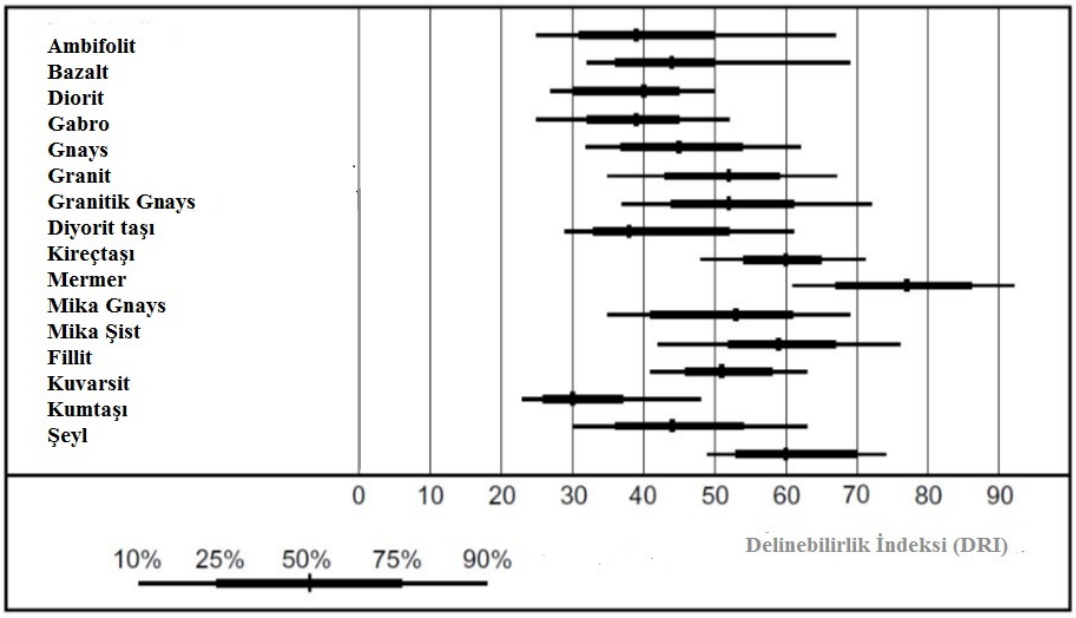
Eğer SJ > 50 ise;

$$DRI = [5.84 * ln(SJ) - 14] + S_{20} \quad (2.42)$$

Farklı kayalar için DRI değişkenliği Şekil 2.27'de verilmiştir.

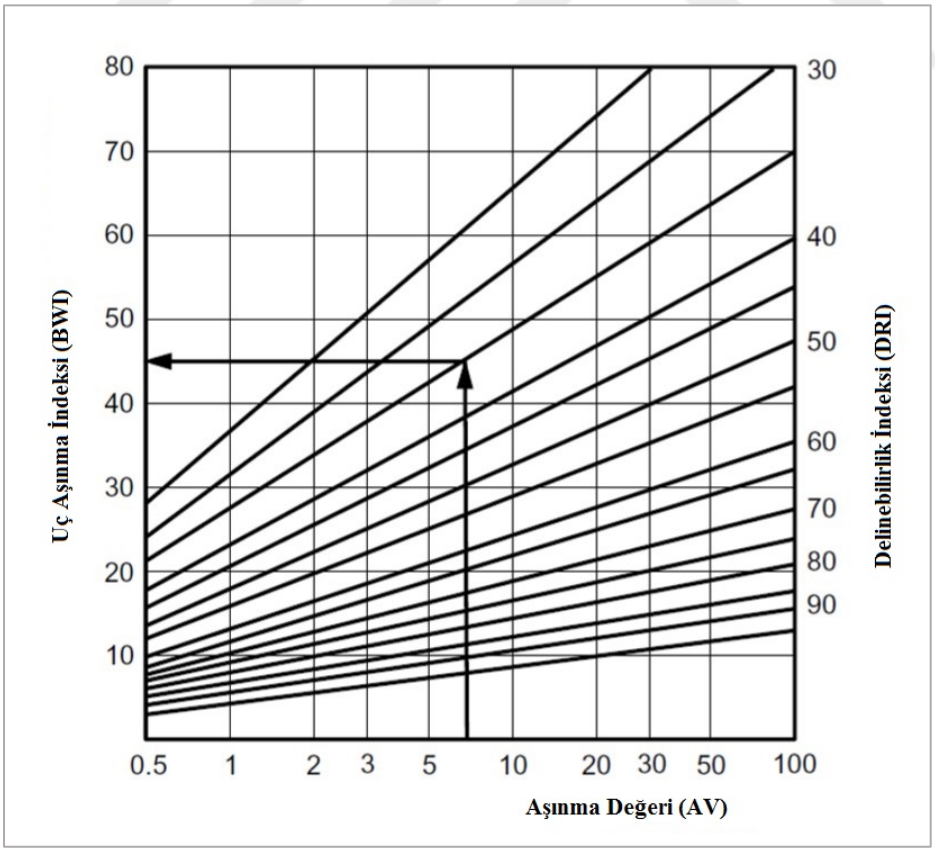


Şekil 2.26. DRI değerlendirmesi için diyagram (Bruland 1998).



Şekil 2.27. Bazı kaya tipleri için DRI varyasyonu (Bruland 1998).

- Bit Aşınma İndeksi (BWI) DRI ve AV'den başlayarak değerlendirilir, fakat aynı zamanda kuvars içeriğine de bağlıdır. Şekil 2.28'deki diyagram, BWI'nın nasıl tahmin edileceğini göstermektedir.



Şekil 2.28. BWI değerlendirmesi için diyagram (Bruland 1998).

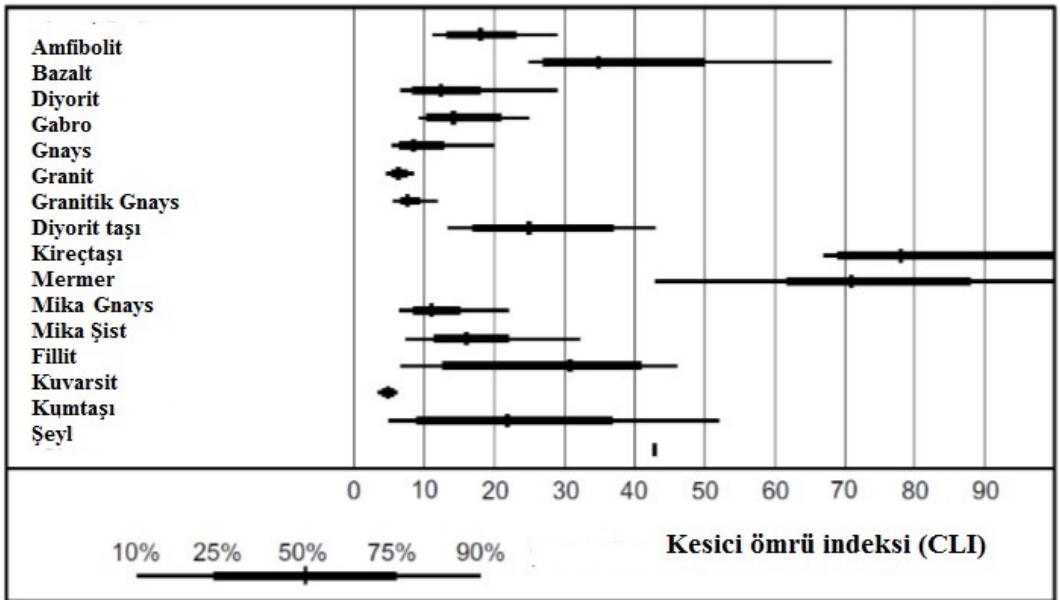
- Kesici Ömrü Endeksi (CLI), SJ ve AVS'den aşağıdaki gibi sayısal olarak tahmin edilmektedir:

$$CLI = 13.84 * \left(\frac{SJ}{AVS}\right)^{0.3847} \quad (2.43)$$

Bruland, CAI'den yola çıkarak CLI'ye yaklaşık bir denklem önermiştir (Bruland 1998).

$$CLI = 2.681 * CAI^2 - 34.319 * CAI + 111.09 \quad (2.44)$$

Şekil 2.29'da farklı kayaçlar için CLI değişkenliği verilmiştir.



Şekil 2.29. Bazı kayaç tipleri için CLI varyasyonu (Bruland 1998).

Net Penetrasyon Oranı

Modelin temeli, kesici disk başına gerçek penetrasyon ve brüt itme, aşağıda denklemi verilen penetrasyon eğrisi ile ilişkilendirilebilir:

$$i_0 = \left(\frac{M_0}{M_1}\right)^b \quad (2.45)$$

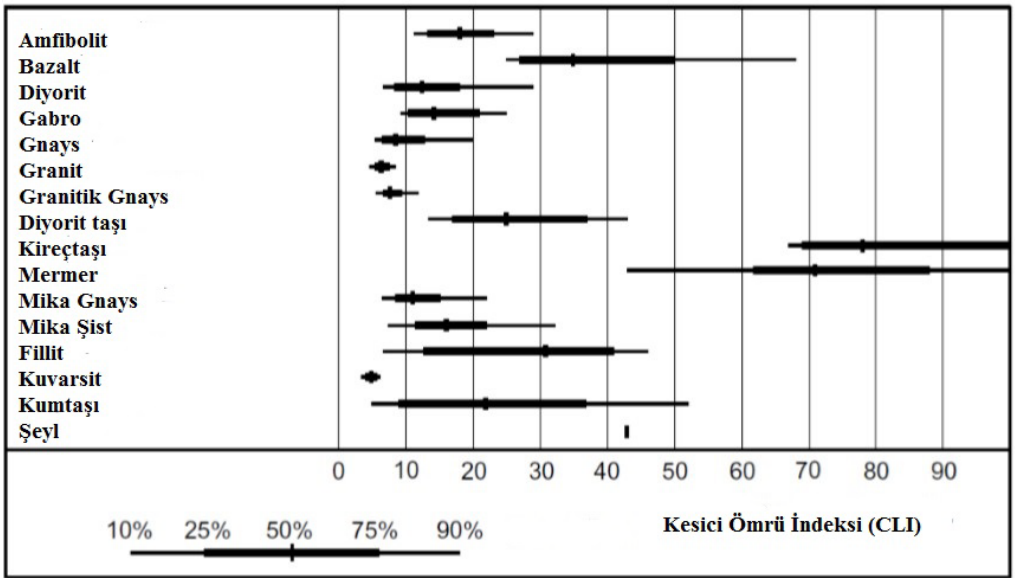
Burada; i_0 net penetrasyon oranı [mm/rev], M_0 keski başına brüt itme kuvveti [kN], M_1 kritik itme kuvvetidir [kN], başka bir değişle; kesici kafanın dönüşü başına 1 mm'lik penetrasyon elde etmek için gerekli kesici disk başına brüt itme ve b de penetrasyon üssüdür. Temel penetrasyonun bu değeri, bozulmamış kaya ve kaya kütlesi özelliklerini hesaba katan bir dizi düzeltme faktörü ile düzeltilmelidir. Kaya kütle özelliklerinin, ortalama eklem aralığının, zayıflık düzlemleri ile tünel ekseni arasındaki

açının TBM tünelciliğinde büyük bir etkisi vardır. Net penetrasyon oranını belirleyen ana parametreler Çizelge 2.4 te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Net penetrasyon oranını belirleyen parametreler (Bruland 1998).

Kaya Kütle Özellikleri	Makine Parametreleri
Çatlak sıklığı ve yönelimi	Brüt ortalama itme
Delinebilirlik indeksi, DRI	Ortalama keski aralığı
Porozite	Kesici boyutu ve şekli
	Kesici kafa gücü

Net penetrasyon oranı aşağıdaki adımlar ve çizelgeler ile hesaplanabilir (Şekil 2.30).



Şekil 2.30. Bazı kayaç tipleri için CLI varyasyonu (Bruland 1998)

1. Eşdeğer kırılma faktörü (k_{ekv})

Eşdeğer kırılma faktörü, kaya kütlesinin kırılma derecesini, zayıflık ana düzlemleri ve tünel ekseni arasındaki açıyı ve kaya delinebilirliğini kombine eder. Model dört farklı davranış içerir:

- Kayaçlardaki sürekli kırıklar; eklemler
- Kaya kütlesi ve yapraklanma düzlemlerinde sürekli olmayan kırıklar; çatlaklar
- Belirgin tek eklemler; belirgin süreksizlikler (örneğin, büyük yapraklanma, karışık yüzlerde çatlak)

- Homojen kaya kütlesi.

Bruland (1998), Çizelge 2.5 te gösterildiği gibi, eklem ve çatlaklar için yedi kırık sınıfı tanımlamıştır.

Çizelge 2.5. Eklem ve çatlaklar için kırık sınıfları (Bruland 1998).

Kırık sınıfı	**Aralık J_s [cm]**	**J_s ile ilgili sınıflar [cm]**
0	-	>240
0+	190	160-240
0-I	140	110-160
I-	90	60-110
I	40	37.5-60
I+	35	32.5-37.5
I-II	30	27.5-32.5
II-	25	22.5-27.5
II	20	17.5-22.5
II-III	15	12.5-17.5
III	10	8.75-12.5
III-IV	7.5	6.25-8.75
IV	5	4-6.25

Tünel ekseni ve zayıflık düzlemleri arasındaki açı şu şekilde hesaplanabilir:

$$a = \left|arcsin\left(sina_f * sin(a_t - a_s)\right)\right| \quad (2.46)$$

Burada;

- a= eklemler ve tünel eksenleri arasındaki açı
- a_f= zayıflık düzleminin eğim açısı
- a_t= tünel ekseninin yönü
- a_s= zayıflık düzlemlerinin tabaka yönü açısı.

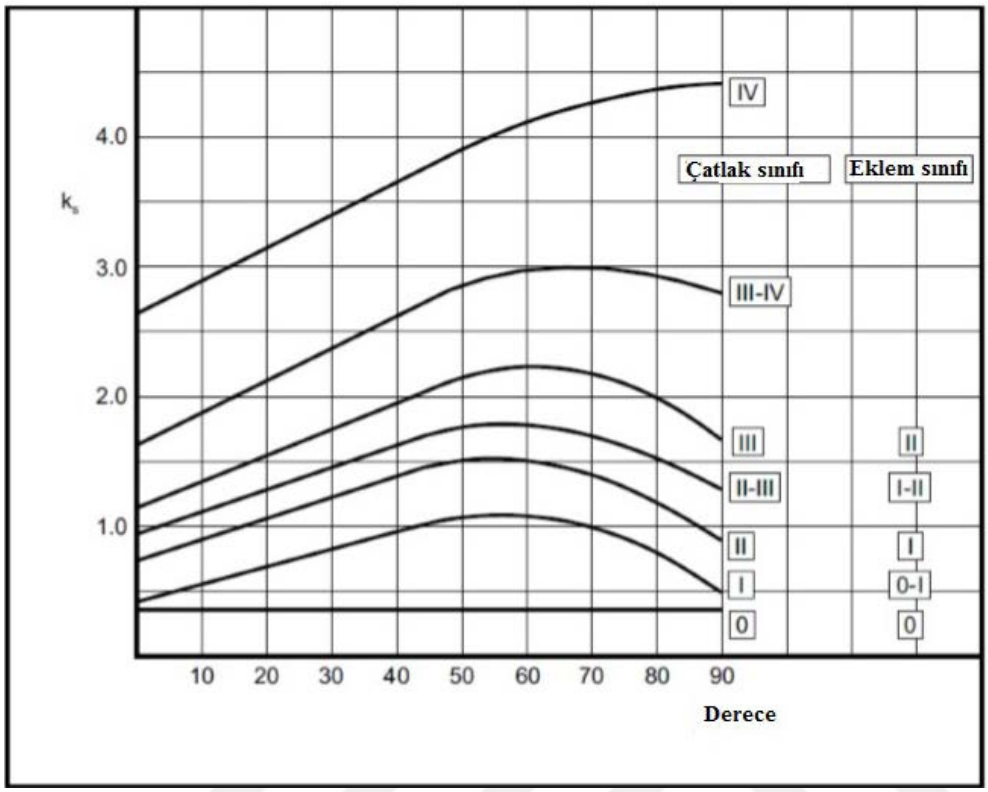
Birden fazla ana eklem ailesi varsa (maksimum değer 3 önerilir):

$$k_{s,tot} = \left(\sum_{i=1}^{n} k_{s,i}\right) - (n-1) * 0.36 \quad (2.47)$$

Burada;

- $k_{s,tot}$=toplam kırılma faktörü
- $k_{s,i}$= Şekil 2.31'den set i için kırılma faktörü

- n= kırılma setleri sayısı



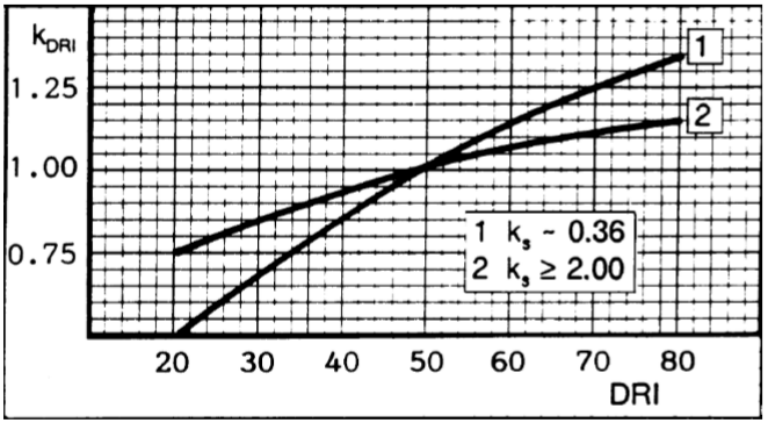
Şekil 2.31. Farklı çatlak ve eklem sınıfları $k_{s,i}$için değerlendirme diyagramı (Bruland 1998).

$k_{s,i}$değerlendirmesi için denklemler Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. $k_{s,i}$ için değerlendirme denklemi (Bruland 1998).

FC	**JC**	**Düzeltme faktörü : $k_{s,i}$**	
		$a < 40^o$	**$40^o < a < 90^o$**
0	0	0.36	0.36
I	0-I	$0.0133a+0.45$	$-0.0005a^2+ 0.0564a - 0.4901$
II	I	$0.0158a+0.75$	$-0.0005a^2+ 0.0586a - 0.1196$
II-III	I-II	$0.017a+0.93$	$-0.0005a^2+ 0.0576a + 0.1291$
III	II	$0.02a+1.16$	$-0.0007a^2+ 0.0835a + 0.2894$
III-IV	II-III	$0.0248a+1.63$	$-0.0005a^2+ 0.0622a + 0.8789$
IV	-	$0.0243a+2.37$	$-0.0003a^2+ 0.0483a + 2.1246$

DRI için düzeltme faktörü, k_{DRI} Şekil 2.32'de verilen eğri yardımıyla tespit edilebilir.



Şekil 2.32. k_{DRI} değerlendirmesi için diyagram (Bruland 1998).

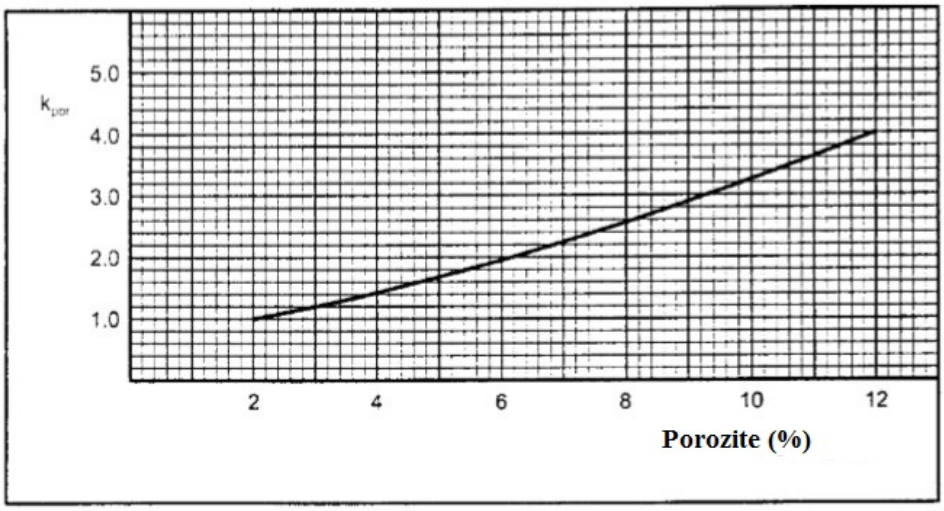
- Eğer $k_{s,tot}$=0.36 ise;

$$k_{DRI} = -0.0001DRI^2 + 0.0247DRI + 0.0293 \quad (2.48)$$

- Eğer $k_{s,tot} \geq 2$ ise;

$$k_{DRI} = -0.00007DRI^2 + 0.0134DRI + 0.51 \quad (2.49)$$

Porozite için düzeltme faktörü, k_{por}, Şekil 2.33'te verilen diyagram yardımıyla bulunabilir.



Şekil 2.33. k_{por} değerlendirmesi için diyagram (Bruland 1998).

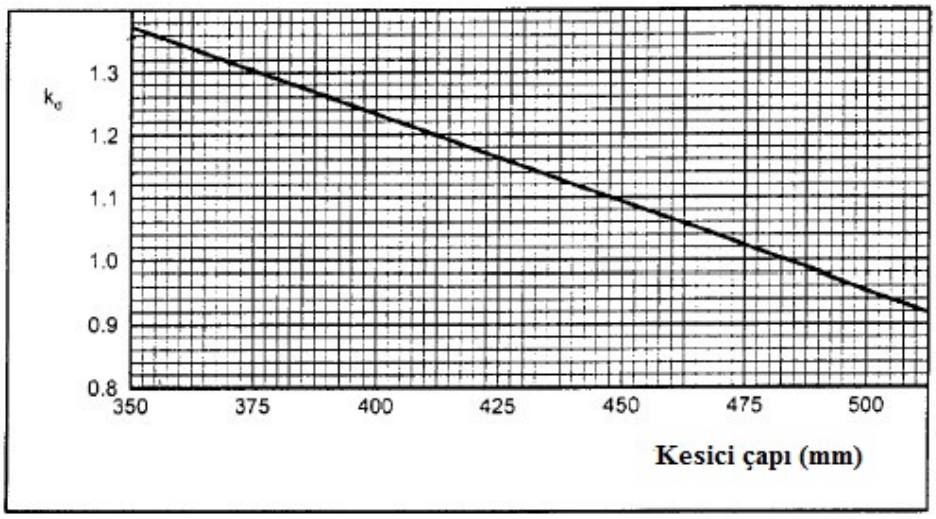
Eşdeğer kırılma faktörü k_{ekv} aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$k_{ekv} = k_{s,tot} * k_{DRI} * k_{por} \quad (2.50)$$

2. Eşdeğer itme (M_{ekv})

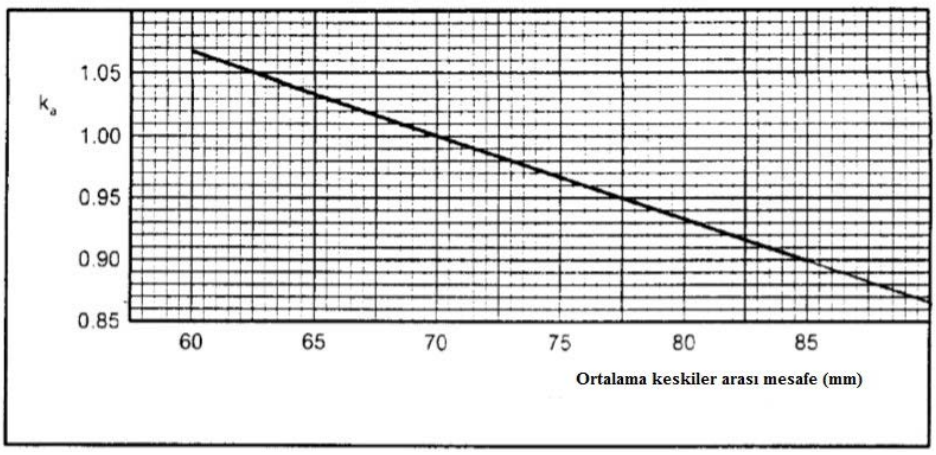
Keski başına eşdeğer itme değeri TBM çapına bağlı değildir, ancak iki düzeltme faktörünün fonksiyonudur. Bunlardan biri Şekil 2.34'te verilen diyagram vasıtasıyla elde edilebilen k_d disk çapı faktörüdür.

$$k_d = 1 + 0.05 * \frac{484 - \Phi_{disk}}{176} \tag{2.51}$$



Şekil 2.34. k_d değerlendirilmesi için diyagram (Bruland 1998).

İkincisi ise, Şekil 2.35'teki eğri ile değerlendirilen k_a, ortalama keskiler arası mesafe faktörüdür.



Şekil 2.35. k_a değerlendirmesi için diyagram (Bruland 1998).

$$k_a = 1 - 0.05 * \frac{s_{kesici} - 69}{11} \tag{2.52}$$

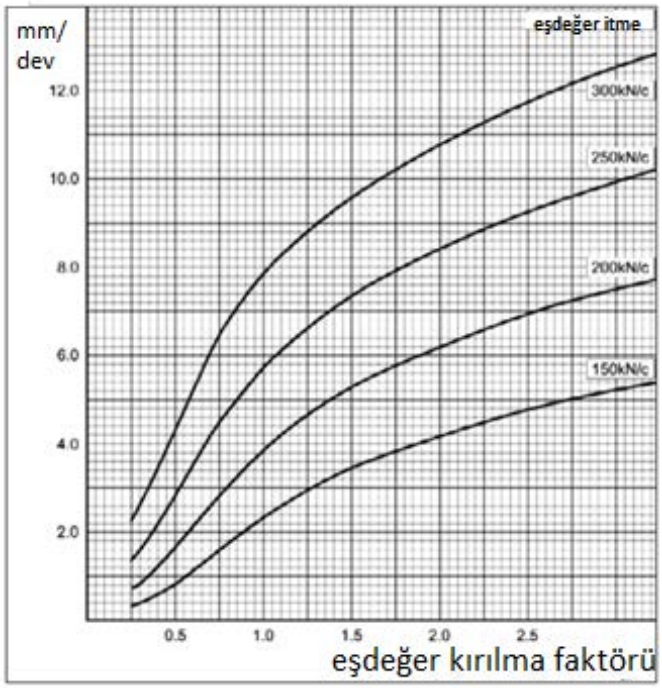
Kesici başına eşdeğer itme M_{ekv} aşağıdaki gibi tahmin edilir.

$$M_{ekv} = M_B * k_d * k_a \tag{2.53}$$

Burada; M_B makinanın mevcut itme kapasitesi değil, keski başına brüt ortalama itme kuvvetidir. Başka bir ifadeyle kullanılacak gerçek itme gücüdür.

3. Temel penetrasyon oranı (i_0)

Temel penetrasyon oranı (i_0) eşitlik 2.53'ten hesaplanabilir. Şekil 2.36'daki diyagram kullanılarak eşdeğer itme ve eşdeğer kırılma faktörünün bir fonksiyonu olarak değerlendirilebilir. Temel penetrasyon oranı için denklemler Çizelge 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.36. i_0 değerlendirmesi için diyagram (Bruland 1998).

Şekil 2.36 için çıkarılan varsayımlar şunlardır:

- Eğer Φ_{disk} = 19" (483 mm) ise çevre keskinin dönme hızı v_{keski}=2.62 m/s
- Eğer Φ_{disk} = 17" (432 mm) ise çevre keskinin dönme hızı v_{keski}=2.30 m/s

Çizelge 2.7. i_0 değerlendirmesi için eşitlikler.

İtme kuvveti M_{ekv} [kN/disk]		**Penetrasyon oranı i_0 [mm/rev]**
100	k_{ekv}<1	-0.5208k_{ekv}^2+3.0521k_{ekv}-0.8313
	$k_{ekv} \geq$	-0.36k_{ekv}^2+2.38k_{ekv}+0.32
150	k_{ekv}<1	-1.1489k_{ekv}^2+4.9531k_{ekv}-1.2042
	$k_{ekv} \geq$	-0.4533k_{ekv}^2+2.96k_{ekv}+0.0933
200	k_{ekv}<1	-2.2825k_{ekv}^2+7.7135k_{ekv}-1.4811
	$k_{ekv} \geq$	-0.3888k_{ekv}^2+2.814k_{ekv}+1.524
250	k_{ekv}<1	-5.5423k_{ekv}^2+13.522k_{ekv}-2.3496
	$k_{ekv} \geq$	-0.3733k_{ekv}^2+2.92k_{ekv}+3.0533
300	k_{ekv}<1	-8.2721k_{ekv}^2+19.063k_{ekv}-2.7904
	$k_{ekv} \geq$	-0.38k_{ekv}^2+2.91k_{ekv}+5.47

4. Net penetrasyon oranı (ROP_0)

$$ROP_0 = I_0 = i_0 * \nu_{rot} * \left(\frac{60}{1000}\right) \tag{2.54}$$

Keski Tüketimi

Bir kesicinin ortalama ömrü bir dizi makine parametresiyle ve kayacın aşındırıcılığıyla etkilenir. Kesici aşınmasını etkileyen ana parametreler Çizelge. 2.8'de verilmiştir.

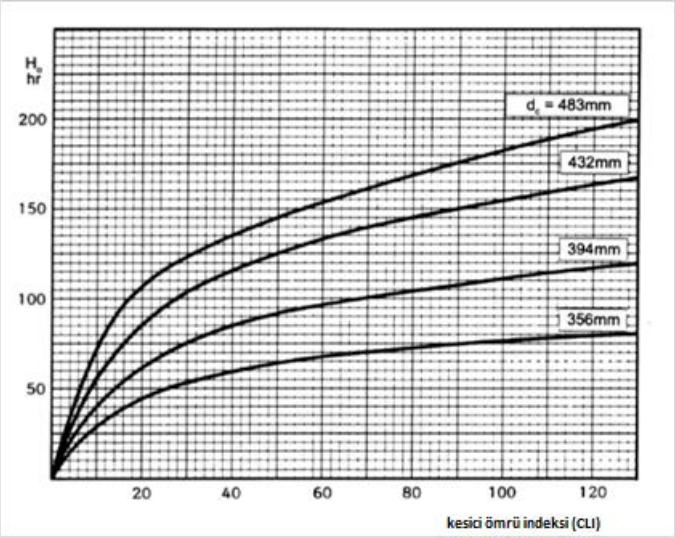
Çizelge. 2.8. keski ömrünü etkileyen parametreler (Bruland 1998).

Kaya kütlesi parametreleri	**Makine parametreleri**
Kayacın aşındırıcılığı	Keski çapı
Kuvars içeriği	Kesici tip ve kalitesi
Porozite	Kesici kafa çap ve şekli
	Kesici kafa dönme hızı
	Kesici sayısı

Ortalama keski ömrü [h/disk] cinsinden aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$H_h = \frac{H_0 * k_\Phi * k_Q * k_{RPM} * k_N}{N_{TBM}} \tag{2.55}$$

Burada; H_0 Şekil 2.37'deki diyagram ile kesici ömrü indeksi (CLI) ve kesici çapının (Φ_{disk}) bir fonksiyonu olarak tahmin edilen temel kesici halka ömrüdür.



Şekil 2.37. H_0 değerlendirmesi için diyagram (Bruland 1998).

Eğer $\Phi_{disk} = 17"$ ise;

- $CLI < 30$ durumunda

$$H_0 = -0.0925CLI^2 + 6.1657CLI + 0.65 \quad (2.56)$$

- $CLI \geq 30$ durumunda

$$H_0 = -0.0044CLI^2 + 1.3333CLI + 67.5 \quad (2.57)$$

Eğer $\Phi_{disk} = 19"$ ise;

- $CLI < 30$ durumunda

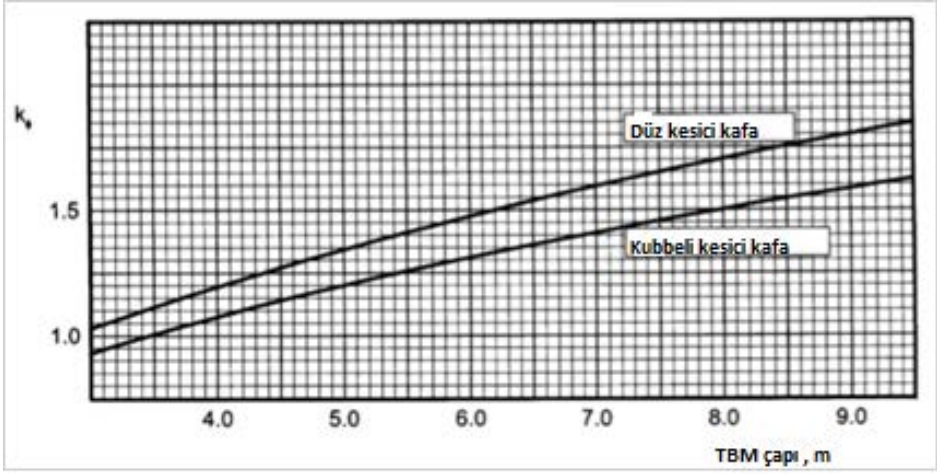
$$H_0 = -0.1425CLI^2 + 8.305CLI + 1.05 \quad (2.58)$$

- $CLI \geq 30$ durumunda

$$H_0 = -0.0031CLI^2 + 1.2483CLI + 88.75 \quad (2.59)$$

k_Φ TBM çapı ve şekli için düzeltme faktörüdür. Aşağıda eşitliği verilen bu düzeltme faktörü, Şekil 2.38'de verilen diyagramdan da elde edilebilir.

$$k_\Phi = -0.0065\Phi_{TBM}^2 + 0.2061\Phi_{TBM} + 0.474 \quad (2.60)$$



Şekil 2.38. k_Φ değerlendirmesi için diyagram (Bruland 1998).

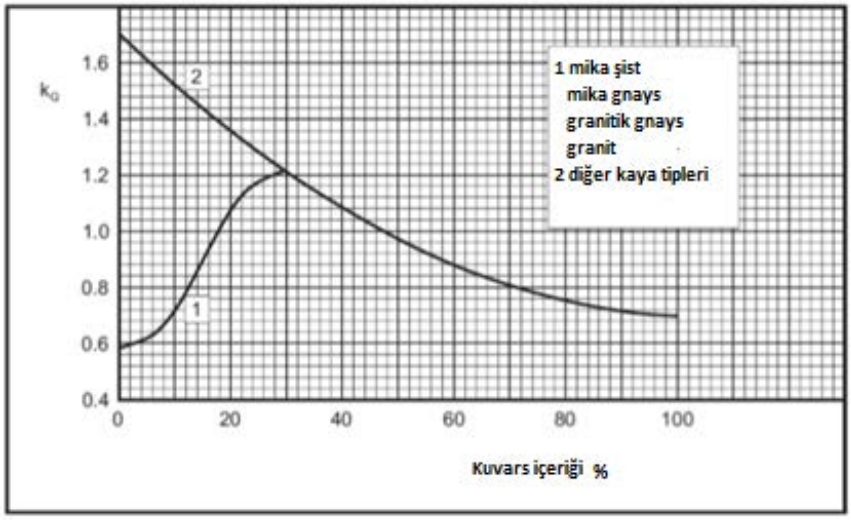
k_Q, Şekil 2.39'dan gelen kaya tipolojisi ile ilgili aşındırıcılık ve kuvars içeriği q için düzeltme faktörüdür. İlgili eşitlikler aşağıda verilmiştir:

- mika-şistler, mika-gnays, gnays ve granitler için q <0.27 ise:

$$k_Q = 0.00009q^2 + 0.004q + 0.6(\mp 0.08) \quad (2.61)$$

- ya da;

$$k_Q = 0.00009 - 0.0196q + 1.714(\mp 0.08) \quad (2.62)$$

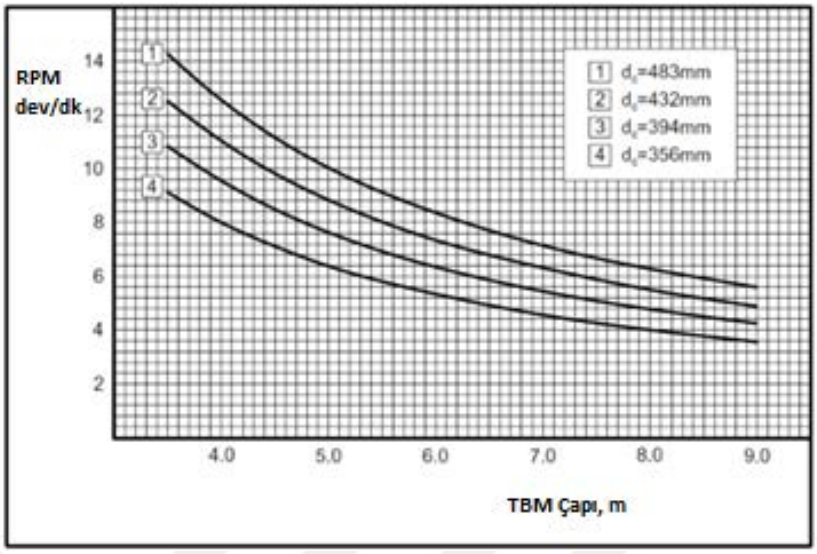


Şekil 2.39. k_Q değerlendirmesi için diyagram (Bruland 1998).

k_{RPM}, kesici kafanın dönme hızı için düzeltme faktörüdür ve aşağıdaki eşitlik vasıtasıyla tahmin edilebilir.

$$k_{RPM} = \frac{50}{\Phi_{TBM} * v_{rot}} \quad (2.63)$$

v_{rot} Şekil 2.40'daki diyagramdan öğrenilebilir.



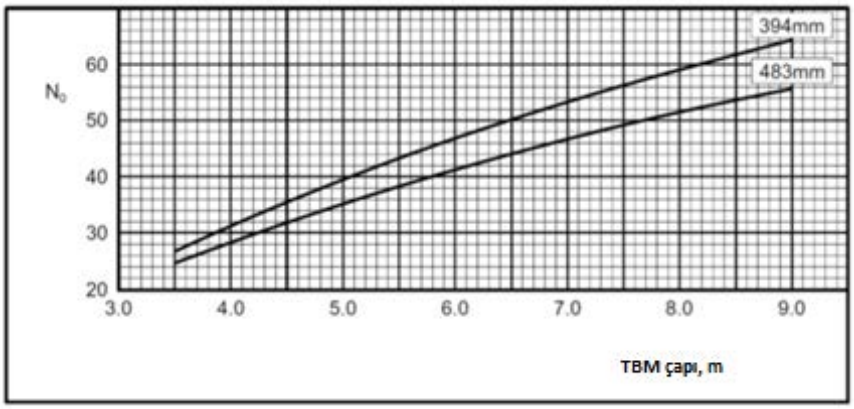
Şekil 2.40. Çapı bilinen bir TBM için ortalama rotasyon hızını elde etmek için diyagram (Bruland 1998).

k_N, aşağıda verilen denklem ile tahmin edilebilen, disk kesicilerin sayısı için düzeltme faktörüdür:

$$k_N = \frac{N_{TBM}}{N_0} \tag{2.64}$$

N_0 Şekil 2.41'de verilen diyagramdan elde edilebilir.

$$N_0 = \frac{\Phi_{TBM}}{2 * s_{kesici}} \tag{2.65}$$



Şekil 2.41. Çapı bilinen bir TBM için ortalama kesici sayısını elde etmek için diyagram (Bruland 1998).

N_{TBM} kesici kafadaki kesici sayısıdır.

Bir kesici halkanın ortalama ömrü, CRL olarak adlandırılır ve [m^3 / kesici] olarak ifade edilebilir:

$$CRL = \frac{\Phi_{TBM}^2 * \pi}{4} * i_0 * \frac{v_{rot} * 60}{1000} * H_h \quad (2.66)$$

Brüt İlerleme Oranı

Brüt ilerleme oranı; penetrasyon oranına, faydalanma faktörüne ve bir haftadaki çalışma saatine göre değişir. Toplam tünel açma süresi şunları içerir.

- Kazma, T_b
- Regripping, T_t
- Keski değişimi, T_c
- TBM'nin bakım onarım, T_{TBM}
- Back-up ünitelerinin bakım onarım, T_{bak}
- Çeşitli aktiviteler, T_a
    - Nadiren de olsa iyi kaya koşullarında destekleme çalışmaları
    - Taşıma hattındaki çalışmalar
    - Lazer ölçümleri
    - Su,havalandırma, elektirik kablolarının taşıma ve bakımı
    - TBM ve back-up ünitelerinin tamizliği
    - Diğer (vardiya değişimi, öngörülmeyen zaman kaybı vb.)

[%] Cinsinden ifade edilen kullanımfaydalanma faktörü UF aşağıdaki gibidir:

$$UF = \frac{100 * T_b}{T_b + T_t + T_c + T_{TBM} + T_{bak} + T_a} \quad (2.67)$$

T_b [h/km] cinsinden ifade edilir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$T_b = \frac{1000}{ROP_0} \quad (2.68)$$

T_t[h/km] cinsinden ifade edilir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$T_t = \frac{1000 * t_{tak}}{60 * l_s} \quad (2.69)$$

Burada; l_s genellikle 1.5-2.0 m civarındaki strok uzunluğu, t_{tak} ise 4-5 dk.'lık regrip başına gerekli olan süredir.

T_c [h/km] cinsinden ifade edilir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$T_c = \frac{1000 * t_c}{60 * H_h * ROP_0} \quad (2.70)$$

Burada; t_c kesicilerin değişimi için gerekli süre (genellikle 45-60 dk), H_h ise eşitlik 2.62'den hesaplanabilen ortalama kesici halkası ömrüdür.

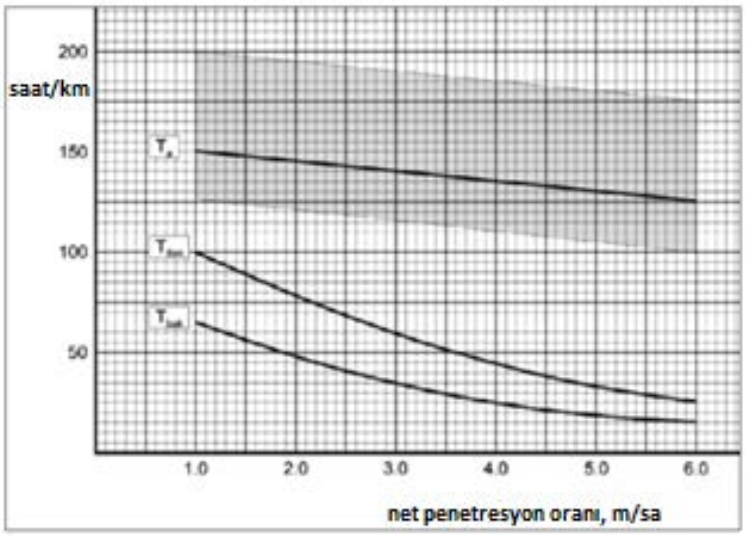
T_a, T_{TBM} ve T_{bak} Şekil 2.42'deki diyagram kullanılarak hesaplanabilir. Aşağıdaki eşitlikler, zaman faktörleri için yaklaşık sayısal değerleri bulmak için kullanılabilir.

$$T_{TBM} = 1.8036 ROP_0^2 - 27.539 ROP_0 + 125.7 \quad (2.71)$$

$$T_{bak} = 1.6607 ROP_0^2 - 21.539 ROP_0 + 84.7 \quad (2.72)$$

T_a, $(-5ROP_0 + 130 < T_a < -6ROP_0 + 210)$ aralığında bulunur:

$$T_a = -5ROP_0 + 155 \quad (2.73)$$



Şekil 2.42. T_a, , T_{TBM} ve T_{bak} değerlendirmesi için diyagram (Bruland 1998).

2.7.2.2. Kaya Kütle Parametrelerine Dayalı Modeller

Bu çalışmaların büyük çoğunluğu, istatistik yazılımları ile gerçekleştirilen ve doğrusal olmayan çoklu regresyon analizine dayanmaktadır. Bazı yazarlar, veri kümelemeye ve geri yayılım algoritmasına dayanan nöro-bulanık modelleri uygulamaya çalışmışlardır. Bu modeller Çizelge 2.9 ve Çizelge 2.10 da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Veritabanının özelliği (Brino 2015; Nuti 2017).

Yazarlar	TBM	Litoloji	Uzunluk [km]	TBM çapı [m]	Disk çapı [”]
Alber, 1996	Çeşitli	Karışık	110	2.9-6.5	15-19
Alvarez ve ark. 2000	Çeşitli	Karışık	-	-	Çeşitli
Yağız, 2008	Kalkansız,	Metamorfik	7.5	7.06	19
Gong, Zhao, 2009	Çift kalkanlı	Magmatik	22.6	4.45-4.88	
Hassanpour ve ark. 2011	Çift kalkanlı, Kalkansız	Karışık	56.4	4.53-10.05	
Farrokh ve ark. 2012	Çeşitli	Karışık	73.6	3.84-11.8	Çeşitli

Çizelge 2.10. Projelerin veri tabanına dayalı ampirik tahmin modelleri (Brino 2015; Nuti 2017).

Yazarlar	Eşitlik
Alber 1996	Şekil 2.43
Alvarez 2000	$ROP = \frac{w_1.ROP_1 + w_2.ROP_2 + w_3.ROP_3 + w_4.ROP_4}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4}$
Yağız 2008	$ROP = 1.093 + 0.029 * PSI - 0.003\sigma_c + 0.437 * \log(a) - 0.219J_s$
Gong ve Zhao, 2009	$FPI = 37.06\sigma_c^{0.26} * BI^{-0.10} * \left(0.84e^{-0.05J_v} + e^{-0.09\sin(a+30)}\right) * PR^{-0.75}$
Hassanpour ve ark. 2011	$FPI = \exp(0.008\sigma_c + 0.015RQD_c + 1.384)$
Farrokh ve ark. 2012	$PR = \exp(0.41 + 0.404\Phi_{TBM} - 0.027\Phi_{TBM}^2 + 0.0691RT_c - 0.00431\sigma_c + 0.0902RQD_c + 0.000893F_N$

Alber, 1996

Alber (1996), farklı TBM'ler ve aşağıdaki özelliklerle 110 km'lik TBM tünel analizinden elde edilen denklemleri türetmiştir.

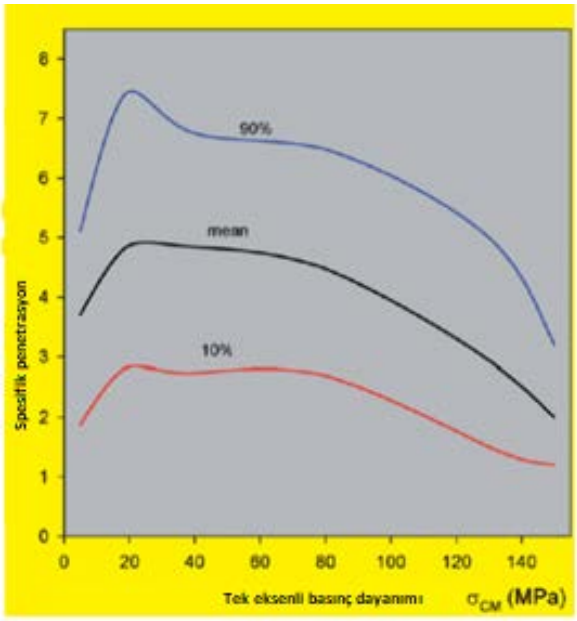
- $\sigma_c = 20 - 320$ MPa (bozunmamış kayanın tek eksenli basınç dayanımı)
- $\sigma_{cm} = 1 - 160$ (kaya kütlesinin tek eksenli basınç dayanımı)
- $\Phi_{TBM} = 2.9 - 6.5$ m
- $\Phi_{disk} = 15 - 19$ inç
- $v_{rot} = 2.3 - 10$ rpm
- Örnekler; kumtaşı, çamurtaşı, kireçtaşı, doloston, dolomitik şeyl, şeyl, bazalt, dolarit.

Yazar özellikle σ_{cm}'den türetilmiş spesifik penetrasyon (SP) ve TBM kullanım faktörü (UF) olmak üzere, jeolojik ve performans parametreleri arasındaki ilişkiyi ve tek

eksenli kaya basınç dayanımı ile kayma gerilmesi arasındaki oran olarak tanımlanan Stabilite Tahminini (SE), elde etmiştir (Alber ve Ruhl 2005).

$$SE = \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_\theta} = \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_v * (3k-1)} \tag{2.74}$$

Kayma gerilmesi σ_θ Kirsch eşitliğinden tahmin edilebilirken jeomekanik parametreler Hoek-Brown kriterinden türetilebilir (Hoek ve Brown 1980).



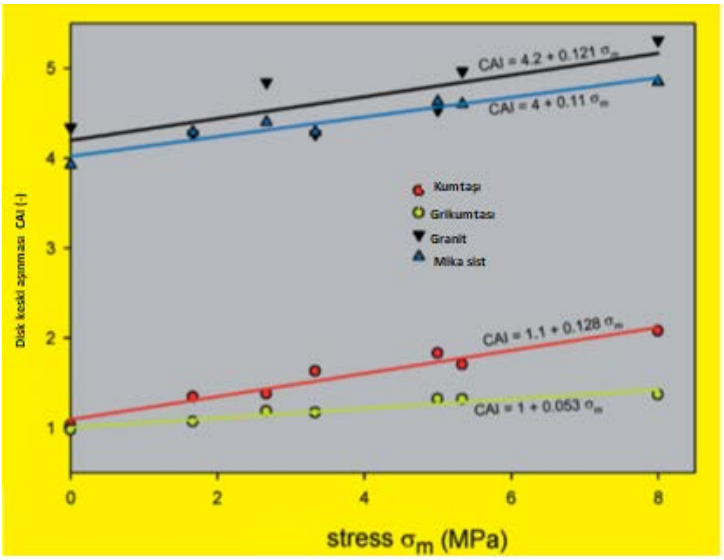
Şekil 2.43. σ_{cm}' nin bir fonksiyonu olarak SP (17 inç disk) (Alber 1996).

$$\sigma_{cm} = \sigma_c * \sqrt{s} \tag{2.75}$$

$$s = exp\left(\frac{RMR_{TBM}-100}{9}\right) \tag{2.76}$$

$$RMR_{TBM} = 0.84RMR + 21 \tag{2.77}$$

Şekil.2.43'te gösterildiği gibi, tek eksenli basınç 20 MPa'dan küçükse, spesifik penetrasyon azalır. Düşük σ_{cm} değerlerinde, kaya kütlesi zayıf ve kırıklı yapıda olduğundan düşük SP değerlerine neden olabilir. Disk keski aşınması CAI ve stres durumu arasındaki ampirik bir korelasyon yoluyla tahmin edilmiştir, ki buradan CAI_p denilen ve laboratuar testlerinden elde edilen düzeltilmiş bir değer elde edilebilir (Şekil 2.44).



Şekil 2.44. Farklı kaya tipleri için ortalama stresin bir fonksiyonu olarak CAI (Alber 1996).

Model strese bağlı CAI değerini, sayısal modelleme ile hesaplanmış aynadaki ortalama gerilme ile birlikte, [mg/m] cinsinden ifade edilen spesifik halka tüketimini (v_s) Gehring denklemi ile tahmin etmek için kullanır (Alber 1996).

$$v_s = 0.74 * (CAI_{mod})^{1.93} \tag{2.78}$$

Burada; CAI_{mod} ortalama stresin bir fonksiyonu olarak CAI'dır ve Çizelge 2.11'den elde edilebilir.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_v + 2\sigma_\theta}{3} \tag{2.79}$$

Çizelge 2.11. Farklı kayalar için ortalama ortalama stres σ_m foksiyonu olarak CAI (Alber 1996).

Kaya tipi	**Eşitlik**
Granit	$CAI_{mod} = 4.2 + 0.121\sigma_m$
Grovak	$CAI_{mod} = 1 + 0.053\sigma_m$
Mika şist	$CAI_{mod} = 4 + 0.11\sigma_m$
Kumtaşı	$CAI_{mod} = 1.1 + 0.128\sigma_m$

Alverez ve ark., 2000

Alvarez ve ark. (2000) tarafından yapılan çalışma, TBM performans tahmininde nöro-bulanık modellemenin ilk örneklerinden biridir. Geri yayılım algoritmasına dayanan nöro-bulanık modellerde, veri kümeleri analiz edilir ve ilgili koşullar sağlandığında özel bir denklem kullanılır (Eğer x A ve y B ise, o zaman A ve B'nin veri kümeleri olduğu z = f (x, y))

Bulunan denklemler dizisi aşağıdaki gibidir (CFF Çekirdek Kırılma Frekansı kodu, yani J_s'lerin tersidir, Çizelge 2.12):

$$ROP_1 = -0.72CFF - 0.01\sigma_c + 0.10\nu_{rot} + 0.001F_N + 0.006\Phi_{disc} + 0.93 \quad (2.80)$$

$$ROP_2 = -1.95CFF + 0.05\sigma_c + 0.13\nu_{rot} + 0.03F_N + 0.04\Phi_{disc} - 24.65 \quad (2.81)$$

$$ROP_3 = -9.63CFF + 0.13\sigma_c + 3.33\nu_{rot} + 0.05F_N - 0.009\Phi_{disc} + 1.31 \quad (2.82)$$

$$ROP_4 = -1.45CFF + 0.06\sigma_c + 1.94\nu_{rot} + 0.35F_N - 0.26\Phi_{disc} - 8.08 \quad (2.83)$$

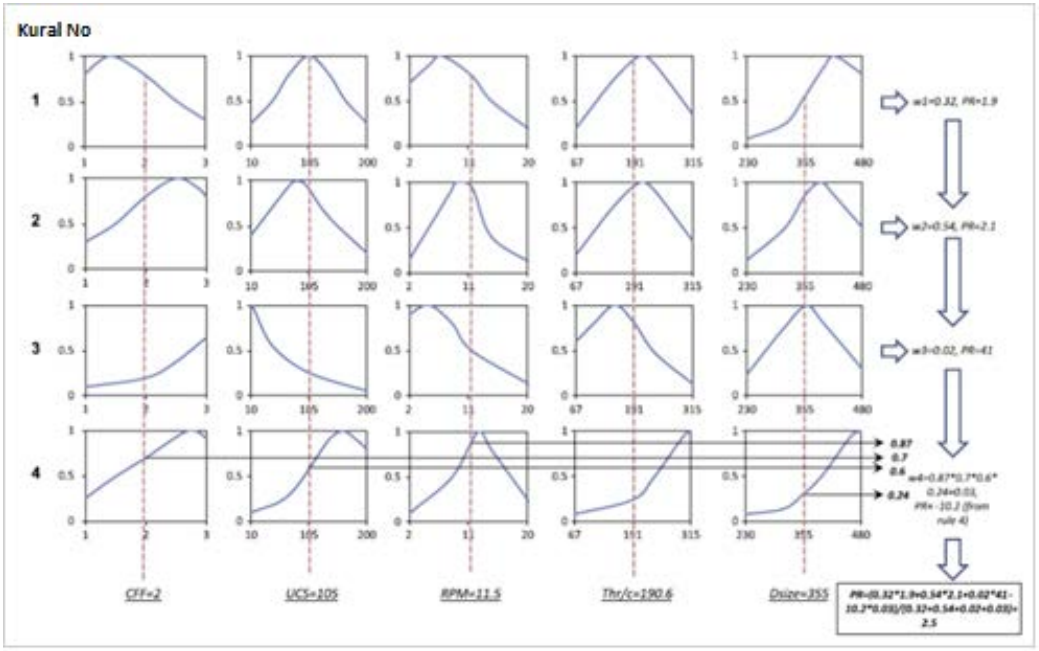
Çizelge 2.12. CFF kodu (Alvarez ve ark. 2000).

Sıklık (çatlak sayısı/m)	**CFF kodu**
<8	1
8-12	2
12-16	3

Yazar modeli kalibre etmek için bir dizi ağırlık fonksiyonu önermiştir. Böylelikle ROP ağırlıklı ortalama olarak bulunabilmektedir:

$$ROP = \frac{w_1.ROP_1 + w_2.ROP_2 + w_3.ROP_3 + w_4.ROP_4}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4} \quad (2.84)$$

Burada, w_i ağırlık fonksiyonları olup Şekil.2.45'te verilen her bir faktöre karşılık gelen ağırlıkların çoğaltılmasıdır.



Şekil 2.45. Ağırlık fonksiyonları kullanılarak yapılan ROP hesaplaması (Farrokh ve ark. 2012).

Yağız, 2008

Yazarın çalışması 7.06 m çaplı bir TBM açılan 7.5 km uzunluğundaki Queens Su Tüneli (New York, ABD)'nden alınan verilere dayanmaktadır. Jeoloji gnays, mika şist, aynı zamanda bazı mermer yataklarını içeren metamorfik ve magmatik kayaçlardan oluşmaktadır. Örneklerin tek eksenli basınç dayanımları 110-210 MPa arasında değişirken çekme dayanımları ise 6-12 MPa arasındadır. Yağız (2008), kaya kırılganlığını anlamak için ek bir parametre olarak Peak Slope Index'i (PSI) kabul etmiştir. Bu parametre laboratuvar testindeki numuneye uygulanan maksimum yük ile delme deney cihazı ile elde edilen yer değiştirme ([kN / mm] cinsinden) arasındaki oran olarak tanımlanır:

$$PSI = \frac{F_{max}}{\upsilon_{max}} = \frac{\sigma_c.A}{\epsilon.L} = E.\frac{A}{L} \quad (2.85)$$

Başka bir çalışmada Yağız (2009), PSI'yi σ_c, $\sigma_t$ve ρ 'ye bağlı olarak aşağıdaki gibi elde etmeyi önermiştir:

$$PSI = 0.198\sigma_c - 2.174\sigma_t + 0.193\rho.g - 3.807 \quad (2.86)$$

$r^2 = 0.82$ olduğunda bulunan eşitlik

$$ROP = 1.093 + 0.029PSI - 0.003\sigma_c + 0.437\log(a) - 0.219J_s \quad (2.87)$$

Burada; PSI [kN/mm], J_s [m], ROP [m/h], σ_c ve σ_t [MPa], a [^{0}] cinsinden verilmiştir.

4. Gong ve Zhao, 2009

Gong ve Zhao (2009), analizlerini Singapur'daki Derin Tünel Kanalizasyon Sistemi (DTSS) projesi, atık su iletimi ve arıtma tüneli üzerinde gerçekleştirmişlerdir. İki adet EPB-TBM ile toplam 22.2 km tünel kazısı yapılmış TBM çapı, keski sayısı ve keskiler arası mesafe ilk EPB-TBM için sırasıyla; 4.88 m, 35, 100 mm iken ikinci EPB-TBM için yine sırasıyla; 4.45 m, 29, 90 mm olmuştur.

Veri kümesi ise şunlardan oluşur; (Gong ve Zhao 2007)

- Saha araştırma verileri,
- Kaya yüzeyi haritalama,
- Sodaj verileri,

- Yerinde testler,
- TBM performans verileri,
- TBM makine verileri

Yazarların inceledikleri litoloji hem kaya hem de zemin özelliği gösteren karışık birimlerden oluşmaktadır. Kaya kütlesinin delinebilirliği (FPI) analizi için yazarlar şu ilişkiyi önermiştir:

$$FPI = FPI_{1mm} * PR^{-0.75} \quad (2.88)$$

Burada; FPI_{1mm} devir başına 1 mm'lik bir penetrasyon oranı (PR) değerinde FPI'dır. Doğrusal olmayan regresyon analizinden aşağıdaki denklem elde edilmiş ve r^2=0.75 olmuştur. (Gong ve ark. 2007)

$$FPI_{1mm} = 37.06\sigma_c^{0.26} * BI^{-0.10} * \left(0.84e^{-0.05J_v} + e^{-0.09\sin(a+30)}\right) \quad (2.89)$$

Buradan;

$$FPI_{1mm} = 37.06\sigma_c^{0.26} * BI^{-0.10} * \left(0.84e^{-0.05J_v} + e^{-0.09\sin(a+30)}\right) * PR^{-0.75} \quad (2.90)$$

Modelin ana eksiklikleri, kesici kafadaki gerilme dağılımı, makine parametreleri ve litoloji sabit olarak kabul edilmiş ve in-situ gerilim durumu ve yeraltı suyu varlığı modelde dikkate alınmamış olmasıdır (Brino 2015).

5. Hassanpour ve ark., 2011

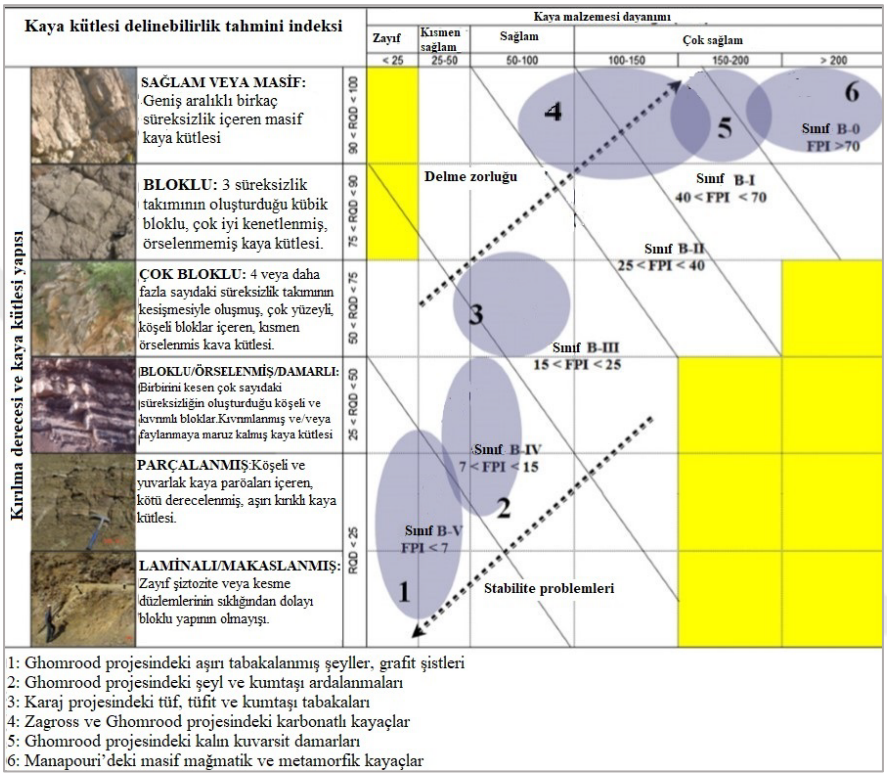
Yazarların çalışmaları 1997 ve 2011 yılları arasında toplam 56,4 km uzunluğunda ve aşağıdaki özelliklere sahip olan; İran'da üç, Yeni Zellanda'da bir tünel projesine dayanır.

- Üç çift kalkan ve bir açık TBM
- σ_c = 15-225 MPa
- TBM çapı 4.53-10.05 m
- Kayaç tipi; kireçtaşı, şeyl ve kumtaşı, arduvaz, fillit, kuvarsitik damarlar, tüfler, aglomera, gnays, sokulum kayaçlar ile şist.

$r^2 = 0.785$ olacak şekilde aşağıdaki denklemi önermişlerdir.

$$FPI = \exp(0.008\sigma_c + 0.015RQD + 1.384) \quad (2.91)$$

Yazarlar, yeni bir proje için tasarlanan zemin penetrasyon indeksi (FPI) değerinin tahminini hesaplayabilmek için σ_c ve RQD'ye dayalı bir grafik önermiştir (Şekil 2.46). Tasarım değeri Çizelge 2.13'te verilmiştir (Hassanpour ve ark. 2011).



Şekil 2.46. Kaya kütle özelliklerinden FPI tahmini (Hassanpour ve ark. 2011).

Çizelge 2.13. Dizayn parametreleri.

Parametre	**Sınıf**					
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
Kaya kütlesi						
Delinebilirlik	B-0	B-I	B-II	B-III	B-IV	B-V
σ_c [MPa]	210	160	100	75	50	30
RQD [%]	100	100	80	60	40	20
Makine						
F_N[kN/disk]			200			
ν_{rot} [rpm]			7			
U [%]			25			
Tahmini						
FRI [kN/disk/mm/rev]	96	64	29	18	11	7
PR [mm/rev]	2.08	3.11	6.78	11.18	18.44	29.20
ROP[m/saat]	0.88	1.31	2.85	4.70	7.74	12.27
AR [m/gün]	5.3	7.8	17.1	28.2	46.5	73.6

6. Farrokh ve ark. 2012

Farrokh ve ark. (2012)'nın çalışması büyük bir değişkenlik gösteren koşullar ve TBM parametreleri ile toplam 73.6 km tünel uzunluğuna ulaşan 17 farklı projeden toplanan bir veri tabanına dayanmaktadır. Çalışmanın ana özellikleri şunlardır:

- 6 çift kalkan, 7 açık, 2 tek kalkan, 2 mix ve 2 çamur basınçlı TBM,
- TBM çapları 3.84-11.8 m,
- Kafa dönüş hızı 6-11 rpm,
- Kireçtaşı, şeyl ve kumtaşı, arduvaz, fillit, kuvarsitik damarlar, tüfler, aglomera, gnays, sokulum kayaçlar, dolomit, argillit, granit ile şist.

$r^2 = 0.63$ olacak şekilde aşağıdaki denklemi önermişlerdir.

$$PR = \exp(0.41 + 0.404\Phi_{TBM} - 0.027\Phi_{TBM}^2 + 0.0691RT_c - 0.00431\sigma_c + 0.0902RQD_c + 0.000893F_{N)} \quad (2.92)$$

RT_c kaya tipi sayısal kodu (Çizelge 2.14), RQD_c ise RQD sayısal kodudur (Çizelge 2.15)

Çizelge 2.14. Kaya tipi kod (Farrokh ve ark. 2012).

Kaya tipi	Kod	RT_c değeri
Kiltaşı, çamurtaşı, marn, kayrak, fillit, argillit	C	5
Kumtaşı, silttaşı, konglomera, kuvarsit	S	3
Kireçtaşı, tebeşir, dolomit, mermer	L	3
Karstik kireçtaşı	K	3
Gnays ve şist gibi metamorfik kayaçlar	M	2
Bazalt, tüf ve andezit gibi ince volkanik kayaçlar	V	2
Granit ve diyorit gibi iri magmatik	G	1

Çizelge 2.15. RQD kodu (Farrokh ve ark. 2012).

Çatlak aralığı J_s [cm]	RQD değeri	RQD_c değeri
> 12.5	100	1
8.5-12.5	0-90	2
6-8.5	≤60	3

2.7.2.3. Kaya Kütlesi Sınıflamasına Dayalı Yöntemler

Birçok model; Kaya Kütle Derecelendirme (RMR), Kaya Kitle Kalitesi İndeksi (Q ve QTBM) ve Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) gibi sınıflandırma sistemlerine dayanmaktadır. Farklı araştırmacılar, esas olarak kabul ve dünya çapında tanınmaları

nedeniyle bu sınıflama sistemleri ile performans arasındaki ilişkiyi bulmaya çalışmışlardır.

Temel modeller aşağıda belirtilmiştir:

- Cassinelli ve ark. (1982); 1974 yılında Wickham tarafından tünel açmada çelik bağların tasarlanması için geliştirilen Kaya Yapı Değerlendirmesi (Rock Structure Rating-RSR) kütle sınıflandırmasından başlayarak bir model geliştirmiştir:

$$ROP = -0.0059RSR + 1.59 \quad (2.93)$$

$$RSR = 0.77RMR + 12.4 \quad (2.94)$$

- Innaurato ve ark. (1990-1991) tek eksenli bozulmamış kaya basınç dayanımına bağlı olarak aşağıdaki eşitlikleri ortaya koymuşlardır:

$$PR = 40.41\sigma_c^{-0.437} - 0.047RSR + 3.15 \quad (2.95)$$

$$UF = -4 * 10^{-6}RMR^3 + 5.7 * 10^{-4}RMR^2 - 1.4 * 10^{-2}RMR + 0.18 \quad (2.96)$$

- Barton'ın, (2000) delme patlatma yöntemi ile açılan tüneller için geliştirilmiş Q sisteminden modifiye edilmiş Q_{TBM} modeli; tünel açma performansını tahmin etmek için kullanılan Kaya Kalitesi İndeksi'nin uyarlamasıdır.

$$ROP = 5 * Q_{TBM}^{-0.2} \quad (2.97)$$

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_0}{J_n} * \frac{J_r \cdot J_w}{j_a SRF} * \frac{20^9 SIGMA}{F^{10}} * \frac{20}{CLI} * \frac{q}{20} * \frac{\sigma_c}{5} \quad (2.98)$$

Burada;

- RQD_0 Kaya kalite değeri, %
- J_n, J_r, J_w, j_a, SRF orijinal Q parametreleridir. Bunlar eklem veya yapraklanma sistemlerinin frekansını, pürüzlülüğünü, yönünü ve ufalanmasını ve stres durumunu tanımlamak için kullanılır.
- F ortalama keski yüküdür, [tnf] cinsinden ifade edilir.
- $SIGMA$ kaya kütlesi dayanımını tanımlayan bir parametredir.

$$SIGMA = 5\gamma Q_c^{1/3} \quad (2.99)$$

$$Q_c = Q * \frac{\sigma_c}{100} \quad (2.100)$$

- Kesici ömrü indeksi (CLI) NTNU modeli ile ifade edilmiştir.
- Q kuvars içeriği,
- n porozite,

- σ_Θ kayma gerilmesidir.

Barton ilerleme oranı tahmininde de bulunmuştur:

$$AR = ROP^{\frac{2m+1}{m}} * L^{\frac{m}{m+1}} \quad (2.101)$$

Burada tünel uzunluğu metre cinsinden m, aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$m = m_1 \left(\frac{\Phi_{TBM}}{5}\right)^{0.20} * \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0.15} * \left(\frac{Q}{20}\right)^{0.10} * \left(\frac{n}{2}\right)^{0.05} \quad (2.102)$$

$Q \leq 0.1$ ise;

$$m_1 = -0.9 + 0.2 * (3 + log_{10}Q) \quad (2.103)$$

$0.1 < Q \leq 1$ ise;

$$m_1 = -0.5 + 0.3 * (1 + log_{10}Q) \quad (2.104)$$

$Q \geq 1$ ise;

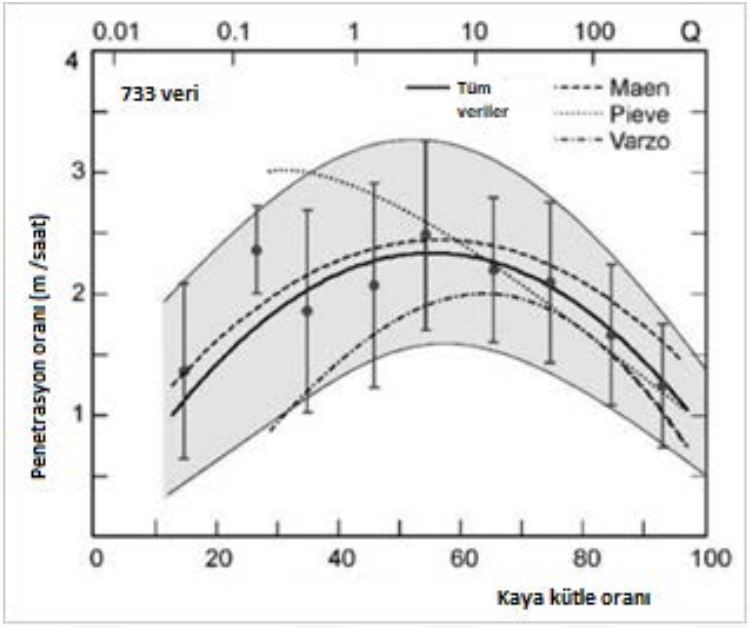
$$m_1 = -0.2 \quad (2.105)$$

- Ribacchi ve Lembo Fazio (2005), litolojisi gnays olan Varzo hidrolik tünelinden elde edilen verilerin analizine dayanan bir model geliştirdiler. Yazarlar aşağıdaki denklemi temel alan bir model geliştirmişlerdir.

$$SP = 250 * \sigma_{cm}^{-0.66} \quad (2.106)$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_c * \sqrt{exp\left(\frac{RMR-100}{18}\right)} \quad (2.107)$$

Varzo tünelinden elde edilen verilerle yapılan başka bir çalışmada (Sapigni ve ark. 2002), yazarlar, en iyi performansların RMR değeri 40-70 aralığında kaydedildiğini, hem çok kötü (RMR <30-40) hem de çok iyi (RMR> 70-80) kaya kütlelerinde ise daha düşük penetrasyonların yaşandığı sonucuna varmışlardır (Şekil 2.47).



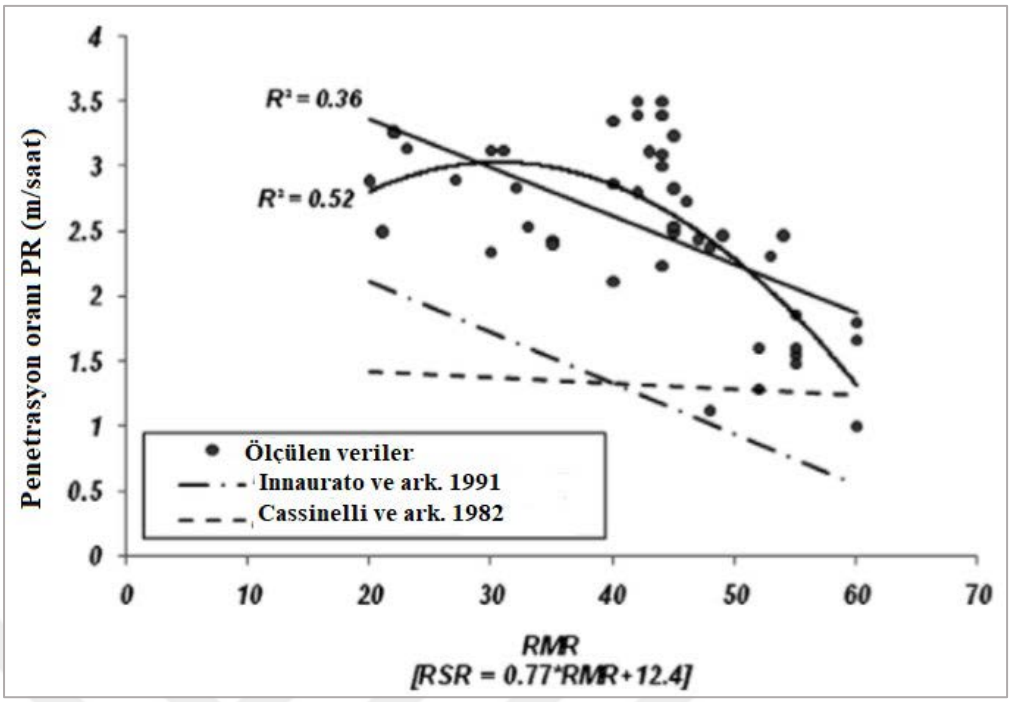
Şekil 2.47. ROP ve RMR arasındaki ilişki (Sapigni ve ark. 2002).

- Hamidi ve ark. (2010), modellerini, İran'ın batısındaki Zagros uzun su iletim tüneli projesi sırasında toplanan verilerden yola çıkarak oluşturmuşlardır. Yazarların veri seti, saha inceleme verileri, sondaj verileri, TBM performansı ve makine verisinden oluşmaktadır. Litolojisi değişken olmakla beraber esas olarak tortul kayaçlar, şeyl ve kireçtaşlarından oluşmaktadır.

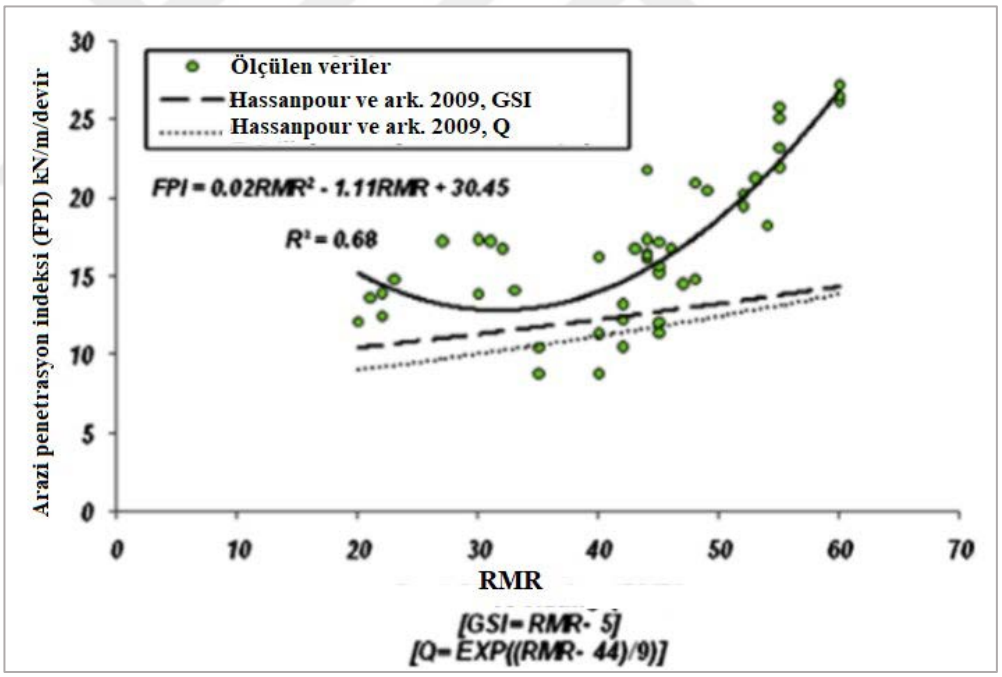
Kaya kütlesinin delinebilirliği için yazarlar tarafından önerilen ilişki aşağıda verilmiştir ($r^2 = 0.76$).

$$FPI = 9.401 + 0.397log_a + 0.011J_c^2 + 1.14 * 10^{-5} * RQD^3 + 1.32 * 10^{-8} * \sigma_c^4 \quad (2.108)$$

Çalışmada kaya kalitesinin artması ile kayanın geçirgenliğinin azaldığı vurgulanmıştır. Bu eğilim; hem σ_c hem de J_s parametrelerinin yüksek olmasından kaynaklıdır. Bu etki Şekil 2.48 ve 2.49'da verilen yazarlara ait çalışmadan görülebilir.



Şekil 2.48. RMR'nin bir fonksiyonu olarak penetrasyon oranı (Hamidi ve ark. 2010).



Şekil 2.49. RMR'ın bir fonksiyonu olarak FPI (Hamidi ve ark. 2010).

- Hassanpour ve ark. (2011), FPI ve özellikle RMR olmak üzere farklı taş kütle sınıflamaları arasında ilginç korelasyonlar bulmuşlardır.

$$FPI = 0.053BRMR^2 - 4.205BRMR + 92.068 \quad (2.109)$$

$$FPI = 4.619 * e^{0.023GSI} \quad (2.110)$$

$$FPI = 15.309 * Q^{0.304} \quad (2.111)$$

2.8. Farklı Modellerin Karşılaştırılması

Bu bölümdeki çizelgelerde 15 farklı modele ait parametreler özetlenmiş; hangi modelin hangi verileri kullandığı ve elde edilen eşitlikler bir arada gösterilmiştir. Çizelge 2.16'da modellerin tanımlandığı veri tabanlarının özellikleri; Çizelge 2.17'de kaya kütle sınıflandırmasına dayalı ampirik tahmin modelleri özetlenmiştir.

Çizelge 2.16. Modellerin tanımlandığı veri tabanlarının özellikleri (Brino 2015; Nuti 2017).

Yazarlar	TBM	Tünel uzunluğu [km]	TBM çapı	Disk çapı
Cassinelli ve ark. 1982	Açık	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Innaurato ve ark. 1991	Açık	19	<4	15
Barton, 2000	mix.	>1000	2-12	15/17
Ribacchi, Lembo F., 2005	Çift kalkanlı	4.5	3.84	
Hamidi ve ark. 2010	Çift kalkanlı	8.5	6.73	
Hassanpour ve ark. 2011	Çift kalkanlı, açık	6.4	4.53-0.05	

Çizelge 2.17. Kaya kütle sınıflandırmasına dayalı ampirik tahmin modelleri (Brino 2015; Nuti 2017).

Yazarlar	Eşitlik
Cassinelli ve ark. 1982	$ROP = -0.0059RSR + 1.59$
Innaurato ve ark. 1991	$PR = 40.41\sigma_c^{-0.437} + 0.047RSR + 3.15$
Barton, 2000	$ROP = 5Q_{TBM}^{-0.2}$
Ribacchi, Lembo F., 2005	$SP = 250\sigma_{cm}^{-0.66}$
Hamidi ve ark. 2010	$FPI = 9.401 + 0.397log_a + 0.011J_c^2 + 1.14 * 10^{-5} * RQD^3 + 1.32 * 10^{-8} * \sigma_c^4$
Hassanpour ve ark. 2011	$FPI = 0.053BRMR^2 - 4.205BRMR + 92.068$ $FPI = 4.619 * e^{0.023GSI}$ $FPI = 15.309 * Q^{0.304}$

Çizelge 2.18'den görülebileceği gibi bütün modeller performansı tahmin etmeye çalışmış, yalnızca dört model aynı zamanda keski tüketimi üzerine tahminde bulunmuştur. Bununla beraber CSM modeli dizayn aşamasında faydalı olabilecek tork, itme kuvveti ve kesici kafa gücü gibi makine parametreleri üzerine de yoğunlaşmıştır.

Çizelge 2.18. Tahmin modelleri özeti: tahmin edilen parametreler (Brino 2015; Nuti 2017).

Model	Tahmin edilen parametreler		
	Performans	**Keski tüketimi**	**Makine parametreleri**
CSM	+	+	+
Gehring	+	+	
NTNU	+	+	
Alber	+	+	
Yağız	+		
Gong, Zhao	+		
Farrokh ve ark.	+		
Alvarez G. ve ark.	+		
Cassinelli ve ark.	+		
Innaurato ve ark.	+		
Barton	+		
Ribacchi, Lembo	+		
Hamidi	+		
Hassanpour ve ark.	+		

Çizelge 2.19 ve Çizelge 2.20'de görüldüğü gibi tahmin modellerinde en çok değerlendirilen jeolojik parametreler; σ_c, J_s ve a parametreleri olmuştur. Bunları litoloji, σ_t ve RQD takip etmektedir. İncelenen diğer parametreler CAI, kuvars içeriği, GSI, porozite, kırık çatlak yapıları olmuştur.

Çizelge 2.19. Tahmin modelleri özeti: kaya parametreleri (Brino 2015; Nuti 2017).

Model	Sağlam kayaç parametreleri					
	Litoloji	$\boldsymbol{\sigma_c}$	$\boldsymbol{\sigma_t}$	$\boldsymbol{CAI}$	$\boldsymbol{q}$	**ρ**
CSM	+	+	+	+	+	
Gehring		+		+		
NTNU	+	+		+	+	
Alber	+	+		+		
Yağız		+	+			+
Gong, Zhao		+	+			
Farrokh ve ark.	+	+				
Alvarez G. ve ark.		+				
Cassinelli ve ark.		+				
Innaurato ve ark.		+				
Barton						
Ribacchi, Lembo		+				
Hamidi						
Hassanpour ve ark.	+	+				

Çizelge 2.20. Tahmin modelleri özeti: kaya kütle parametreleri (Brino 2015; Nuti 2017).

Model	Kaya kütle parametreleri							
	J_s	RQD	J_w	J_c	a	σ, w	n	GSI
CSM	+				+			
Gehring	+				+			
NTNU	+				+		+	
Alber						+		+
Yağız	+				+			
Gong, Zhao	+				+			
Farrokh ve ark.	+							
Alvarez G. ve ark.	+							
Cassinelli ve ark.	+	+	+		+	+		
Innaurato ve ark.	+	+	+		+	+		
Barton	+	+	+		+	+		
Ribacchi, Lembo								+
Hamidi		+			+			
Hassanpour ve ark.	+	+	+		+	+		+

Modellerde değerlendirilen disk ve kesici kafa parametreleri Çizelge 2.21'de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi CSM, NTNU ve Gehring modelleri en eksiksiz olanlardır.

Çizelge 2.21. Tahmin modelleri özeti: disk ve kesici kafa parametreleri (Brino 2015; Nuti 2017).

Model	Disk				Kesicikafa			
	F_N	Φ_{disk}	ω_{tip}	v_{lim}	Φ_{TBM}	n_{cut}	S_{cut}	v_{rot}
CSM	+	+	+	+	+	+	+	
Gehring	+	+						+
NTNU	+	+			+	+	+	+
Alber								
Yağız								
Gong, Zhao								
Farrokh ve ark.	+				+			
Alvarez G. ve ark.	+	+						+
Cassinelli ve ark.								
Innaurato ve ark.								
Barton	+				+		+	
Ribacchi, Lembo								
Hamidi								
Hassanpour ve ark.								

2.9. TBM Performansı Üzerine Yapılmış Tez Çalışmaları

Feridunoğlu (2001), "Tarabya Atıksu Tünelinde Kullanılan Tam Cepheli Tünel Açma Makinesinin S13-S10 Şaftları Arasındaki Performansının İncelenmesi" adını taşıyan çalışmada TBM performansını incelemiştir. Çalışmada tünel açılacak bölgenin jeolojisi, tam cepheli tünel açma makinesinin teknik özellikleri, tahkimat sistemi ve ölçme sistemi anlatılmıştır.

Poşluk (2002), "Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 26 Nolu Tünelin TBM Kazı Performansının QTBM Metodu ile Tahmini" isimli çalışmasında; adı geçen tünelin inşasını yapacak olan TBM'in kazı performansının önceden tahmin edilmesini amaçlayarak QTBM yöntemini kullanmıştır.

Çilsal (2003), "Ankara Metrosu 3. Aşama Projesinde TBM İle Açılan Tünellerin Duraylılığının Analizi" isimli çalışmada, Eryaman tünellerinin duraylılığı açısından TBM ile kazının performansını jeoteknik ölçümlerle incelenmiş, aynı jeolojik formasyonda Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ile tünel kazısı gerçekleştirilen Ankara Hafif Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesi (ANKARAY) içerisinde yer alan Demirtepe-Kızılay delme tünellerindeki jeoteknik ölçümlerin, Eryaman Delme tünellerindeki jeoteknik ölçümler ile karşılaştırmış ve bu analizler neticesinde TBM ile açılan tünellerdeki zeminin daha duraylı olduğunu ortaya koymuştur.

Özbaş (2007), "Tandoğan-Keçiören Metro Tünelinin Mecidiye-Tandoğan Kısmında TBM-EPB ile Kazılabilme Güçlüğünün CBS Tabanında Belirlenmesi" isimli çalışmasında geçilecek litolojik birimler içinde TBM-EPB performansını belirlemek için jeolojik etütler, sondajlar, yerinde ve laboratuar deneyleri, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve istatistik yöntemleri kullanmıştır. Tünel kazma çalışmaları boyunca jeolojik, hidrojeolojik ve jeoteknik koşulların TBM performansı üzerinde önemli etkileri olduğunu vurgulamıştır.

Hajebi (2008), "TBM ile Açılan İkiz Tüneller Çevresinde Gözlenen Oturma ve Deformasyonlar" isimli çalışmasında, İstanbul'da EPB ile açılan ikiz metro tünelleri inşası sırasında civar zemin ve yapılarda meydana gelen deformasyonların aletsel gözlemlerden alınan ölçümleri değerlendirmiş, göz önüne alınan tünel güzergahı boyunca önemli bir geoteknik sorun ile karşılaşılmadığını gözlemlemiştir. Tünel inşaatı

dolayısıyla meydana gelen zemin kayıpları ve yüzey oturmaları projede öngörülen sınırlar içinde kalmış olup tüm güzergah boyunca kuramsal değerlerin üzerinde arın basınçları uygulanmıştır.

Erguner (2008), "Marmaray Projesi ve Çamur Sistemli Tünel Açma Makinasının Performans Analizi" isimli çalışmasında adı geçen projede kullanılan tünel açma makinasının seçimi ve seçilen çamur sistemli makina hakkında bilgi ve kazı tekniği hakkında bilgiler vermiş, makinanın mekanik verilerini değerlendirmiştir.

Doğruoğlu (2009), "TBM Metodu ile Açılan İkiz Tünellerde Meydana Gelebilecek Deformasyonların Sonlu Elemanlar Metodu ve Numerik Hesaplarla Tahmini" adlı çalışmada zemin ortamlarında açılan şehir içi tünellerde oluşan zemin yer değiştirmeleri ve düşey deplasmanları incelemiştir.

Çimentepe (2010), "TBM İç Kaplama Segmanlarının Tasarımında Kullanılan Yapısal Analiz Metotlarının Değerlendirilmesi" isimli çalışmasında elastik denklem metodu ile iki boyutlu ve üç boyutlu çubuk ve yay metotlarını içeren farklı hesaplama yöntemleri incelemiş; betonarme segmanların niteliklerine ilaveten, boyuna ve dairesel yöndeki düğüm noktalarının mekanik ve geometrik özelliklerinin de segmanların yapısal davranışında önemli etkileri olduğunu göstermiştir.

Aksu (2010), "Zemin Şartlandırmanın Pasa Basınçlı (EPB) TBM'in Performansına Etkisi" olarak adlandırdığı çalışmasında kimyasal katkılar yoluyla zemin şartlandırmanın Pasa Basınçlı TBM performansına etkilerinin belirlenmesini amaçlamış ve belirlenen bir tünelden laboratuvarda incelemek ve özelliklerini tespit etmek üzere formasyon numuneleri temin etmiş ve zemin mekaniği deneyleri yaparak özellikleri belirlenen numunelere uygun zemin şartlandırıcı kimyasal hazırlamış ve performansa etkilerini incelemiştir.

Seven (2010), "TBM Projelerinde Zorlu Zemin Koşullarında Ön ve Sonradan Enjeksiyon Uygulamaları, Türkiye'den İki Farklı Örnek Uygulama" isimli çalışmasında, farklı TBM projelerinde yaşanan özel jeolojik şartların aşılmasına yönelik teknoloji ve metodları, sorunla karşılaşıldıktan sonra operasyonu kolaylaştırmaya yönelik makinalarda yapılabilecek iyileştirme ve modifikasyonları incelemiştir.

Caner (2010), "Sıkışan Zeminlerde Tam Cepheli Tünel Açma Makinelerinin Performans Analizi ve Uluabat Kuvvet Tüneli Örneği" isimli çalışmada, tünel kazısı

süresince, 18 adet şilt sıkışması problemini incelemiştir. Çalışmada bu sıkışma dönemlerindeki itme kuvveti, tork, tork/itme kuvveti oranı, spesifik enerji ve kesme derinliği verileri analiz edilmiş, sıkışmanın önceden tahmin edilebilirliği tartışılmıştır. Şilt ile zemin arasına sabit debi ve basınçta bentonit enjeksiyonun sıkışan zeminlerdeki etkileri ele alınmıştır. Buna göre, kazı sırasında uygulanan bentonit enjeksiyonunun sıkışma olasılığını minimum seviyede tutuğu gözlemlenmiştir.

Arıoğlu (2010), "Tünel Açma Makinelerinin (Tbm) Performansına Etki Eden Etkenler Ve Kadıköy Kartal Tünelinde Kullanılan TBM'in Performansının Arazi Penetrasyon İndisi ile Kestirilmesi" isimli çalışmada sağlam kaya tünel açma makinelerinin (açık mod TBM'lerin) performanslarına etki eden faktörleir araştırmış ve bunların TBM'nin performansın nasıl etkilediğini ortaya koymaya çalışmıştır. Bu kapsamda değişen formasyon şartlarında sağlam kaya TBM'lerin performanslarının tahminine yönelik çeşitli performans tahmin yöntemleri, arazi penetrasyon indeksi (FPI) cinsinden verilmiş ve bu indeksin kullanılması sonucu benzer formasyonlarda benzer değerlerin elde edildiği görülmüştür.

Avunduk (2011), "Kadıköy-Kartal Metrosunda Zor Jeolojik Koşullarda Kullanılan EPB-TBM İn Performans Analizi" isimli çalışmasında zor zemin şartlarının pasa basınçlı (EPB) TBM'in performansına etkilerinin araştırılmasını amaçlayarak TBM ile tünel kazısında sorun yaratacak bölgeleri tespit etmiş, stabilite problemleri yaşanabilecek bölgeler için TBM karşıt ayna basıncı hesaplamalarını yapmıştır. Çalışmada karşılaşılan problemlerin ve TBM performansını etkileyen parametrelerin başında jeolojik koşulların geldiği tespit edilmiştir.

Yurtaydın (2011), "İstanbul'daki İki Tünelde TBM Performansları Ve Kaya Kütle Sınıflandırmasının Etkisi" isimli çalışmada, iki farklı projede çok benzer özellikli tünel açma makinelerini genel olarak karşılaştırmış, farklı jeolojik koşulların, tünel açma makinelerinin ilerleme hızı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Çalışmada; jeolojik koşulların makine parametreleri ve malzeme tüketimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Gürkan (2011), "İSKİ Avrupa Yakası 2. Kısım Yenikapı Atıksu Tünelinde Kullanılan EPM-TBM'in S6 - S7 Kuyuları Arasındaki Performansının İncelenmesi" adını verdiği çalışmasında projede kullanılan EPB TBM'in performans parametreleri ve

bu parametrelerin birbirleriyle olan ilişkisini ve TBM tork değeri, toplam itme (baskı) kuvveti, RPM, FER, FIR gibi parametreleri incelemiş, performans kriterleri ile ise günlük ortalama ilerleme, makine faydalanma oranı, net kazı hızı gibi kriterler ortaya koymuş, arıza ve duraklama nedenleri gruplandırılmıştır.

Öz (2012) "İstanbul-Kadıköy-Kartal Metro Tünelince Kullanılan Tünel Açma Makinesinde (TBM) Kazı Performans Analizi" adlı çalışmada hat boyunca belirli aralıklarla alınan kayaç numuneleri üzerinde yapılmış tek eksenli sıkışma dayanımı ve zemin numuneleri deney sonuçlarının, makine itme kuvveti, tork, penetrasyon indeksi değerleri, ilerleme miktarı, kesici kafa dönme sayısı parametrelerine etkilerini araştırmış ve kazılan kayaç ile makine ilerlemesi arasındaki ilişki ortaya koymuştur.

Tüysüz (2012), "İstanbul'da Açılacak Metro Tünellerinde TBM (Tünel Açma Makinesi) Performansını Tahmin Etmek İçin Yeni Bir Yaklaşım" isimli çalışmada TBM kazısında kritik bölgeleri tanımlayan ve önceki çalışmalardan toplanan verileri esas alan TBM performansı tahmin metodolojisini ortaya koymayı amaçlamış ve bu metodolojide güzergah üzerindeki sondajların jeomekanik özelliklerini, tek eksenli basınç dayanımlarını ve kaya kalite oranlarının belirlenmesiyle kaya yapısına ve formasyona göre spesifik enerjisi hesaplamış TBM'in pasa basıçlı ya da açık modda çalışabilirliğini ve tahmini kazı süresi belirlemiştir.

Chakeri (2012), "Zemin Basıncı Dengeleme Tünelcilik Yönteminde Ayna Duraylılığı ve Yer Üstü Oturmalarının İncelenmesi" isimli çalışmasında yer üstü oturmalarının hesaplanmasında kullanılan yöntemlerden biri olan sonlu farklar sayısal yöntemi ile literatürden topladığı bilgilere göre yenilme yüzeyini etkileyen faktörleri araştırmıştır ve yer üstü oturmalarının hesaplanması için yeni istatistiksel model eşitlikleri ortaya koyarak ve bu eşitlikten elde ettiği sonuçları literatürdeki mevcut eşitliklerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır.

Ateş'in (2013), "TBM Tasarım Parametreleri Arasındaki İlişkilerin Araştırılması ve Buna Bağlı Olarak İki Büyük Çaplı TBM Projesinin İncelenmesi" isimli çalışmasında, 329 adet tünel açma makinesi (TBM) içeren bir veri tabanı oluşturulmuş, TBM'lerin tasarım parametreleri ve bu parametrelerin birbirleri ile olan ilişkileri incelenmiş, istatistiksel verilerden yola çıkarak tasarım parametrelerinin belirlenebilmesi için yeni hesaplama modelleri geliştirilmiştir. Tasarım parametreleri

arasındaki ilişkilerin teorik konseptler ile bağlantılarının ortaya koyulabilmesi amacıyla, literatürde bulunan ampirik hesaplama yöntemleri irdelenmiştir. Veritabanından elde edilen istatistiksel verilerin, literatürde TBM tasarımı için kullanılan ampirik formüller ile benzer sonuçlar verdiği, TBM tasarımının birçok parametreye bağlı olduğu ve doğru TBM tasarımı veya TBM seçimi yapılabilmesi için tünel güzergahındaki jeolojik koşulların detaylı olarak belirlenmesi gerektiği görülmüştür.

Cingöz (2013), "NATM ve TBM Yöntemlerinin Deneysel Olarak Maliyet ve Süre Kriterleriyle Karşılaştırılması" çalışmasında Kadıköy Kartal Metrosu inşaatını ele alarak yapım metodu seçiminin önemi ve proje süresine etkileri incelenemiş, tünel yapımında kullanılmakta olan NATM ve TBM metodlarını karşılaştırılarak bunların süre performansına etkilerini ve maliyetleri irdelemiştir.

Hasanpour (2013), "Çift Kalkanlı Tünel Açma Makinelerinin Sıkışan Zemin Koşullarında Kullanabilirliğinin Araştırılması" adlı çalışmada, çift kalkanlı TBM'lerin performansını sıkışan ortamlarda değerlendirmek amacıyla, gerçekçi üç boyutlu sayısal benzetimler oluşturmuştur, kalkan sıkışmasının önlenmesi için sıkışan ortamlarda sayısal analizlerden yararlanarak uygun iyileştirme yöntemlerinin seçilmesini önermiştir.

Yüksel (2014) "TBM Makinelerinde Kayaç Özellikleri ve Makro Süreksizliklerin Kazı Performansına Etkilerinin Araştırılması" çalışmasında TBM kullanılarak yapılan tünel açma çalışmalarında kaydedilen kazı parametreleri ile yine güzergahın bu bölümünde açılmış sondajlardan elde edilen kaya dayanım parametreleri arasındaki istatistiksel ilişkiler ile TBM ile yapılan tünel kazıları sırasında meydana gelen göçüklerin kazı performansına olan etkilerini araştırmıştır.

Sarbangholi (2014), "Tünel Açma Makinelerinin (TBM), Kazı Zamanı, Makine ve Kaya Özelliklerine Göre İstatiksel Analizi" adlı çalışmasında, kazı esnasında duraklamaların genel nedenini ve TBM'in çalışma zamanı ile makine ve zemin şartlarının arasındaki ilişkisini araştırmıştır.

Demir (2015), "TBM Tüneli Kazısı Oluşan Oturmalar ve Gerçekleşen Saha Okumalarıyla Karşılaştırılması" adlı çalışmada, tünel açımı nedeniyle kaynaklanan yüzey oturmaları tahmin etmek amacıyla üç ana metod (ampirik metod, analitik çözümler ve nümerik metod) kullanmış ve şartların iyi modelize edilmesi ile nümerik

hesaplamalarda diğer yöntemlere nazaran daha hassas ve gerçekleşen ile daha uyumlu sonuçlar elde edildiğini belirtmiştir.

Osmanoğlu (2018), "Kahramanmaraş Kılavuzlu Sulama Projesi Belpınar Tünelinde Kullanılan Pasa Basınçlı Tünel Açma Makinesinin (EPB-TBM) Kazı Performans Analizi" isimli çalşmasında; güzergah üzerinde bulunan birimlerin jeoteknik ve jeolojik özelliklerini incelenmiş ve tünel açma makinesine ait tork, itme kuvveti, ilerleme hızı ve RPM parametrelerinden yararlanarak penetrasyon ve SE değerleri hesaplanmıştır. Makine parametreleri arasında tork-penetrasyon, itme kuvveti-penetrasyon ve SE-penetrasyon değerleri karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. TBM çalışması sırasında karşılaşılan arıza ve duraklamalar nedenleri sınıflandırılmış ve makine kullanım oranı belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu çalışmada zor koşullar altında TBM ile tünel açımının incelenmesi amacıyla Diyarbakır Silvan sulama tüneli ve Gaziantep Nurdağı hızlı tren tüneli projeleri ele alınmış, bu tünellerin yapım çalışmaları sırasında karşılaşılan problemler ile bu problemlerin çözümleri için uygulanan yöntemler analiz edilmiştir. Yaşanan problemlerin kazı performansına etkileri 4.Bölüm'de değerlendirilmiştir.

3.1.1. Silvan Tüneli

Silvan Barajı iletim kanalı ikinci kısmını oluşturan Silvan tüneli, Diyarbakır ili Silvan ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Proje alanını gösterir yer bulduru haritası.

Tünel eksenleri arasında 45 m mesafe ve birbirine paralel olacak şekilde her biri 10210 m uzunluğunda iki adet tünel olarak planlanan Silvan Tüneli'nin iç çapı 7.00 m, dış çapı 7.60 m ve kazı çapı 7.90 m'dir. Serbest akımlı çalışan tünellerin toplam kapasitesi 212.20 m^3/sn'dir. Su kaynağı Batman Çayı'nın Kulp Kolu üzerinde inşa edilecek Silvan Barajı olan bu proje ile Dicle Nehri Sol Sahil ovalarında toplam 245372 hektar tarım arazisinin sulanması amaçlanmış ancak, 2014 yılı Temmuz ayında başlayan

kazı öngörülemeyen metan gazı parlaması sonucu 2015 yılı Nisan ayında durmak zorunda kalmıştır.

3.1.1.1 Proje Alanı Jeolojisi

Silvan Tüneli güzergahı, Güneydoğu Anadolu bindirme kuşağında kıvrımlı kuşak üzerinde bulunan Hazro Antiklinali'nde yer almaktadır. Bölgede, asimetrik kıvrımlar, ters faylar ile bunları belli bir açı ile kesen doğrultu atımlı faylar bulunmaktadır. Silvan fayı, buradaki en önemli tektonik yapıdır. Formasyonlarda tabaka eğimleri yer yer belirgindir. Tabaka doğrultu ve eğimleri genellikle kıvrım eksenleri ile uyum içerisindedir (DSİ 2011).

Silvan Formasyonu ve Midyat Formasyonu, kırıklı ve karstik bir yapı sunduklarından yeraltı suyu yönünden önemli akiferlerdir. Şelmo formasyonu ise yeraltı suyu yönünden zayıf olup kumtaşı ve çakıltaşı seviyelerine bağlı olarak az miktarda yeraltı suyu içermektedir. Gercüş formasyonu ise yeraltı suyu yönünden verimsizdir. Çizelge 3.1'de inceleme alanındaki yeraltı suyu kaynakları verilmiştir (DSİ 2011).

Çizelge 3.1. İnceleme alanındaki yeraltı suyu kaynakları.

Kaynak	Debi (l/s)	Kot (m)
Malahermo	50	748
Büyük kaynak	179	852
Orta kaynak	50	864
Kulfa	4-5	860
Yılanlı	124	630
Hanık	25	835
Külbeyt	Kuru	902
Taşpınar	8	889
Çiğdemli	25-30	866
Ganiyeseye	20-25	923
Kayadere	35-40	1096
Boyunlu	8	1140

Tünel güzergahında mühendislik jeolojisi raporunda belirtilen Şelmo, Silvan, Midyat ve Gercüş Formasyonları ile öngörülmemiş metan parlamasının yaşandığı Üst Sinan Formasyonu geçilmiş olup bu formasyonlar sırasıyla açıklanmıştır.

Şelmo Formasyonu:

İnceleme alanında geniş bir bölgede yayılım göstermektedir. Gri, boz renkli kiltaşı, kumtaşı, silttaşı ve çakıltaşı birimleriyle temsil edilmektedir. Yatay ve düşey yönde kademeli geçişlidir (DSİ 2011).

Kiltaşı hakim litoloji durumundadır. Kumtaşı seviyeleri düzgün laminalanma gösterir. İnce orta katmanlı, orta sert yapıda olup bağlayıcı, çoğunlukla kil ve kısmen karbonattır. Kiltaşı ve silttaşı düzeyleri yumuşak ve ayrışmalıdır.

Çakıltaşı seviyeleri ise orta-iri taneli, yumuşak çakıllı, polijenik elemanlı ve metamorfik kayaç parçacıklarından oluşur. Yer yer yumuşak, dağılgan, ayrışmalı, el ile ufalanabilen çakıltaşı seviyeleri, kil ve karbonat çimentoludur.

Genel olarak Şelmo formasyonun üst seviyeleri yer yer tamamen ayrışmış bir yapıdadır. Ayrışmış olan bu seviyelerin kalınlığı 5 ile 30 m arasında değişmektedir. Üst Miyosen-Piliyosen yaşlı formasyon subsidans havzası çökelidir ve kalınlığı 1-300 m arasındadır (DSİ 2011).

Silvan Formasyonu:

İnceleme alanında geniş bir sahada yayılım gösteren formasyon krem, gri, beyaz renkli, çoğunlukla kireçtaşı yer yer killi kireçtaşı, marn birimleriyle temsil edilmektedir. Yükselim eksenlerinde kireçtaşı, alçalım eksenlerinde ise killi kireçtaşı, marn şeklinde yayılım göstermektedir. Kireçtaşları oldukça sert ve sivri köşeli, kırıklı, çatlaklı, erime boşluklu ve karstik yapıdadır. Çatlak ve boşluklar yer yer kalsit ve kil dolguludur. Killi kireçtaşları ve marnların ise yoğunluğu az olup aşınma ve ayrışma oranları fazladır. Resifal bir ortamda çökelmiş olan Silvan formasyonu alt miyosen yaşlı olup kalınlığı 300 m kadardır (DSİ 2011).

Midyat Formasyonu:

Krem, gri ve beyaz renkli kireçtaşı, killi ve tebeşirli kireçtaşı birimleriyle temsil edilir. Midyat formasyonu altta krem, gri renkli marnlarla başlamaktadır. Üste doğru açık krem renkli kireçtaşı, masif kireçtaşı ve beyaz renkli killi kireçtaşı seviyeleri şeklinde devam eder (DSİ 2011).

Yer yer kil kalsit dolgulu erime boşluklu ve parçalı kırıklı bir yapıya sahiptir. Bölge genelinde mostra veren bu formasyonda yer yer ve karstik yapıların oluştuğu bilinmektedir. Orta kalın tabakalı, sert, orta sert bir yapıdadır. Yaklaşık 150 m kalınlığında olan Midyat formasyonu orta eosen yaşlıdır (DSİ 2011).

Gercüş Formasyonu:

Kırmızı, kiremit renkli kiltaşı, kumtaşı, çamurtaşı ve konglomera birimlerinin ardalanması şeklindedir. Karbonatlı, demiroksitli, kil çimento ile metamorfik ve ultra bazik kökenli tanelerin çimentolanmasından oluşmuştur (DSİ 2011).

Kiltaşı, kırmızı, kahve renkli, genelde orta sert, yer yer yumuşak yapılı olup konglomera seviyeleri ile yer yer geçişlidir. Kalın ve orta tabakalanmalıdır.

Çamurtaşı; kırmızı kahve ve alacalı renklerdedir. Genellikle kumlu çamurtaşı bileşiminde olup kiltaşı seviyeleri ise düşey ve yatay yönde geçişler göstermektedir. Sıkı dokulu ve orta sert yapıdadır (DSİ 2011).

Kumtaşı; kahve renkli olup orta sert yapıya sahiptir.

Konglomera; kırmızı, kahve renkli, genellikle sıvı dokulu, yer yer zayıf kil çimentolu, sert ve dayanımlıdır. Çakıllar kireçtaşı, sileks, ofiyolit kökenli olup köşeli ve yarı yuvarlaktır. Genellikle kalın tabakalanmalıdır.

Gercüş formasyonu içinde yer yer koyu gri renkli, sert ve sıkı dokulu marn birimi ile nadir de olsa evaporit birimi de bulunmaktadır (DSİ 2011).

Orta kalın tabakalı, sıkı çimentolu olan Gercüş formasyonu, gölsel-lagüner bir ortamda çökelmiştir. İnceleme alanındaki kalınlığı 400 m'nin üzerinde olan Gercüş formasyonu paleosen-alt eosen yaşlı olup üzerinde uyumlu olarak Midyat formasyonu bulunmaktadır (DSİ 2011).

Üst Sinan Formasyonu:

Paloesen yaşlı formasyon; krem renkli biyoklastik kireçtaşı, beyaz, grimsi bej, krem renklerde kireçtaşı, açık yeşil renkli dolomatik kireçtaşı ve açık bej, yeşilimsi gri renkli dolomitlerden oluşmaktadır. Formasyon kalınlığı 397 m kadardır (Yılmaz ve Duran 1997).

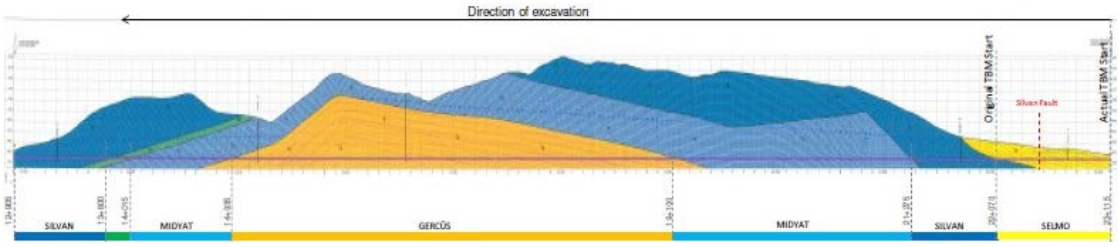
Üst Sinan Formasyonu hazırlanan ilk jeolojik raporda yer almamış, yaşanan gaz parlaması neticesinde tünel faaliyetlerinin durmasının ardından yapılan ek çalışmalar kapsamında hazırlanan alternatif Silvan tüneli jeoteknik raporunda tanımlanmıştır.

Projelendirme aşamasında tünel güzergahında açılan temel sondajlarının kot ve derinlikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Bunlardan SSK-1, SSK-3, SSK-4, SSK-5 sondajları tünel ekseninde, İSK-4 sondajı ise tünel eksenine yaklaşık 240 m mesafededir.

Çizelge 3.2. Tünel güzergahında açılan temel sondajları.

Sondaj No	Proje kilometresi	Başlama noktasına mesafe (m)	Kot(m)	Derinlik (m)	Geçilen Formasyon
SSK-4	22+720	395	798.50	39.50	0.00-39.50 m Şelmo
SSK-3	21+720	1395	888.00	123.00	0.00-107.50m Silvan
İSK-4	16+342	6773	1084.20	315.00	0.00-70.00 m Midyat 70.00-315 m Gercüş
SSK-5	15+185	7930	975.00	213.00	0.00-150.70 m Midyat 150.70-213.00 m Gercüş
SSK-1	13+355	9760	873.50	107.50	0.00-107.50 m Silvan

Sondaj verilerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda çizilen tünel kesiti Şekil 3.2'de, geçilecek formasyonlar ve özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.2. Tünel güzergahı boyunca geçilmesi öngörülen jeolojik formasyonlar.

Çizelge 3.3. Tünel güzergahında geçilmesi beklenen formasyonların fiziksel ve mekanik özellikleri.

Formasyon	**Silvan (895m)**	**Germik (210m)**	**Midyat (875m)**	**Gercüş (4200m)**	**Midyat (2175m)**	**Silvan (805m)**	**Şelmo (1050m)**
Geçilecek birim	Kireçtaşı, marn	Kiltaşı, marn, killi kireçtaşı	Kireçtaşı, killi ve tebeşirli kireçtaşı	Kiltaşı, çamurtaşı, konglomera, kumtaşı	Kireçtaşı, killi ve tebeşirli kireçtaşı	Kireçtaşı, marn	Kiltaşı, kumtaşı, silttaşı, çakıltaşı
Özellik	Oldukça sert, yer yer parçalı, kırıklı ve karstik Geçirimli -çok geçirimli iyi dayanımlı	Orta sert, kısmen çatlaklı, eklemli, Az geçirimli-geçirimli	Eklemli, çatlaklı, erime boşluklu, Az geçirimli-geçirimli Orta-iyi dayanımlı	Orta sert ve yer yer yumuşak	Eklemli, çatlaklı, kırıklı, erime boşluklu Az geçirimli-geçirimli Orta-iyi dayanımlı	Oldukça sert, yer yer parçalı, kırıklı ve karstik Geçirimli -çok geçirimli iyi dayanımlı	Yumuşak -orta sert, zayıf dayanımlı, zayıf çimentolu
Tabaka eğimi	Kuzey ve KD	Kuzey ve KD	Kuzey ve KD	Kuzey-KD Güney-GB	Güney-GB	Güney-GB	Güney-GB
Çatlak sayısı	>50	1-3	3-10	3-10		Masif-parçalanmış	Silvan fayı
Yeraltı su seviyesi (m)	27		90.2	30.4		33.1	15.1
RMR	37-24	46-37	54-49	61-56	62-57	57-40	37-22
RQD (%)	0-25	50-75 75-90	90-100	25-50 50-75 90-100		0-25	0-25
Q	0.22-0.011		2.47-1.25	3.75-1.65		2.475-0.55	0.43-0.14
Ortalama tek eksenli basınç dayanımı (kg/cm^2)	493		925.7	583.2		599.6	
Beklenen problem	Su boşalımı	Su boşalımı	Karstik boşluk, su boşalımı	Zayıf zonlarda kopma, Su boşalımı	Karstik boşluk	Su boşalımı	Çamur oluşumu

3.1.1.2. Silvan Tüneli Kazısında Kullanılan TBM

Sistem-Kayaoğlu-Yertaş-İntekar İş Ortaklığı ile Devlet Su İşleri adına yürütülen Silvan tüneli projesi; 10210 m uzunluk ve 7 m iç çapa sahip 2 adet tünel olarak öngörülmüştür. Tünelin yaklaşık olarak 778.38 m taban kotundan başlayıp 770.61 m

taban kotunda sonlanması planlanmıştır. Proje için; Herrenknecht marka S-794 model sert kaya çift kalkanlı tam cephe tünel açma makinası (TBM) seçilmiştir. Seçilen makinenin (Şekil 3.3) teknik özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kullanılan TBM'in teknik özellikleri.

Özellik	
Kafa çapı	7.960 m
Disk sayısı	49 adet tekli 4 adet çiftli
Disk çapı	432 mm (17 inç)
Kesici halka sayısı	57 adet
Sıyırma kovaları	4 adet büyük 2 adet küçük
Makinenin devir sayısı	0-8 rpm
Keskiler arası mesafe	75 mm
Tek bir keskiye etkiyen normal kuvvet	267 kN
Aynaya uygulanan toplam itme kuvveti	14151 kN
Kesici kafa torku	5384 kNm
İtme silindirleri	10 adet 360/280 mm
İtme silindirlerinin toplam gücü (350 bar'da)	35600 kN
Yardımcı itme silindirleri	22 adet 280/240 mm
Yardımcı itme silindirlerinin toplam gücü (350 bar'da)	47400 kN
Anti tork silindirleri	2 adet 450/220 mm



Şekil 3.3. Herrenknecht marka S-794 model sert kaya çift kalkanlı tam cephe tünel açma makinası.

1225 ton ağırlığındaki TBM, 1 adet gemi ile Ovenburg Almanyadan İskenderun limanına demonte vaziyette nakledilmiştir. İskenderun limanından Silvan'a TBM'in nakliyesi 67 tır ile gerçekleştirilmiştir. Nakliyenin en ağır parçaları 140 tonluk ana rulman ve 98 tonluk kesici kafa merkez parçasıdır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Kesici kafa montajı.

TBM'in kurulumu 500, 200, 100, 65 ve 30 tonluk 5 adet vinç ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. TBM montaj çalışmaları.

TBMin yan kazı yüzeylerine tutunarak (grip yaparak) kazıya başlayabilmesi için 27 m uzunluğunda konvansiyonel tünel ve kanopi imalatı yapılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Konvansiyonel tünel kazısı.

Konvansiyonel tünel kazısı Şelmo formasyonunda yapılmış olup, girişte taç bölgesinde 20 cm aralıkla, 6 m boyunda, 28 mm'lik demir süren, tünel boyunca da iksa, püskürtme beton, çelik hasırdan oluşan sistematik tahkimat uygulanmıştır.

Kamulaştırma işlemlerinin gecikmesi nedeniyle TBM tünel aynasından yaklaşık 200 m geride kurulmuştur (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. TBM'in tünel aynasına mesafesi.

TBM, yerinde dökülen beton kaide üzerinde çelik segmentler vasıtasıyla tünel aynasına doğru hareket ettirilmiştir. Bu işlem sırasında sadece tabandaki itki pistonları kullanılmıştır.

TBM'in şantiyeye ulaşmasından kazıya başladığı ilk güne kadar yaklaşık bir sene geçmiştir.

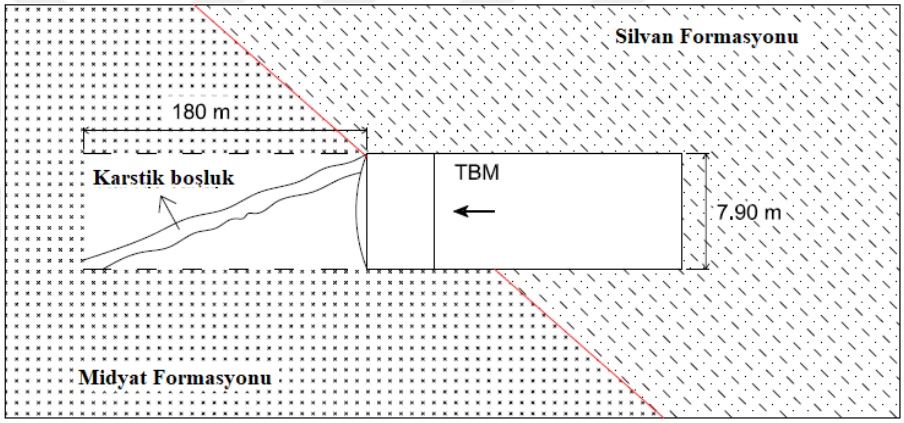
3.1.1.3. Silvan Tünelinde Karşılaşılan Problemler

Su Problemi

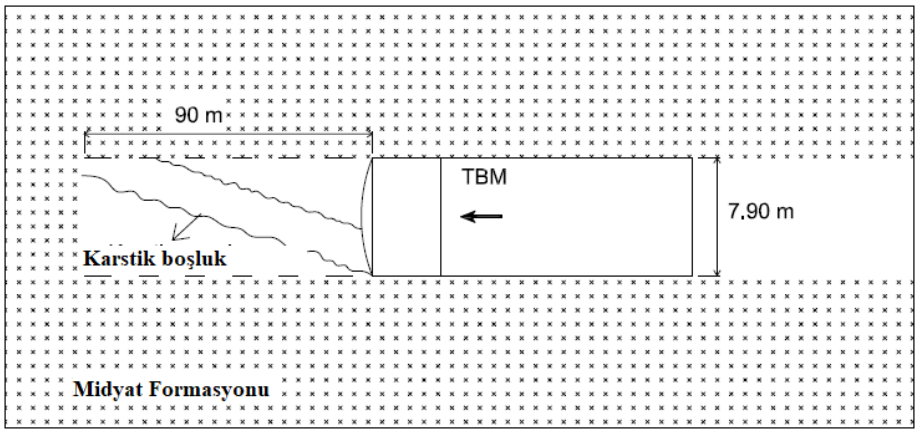
Proje alanı yer altı suyu bakımından geniş bir havzaya sahiptir. Yörede bulunan yer altı suyunun çoğunluğu Silvan ve Midyat Formasyonlarından alınmaktadır. Silvan formasyonu geçilirken 200 lt/sn su geliri ile karşılaşılsa da aşırı su geliri problemi Midyat Formasyonunda yaşanmıştır (Şekil 3.8). Karstik boşluklar içeren karbonat kaya kökenli Midyat formasyonunda ilerlerken tünelin 1730 ve 2059. metrelerinde farklı yapılara sahip iki karstik boşluk geçilmiştir (Şekil 3.9 ve Şekil 3.10). Bu karstik boşluklar sırasıyla 180 ve 90 m uzunlukta olup, yine sırasıyla 1663 lt/sn ve 500 lt/sn suyun tünele akmasına sebep olmuşlardır. Tünele toplamda yaklaşık 2200 lt/sn su geliri olmuştur.



Şekil 3.8. Yaşanan ani su geliri problemi sebebiyle tünelde su birikimi.



Şekil 3.9. Silvan-Midyat formasyon dokanağında geçilen birinci karstik boşluk.



Şekil 3.10. Midyat Formasyonunda geçilen ikinci karstik boşluk.

Ayrıca yer yer killi siltli sedimanla dolu olan bu karstik boşluklardan tünele ani sediman yığılmaları söz konusu olmuş ve kazı yapılmasını imkansız kılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Karstik boşluklardan tünele yığılan sediman.

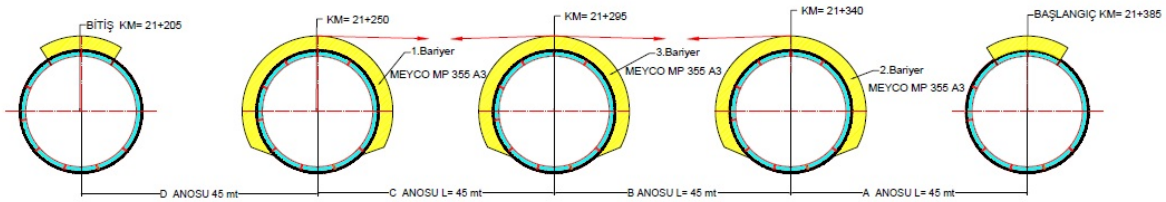
Tünele boşalan bu yer altı suyundan dolayı güzergah çevresinde 450 lt/sn kapasiteye sahip su kaynaklarında kuruma gözlenmiştir. Bunun neticesinde 80000 nüfuslu Silvan ilçesi ve çevredeki yerleşim birimlerinde önemli düzeyde susuzluk sorunu ortaya çıkmıştır.

Şekil 3.12'de gösterildiği gibi TBM içinde 80 cm yüksekliğe ulaşan su geliri ile mücadele etmek için, karstik boşlukların olduğu bölgelere kimyasal enjeksiyon uygulanmıştır.



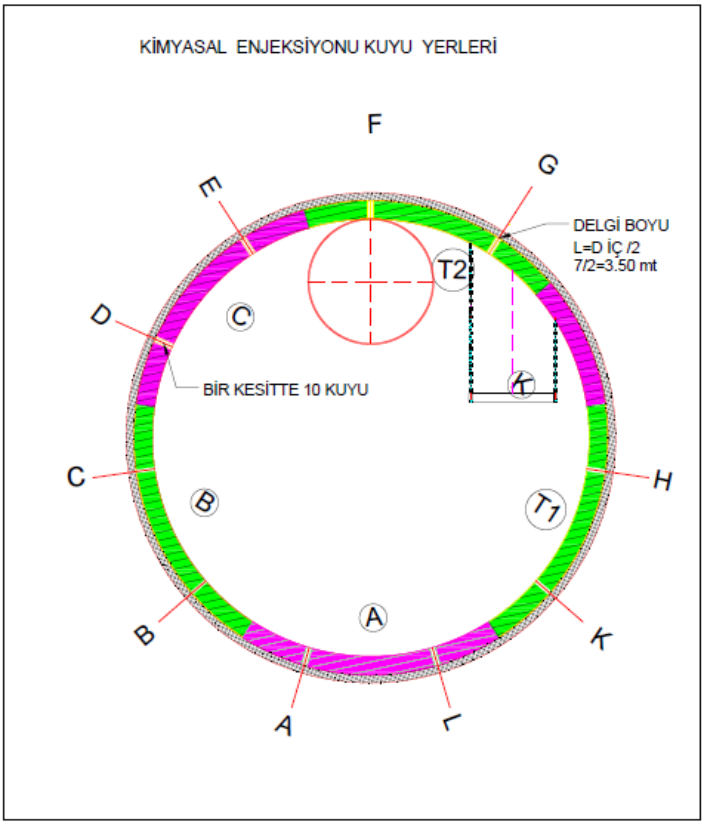
Şekil 3.12. Tünel içindeki su seviyesi.

Tünelde yoğun su gelirinin yaşandığı 21+385-21+205 metreler arasındaki 180 m'lik bölge; A, B, C, D olarak tanımlanan ve her biri 45 m uzunluğunda 4 kısma (ano) ayrılmıştır. Enjeksiyon işlemine basınç ve debinin yüksek olduğu B ve C anolarından başlanmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. A, B, C ve D anoları ve enjeksiyon işlemi ile bariyer oluşturulması.

Her bir kesitte 3.5 m uzunluğunda 42 mm çapında 10 adet enjeksiyon deliği açılmıştır (Şekil 3.14). Her kesit arası 3 metre olarak planlanmıştır.



Şekil 3.14. Kimyasal enjeksiyon kuyu yerleri.

Kimyasal enjeksiyon işleminde iki bileşenli (A ve B) poliüreten kökenli malzeme kullanılmıştır. Hacimce 1/1 oranında alınan A ve B katkılarına % 1 oranında priz hızlandırıcı ilave edilerek mikser yardımıyla karıştırıldıktan sonra, çift pistonlu hava tahrikli enjeksiyon pompası ile açılan delgilere minimum 10, maksimum 30 bar basınç ile tavan kuyularından başlayıp sonra yan duvar kuyularına son olarak da taban kuyularına uygulamıştır.

Şekil 3.15'te çift pistonlu hava tahrikli enjeksiyon pompası, Şekil 3.16'da poliüretan uygulamalara yönelik özel hazırlanmış tij ve paker, Şekil 3.17'de ise bir deliğin enjeksiyon uygulaması sonrası durumu gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Çift pistonlu hava tahrikli enjeksiyon pompası.



Şekil 3.16. Poliüretan uygulamalara yönelik özel hazırlanmış tij ve paker.



Şekil 3.17. Enjeksiyon uygulaması sonrası görünüm.

Gaz Problemi

Silvan tüneli inşaatının 4668.70. metresinde 21/04/2015 tarihinde 13 çalışanın yaralanmasıyla sonuçlanan metan gazı parlaması meydana gelmiştir. Bu olay neticesinde kazı çalışmaları durdurulmuştur, olayın aydınlatılması için bilirkişi heyeti oluşturulmuş, ayrıca Türkiye Taş Kömürü Kurumu (TTK)'ndan bir tahlisiye istenerek

gerekli ölçüm ve incelemelerin yapılması sağlanmıştır. Yapılan ölçümler neticesinde çok yüksek oranda metan varlığı tespit edilmiştir (Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6).

Çizelge 3.5. 28/04/2015 tarihli tünel içi gaz ölçüm değerleri.

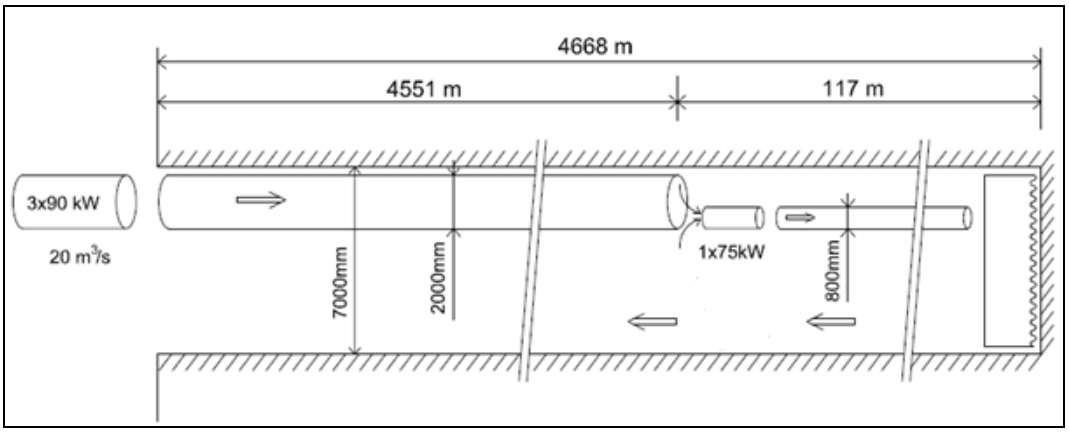
Ölçüm noktaları (m)	CH_4 (%)	O_2 (%)
2205	2.30	20.1
2250	2.90	20.3
2355	2.33	20.3
3135	2.26	20.2
3600	2.40	20.2
3900	2.48	20.2
4540	2.50	20.0
4656	15.6	19.0

Çizelge 3.6. 29/04/2015 tarihli tünel içi gaz ölçüm değerleri.

Ölçüm noktaları (m)	CH_4 (%)	O_2 (%)
2100	0.3	20.9
2445	0.3	20.9
3075	0.8	20.9
4656	0.5	20.5
4656	11	19
4538	0.8	20.3
4668	28.6	17.3
2100	0.3	20.9

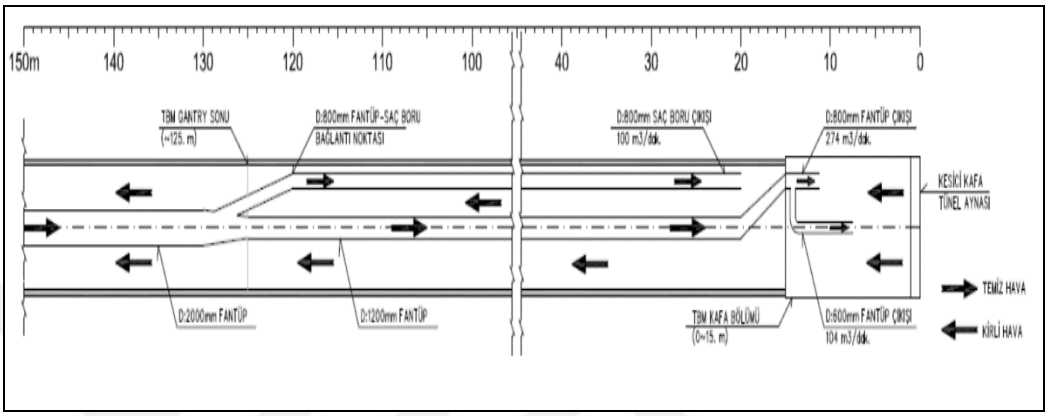
Tünel içinde suyla mücadele kapsamında yürütülen kimyasal enjeksiyon işleminin devam edilebilmesi için bu işlemi yapacak personele kişisel koruyucu ve oksijenli ferdi kurtarıcı donanımları eğitimleri verilmiştir.

Kazadan önce tünel; havanın 3*90 kW'lık fan ve 2000 mm çaplı fan tüp vasıtasıyla makine kuyruğuna, bu noktadan sonra da fantüp çıkışında bulunan 75 kW'lık emici ünite 800 mm'lik sac boru yardımıyla aynaya ulaştırılması ile havalandırılmaktaydı (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Kaza öncesi tünel havalandırma sistemi.

Ancak kaza sonrası tünele elektrik akımı verilememesi nedeniyle ve ortamdaki gaz konsantrasyonunun limitlerin altına düşürülmesi gerektiğinden; 1200 mm çaplı yeni bir fantüp ilk fantüpe seri olarak bağlanmış, makinanın altından alınarak kumanda kabinine kadar taşınmıştır. Bu noktadan itibaren 800 mm ve 600 mm'lik fantüplerle biri kabin hizasına diğeri kumanda kabininin solundan yukarı alınarak kesici kafa bölgesinin havalandırılması sağlanmıştır (Şekil 3.19).

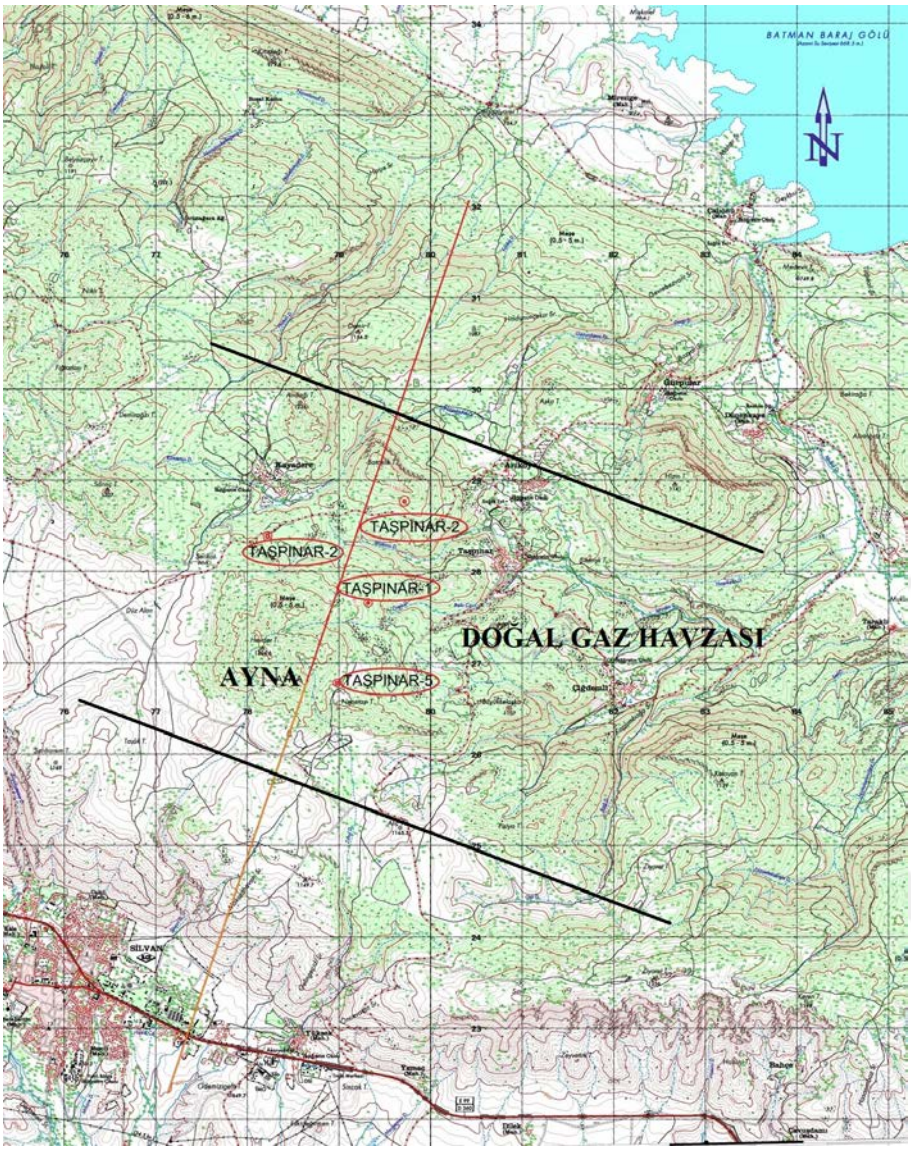


Şekil 3.19. Kaza sonrası yeniden düzenlenen tünel havalandırma sistemi (Aydın ve ark. 2017).

Belli aralıklarla tünel içinde gaz ölçümleri alınmaya devam edilmiştir. Tünel içindeki hasarı gözlemlemek için güvenlik önlemleri alarak ex-proof özellikte bir makine ile fotoğraf çekimi ve hasar tespiti yapılmıştır (Şekil 3.20). Türkiye Petrolleri kurumundan çalışma alanındaki daha önce farklı tarihlerde açılmış petrol sondajları bilgileri istenmiş ve neticesinde bölgede gaz ihtiva eden birimlerin varlığı ortaya konulmuştur (3.21).

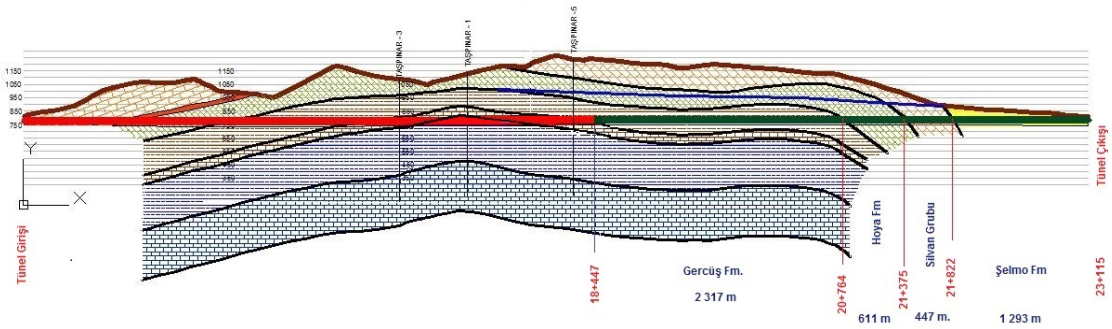


Şekil 3.20. Tünel içinde çekim yapılan ex-proof özellikteki fotoğraf makinesi.

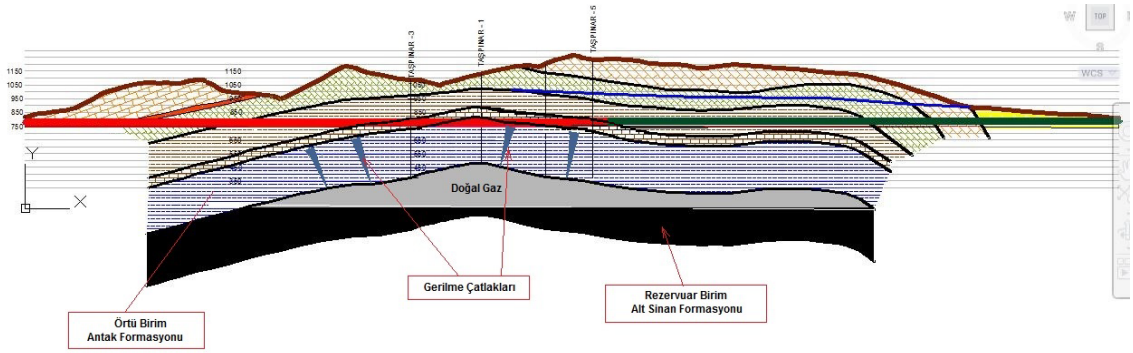


Şekil 3.21. Tünel güzergahında açılan TPAO sondajları (Ayhan ve ark. 2018).

Yapılan incelemeler neticesinde Gercüş formasyonundan sonra birimin değiştiği; Üst Sinan formasyonuna girildiği ve metan parlama olayının da bu formasyonda 80 m ilerledikten sonra meydana geldiği anlaşılmıştır. Parlamanın olduğu nokta ile, doğal gazın hazne kayası olan Alt Sinan formasyonu arasındaki derinlik mesafesi 400 metre civarında olup arada geçirimsiz Antak formasyonu yer almaktadır (Şekil 3.22). Söz konusu bölgede, antiklinal ekseninde kayaların bükülmesi neticesinde oluşan gerilme çatlaklarından hazne kayadaki gazın tünele sızdığı düşünülmektedir (Şekil 3.23). Sivan tünelinde mevcut eksende ilerleme yapılması durumunda, gaz çıkışının daha da yoğunlaşacağı ve can ve mal kayıplarına neden olabileceği endişesiyle tünel açma faaliyeti durdurulmuştur (Ayhan ve ark. 2018).

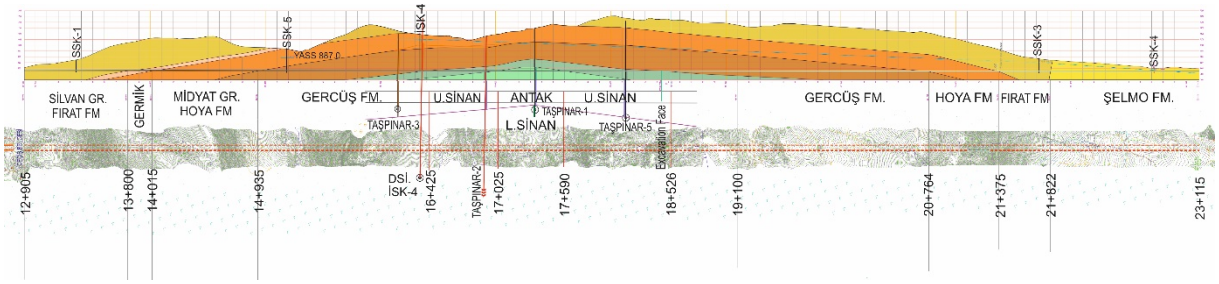


Şekil 3.22 Tünel boyunca kesilecek birimlerin kalınlık ve derinlikleri (Aydın ve ark., 2017).



Şekil 3.23 Gaz sızıntısına neden olan gerilme çatlakları (Aydın ve ark., 2017).

Buradan elde edilen yeni bilgiler ile mevcut jeolojik kesitteki eksik ve yanlışlar tespit edilerek yeni jeolojik kesit oluşturulmuştur (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Yeni veriler ışığında tekrar çizilen jeolojik kesit (Ayhan ve ark. 2018).

3.1.2. Nurdağı Tüneli

"Bahçe - Nurdağı (Fevzipaşa) Varyantı Altyapı İşleri" kapsamında, Km: 03+652.61 ile Km: 13+453.04 arasında TBM ile açılan her biri 10200 metre uzunlukta çift tüplü demiryolu Nurdağı Tüneli Osmaniye ile Gaziantep arasında yer almaktadır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Proje alanını gösterir yer bulduru haritası.

Projede Robbins marka SS268-398 model tek kalkanlı TBM kullanılmıştır. Kullanılan TBM'in genel özellikleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Nurdağı Tüneli'nde kullanılan TBM'in genel özellikleri.

Özellik	Birim
Kafa çapı	8.0 m
Keski çapı	19''
Keski sayısı	53
Maksimum yük (keski başına)	311 kN
Ortalama keskiler arası mesafe	77.6 mm
Toplam kesici kafa gücü	3300 kW
Kesici kafa hızı	0-6.9 rpm
Kesici kafa torku	9635 KNm (0-3.3 rpm) 4588 kNm (6.9 rpm)
İstisnai tork	14453 kNm (0-3.3 rpm)
Maksimum itme kuvveti	88543 kN (345 bar)
Önerilen itme kuvveti	16503 kN (maksimum)
İtme silindiri sayısı	32

3.1.2.1. Çalışma Alanı Jeolojisi

Bahçe-Nurdağı tüneli, Bahçe giriş portalı, Km: 3+653'den başlamakta ve Km: 13+453'de Nurdağı çıkış portalına ulaşmaktadır. Tünel güzergahında, Kızlaç formasyonu, Karadağ Kireçtaşı, Yamaç molozu ve Alüvyonel çökeller görülmektedir (Şekil 3.26).

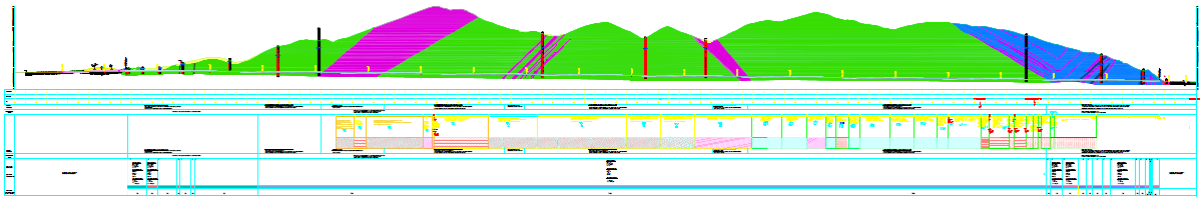
Tünel güzergahının üzerinde rastlanan en yaşlı birim Orta Ordovisyen yaşlı Kızlaç formasyonudur. Birim, tünel güzergahı Km: 3+653 ile Km: 11+510 arasında ve yakın çevresinde, geniş alanlarda yayılım gösterir. Kızlaç formasyonunu, tünel

güzergahı ve yakın çevresinde, kuvarsit ara tabakalı-ara düzeyli meta-kumtaşı ve meta-çamurtaşı birimleri temsil etmektedir (FUGRO ve SİAL 2014).

Kızlaç formasyonu; ayrışma rengi kahve, taze kesimleri gri-yeşilimsi gri-bordo renkli, meta kumtaşı düzeyleri orta-kalın, meta çamurtaşları ince-orta tabakalı, mostrada orta - genelde az ayrışmış ve orta sağlam genelde sağlam kaya direncindedir. Kuvarsit ve meta-kumtaşı düzeyleri çok sağlam mukavemetli kaya durumundadır. Kızlaç formasyonu, jeolojik geçmişi ve geçirmiş olduğu tektonizma etkisi ile kıvrımlanmıştır. Bu kıvrımlanma, tünel güzergahında, tünel eksenine dik, 2 adet antiklinal ekseni ve 1 adet senklinal ekseni olarak görülmektedir (FUGRO ve SİAL 2014).

Km: 11+510 ile Km: 13+500 arası Kızlaç formasyonunu açısal uyumsuzlukla örten Jura-Kretase yaşlı Karadağ Kireçtaşı yüzlek vermektedir. Bu birim, kireçtaşı, şeyl ve şist ardalanmalarından meydana gelmektedir.

Birim, koyu mavimsi gri renkli, ince-orta tabakalı, şeyl-şişt seviyeleri laminalı-ince tabakalı, orta- zayıf-orta sağlam kaya mukavemetindedir. Proje sahasında, Karadağ kireçtaşının doğusunu Doğu Anadolu Fayı sınırlar. Formasyon fazlası ile kıvrımlı olup, Doğu Anadolu Fay Zonuna doğru, kıvrımlanma şiddeti artmaktadır (FUGRO ve SİAL 2014).



Şekil 3.26. Tünel güzergahı jeolojik kesiti (FUGRO ve SİAL 2014).

Tünel eksenine dik yönde bulunan vadilerde, değişken kalınlıklarda yamaç molozları gelişmiştir. Kızıl kahverenkli, yarı tutturulmuş, kil matriks içerinde köşeli-yarı köşeli çakıl ve blok boyutlu kayaç parçaları yamaç molozunu temsil etmektedir. Tünelin Bahçe-giriş ve Nurdağı-çıkış taraflarında, Alüvyonel çökeller bütün birimleri örtmektedir (Çizelge 3.8).

Çizelge 3.8. Güzergah jeolojisi boyunca geçilecek birim ve kilometreleri (FUGRO ve SİAL 2014).

Kilometre	Birim
3+215-3+580	Eski heyelan
3+580-3+653	Alüvyonel çökeller
3+653-6+000	Kızlaç formasyonuna ait meta çamurtaşı/meta kumtaşı ardalanması ve üzerinde yer yer yamaç molozu
6+000-7+015	Kızlaç formasyonuna ait kuvarsit üyesi
7+015-11+510	Kızlaç formasyonuna ait meta çamurtaşı/meta kumtaşı ardalanması ve üzerinde yer yeryamaç molozu
11+510-13+500	Karadağ kireçtaşı-Şeyl-Şist ardalanması

Hidrojeoloji

İnceleme alanı batı kesiminde Bahçe İlçe merkezi yakınlarında yer alan, kuvarsit ve meta-kumtaşları kırık sistemlerinden boşalan, çok sayıda kaynak yer almaktadır. Bu kaynaklar, kırıklı kumtaşı ve kuvarsit seviyelerinin geçirimsiz çamurtaşı dokanaklarının en düşük kotlarından çıkmaktadır. Kızlaç Formasyonu içindeki geçirimsiz çamurtaşı seviyelerinin yaygın yüzeylenmesi nedeniyle, geçirimli-yarı geçirimli kumtaşı ve kuvarsit seviyelerindeki akifer birimler, küçük beslenme havzalarına ayrılmıştır. Bu nedenle kaynak verimleri de havza büyüklüklerine bağlı olarak farklı debilerde boşalırlar. Tünel güzergahı yaklaşık Km: 11+500'e kadar bu birimler içinde açılacaktır.

Güzergahta ilerleme sırasında geçilecek metakumtaşı ve kuvarsit seviyelerinde, yer yer mevsimine göre sınırlı miktarlarda yeraltısuyu ile karşılaşılması doğaldır. Bu alanda su geliri miktarı yaklaşık 2-3 lt/sn olarak beklenmektedir. Su basıncı yaklaşık 30 bar olarak değerlendirilmektedir. Km:11+500 km ile tünel bitimi olan Km: 13+453 arasında, Jura – Kretase yaşlı Karadağ Formasyonunun kireçtaşı-şist ardalanmalı seviyelerinde geçilecektir. Bu kesimde kireçtaşları karstik özelliktedir. Karstik kireçtaşları yer yer geçirimsiz şist seviyeleri ile sınırlanmıştır. Ancak genel olarak poroz bir ortama sahip akifer özelliğinde görülür (FUGRO ve SİAL 2014).

Tünel açılımı sırasında, Km: 11+500'den itibaren kireçtaşı seviyelerine girildiğinde, tünel taban kotu yaklaşık 520 m kotlarında olacaktır. Karstik kireçtaşlarının yüksek poroziteye sahip olması nedeniyle, kurak dönemlerde, kaynak havzasında yeraltısuyu eğimi yataya yakın olarak gelişeceğinden, yeraltısuyu seviyesi

tünel kotunda veya biraz üzerinde kalacaktır. Ancak, yağışlı dönemlerde, kaynak beslenme havzası özelliğindeki bu bölümde, zaman zaman yeraltısuyu kotunun, tünel kotunun oldukça üzerine çıkacağından zaman zaman bol su ile karşılaşılabilir. Bu kesimde, su basıncı, su tablasının yataya yakın olmasından dolayı düşük olacaktır. Fakat grafitik şist ile bariyer oluşturulmuş zonların geçilmesinden sonra, gerideki kireçtaşından ani boşalımlar beklenmektedir. Tünel güzergahı üzerindeki yeraltısuyu yaklaşık +564 m ile +840 m kotları arasında değişmektedir (FUGRO ve SİAL 2014).

Nurdağı tünel güzergahında geçilecek olan jeolojik birimlerin, yapısal ve mühendislik özelliklerini ile yeraltısuyu durumunu tespit etmek üzere Temmuz 2013 – Ocak 2014 döneminde toplam 2961.6 metre uzunluğunda 15 adet açılmıştır (Çizelge 3.9).

Çizelge 3.9. Tünel güzergahında açılan sondajlar ve geçilen birimler.

Sondaj	Km	Kot (m)	Derinlik (m)	Geçilen Formasyon
SK-7	3+655.00	627.43	41.00	0..00-17.40 m Alüvyon 17.40-23.75m Metaçamurtaşı 23.75-25.00m Metakumtaşı 25.00-39.00m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması 39.00-41.00m Metakumtaşı
SK-8	3+667.90	629.85	40.00	0.00-13.50m Alüvyon 13.50-20.50m Metaçamurtaşı 20.50-27.00m Metakumtaşı 27.00-40.00m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması
SK-9	3+799.50	639.00	50.00	0.00-1.00m Yamaç molozu 1.00-13.00m Metakumtaşı 13.00-21.00m Metaçamurtaşı 21.00-23.50m Metakumtaşı 23.50-24.70m Metaçamurtaşı 24.70-28.30m Metakumtaşı 28.30-50.00m Metaçamurtaşı
SK-10	3+958.50	642.30	50.00	0.00-15.50m Yamaç molozu 15.50-50.00m Metaçamurtaşı
SK-11	4+182.51	685.00	95.00	0.00-18.90m Yamaç molozu 18.90-36.90m Metaçamurtaşı 36.90-40.90m Metakumtaşı 40.90-95.00m Metaçamurtaşı
SK-11A	4+624.52	722.40	97.00	0.00-33.00m Yamaç molozu 33.00-97.00m Metakumtaşı
SK-12	5+080.77	844.00	280.00	0.00-55.60m Metakumtaşı 55.60-69.20m Metaçamurtaşı 69.20-137.00m Metakumtaşı 137.00-280.00m Metaçamurtaşı

Sondaj	Km	Kot (m)	Derinlik (m)	Geçilen Formasyon
SK-13	5+467.13	1010.00	435.00	0.00-1.50m Yamaç molozu 10.50-14.50m Metaçamurtaşı 14.50-56.20m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması 56.20-137.90m Metaçamurtaşı 137.90-201.70m Metakumtaşı 201.70-214.80m Metaçamurtaşı 214.80-251.70m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması 251.70-350.50m Metaçamurtaşı 350.50-359.50m Metakonglomera 359.50-420.00m Metaçamurtaşı
SK-14	7+592.64	971.75	420.00	0.00-54.50m Metaçamurtaşı 54.50-78.40m Kuvarsit 78.40-145.00m Metaçamurtaşı 145.00-151.00m Kuvarsit 151.00-198.20m Metaçamurtaşı 198.20-212.30m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması 212.30-213.00m Kuvarsit 213.00-261.90m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması 261.90-267.00m Kuvarsit 267.00-307.80m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması 307.80-308.90m Kuvarsit 308.90-315.60m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması 315.60-319.50m Kuvarsit 319.50-326.70m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması 326.70-328.80m Kuvarsit 328.80-420.00m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması
SK-15	8+564.70	926.10	380.10	0.00-233.00m Metaçamurtaşı 233.00-259.90m Metakumtaşı 259.90-272.50m Metaçamurtaşı 272.50-273.60m Metakuntaşı 273.60-343.00m Metakumtaşı- Metaçamurtaşı ardalanması 343.00-380.00m Metaçamurtaşı
SK-16	9+138.50	907.81	355.00	0.00-36.70m Kuvarsit 36.70-42.60m Metaçamurtaşı 42.60-63.60m Kuvarsit 63.60-65.80m Metaçamurtaşı 65.80-74.50m Fay zonu 74.50-81.00m Metaçamurtaşı 81.00-88.70m Kuvarsit 88.70-116.50m Metaçamurtaşı 116.50-120.00m Metakumtaşı 120.00-355.00m Metaçamurtaşı
SK-23	13+505.22	525.00	30.00	0.00-4.50m Yamaç molozu 4.50-19.50m Breşik kireçtaşı 19.50-30.00m Fay zonu

Sondaj	Km	Kot (m)	Derinlik (m)	Geçilen Formasyon
SK-17	12+180.64	953.20	308.50	0.00-3.90m Yamaç molozu 3.90-42.00m Çatlak ve ezilme zonları içeren Kireçtaşı 42.00-55.50m Şist-Şeyl ara tabakalı Kireçtaşı 55.50-103.00m Çatlak ve ezilme zonları içeren Kireçtaşı 103.00-138.40m Şist-Şeyl ara tabakalı Kireçtaşı 138.40-187.00m Çatlak ve ezilme zonları içeren Kireçtaşı 187.00-190.00m Şeyl 190.00-268.20m Şist-Şeyl ara tabakalı Kireçtaşı 268.20-274.00m Şeyl 274.00-280.40m Çatlak ve ezilme zonları içeren Kireçtaşı 280.40-291.50m Şeyl ara tabakalı Kireçtaşı 291.50-305.00m Şeyl 305.00-308.00m Metakumtaşı
SK-18	12+890.81	767.00	260.00	0.00-0.90m Yamaç molozu 0.90-13.50m Kuvars damarlı Kireçtaşı 13.50-22.10m Breşik kireçtaşı 22.10-26.50m Şeyl 26.50-28.50m Breşik kireçtaşı 28.50-30.50m Fay zonu 30.50-34.00m Breşik kireçtaşı 34.00-36.50m Şeyl 36.50-41.00m Breşik kireçtaşı 41.00-44.00m Şeyl 44.00-59.50m Kireçtaşı 59.50-83.30m Fay zonu 83.30-87.80m Breşik kireçtaşı 87.80-121.50m Şeyl 121.50-173.50m Breşik kireçtaşı 173.50-208.00m Fay zonu 208.00-212.50m Breşik kireçtaşı 212.50-222.80m Şeyl 222.80-260.00m Breşik kireçtaşı
SK-19	13+291.00	620.86	120.00	0.00-6.35m Kireçtaşı 6.35-8.80m Kil 8.80-13.90m Kireçtaşı 13.90-43.20m Fay zonu 43.20-46.50m Breşik kireçtaşı 46.50-56.80m Fay zonu 56.80-59.30m Breşik kireçtaşı 59.30-60.40m Fay zonu 60.40-65.30m Breşik kireçtaşı 65.30-68.30m Fay zonu 68.30-89.50m Breşik kireçtaşı 89.50-93.50m Fay zonu 93.50-107.20m Tekonize şeyl 107.20-108.60m Şist içerikli fay zonu 108.60-112.00m Grafitik şist aratabakalı Tektonize şeyl 112.00-120.00m Breşik Kireçtaşı

Mühendislik Jeolojisi

TBM ile açılacak tünelde geçilecek birimler jeolojik ve jeoteknik özelliklerine göre 3 kısımda incelenmiş ve elde edilen sonuçlar ilgili çizelgelerde özetlenmiştir. Bunlar;

- Tünel giriş portalı Km: 3+653 ile Km: 4+900 arası (Çizelge 3.10)
- Km: 4+900 ile Km: 12+380 arası (Çizelge 3.11)
- Km: 12+380 ile Çıkış portalı Km: 13+453 arasıdır (Çizelge 3.12).

Bahçe-Nurdağı tüneli, giriş portalı Km: 3+653 ile Km: 4+900 arasında, tünel düzeyinde, Kızlaç formasyonunun kahve-bordo-gri renkli, ince yer yer orta tabakalı, yakın aralıklı, orta-az ayrışmış, orta sağlam-sağlam dirençli metakumtaşı-metaçamurtaşı birimlerinde açılacaktır. Bu kesimde yapılan, GSI, RMR ve Q kaya kütlesi sınıflamaları ve jeoteknik parametreler Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Tünel giriş portalı Km: 3+653 ile Km: 4+900 arasının kaya kütle sınıflamaları ve jeoteknik tasarım parametreleri.

	Metaçamurtaşı	**Ezik zon içeren metaçamurtaşı**
USC, Tek eksenli basınç (MPa)	110	110
GSI, Jeolojik Dayanım İndeksi	41	34
Mi, Malzeme sabiti	19	19
D, Örseleme faktörü	0	0
Ei, Elastisite Modülü (GPa)	26,1	26,1
Yn, Birim ağırlık (kN/m^3)	27	27
H, Etkin kaya yüksekliği (m)	60	60
C, Kohezyon (kPa)	639	521
Φ, İçsel sürtünme açısı (º)	60	58
Em, Deformasyon Modülü (MPa)	4462	2766
RMR, Kaya kütlesi sınıflama puan (temel)	37	37
RMR, Kaya kütlesi sınıflama puan (nihai)	27	27
Q, tünelcilik kalite indeksi	0,22	0,22
NATM, iksa sınıfı	B2	B3
CAI, Cerchar aşındırıcılık indeksi	Aşırı düşük-aşırı yüksek (0-5)	

Bahçe-Nurdağı tüneli, Km: 4+900 ile Km: 12+380 arasında, Kızlaç formasyonunun kahve-bordo-gri renkli, ince yer yer orta tabakalı, yakın aralıklı, orta-az ayrışmış, orta sağlam-sağlam dirençli metakumtaşı-metaçamurtaşı birimleri ve gri renkli, yakın-orta aralıklı süreksizlikler içeren, orta tabakalı, az ayrışmış, çok sağlam dayanımlı aynı formasyona ait kuvarsit birimlerinde açılacaktır. Bu kesimde yapılan,

GSI, RMR ve Q kaya kütlesi sınıflamaları ve jeoteknik parametreler Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Km: 4+900 ile Km: 12+380 arasının kaya kütle sınıflamaları ve jeoteknik tasarım parametreleri.

	Metaçamurtaşı-Metakumtaşı ve Kuvarsit
USC, Tek eksenli basınç (MPa)	110
GSI, Jeolojik Dayanım İndeksi	60
Mi, Malzeme sabiti	19
D, Örseleme faktörü	0
Ei, Elastisite Modülü (GPa)	27,44
Yn, Birim ağırlık (kN/m^3)	28
H, Etkin kaya yüksekliği (m)	400
C, Kohezyon (kPa)	2834
Φ, İçsel sürtünme açısı (º)	52
Em, Deformasyon Modülü (MPa)	14270
RMR, Kaya kütlesi sınıflama puan (temel)	61
RMR, Kaya kütlesi sınıflama puan (nihai)	51
Q, tünelcilik kalite indeksi	2,67
NATM, iksa sınıfı	-
CAI, Cerchar aşındırıcılık indeksi	Az- yüksek (1-5)

Bahçe-Nurdağı tüneli, Km: 12+380 ile çıkış portalı Km: 13+453 arasında, orta Ordovisyen yaşlı Kızlaç formasyonunu açısal uyumsuzlukla örten Jura-Kretase yaşlı Karadağ Kireçtaşı formasyonunda açılacaktır. Karadağ formasyonu, kireçtaşı – şeyl – şişt ardalanmalarından meydana gelmektedir. Birim, koyu mavimsi gri renkli, ince-orta tabakalı, şeyl-şişt seviyeleri laminalı-ince tabakalı, yüzeyde çok zayıf – zayıf, sondaj karotlarında derinlerde zayıf – orta sağlam kaya mukavemetindedir. Bu kesimde yapılan, GSI, RMR ve Q kaya kütlesi sınıflamaları ve jeoteknik parametreler Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Km: 12+380 ile çıkış portalı (Km: 13+453) arası tasarım parametreleri.

	Kireçtaşı	**Çok çatlaklı kireçtaşı**	**Şist**
USC, Tek eksenli basınç (MPa)	60	60	60
GSI, Jeolojik Dayanım İndeksi	39	35	30
Mi, Malzeme sabiti	9	9	9
D, Örseleme faktörü	0	0	0
Ei, Elastisite Modülü (GPa)	6,46	6,46	6,46
Yn, Birim ağırlık (kN/m^3)	26	26	26
H, Etkin kaya yüksekliği (m)	180	180	180
C, Kohezyon (kPa)	721	656	581
Φ, İçsel sürtünme açısı (º)	42	41	39
Em, Deformasyon Modülü	963	733	526

(MPa)			
RMR, Kaya kütlesi sınıflama puan (temel)	35	35	35
RMR, Kaya kütlesi sınıflama puan (nihai)	25	25	25
Q, tünelcilik kalite indeksi	0,055	0,055	0,055
NATM, iksa sınıfı	B2	B3	C2
CAI, Cerchar aşındırıcılık indeksi	Aşırı düşük-orta		

3.1.2.2. Nurdağı Tünelinde Karşılaşılan Problemler

Bahçe-Nurdağı varyantı tüneli girişi Ölü Deniz fay zonu, Amanos fay segmenti, tünel çıkışı ise Düziçi-İskenderun fay zonuna denk gelmektedir. Tünel kazısı sırasında; aşırı sökülme, zeminin şişmesi ve TBM'yi sıkıştırması, su geliri ve aşırı keski tüketimi sorunları ile karşılaşılmıştır.

1600-1900 metreler arasında gözlenen grafit şist biriminde aşırı sökülme sebebiyle zemin boşalma sorunları yaşanmış ve bu bölgelerde TBM ilerleme hızında düşüş gözlenmiştir. Bununla birlikte aynı birimin yoğun kil içerikli kesimlerinde zemin şişmesi problemi yaşanmış ve kafanın sıkışmasına sebep olmuştur. Kılavuz galeriler açılarak TBM kesici kafası tekrar işlevsel hale getirilmiştir. Bu bölgelerde itme ve tork değerleri artmıştır.

TBM kazı esnasında su gelirinin yüksek olduğu bölgelere mil akışı ile birlikte tünel imalatı olumsuz etkilenmiş; tünel içi trafik ve segment montajında olumsuzluklar yaşanmıştır. Kafa içine dolan su ve milin temizlenebilmesi için kesici kafa şanzımandan sökülmek zorunda kalınmıştır. Ayrıca zemin suyu, elektrik panolarında ve tünel içinde nakliye için kullanılan ekipmanda arızalara neden olmuştur.

Tünelin kuvarsitli birimlerinde yüksek keski tüketimi ile kazı maliyetinde ciddi artış gözlenmiştir. Aşındırmayı önleyici kimyasallar kullanılarak sorun çözülmeye çalışılsa da maliyetler ciddi oranda artmıştır.

Tüm bunlar göz önüne alındığında tünelin 8700 m uzunluğuna ulaşması 3 yılı bulmuş ve günlük ilerleme ortalama 9 m olmuştur.

3.2. Metot

Bu çalışma kapsamında; Silvan ve Nurdağı tünellerinde kullanılan TBM'lerden elde edilen veriler ve formasyon özelliklerine dayanılarak kesme performansı parametreleri (itme kuvveti, tork, tork/itme kuvveti, kesici kafanın dakikadaki devir sayısı, penetrasyon indeksi gibi) istatiksel olarak değerlendirilmiştir.

Bununla beraber elde edilen parametreler istatiksel olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca formasyonların mekanik özellikleri ile performans parametreleri arasındaki ilişkiler, tüneller açılırken yaşanan problemlerin kazı performansına etkisi ve keski tüketimleri incelenmiş, verilere uygun performans tahmin modelleri ile penetrasyon hesabı yapılmış ve gerçekleşen penetrasyon ile karşılaştırılmıştır.

Son olarak Silvan ve Nurdağı tünellerinde çift değişkenli performans değerlendirmesinde; elde edilen kazı paremetreleri değerleri ile hesaplanan penetrasyon ve spesifik enerji değerleri arasında MATLAB programının Curve Fitting metodu ile matematiksel fonksiyonlar yazılımsal olarak elde edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Silvan Tüneli TBM Performans Değerlendirmesi

Silvan Tüneli'nin kazı performansı açısından değerlendirmesi, tünel güzergahı boyunca geçilen her formasyon için ayrı ayrı yapılmıştır. Kazı performansı kapsamında; itme kuvveti, tork, penetrasyon, penetrasyon indeksi, ilerleme hızı, spesifik enerji, makine kullanım oranları ve keski tüketimi parametrelerinin formasyonlara göre değişimi incelenmiştir.

4.1.1. Silvan Tüneli Tek Değişkenli TBM Performans Değerlendirmesi

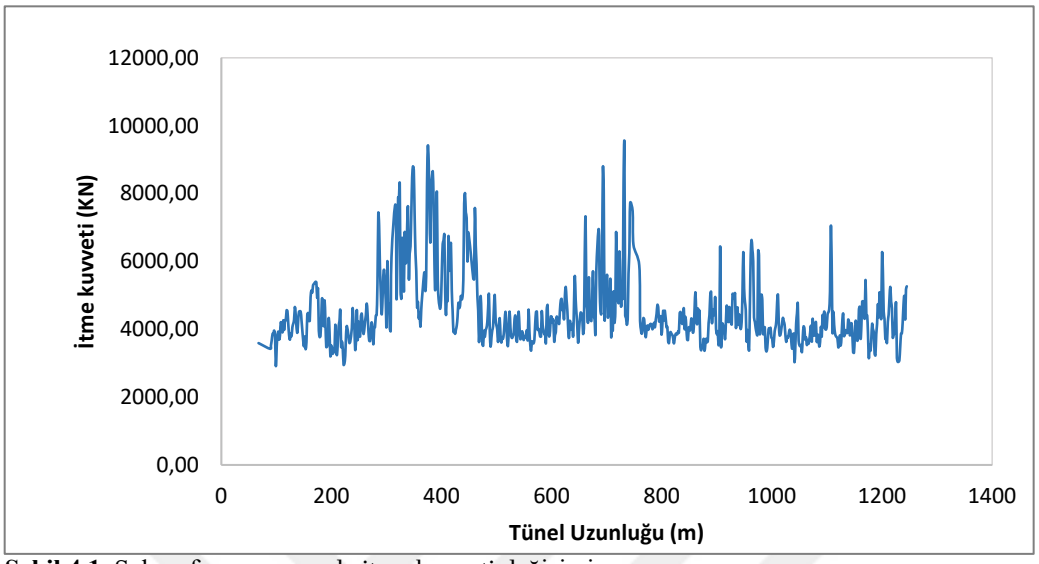
4.1.1.1. Şelmo Formasyonu

Tünel kazısı Şelmo formasyonu ile başlamış olup, mühendislik jeolojisi raporuna göre 1050 m uzunluğunda olması beklenen bu formasyon yaklaşık 1293 m boyunca devam etmiştir. Şelmo formasyonunun kazısı 01 Temmuz 2014 ile 14 Ekim 2014 tarihleri arasında gerçekleşmiştir.

Şelmo formasyonu gri, boz renkli kiltaşı, kumtaşı, silttaşı ve çakıltaşı birimlerinin düzensiz ardalanmasından oluşmuştur. Kazı zorluğu açısından Şelmo formasyonunda 3 farklı seviye bulunmaktadır. Bunlar; kazılabilirliği en zor olan kiltaşı silttaşı ardalanmalı birimi içinde yer alan çoğunlukla kalsit çimentolu konglomera seviyeleri, kazılabilirliği orta seviye olan iyi pekişmiş kilttaşı silttaşı ardalanması ve en kolay kazılabilen birim olan çimentolanmamış ince kumlu siltli seviyelerdir.

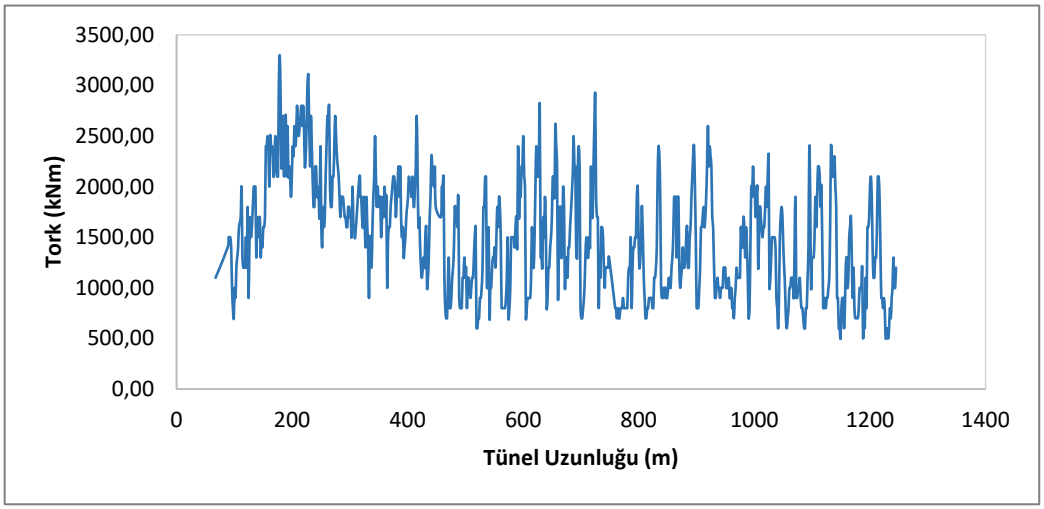
Makinanın uyguladığı itme kuvvetinin Şelmo formasyonu boyunca değişimi Şekil 4.1'de verilmiştir. 1293 m uzunluğuna sahip Şelmo formasyonunda elde edilen ortalama itme kuvveti 4489 kN olmuştur. 338-460 metreler arasında gözlenen yüksek itme kuvveti, 460. metrede 25 adet kesici diskin değiştirilmesi sonucunda ortalamaya yakın seviyelere düşmüştür. 660-747 metreler arasında da itme kuvveti yükselmiş ve yine 705 ve 760. metrelerde toplamda 21 adet kesici diskin değiştirilmesi sonucunda itme kuvveti ortalama değerlere yakın seviye düşüş göstermiştir. Benzer durum 906, 948, 966 ve 1107 inci metrelerde de gözlemlenmiştir. Aşınmış keskilerde itme kuvvetindeki artışın nedeni, keski ile kayaç arasındaki sürtünme alanının artmasının bir sonucu olarak açıklanabilir. İtme kuvveti açısından baktığımızda keski değişim

noktalarında kuvvetin maksimum olduğunu, ayrıca konglomera içeren ve kazının zor olduğu bölgelerde de itme kuvvetinin yüksek olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.1. Şelmo formasyonunda itme kuvveti değişimi.

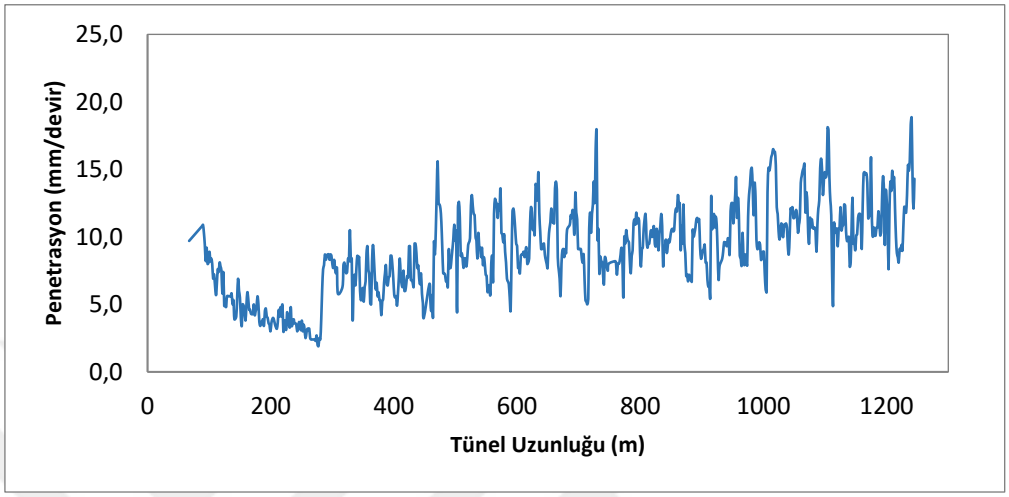
Şelmo formasyonunda makine tarafından kaydedilen tork değerlerinin değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir. Formasyon boyunca ortalama tork değeri 1504.03 kNm olmuştur. Kiltaşı silttaşı ardalanmalı birimde tork değerleri ortalamanın oldukça üzerinde gözlenmiştir. Bu bölgede killi birimler kafayı sararak bloke etmiş ve kesici kafanın dönmesini zorlaştırmıştır. Ayrıca konglomeralı bölgelerde de yine tork artışı gözlenmiştir.



Şekil 4.2. Şelmo formasyonunda tork değişimi.

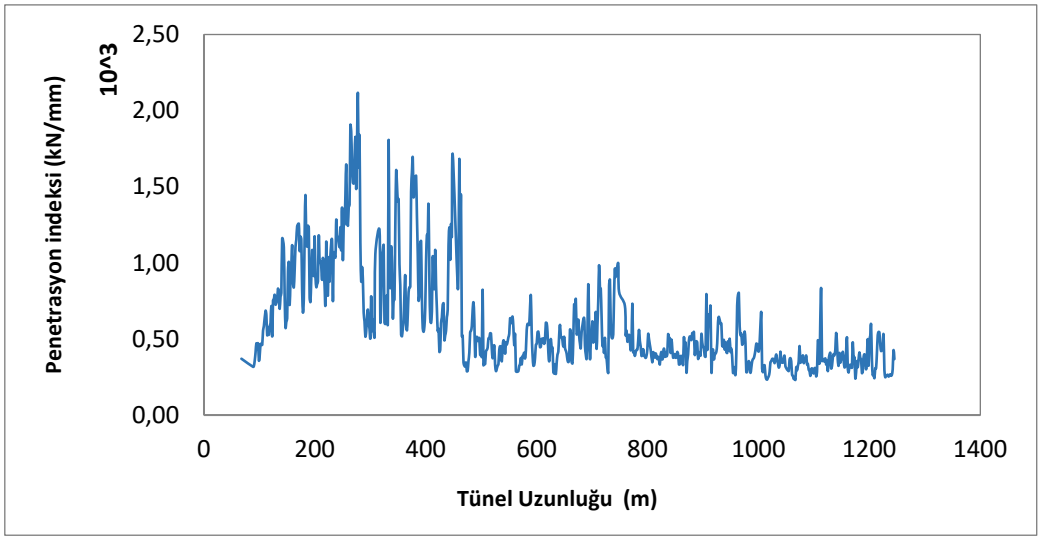
Şelmo formasyonunda penetrasyon değişim grafiği Şekil 4.3'te verilmiştir. Penetrasyon değerlerinde görülen değişimlerde formasyonun heterojen yapıya sahip

olması önemli rol oynamaktadır. Ortalama penetrasyon değeri devir başına 8.96 mm'dir. İlk 250 m'deki bariz düşüklük, daha önce de belirtilen bu bölgedeki konglomera merceklerinden ileri gelmektedir. Aynı zamanda yüksek itme kuvvetine ihtiyaç duyulan bölgelerde, düşük penetrasyon değerleri elde edilmiştir.



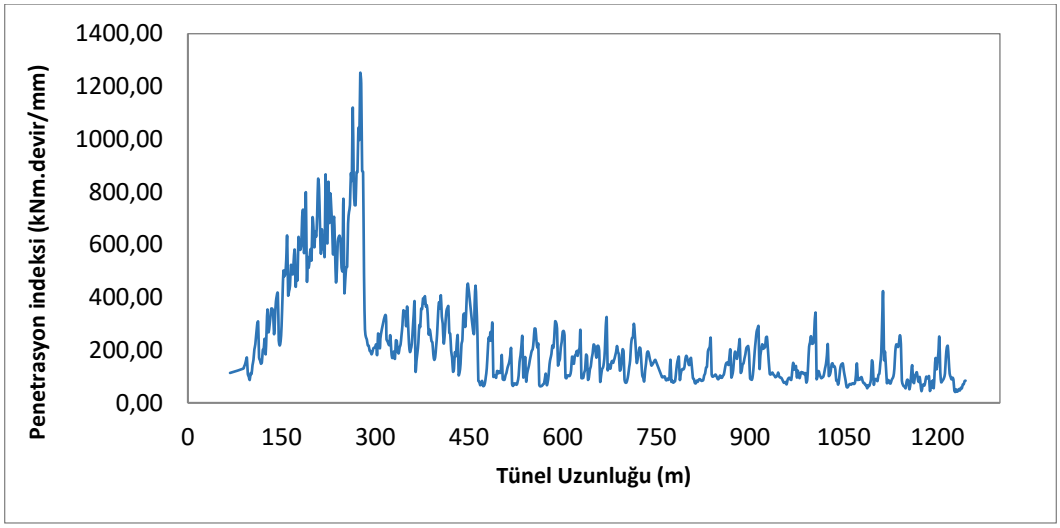
Şekil 4.3. Şelmo formasyonunda penetrasyon değişimi.

Kazı performansının önemli bir parametresi olan itme kuvvetine dayanılarak hesaplanan penetrasyon indeksi değerlerinin tünel ekseni boyunca değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Bu değer bir ringdeki ortalama itme kuvveti değerinin o ringdeki ortalama penetrasyon değerine bölünmesi ile elde edilir. Başka bir değişle birim kesme derinliğine düşen itme kuvveti değeri olarak tanımlanabilir. Ortalama itme kuvvetine bağlı penetrasyon değeri 595.44 kN/mm olmuştur. Formasyonun sert olduğu konglomeralı kesimlerde itme kuvvetinin artmasına rağmen ona karşılık gelen penetrasyon değerlerinin aynı oranda artmadığı ve düşük olduğu görülmektedir. Benzer durum, killi birimlerin yoğun olduğu ve kesici kafa sıvamalarının yaşandığı bölgelerde de görülmüştür. Kesici kafa ve disklerin bloke olması sonucunda; disklerde tek yönlü aşınma meydana gelmekte, disk ömrü kısalmakta ve dolayısıyla kesme performansı düşmektedir.



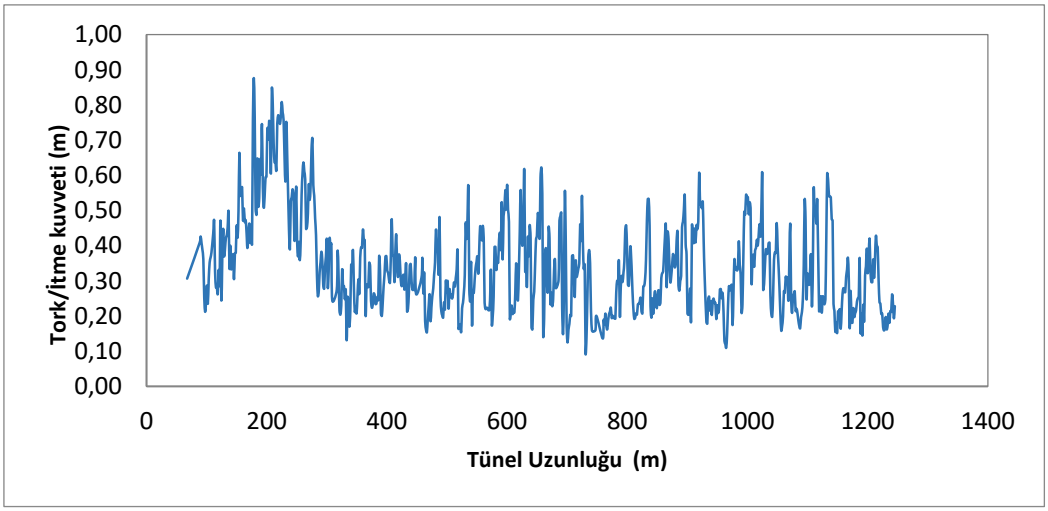
Şekil 4.4. Şelmo formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi değişimi.

Torka bağlı olarak hesaplanan penetrasyon indeksi değerlerinin tünel ekseni boyunca değişimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu hesaplamada ringlere ait ortalama tork değerleri ortalama penetrasyon değerlerine bölünmüştür. Formasyonun torka bağlı penetrasyon indeksi ortalama 217.08 kNm.devir/mm (tork/mm) dir. Şekil 4.5'te de görüldüğü gibi konglomeralı kesimlerde yüksek tork değerlerine karşın penetrasyon değerinin düşük gerçekleşmiştir. Diğer bölgelerde tork ve penetrasyon arasında daha oransal bir değişim söz konusudur.



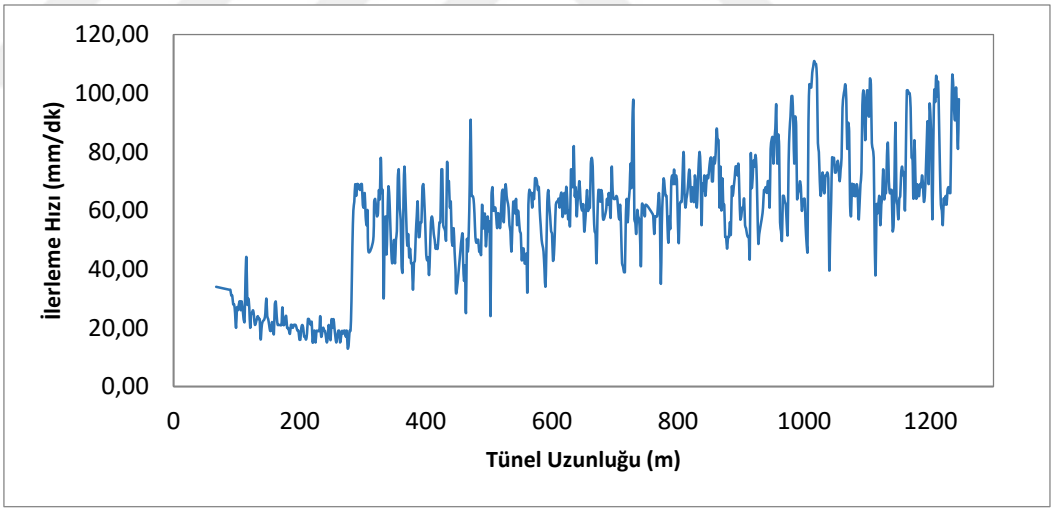
Şekil 4.5. Şelmo formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksi değişimi.

Şelmo formasyonunda tork/itme kuvveti oranının değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Şelmo formasyonunun çimento dolgulu konglomera merceği içeren ilk 250 metresindeki tork/itme oranı diğer bölgelere göre daha yüksek çıkmıştır.



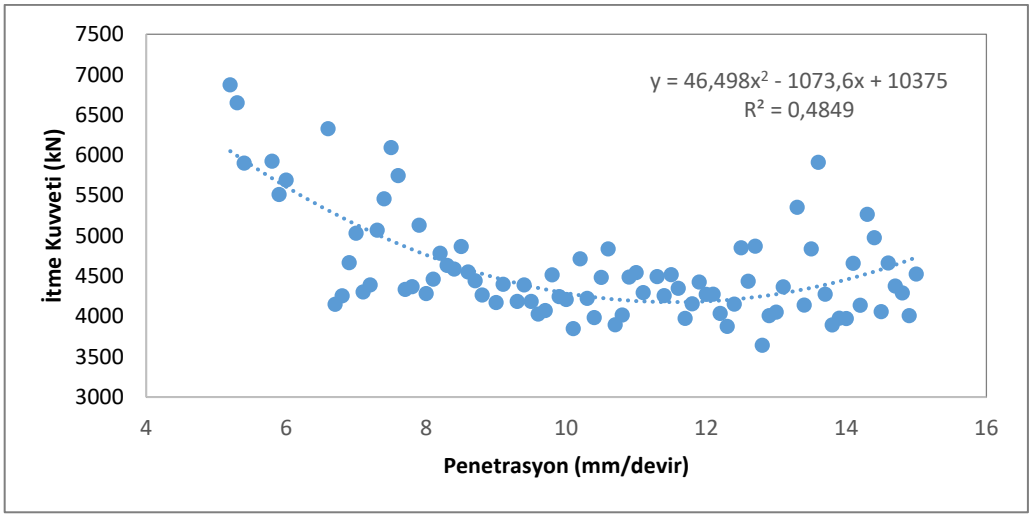
Şekil 4.6. Şelmo formasyonuna ait tork/itme oranı değişimi.

Şelmo formasyonunda TBM ilerleme hızının değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir. Formasyon için ortalama ilerleme miktarı 57.94 mm/dk olarak hesaplanmıştır. Şelmo formasyonu RMR ve RQD değerleri açısından kolay kazılabilir bir formasyon gibi görünse de, tünelin ilk 250 metresindeki konglomera merceklerinden dolayı ilerleme hızı oldukça düşük gerçekleşmiştir.



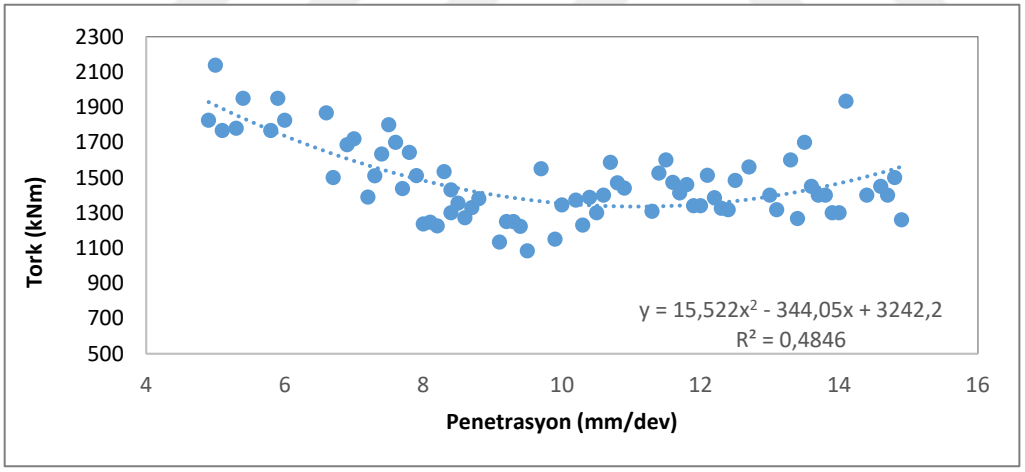
Şekil 4.7. Şelmo formasyonunda ilerleme hızı değişimi.

Şelmo formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki yüksek bir korelasyon elde edilmemekle birlikte (% 48.49), itme kuvveti arttıkça penetrasyonun nispeten azaldığı görülmüştür (Şekil 4.8).



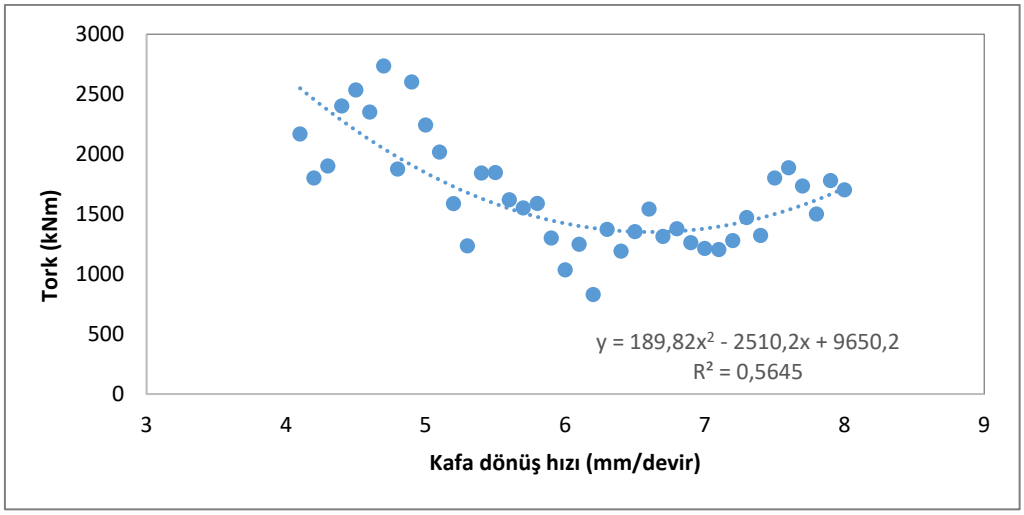
Şekil 4.8. Şelmo formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Penetrasyon ve tork arasındaki değişime bakıldığında iyi bir korelesyon elde edilmemekle birlikte (% 48.46), Şelmo formasyonunda konglomera mercekleri ve kilin yoğun olduğu bölgelerde yüksek tork değerlerine karşılık yeterli penetrasyon (kesme derinliği) sağlanamadığı görülmektedir. Diğer kesimlerde ise torka bağlı olarak penetrasyonun da göreceli olarak arttığı görülmektedir (Şekil 4.9).



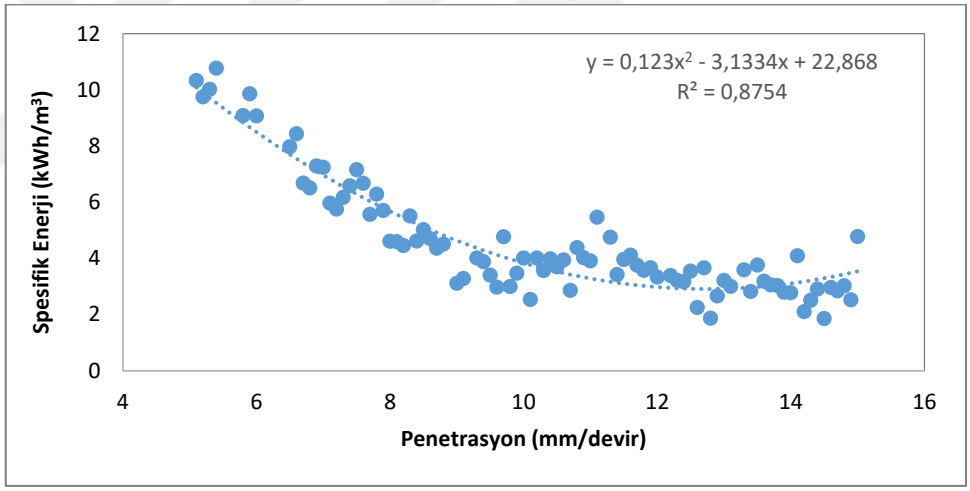
Şekil 4.9. Şelmo formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Şelmo formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki incelenmiş ve bu parametrelerin ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Devir sayısı arttıkça disklerin kesme derinliğinin azalması nedeniyle tork değerlerinde düşüş yaşanmış ve %56.45 değerinde korelasyon sağlanmıştır (Şekil 4.10).



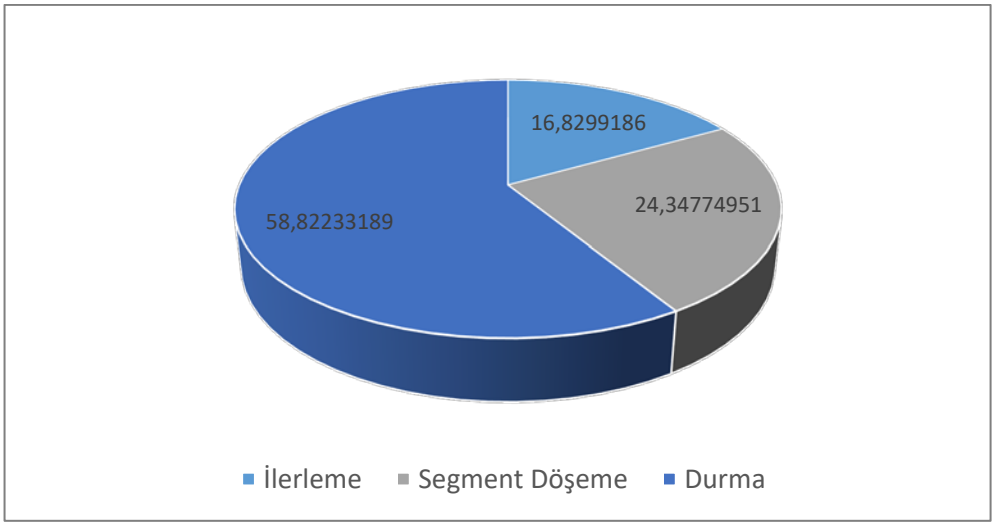
Şekil 4.10. Şelmo formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki.

Şelmo formasyonunda penetrasyona bağlı spesifik enerji değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir. Penetrasyon arttıkça spesifik enerjide düşüş gözlenmiş ve %87.54 değerinde yüksek bir korelasyon elde edilmiştir.



4.11. Şelmo formasyonunda spesifik enerji ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Şelmo formasyonunda TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları Şekil 4.12'de verilmiştir. Toplam zamanın %58.82'si durma, %24.35'i segment döşeme, %16.83'ü ilerleme ile harcanmıştır.

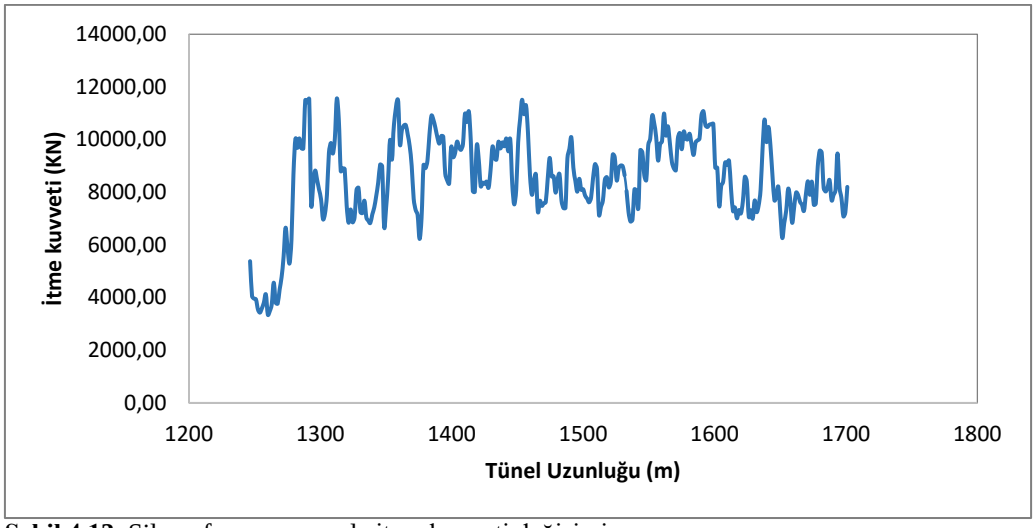


4.12. Şelmo formasyonunda TBM ilerleme, durma ve segment döşeme oranlarının dağılımı.

4.1.1.2. Silvan Formasyonu

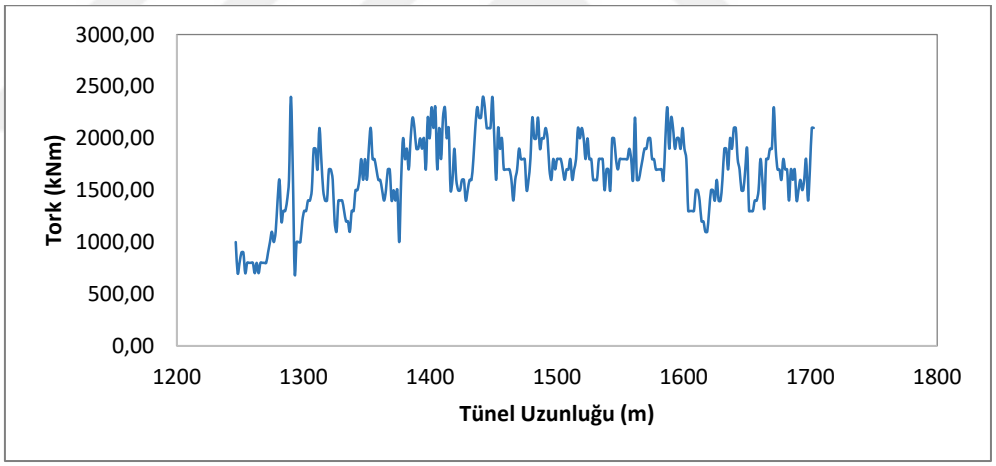
Silvan formasyonu kendi içinde iki birim olarak ayırtlanabilmektedir. Bunlardan birincisi zor kazılan resifal masif kireçtaşlarından oluşmakta; ikincisi ise kireçtaşı seviyelerine göre daha kolay kazılabilen killi kireçtaşı marn ardalanmasından oluşan bir birimdir. Mühendislik jeolojisi raporuna göre 805 m uzunluğunda olması beklenen bu formasyon 447 m uzunluğunda geçilmiştir. Silvan formasyonunda 14 Ekim 2014 ile 30 Ekim 2014 tarihleri arasında TBM kazısı yapılmıştır.

Şekil 4.13'te Silvan formasyonunda itme kuvvetinin değişimi verilmiş ve ortalama itme kuvveti 8476.35 kN olarak hesaplanmıştır. Şelmo-Silvan formasyonu geçiş bölgesinde itme kuvvetinde azalma gözlenmiştir. Bu bölge dışında Silvan formasyonun farklı dayanımlara sahip birimler içermesi nedeniyle itme kuvvetinde yer yer yükselmeler olsa da, geneli itibariyle belirgin bir değişim gözlenmemiştir.



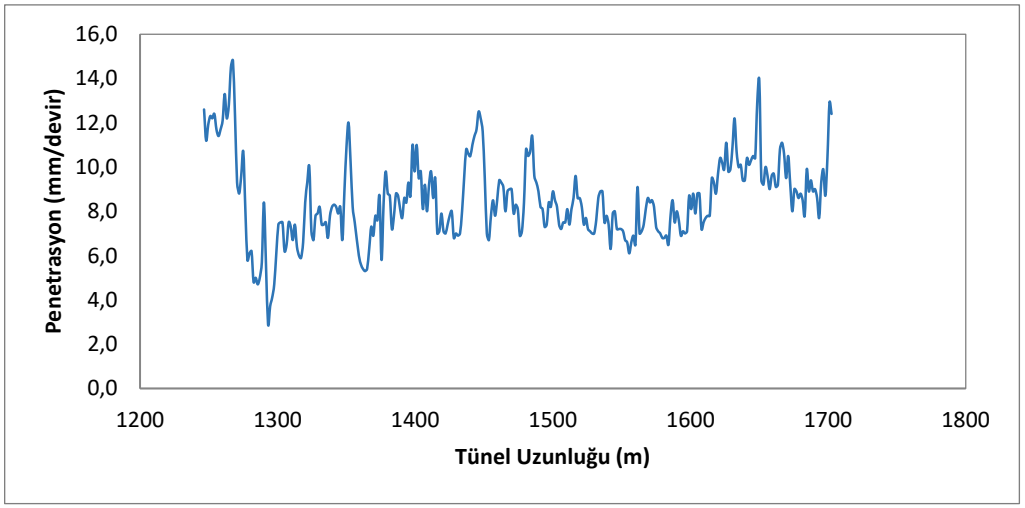
Şekil 4.13. Silvan formasyonunda itme kuvveti değişimi.

Şelmo-Silvan formasyonu geçişinde tork değerleri formasyon genelinden daha düşük gözlemlenmiş ve ortalama tork değeri 1649.24 kNm olmuştur (Şekil 4.14). Tork değerlerindeki değişimler formasyon içindeki masif kireçtaşı, killi kireçtaşı ve marn birimlerinden oluşan heterojen yapıdan kaynaklıdır.



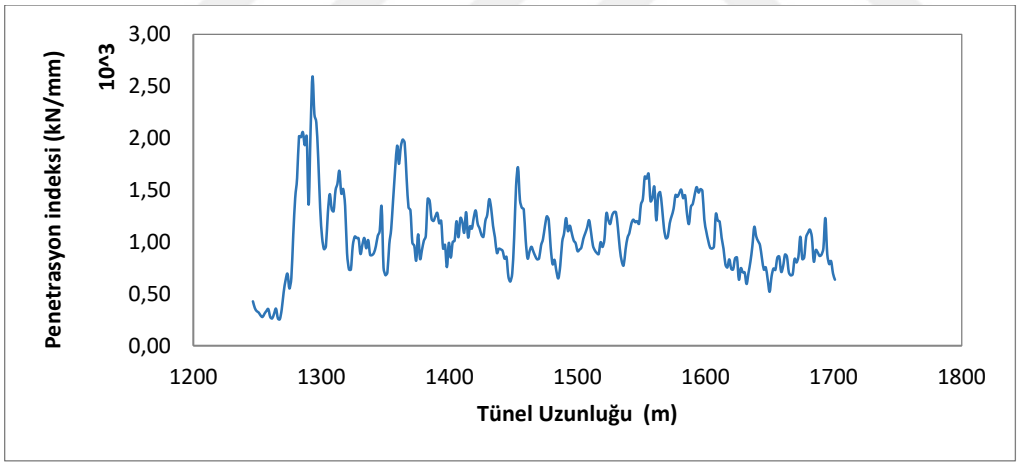
Şekil 4.14. Silvan formasyonunda tork değişimi.

Silvan formasyonunun kazısı sırasında elde edilen penetrasyon değerleri Şekil 4.15'te verilmiş ve ortalama penetrasyon değeri 8.52 mm/devir olarak hesaplanmıştır. Formasyon geçişinde penetrasyon değeri killi ve boşluklu yapıdan dolayı genel dağılımdan daha yüksek gözlemlenmiştir. Yüksek dayanımlı masif kireçtaşı seviyeleri geçilirken penetrasyon değerleri düşük, kolay kazılabilir diğer kesimlerde ise penetrasyon yüksek gözlenmiştir.

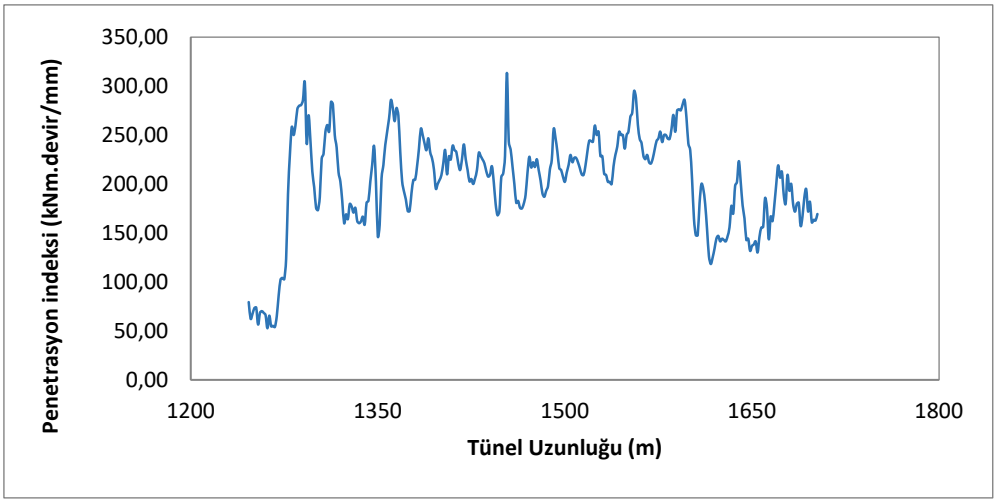


Şekil 4.15. Silvan formasyonunda penetrasyon değişimi.

Silvan formasyonunun itme kuvvetine ve torka bağlı penetrasyon indeksi grafikleri Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir. Her iki grafikte de hem itmeye bağlı (itme kuvveti/penetrasyon) hem de torka bağlı (tork/penetrasyon) penetrasyon indeksi değerleri; yüksek dayanımlı birimler geçilirken yüksek, diğer bölgelerde ise düşük bir eğilim göstermiştir.

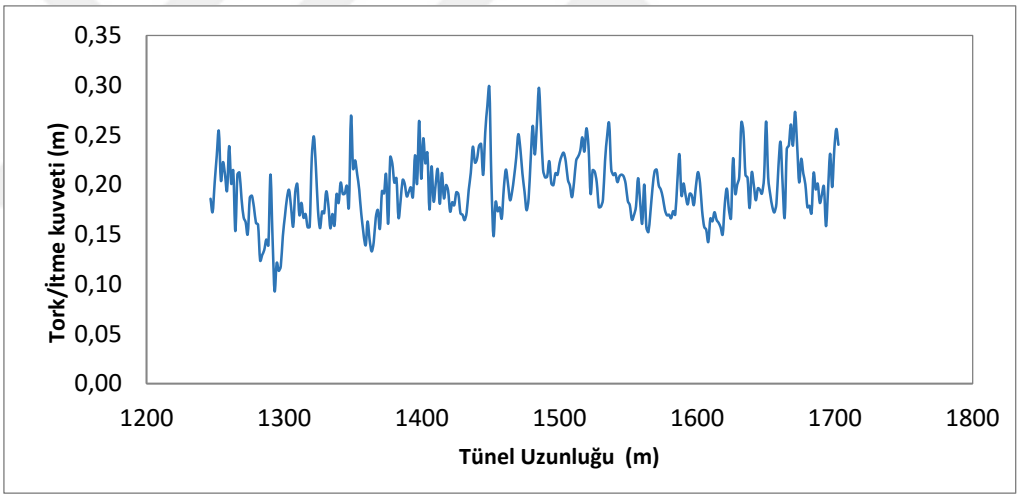


Şekil 4.16. Silvan formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksinin değişimi.



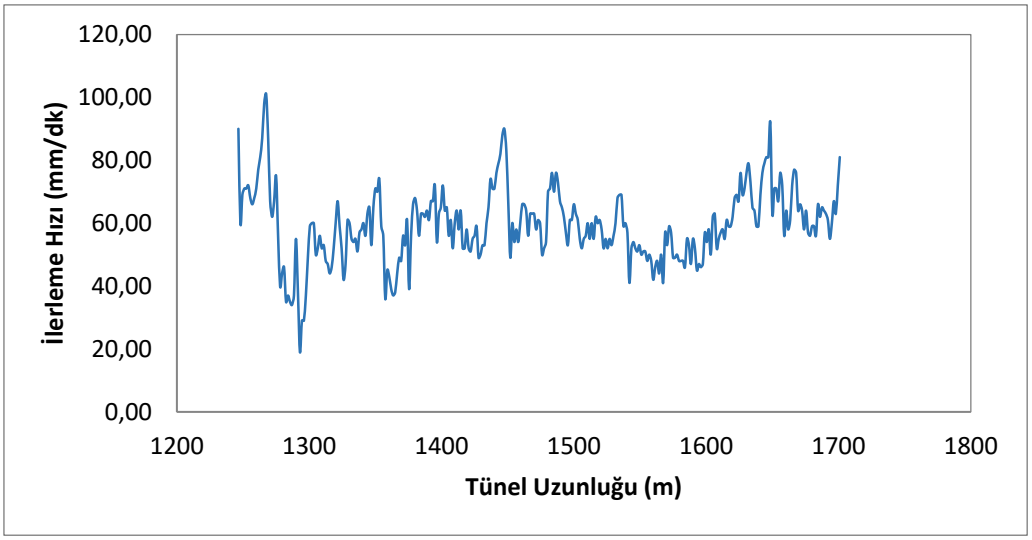
Şekil 4.17. Silvan formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksinin değişimi.

Silvan formasyonu için tork/itme kuvveti oranının değişimi Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi Silvan formasyonu boyunca yer yer pik noktalar olsa da önemli bir değişkenlik gözlenmemiştir.



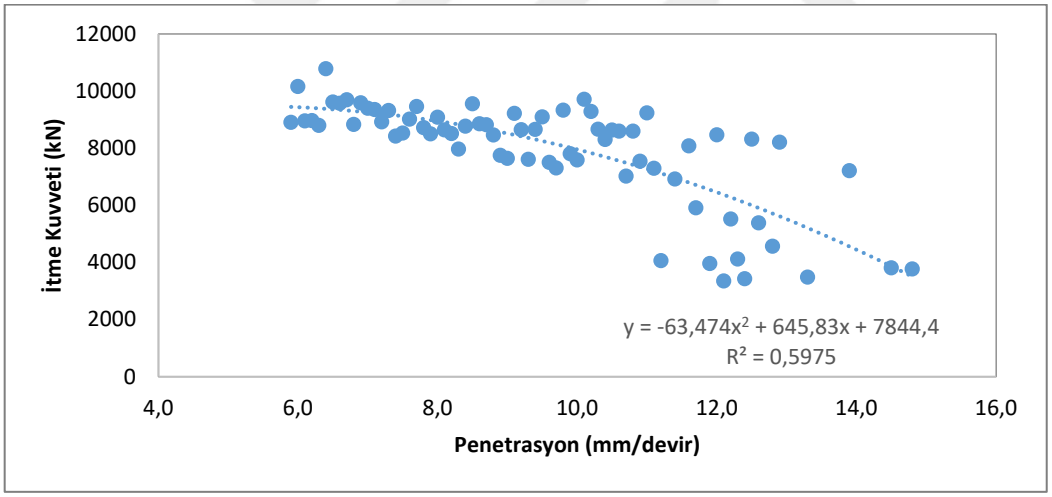
Şekil 4.18. Silvan formasyonunda tork/itme oranı değişimi.

Silvan Formasyonunda ilerleme hızı değişimi Şekil 4.19'da görülmektedir. Şelmo-Silvan Formasyonun geçişinde yüksek ilerleme hızı gerçekleşmiş olup, ortalama ilerleme hızı 59.41 mm/dk olarak hesaplanmıştır. Formasyon genelinde masif kireçtaşlarının olduğu kesimlerde ilerleme hızının düşüş gösterdiği tespit edilmiştir.



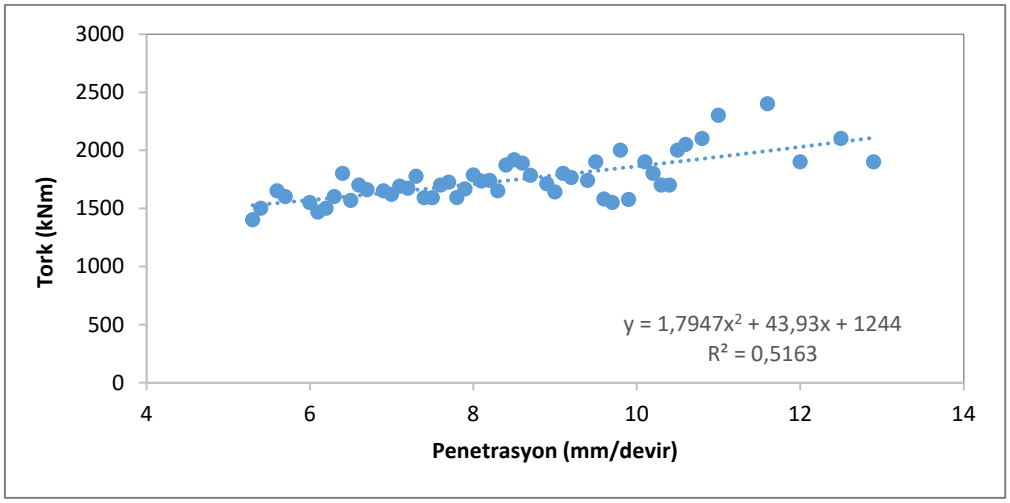
Şekil 4.19. Silvan formasyonunda ilerleme hızı değişimi.

Silvan formasyonda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi itme kuvveti ile penetrasyon arasında ters orantılı bir ilişki gözlenmiş ve %59.75 oranında korelasyon elde edilmiştir.



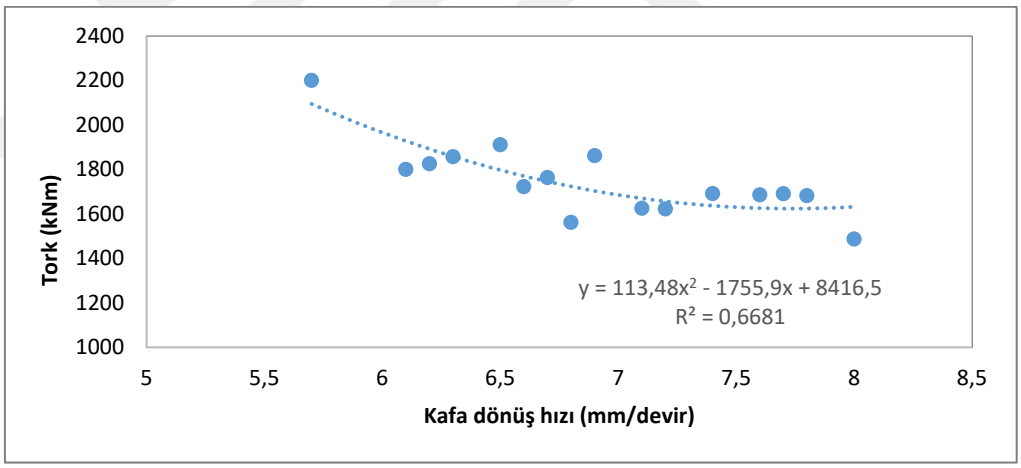
Şekil 4.20. Silvan formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Silvan formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki Şekil 4.21'de verilmiştir. Formasyonda tork arttıkça penetrasyonun da arttığı ve iki parametre arasında %51.63 değerinde korelasyon hesaplanmıştır.



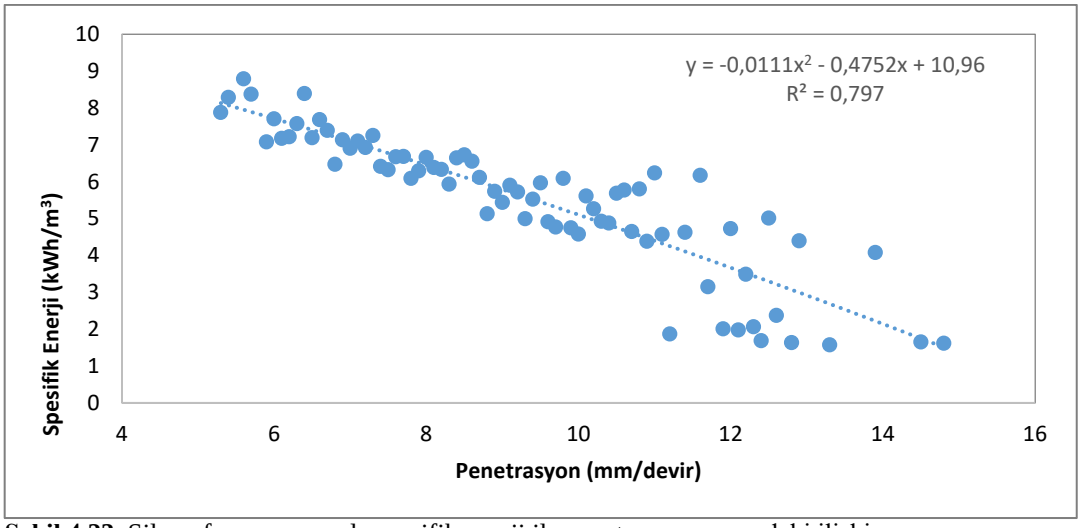
Şekil 4.21. Silvan formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Silvan formasyonunda, tork ile rpm arasındaki ilişki Şekil 4.22'de verilmiştir. Bu iki parametre arasında ters orantı olduğu gözlenmiş ve %66.81 değerinde korelasyon elde edilmiştir. Yüksek devir hızında disklerin kesme derinliklerinin değişimi bu sonuçta etkili olmuştur.



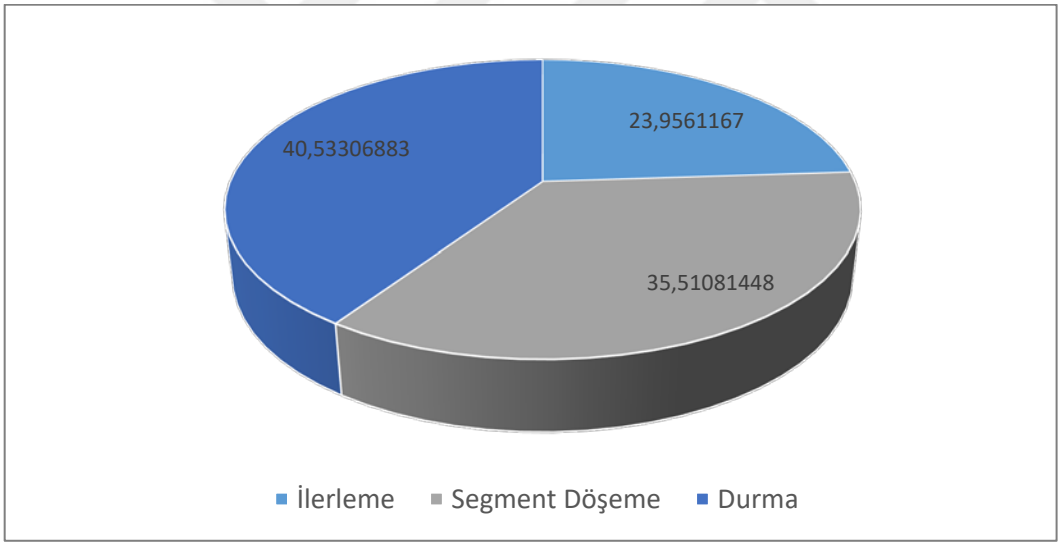
Şekil 4.22. Silvan formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki.

Silvan formasyonunda penetrasyon ile spesifik enerji arasındaki ilişki Şekil 4.23'te verilmiştir. Penetrasyon arttıkça spesifik enerjide düşüş gözlenmiş ve %79.70 seviyesinde korelasyon elde edilmiştir.



Şekil 4.23. Silvan formasyonunda spesifik enerji ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Silvan formasyonunda TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları Şekil 4.24'te verilmiştir. Formasyonda toplam zaman içinde durma süresi %40.53, segment döşeme süresi %35.51, ilerleme süresi ise %23.96 oranına sahiptir.



Şekil 4.24. Silvan formasyonunda TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları.

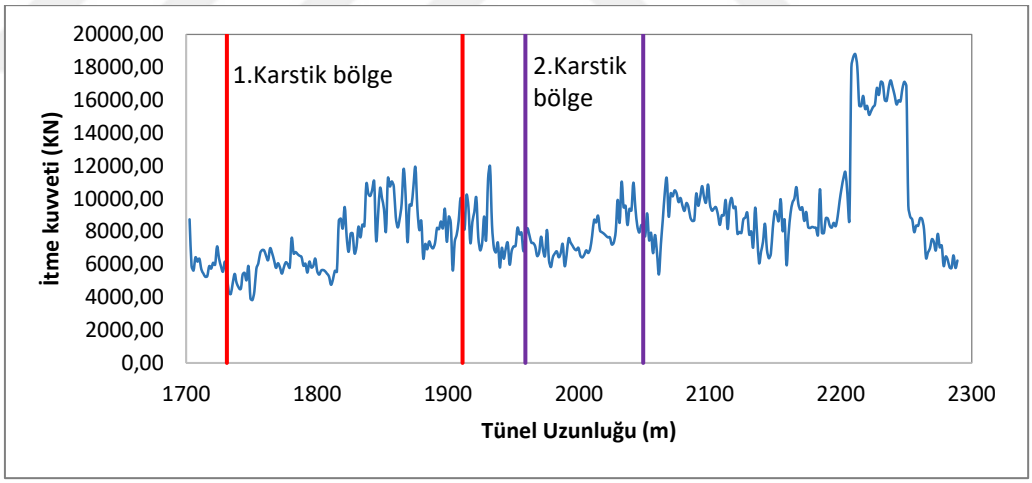
4.1.1.3. Midyat Formasyonu

Midyat grubu üç farklı kireçtaşı serisinden oluşmaktadır. Bunlar; iyi pekişmiş kazılabilirliği zor olan masif kireçtaşları, kazı kolaylığı açısından ikinci sırada olan yüksek tebeşir düzeyli marnla ardalanmalı Gaziantep formasyonu ile bol gözenekli iyi pekişmemiş ve yüzeyden 1-2 metreden sonra kolay kazılabilir özellikteki kalker içerikli Hoya formasyonudur.

Mühendislik jeolojisi raporuna göre 2175 m olması beklenen bu formasyon yaklaşık 611 m uzunluğunda geçilmiştir. 30 Ekim 2014 ile 11 Ocak 2015 tarihleri arasında Midyat formasyonunda kazı yapılmıştır.

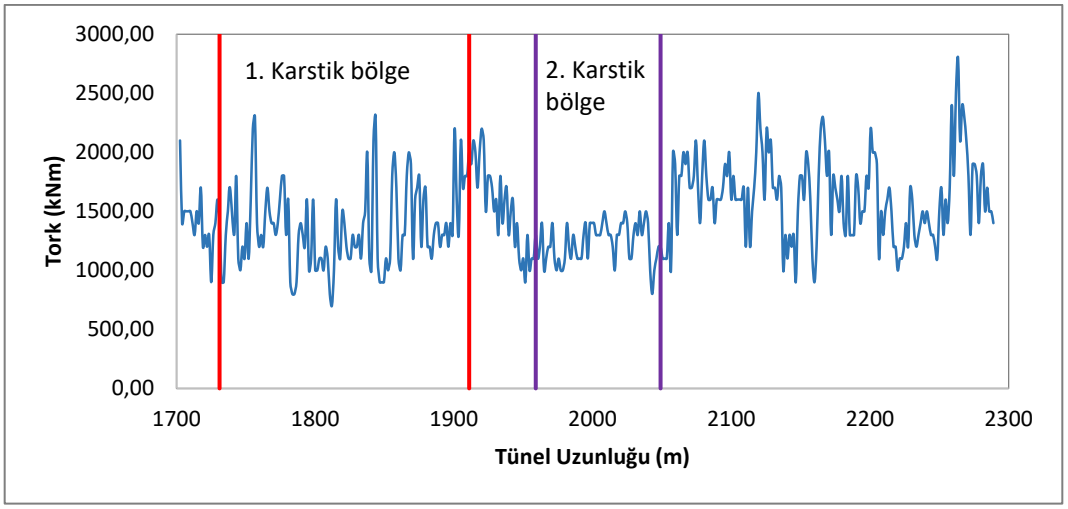
Daha önceki bölümde değinildiği gibi Midyat formasyonunda ilki 1730. metrede, ikincisi ise 2059. metrede olmak üzere; uzunlukları sırası ile 180 ve 90 m olan iki karstik boşluk geçilmiş; bu boşluklarda biriken yüksek basınçlı yeraltı suyunun tünele akması ile toplam 2200 lt/sn lik bir su geliri yaşanmıştır. Yaşanan bu problem kazı performansını ve tünel imalatını olumsuz yönde etkilemiştir.

Midyat formasyonunda itme kuvvetindeki değişimler Şekil 4.25'te verilmiştir. Midyat formasyonunun tamamında ortalama itme kuvveti 8468.47 kN, karstik boşlukların olduğu bölgeler için 7463.09, karstik boşluk içermeyen bölgeler için ise 9335.01 kN olmuştur. 2208-2250 metreler arasında masif kireçtaşlarının olduğu bölgelerde itme kuvveti değerleri neredeyse ortalamanın iki katı seviyelerine ulaşmıştır. Masif kireçtaşlarının olduğu bu 42 metrelik kısa mesafede, disklerde yaşanan aşınmalar sebebi ile farklı tarihlerde toplam 11 disk değiştirilmiştir.



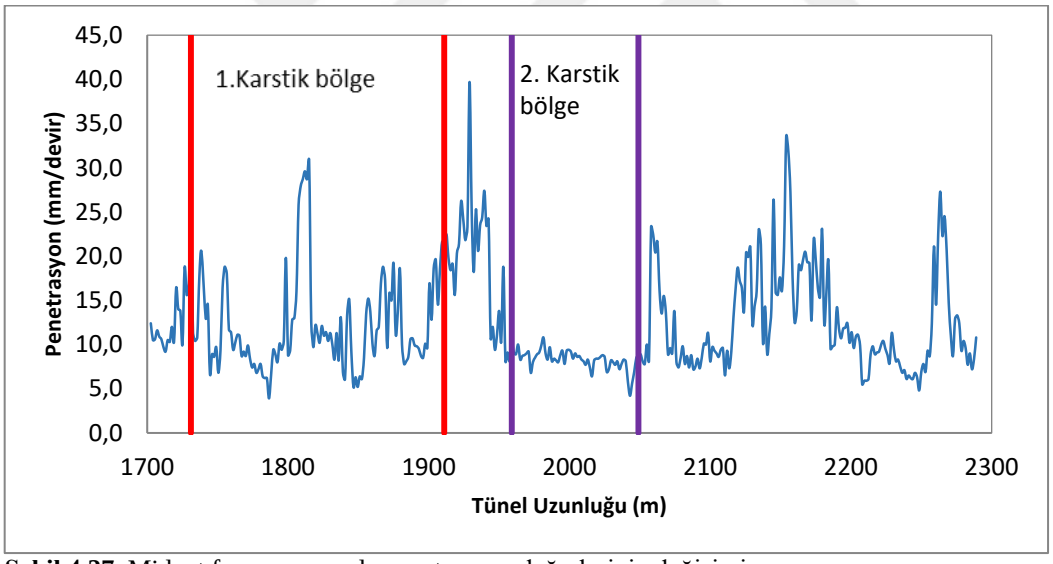
Şekil 4.25. Midyat formasyonunda itme kuvveti değişimi.

Midyat formasyonunda ölçülen tork değerleri Şekil 4.26'da verilmiştir. Midyat formasyonunun tamamında ortalama tork değeri 1466.75 kNm, su geliri yaşanan karstik boşluklu bölgelerde 1321.55 kNm, ve masif sağlam kayanın olduğu bölgelerde ise 1591.90 kNm olmuştur. Elde edilen bu değerlerden görüldüğü gibi karstik boşluk bulunan bölgelerde tork değerleri azalmaktadır. Karstik boşluklu bölgelerde tork değerlerinde görülen yer yer anlık artışlar, tünele yer yer suyla beraber gelen sedimanın kafayı sararak kazıyı zorlaştırması ile açıklanabilir.



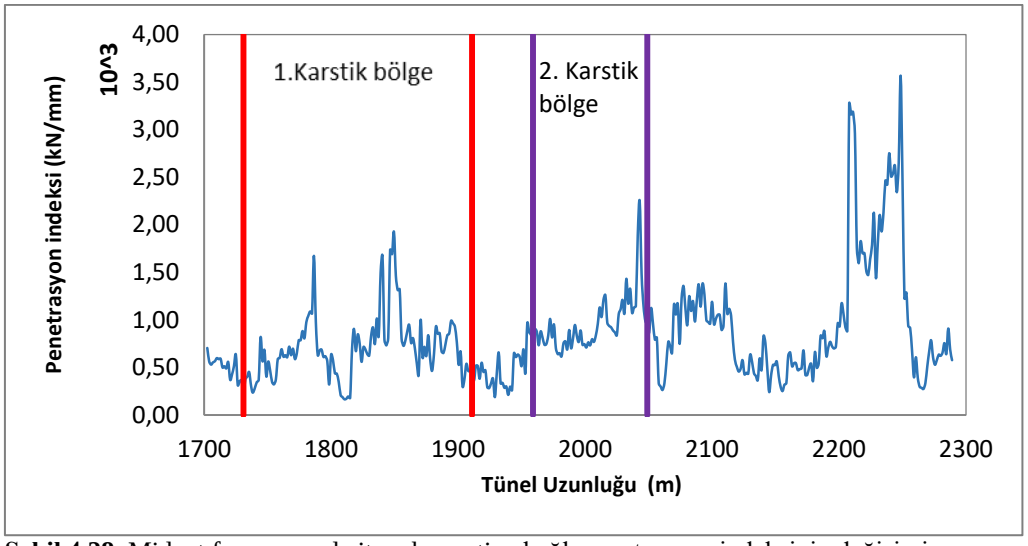
Şekil 4.26. Midyat formasyonunda tork değişimi.

Midyat formasyonunda ölçülen penetrasyon değerleri Şekil 4.27'de verilmiştir. Midyat formasyonunun tamamında ortalama penetrasyon değeri 12.33 mm/devir, karstik boşluklu bölgelerde 10.90 mm/devir ve masif sağlam kayanın olduğu bölgelerde ise 13.57 mm/devir olmuştur.



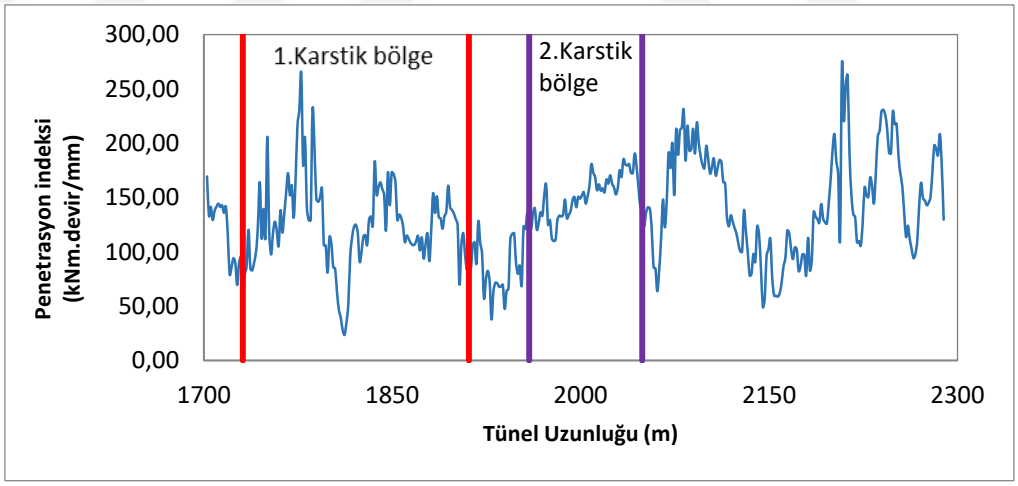
Şekil 4.27. Midyat formasyonunda penetrasyon değerlerinin değişimi.

Midyat formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi değişimi grafiği Şekil 4.28'de verilmiştir. Midyat formasyonunun tamamında penetrasyon indeksinin ortalaması 840.71 kN/mm, karstik boşluk içeren kesimlerinde 792.48 kN/mm ve masif kireçtaşlarında ise 882.27 kN/mm olarak tespit edilmiştir.



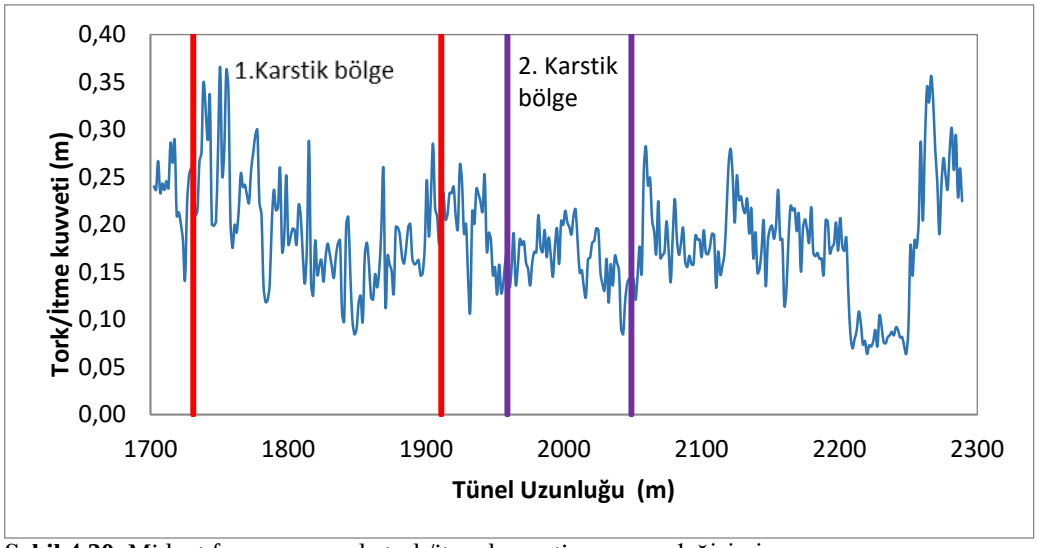
Şekil 4.28. Midyat formasyonda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksinin değişimi.

Midyat formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksi değişimi grafiği Şekil 4.29'da verilmiştir. Midyat formasyonunun tamamında ortalama penetrasyon indeksi 134.38 kNm.devir/mm, karstik boşluk içeren kesimlerinde 133.81 kNm.devir/mm ve masif sağlam kireçtaşlarında ise 134.87 kNm.devir/mm olarak belirlenmiştir Masif kireçtaşlarının olduğu ve tünele aşırı sediman akışının olduğu bölgelerde penetrasyon indeksi değeri artış göstermiştir.



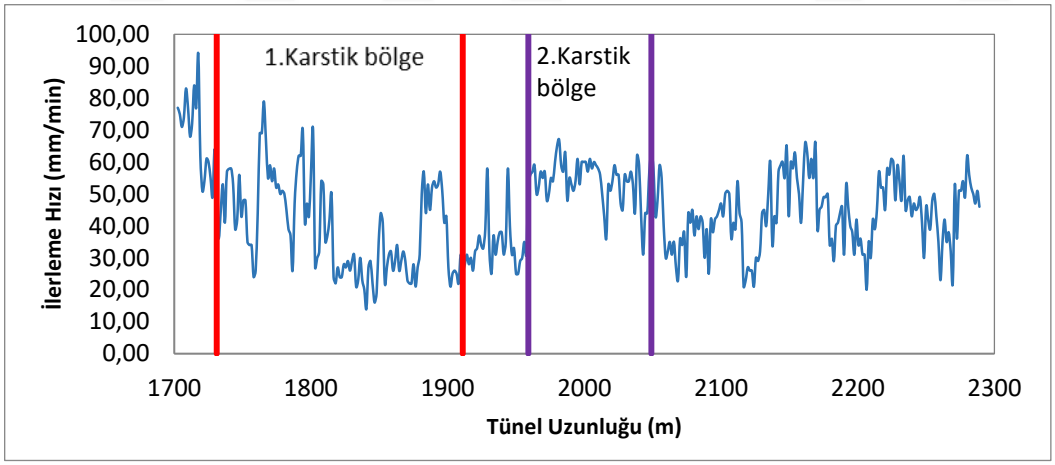
Şekil 4.29. Midyat formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksinin değişimi.

Midyat formasyonda tork/itme kuvveti oranının değişimi Şekil 4.30'da verilmiştir. Midyat formasyonunun tamamında ortalama tork/itme kuvveti oranı 0.19, karstik boşluk içeren kesimlerinde 0.18, masif kireçtaşlarında ise 0.19 olarak tespit edilmiştir. Şekilden 4.29'dan da görüldüğü gibi Midyat formasyonu boyunca tork/itme kuvveti oranında yer yer pik noktalar olsa da önemli bir değişkenlik gözlenmemiştir.



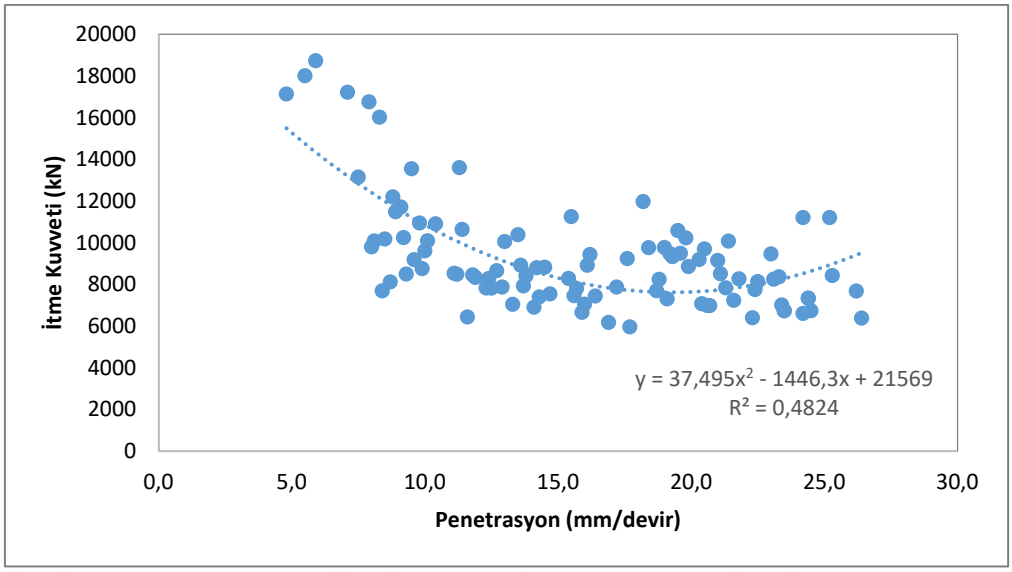
Şekil 4.30. Midyat formasyonunda tork/itme kuvveti oranının değişimi.

Midyat formasyonuna ait ilerleme hızının grafiksel gösterimi Şekil 4.31'de verilmiştir. Formasyonun tamamında, karstik boşluklu ve sağlam kayadan oluşan bölgelerde ortalama ilerleme hızları sırasıyla 44.32 mm/dk, 44.19 mm/dk, 44.43 mm/dk olmuştur. Bu değerler Midyat formasyonunun masif sağlam kesimlerinde ve aşırı su ve sediman gelirinin olduğu bölgelerde ilerleme hızlarının benzer olduğuna işaret etmektedir.



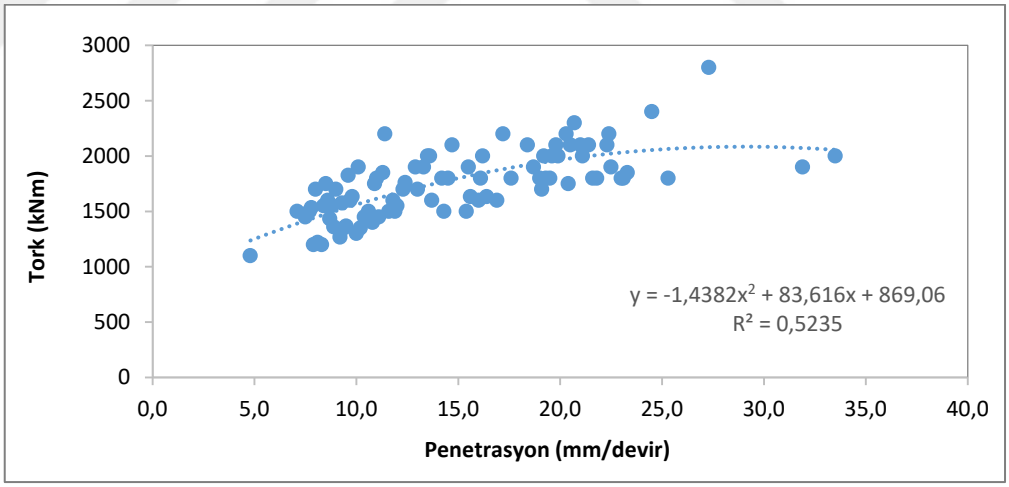
Şekil 4.31. Midyat formasyonunda ilerleme hızının değişimi.

Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerde itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki Şekil 4.32'de verilmiştir. Şekil 4.32'den de görüldüğü gibi itme kuvveti ile penetrasyon arasında ters orantılı bir ilişki gözlenmiş ve %48.24 oranında korelasyon sağlanmıştır.



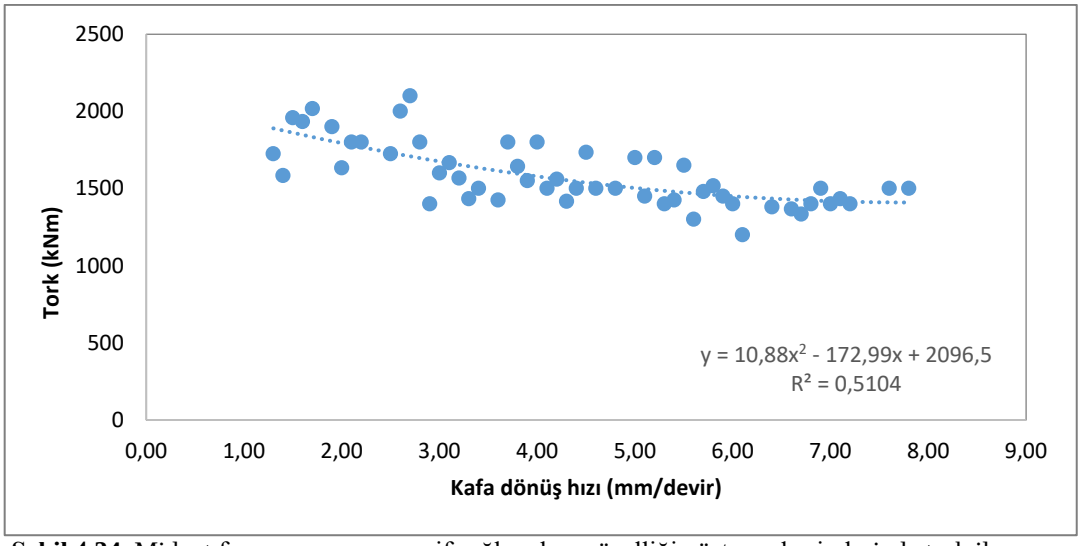
Şekil 4.32. Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerinde itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Midyat formasyonunda masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerde tork ile penetrasyon arasındaki ilişki Şekil 4.33'te verilmiştir. Şekil 4.33'ten de görüldüğü gibi tork arttıkça penetrasyon da artmış ve iki parametre arasında %52.35 değerinde korelasyon hesaplanmıştır.



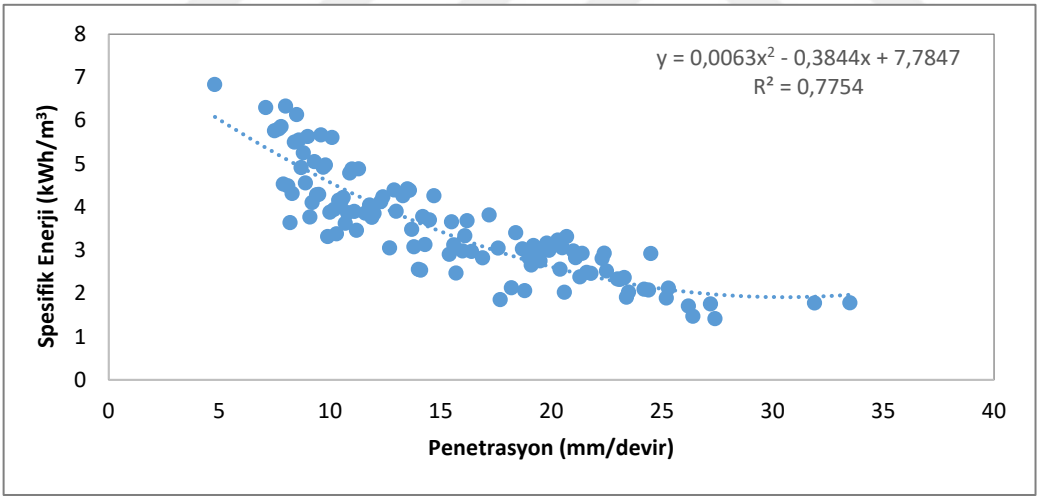
Şekil 4.33. Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerinde tork ve penetrasyon arasındaki ilişki.

Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerde tork ve rpm arasındaki ilişki Şekil 4.34'te verilmiştir. Bu iki parametre arasında ters orantılı bir ilişki olup, %51.04 seviyesinde korelasyon mevcuttur.



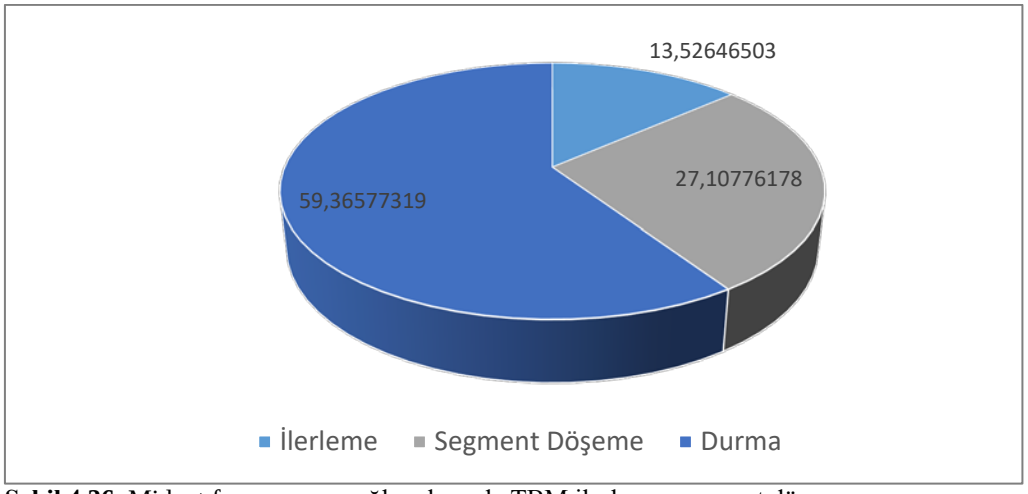
Şekil 4.34. Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerinde tork ile rpm arasındaki ilişki.

Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerde penetrasyon ile spesifik enerji arasındaki ilişki Şekil 4.35'te verilmiştir. Şekil 4.35'ten de görüldüğü gibi penetrasyon arttıkça spesifik enerji de düşüş gözlenmiş ve %77.54 seviyesinde korelasyon elde edilmiştir.



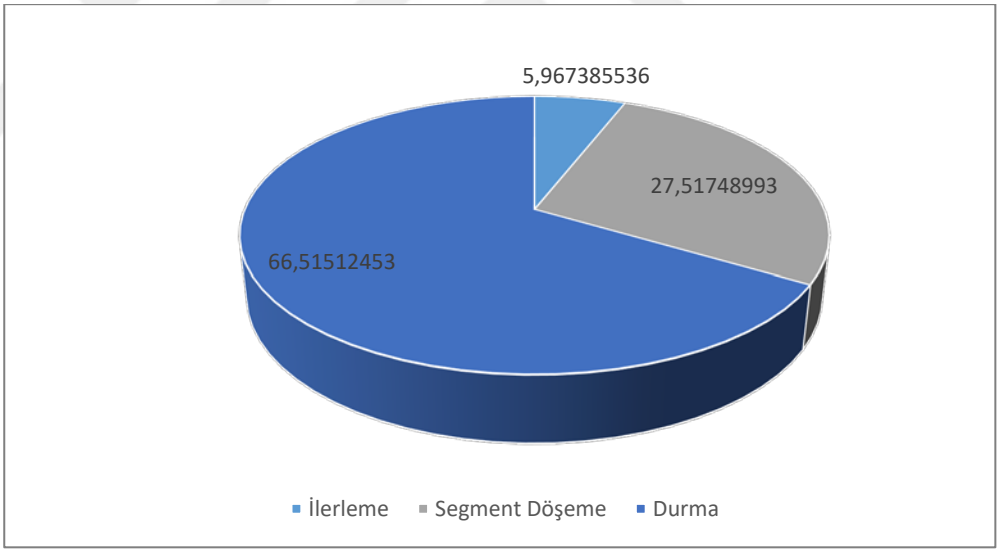
Şekil 4.35. Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerinde spesifik enerji ve penetrasyon arasındaki ilişki.

Midyat formasyonunun masif sağlam kaya özelliği gösteren kesimlerde TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları Şekil 4.36'da verilmiştir. Toplam zamanın içerisinde durma süresi %59.36, segment döşeme süresi %27.11 ve TBM ilerleme süresi %13.53 oranına sahiptir.



Şekil 4.36. Midyat formasyonu sağlam kayada TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları.

Midyat formasyonunun karstik boşluk içeren kesimlerinde TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları ise Şekil 4.37'de verilmiştir. Toplam zamanın içerisinde durma süresi %66.52, segment döşeme süresi %27.52 ve TBM ilerleme süresi %5.96 oranına sahiptir.



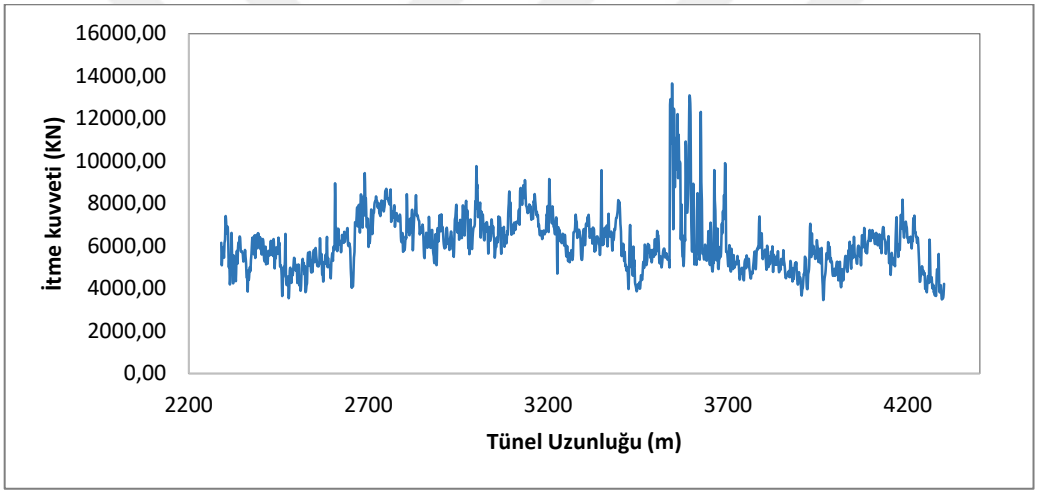
Şekil 4.37. Midyat formasyonu karstik boşluk içeren kesimlerinde TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları.

Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de verilen iki grafik karşılaştırıldığında; TBM durma süresinde %11 oranında artış, ilerleme süresinde ise %56 oranında düşüş gözlenmiştir. Segment döşeme süresinde ise önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.

4.1.1.4. Gercüş Formasyonu

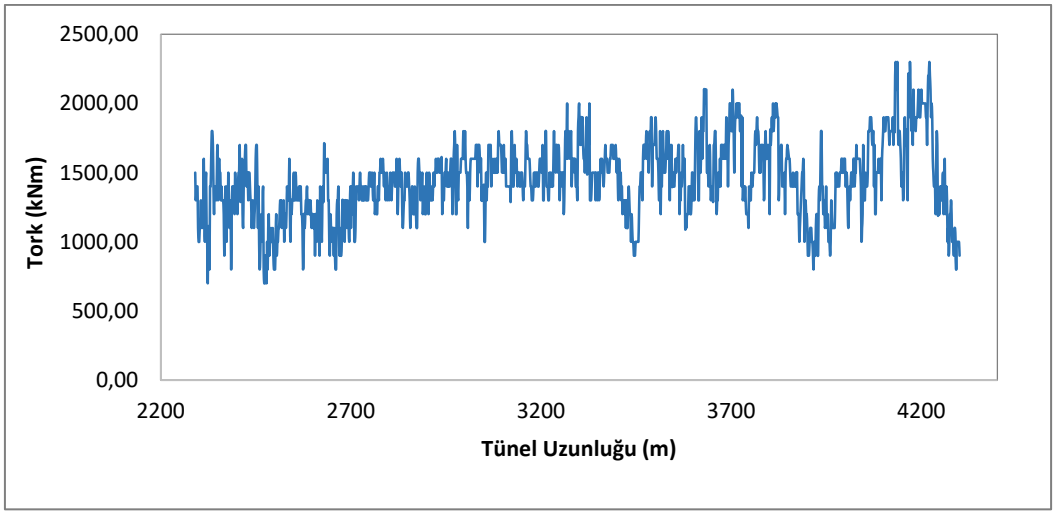
Tamamen karasal birimlerinden oluşan bu formasyon; kiltaşı, çamurtaşı, çakıltaşı ve jipsli seviyeler içerir. Birim karasal ortamda çökeldiğinden yanalda ve düşeyde ani değişimler gösterebilmektedir. Çakıltaşları yer yer iyi, yer yer ise de az seviyede kalsit çimentoludur. Çimentolanma durumu ve birim değişimine bağlı olarak kazılabilirliği farklılıklar gösterebilmektedir. Mühendislik jeolojisi raporuna göre 4200 m uzunluğunda olması beklenen bu formasyon 2187 m uzunluğunda geçilmiştir.

Gercüş formasyonunda ait itme kuvveti değerleri Şekil 4.38'de verilmiş olup, ortalama itme kuvveti 6153.35 kN olarak hesaplanmıştır. 3538-3624 metreler arasında itme kuvvetinde belirgin bir yükseliş gözlenmiştir. Bu bölgede sağlam çimentolu kazılabilirliği zor bir birimden geçilmiştir.



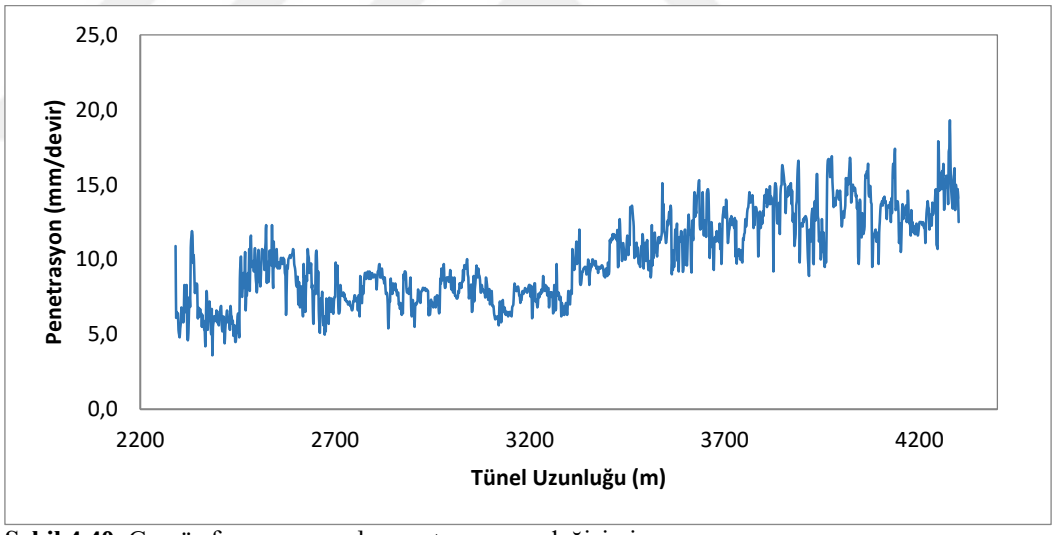
Şekil 4.38. Gercüş formasyonunda itme kuvvetinin değişimi.

Gercüş formasyonuna ait tork değerleri Şekil 4.39'da verilmiştir. Şekil 4.39'dan da görüldüğü gibi tork değerlerinin önemli oranda değişim göstermediği belirlenmiştir. Gercüş formasyonu için ortalama tork değeri 1447.31 kNm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.39. Gercüş formasyonunda torkun değişimi.

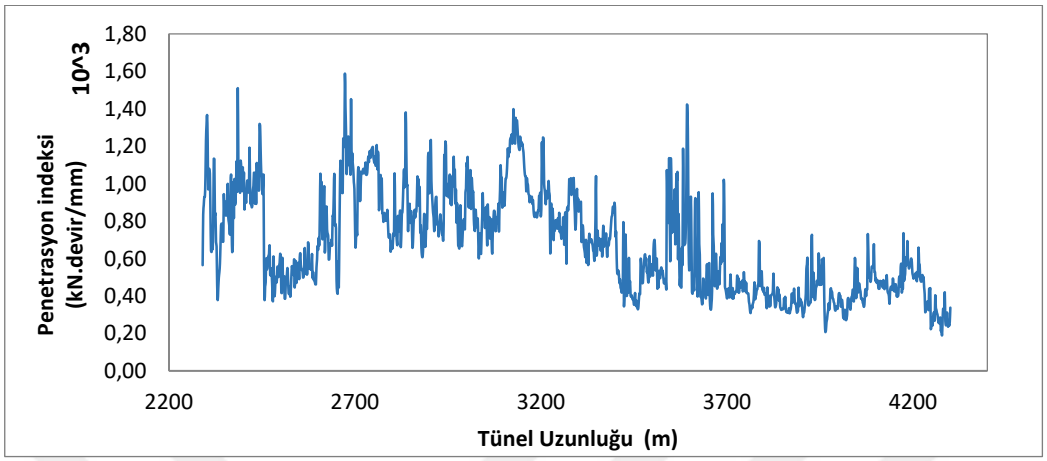
Gercüş formasyonunda ölçülen penetrasyon değerlerinin değişimi Şekil 4.40'ta verilmiş olup, ortalama penetrasyon değeri 10.03 mm/devir olarak hesaplanmıştır. İyi çimentolanma gözlenen bölgelerde düşük, aksi gözlenen bölgelerde ise yüksek penetrasyon değerleri elde edilmiştir.



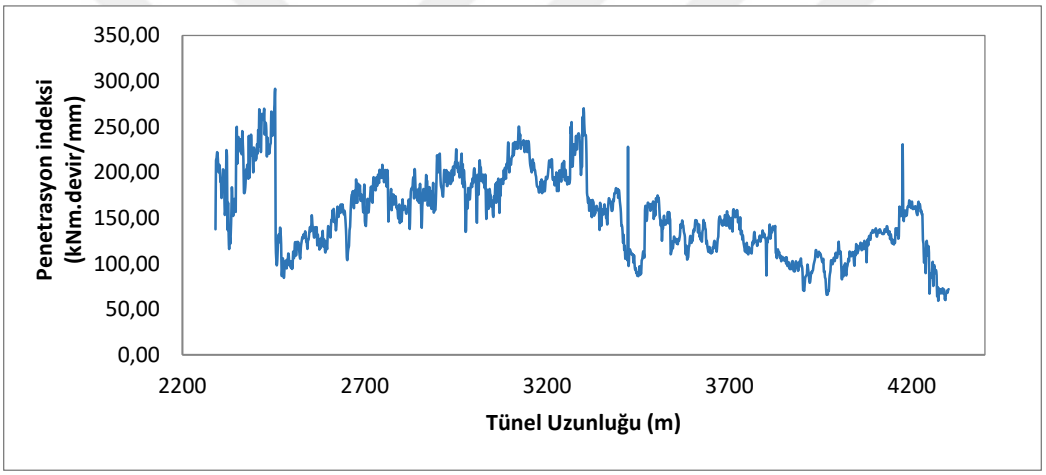
Şekil 4.40. Gercüş formasyonunda penetrasyonun değişimi.

Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi değişimi Şekil 4.41'de, torka bağlı penetrasyon indeksi değişimi ise Şekil 4.42'de verilmiştir. Gercüş formasyonu için itme kuvvetine bağlı ortalama penetrasyon indeksi 679.78 kN/mm, torka bağlı ortalama penetrasyon indeksi ise 154.00 kNm.devir/mm olarak hesaplanmıştır. Gercüş formasyonunun farklı dayanım özelliklerine sahip birimler içermesi nedeniyle penetrasyon indeksi değerleri farklı bir dağılım göstermiştir.

Özellikle kaya özelliği gösteren ve iyi çimentolanma derecesine sahip kesimlerde indeks değerleri yüksek gerçekleşmiştir.

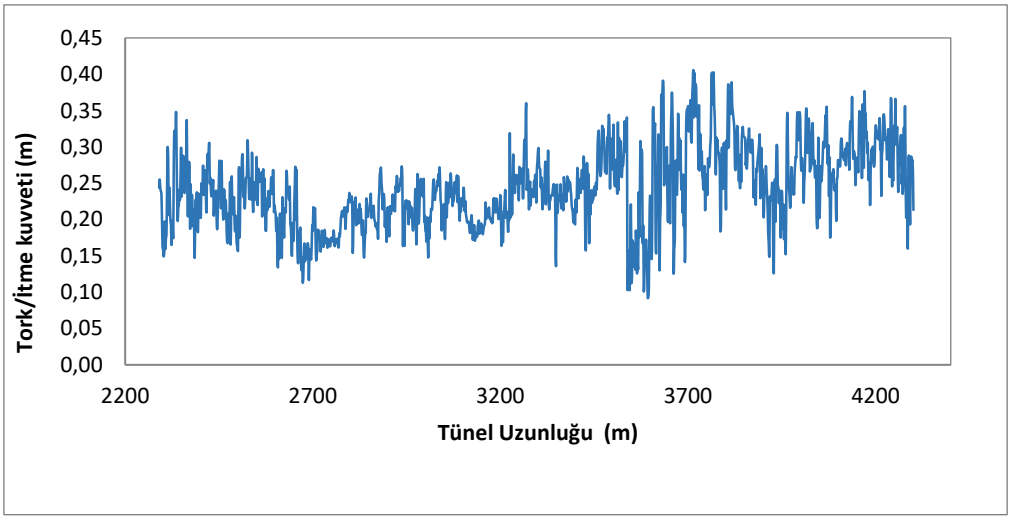


Şekil 4.41. Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksinin değişimi.



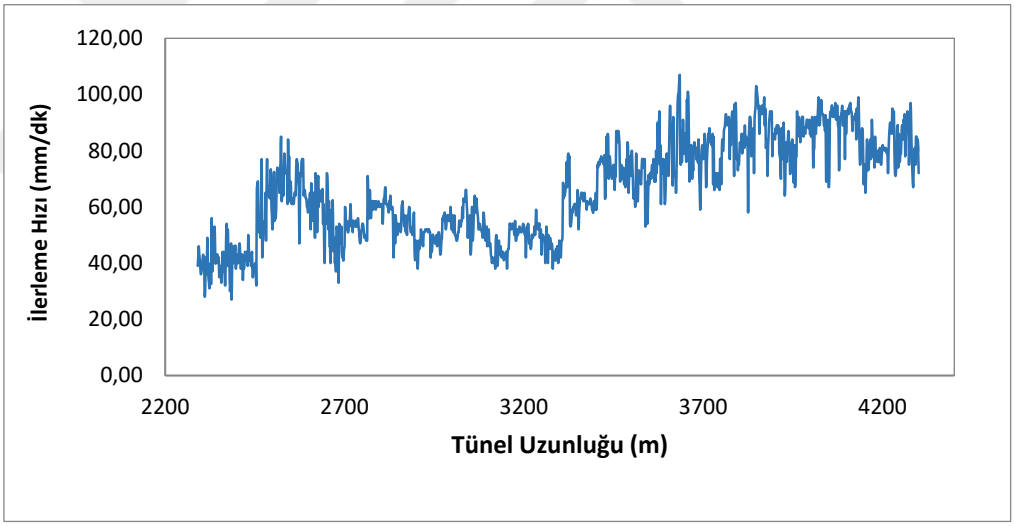
Şekil 4.42. Gercüş formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksinin değişimi.

Gercüş formasyonda tork/itme kuvveti oranının değişimi Şekil 4.43'te verilmiştir. Şekil 4.43'te de görülebileceği gibi Gercüş formasyonunda tork/itme kuvveti oranında formasyon boyunca kayda değer bir değişkenlik gözlenmemiştir.



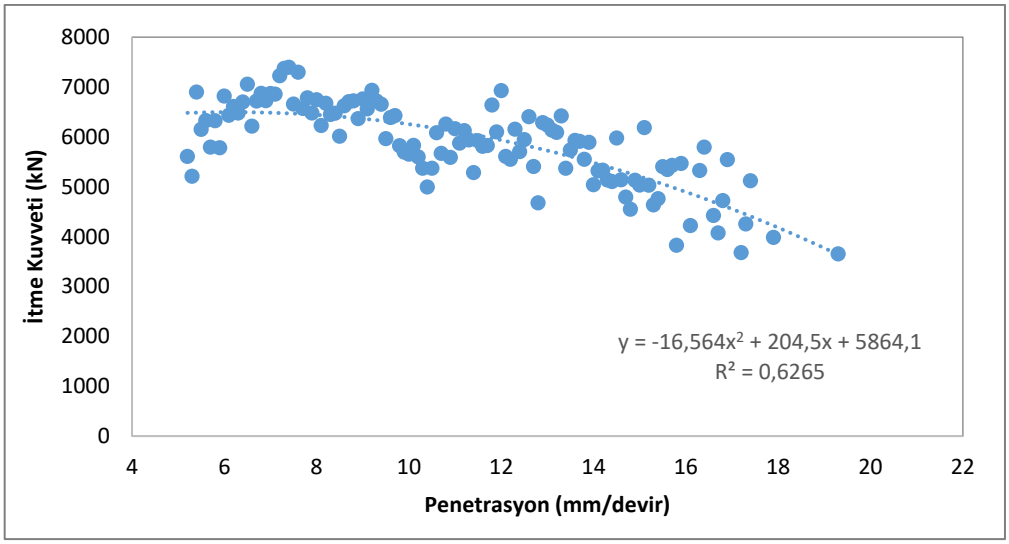
Şekil 4.43. Gercüş formasyonunda tork/itme kuvveti oranı değişimi.

Gercüş formasyonunda ilerleme hızının değişimi Şekil 4.44'te verilmiş olup, ortalama ilerleme hızı 65.76 mm/dk olarak hesaplanmıştır. İlerleme hızı ve penetrasyon değerleri birbirine yakın bir eğilim göstermiştir.



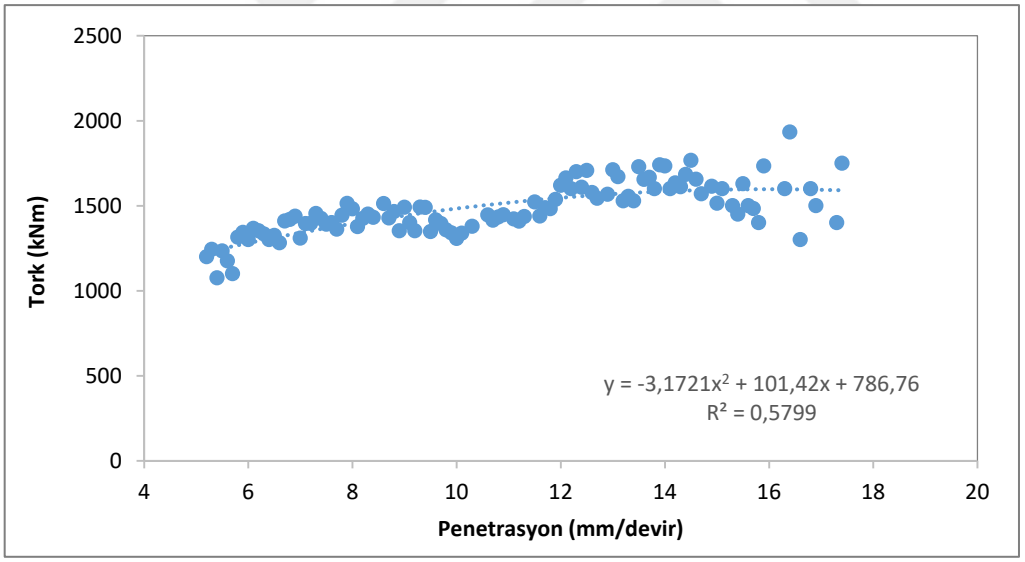
Şekil 4.44. Gercüş formasyonunda ilerleme hızının değişimi.

Gercüş formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki Şekil 4.45'te verilmiştir. Şekil 4.45'ten de görüldüğü gibi itme kuvveti ile penetrasyon arasında ters orantılı bir ilişki gözlenmiş ve %62.65 oranında korelasyon elde edilmiştir.



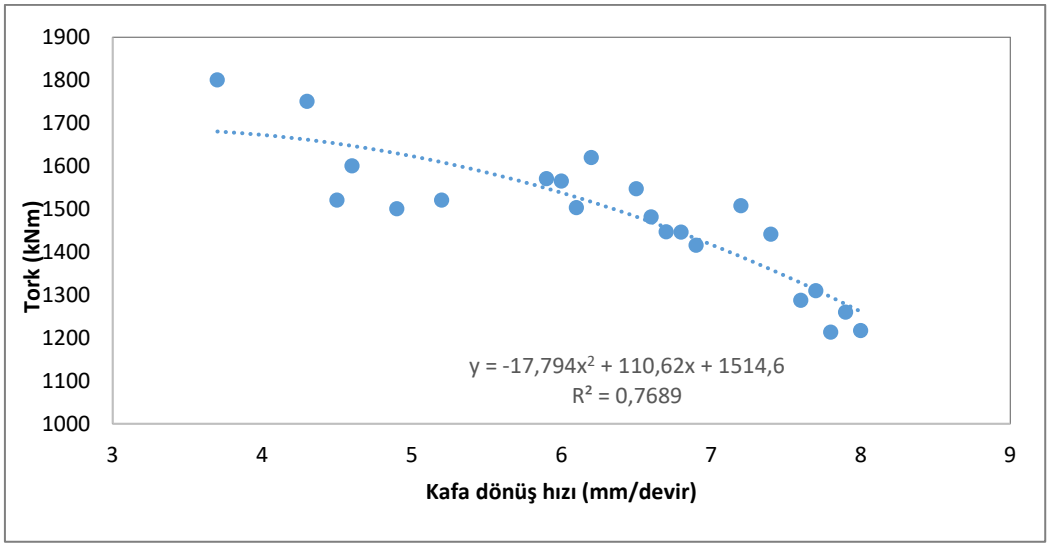
Şekil 4.45. Gercüş formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Gercüş formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki Şekil 4.46'da verilmiştir. Şekil 4.46'dan da görüldüğü gibi penetrasyon arttıkça tork değerleri artmakta olup, iki parametre arasında %57.99 değerinde korelasyon hesaplanmıştır.



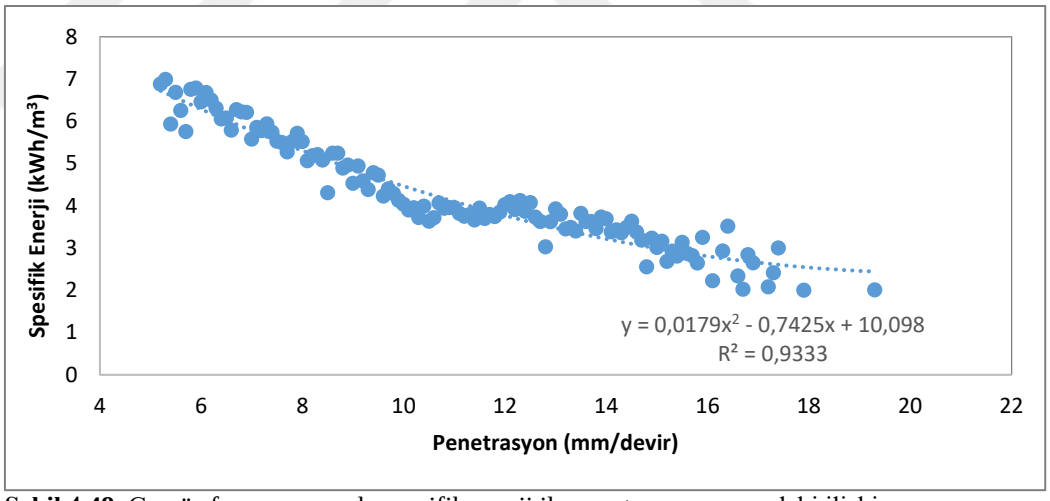
Şekil 4.46. Gercüş formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Gercüş formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki Şekil 4.47'de verilmiştir. Bu iki parametre arasında ters orantı olduğu ve %76.89 seviyesinde korelasyon tespit edilmiştir.



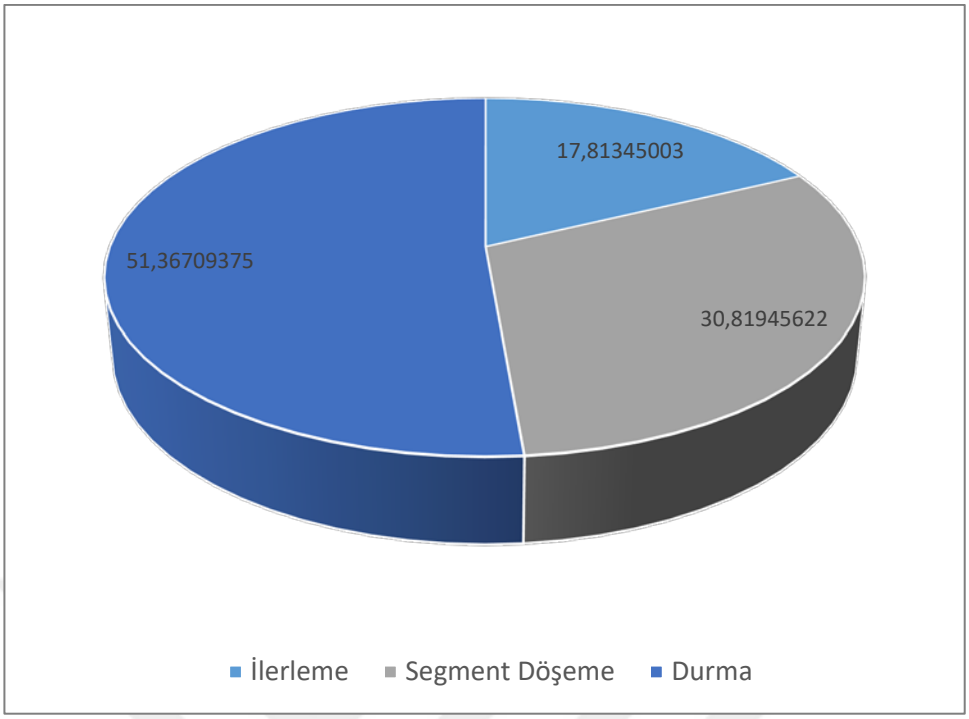
Şekil 4.47. Gercüş formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki.

Gercüş formasyonunda penetrasyon ile spesifik enerji arasındaki ilişki Şekil 4.48'de verilmiştir. Geçilen diğer formasyonlarda olduğu gibi penetrasyon arttıkça spesifik enerjide düşüş gözlenmiş ve %93.33 seviyesinde çok yüksek bir korelasyon elde edilmiştir.



Şekil 4.48. Gercüş formasyonunda spesifik enerji ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Gercüş formasyonunda TBM kullanım oranları Şekil 4.49'da verilmiştir. Formasyonda toplam TBM kullanım süresi %51.37 oranında durma, %30.82 oranında segment döşeme, %17.81 oranında ilerleme ile tamamlanmıştır.



Şekil 4.49. Gercüş formasyonunda TBM ilerleme, segment döşeme ve durma oranları.

4.1.2. Silvan Tüneli TBM Genel Performansı Değerlendirmesi

Silvan tüneli, iki karstik boşluğun geçildiği, yüksek su gelirinin yaşandığı ve uzun süre su ile mücadele edilen, sonrasında ise metan gazı parlaması vakası yaşanması sonucu kazının tamamen durdurulduğu zor koşullar altında çalışılan bir proje niteliği taşımaktadır.

Daha önce de değinildiği gibi Silvan tüneli açımı sırasında Şelmo, Sivan, Midyat ve Gercüş formasyonları geçilmiştir. Çizelge 4.1'de formasyonlara ait RMR, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ile TBM kayıtlarından alınan veriler ve bu verilere dayanarak üretilen performans parametrelerinin ortalama değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Silvan tünelinde geçilen formasyonlarda performans parametrelerinin ortalama değerleri.

	Şelmo	**Silvan**		**Midyat**		**Gercüş**
			Karstik	**Sağlam**	**Toplam**	
İtme Kuvveti (kN)	4489.04	8476.35	7463.09	9335.01	8468.47	6157.12
Tork (kNm)	1504.03	1649.24	1321.55	1591.90	1466.75	1447.33
Penetrasyon (mm/dev.)	8.96	8.52	10.90	13.57	12.33	10.03
İtme/penetrasyon (kN.devir/mm)	595.44	1046.66	792.48	822.27	840.71	679.78
Tork/penetrasyon (kNm.devir/mm)	217.08	201.51	133.81	134.87	134.38	154.00
Tork/itme (m)	0.34	0.20	0.18	0.19	0.19	0.24
Kafa dönüş hızı (devir/dakika)	6.48	7.02	4.75	3.95	4.32	6.63
İlerleme hızı (mm/dakika)	57.94	59.41	44.19	44.43	44.32	65.76
Keski başına itme kuvveti (kN)	70.58	133.28	146.78	117.34	133.15	96.81
Keski başına yuvarlanma kuvveti (kNm)	11.88	13.03	12.58	10.44	11.59	11.44
Kesme katsayısı	0.17	0.10	0.09	0.09	0.09	0.12
Delinebilirlik İndeksi	9.36	16.74	13.87	12.46	13.22	10.69
Anlık kazı hızı ($m^{3/}$saat)	173.10	177.21	132.58	132.06	132.34	196.24
Güç tüketimi (kW)	1013.22	1212.61	627.17	634.99	630.79	1000.50
Spesifik enerji (kwh/m^3)	6.47	6.01	4.02	3.99	4.01	4.59
RMR	25	53			51	50
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	28.98	60.01			41.69	48.11
Çekme dayanımı (MPa)	1.93	8.22			2.10	6.46
TBM faydalanma oranı (%)	16.83	23.96	5.97	13.53	8.65	17.81
Günlük ilerleme (m)	12.58	20.66	4.22	9.31	5.98	15.72
Günlük net ilerleme (m)	30.37	34.96	12.86	22.61	16.29	32.20

Silvan tünelinde Şelmo formasyonunda itme kuvvetinde en düşük, torka bağlı penetrasyon indeksi, tork/itme ve spesifik enerjide ise en yüksek ortalama değerleri elde edilmiştir. Şelmo formasyonu kolay kazılabilir bir formasyon olmasına ve en düşük itme kuvveti ortalamasına sahip olmasına rağmen spesifik enerjide en yüksek ortalamaya ulaşması içerdiği konglomera ve killi bölgelerdeki kazı zorluğu sebebiyle torkun yükselmesi ile gerçekleşmiştir.

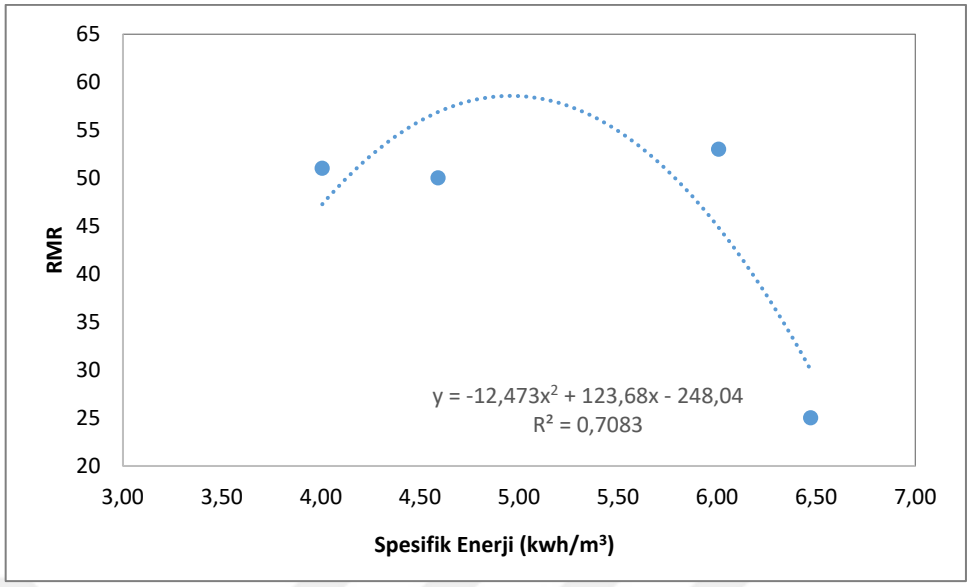
En yüksek tork, itmeye bağlı penetrasyon indeksi, kesici kafa dönüş hızı ve güç tüketimi değerleri Silvan formasyonunda elde edilmiş olmasına karşın, ortalama penetrasyon değeri en düşük gerçekleşmiştir. Bu formasyonda yüksek rpm değerlerine rağmen tork da yüksek gerçekleşmiş ve dolayısıyla en yüksek güç tüketimi de bu formasyonda gözlenmiştir.

En yüksek itme kuvveti ve penetrasyon değerlerine Midyat formasyonunun sağlam kaya özelliği gösteren bölgelerinde ulaşılmıştır. En düşük kesici kafa dönüş hızı, ve spesifik enerji değerleri yine aynı birimde gerçekleşirken, en düşük ilerleme hızı ve güç tüketimi de Midyat formasyonunun karstik boşluk içeren bölgelerinde gerçekleşmiştir.

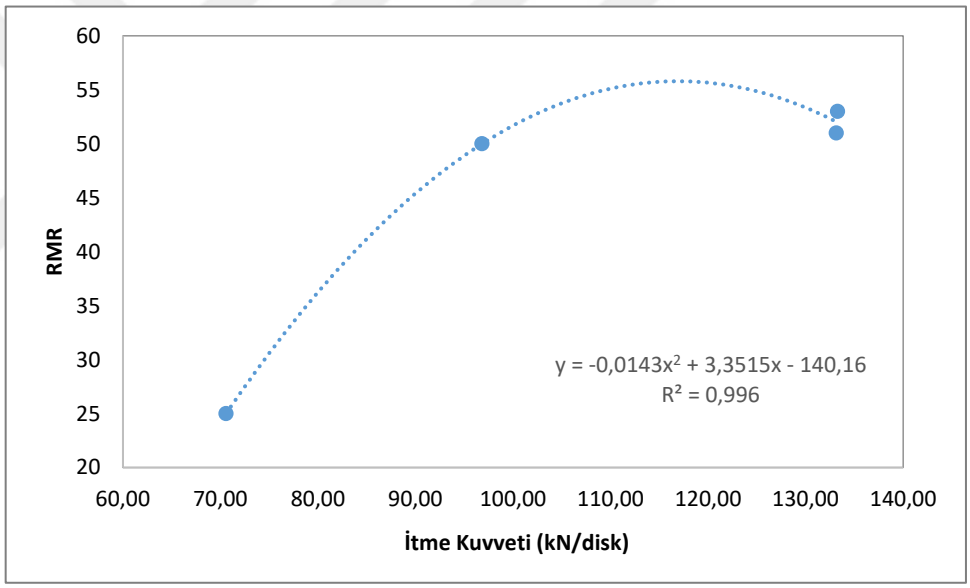
En yüksek ilerleme hızı, anlık kazı hızı ortalamaları Gercüş formasyonunda elde edilmiş dolayısıyla TBM kullanım oranında en yüksek değere de bu formasyonda ulaşılmıştır.

Silvan tünelinde geçilen formasyonlarda günlük ilerleme değerleri incelendiğinde en yüksek günlük ilerlemenin Silvan formasyonunda, en düşük günlük ilerlemenin ise Midyat formasyonunun karstik boşluk içeren bölgelerinde gerçekleştiği görülmüştür.

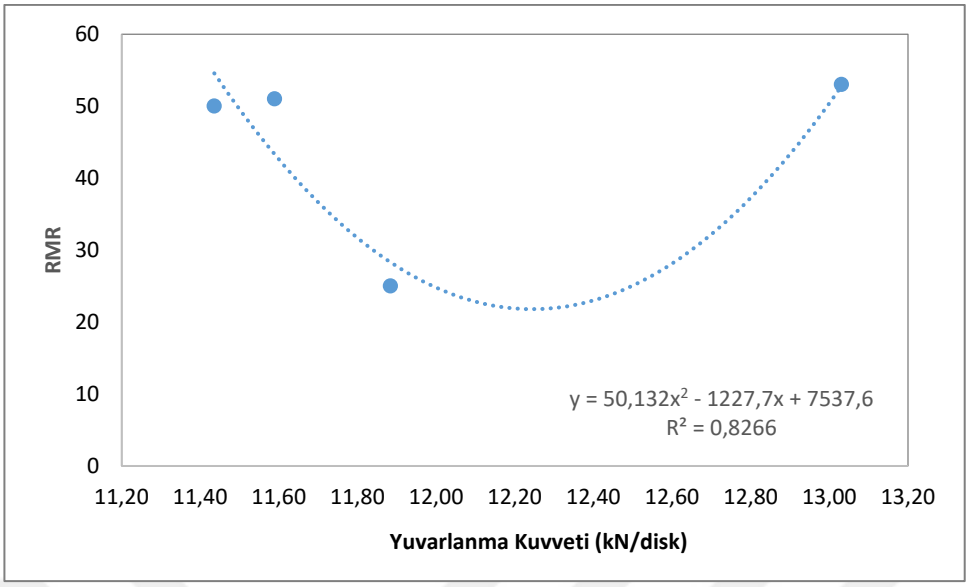
Silvan tünelinde geçilen tüm formasyonlar için RMR değerleri ile spesifik enerji (Şekil 4.50), itme kuvveti (Şekil 4.51), yuvarlanma kuvveti (Şekil 4.52), kesme katsayısı (FR/FN) (Şekil 4.53), delinebilirlik indeksi (itme kuvveti/penetrasyon) (Şekil 4.54), değişimleri incelenmiş; RMR değerleri açtıkça genel olarak itme kuvveti, delinebilirlik indeksi ve spesifik enerji değerlerinin de arttığı, kesme katsayısı ve yuvarlanma kuvveti değerlerinin ise düştüğü gözlenmiştir. Ancak yer yer zemin özelliği gösteren Şelmo formasyonunun RMR değeri düşük olmasına rağmen barındırdığı konglomeralı kesimlerden dolayı spesifik enerji yüksek gerçekleşmiştir.



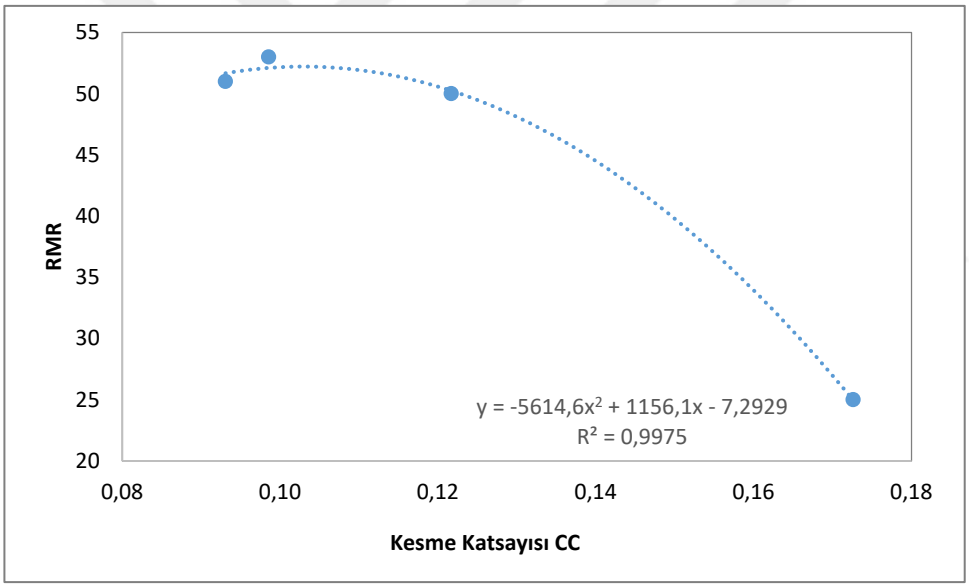
Şekil 4.50. Formasyonların RMR değerleri ile spesifik enerji değerleri arasındaki ilişki.



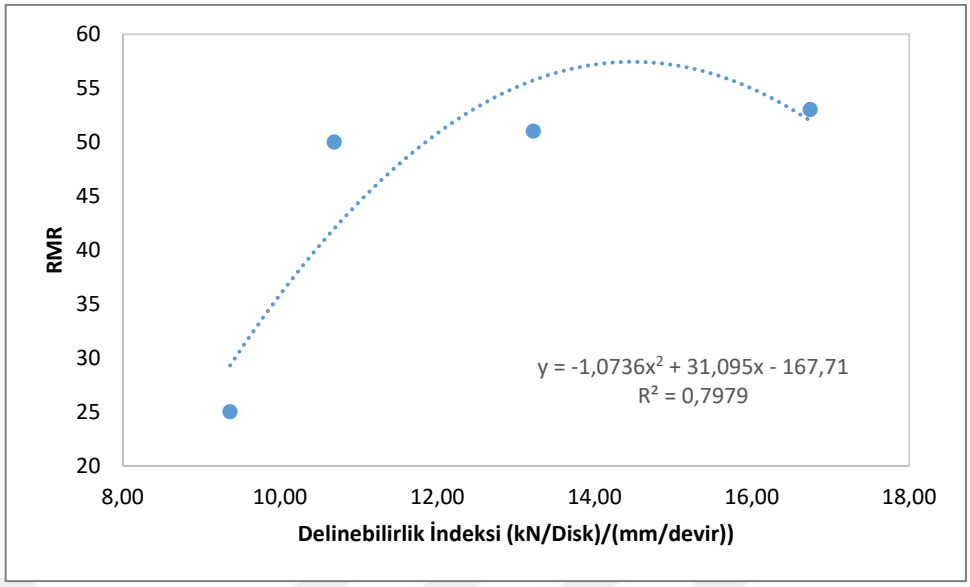
Şekil 4.51. Formasyonların RMR değerleri ile keski başına düşen itme kuvveti değerleri arasındaki ilişki.



Şekil 4.52. Formasyonların RMR değerleri ile keski başına düşen yuvarlanma kuvveti değerleri arasındaki ilişki.

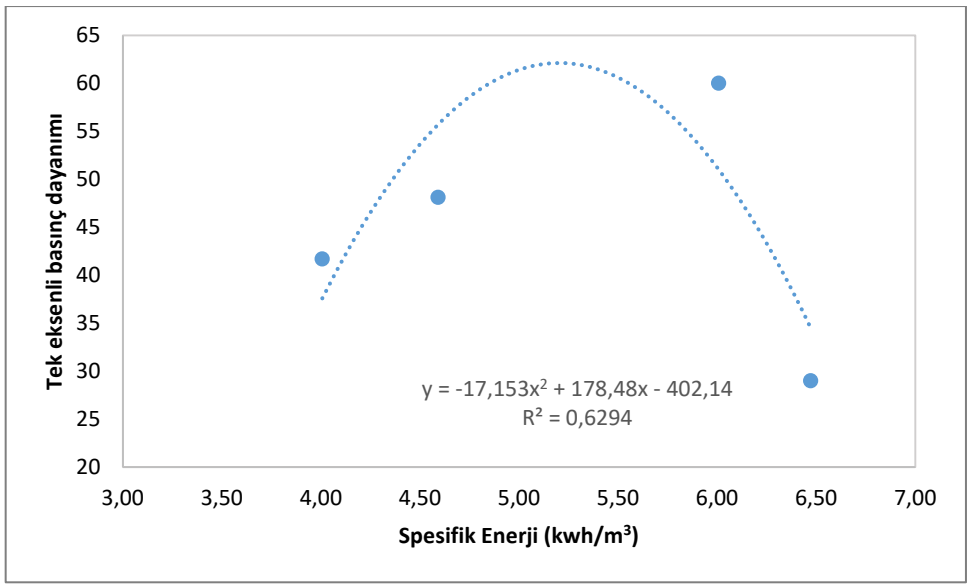


Şekil 4.53. Formasyonların RMR değerleri ile kesme katsayısı değerleri arasındaki ilişki.

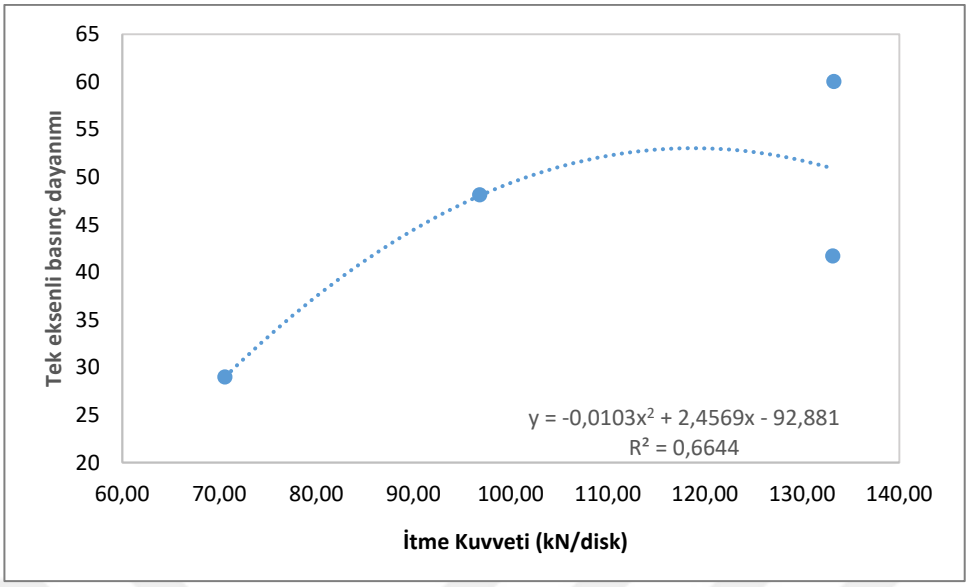


Şekil 4.54. Formasyonların RMR değerleri ile delinebilirlik indeksi değerleri arasındaki ilişki.

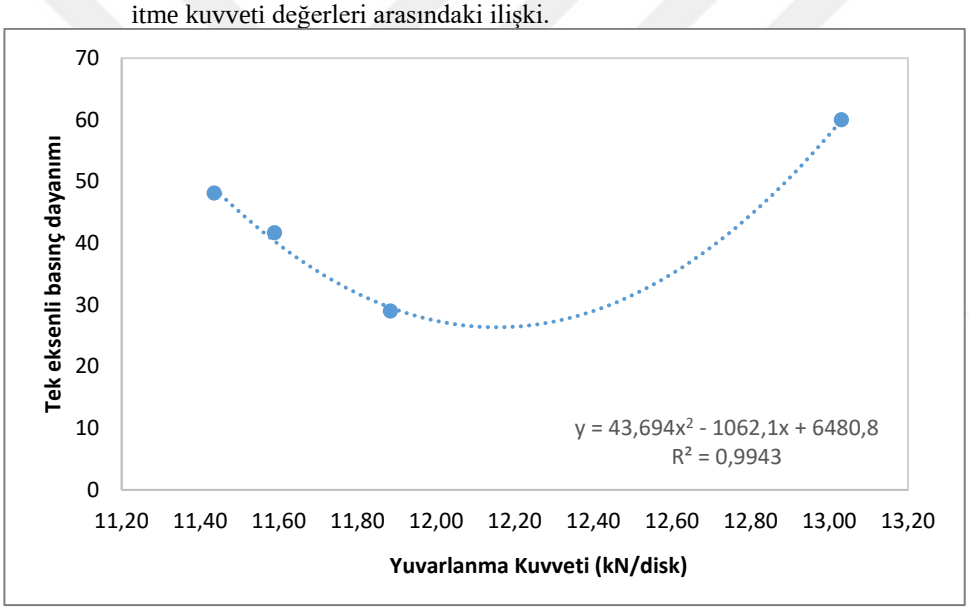
Silvan tünelinde geçilen tüm formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile spesifik enerji (Şekil 4.55), itme kuvveti (Şekil 4.56), yuvarlanma kuvveti (Şekil 4.57), kesme katsayısı (FR/FN) (Şekil 4.58), delinebilirlik indeksi (keski başına itme kuvveti/penetrasyon) (Şekil 4.59), değişimleri incelenmiş; tek eksenli basınç değerleri açtıkça genel olarak itme kuvveti, delinebilirlik indeksi ve spesifik enerji değerlerinin de arttığı, kesme katsayısı ve yuvarlanma kuvveti değerlerinin ise düştüğü gözlenmiştir.



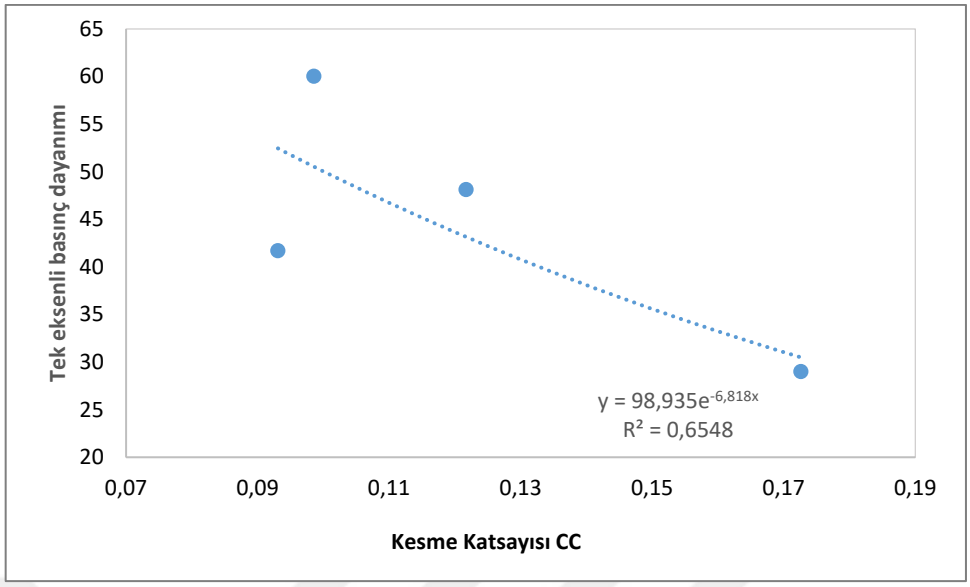
Şekil 4.55. Formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile spesifik enerji değerleri arasındaki ilişki.



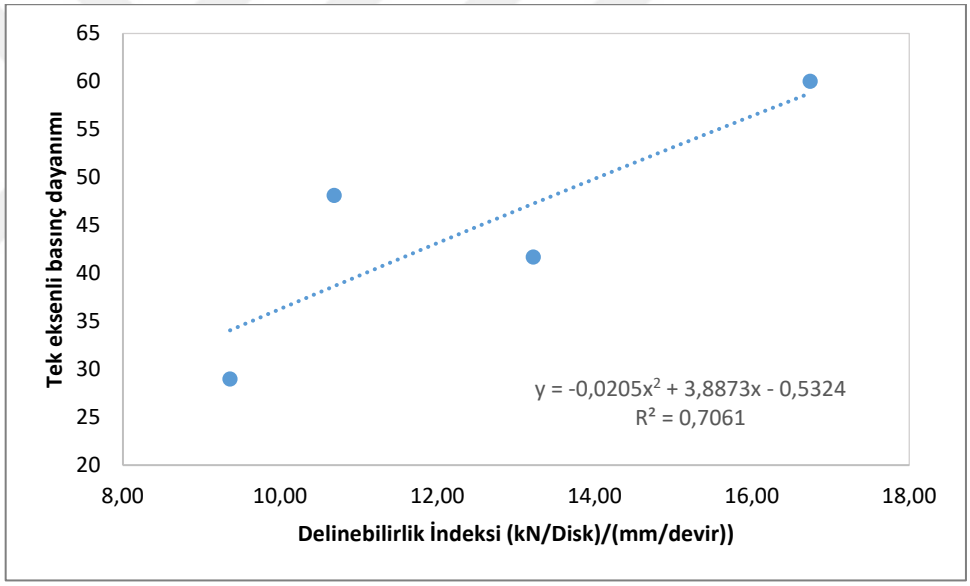
Şekil 4.56. Formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile keski başına düşen itme kuvveti değerleri arasındaki ilişki.



Şekil 4.57. Formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile keski başına düşen yuvarlanma kuvveti değerleri arasındaki ilişki.



Şekil 4.58. Formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile kesme katsayısı değerleri arasındaki ilişki.



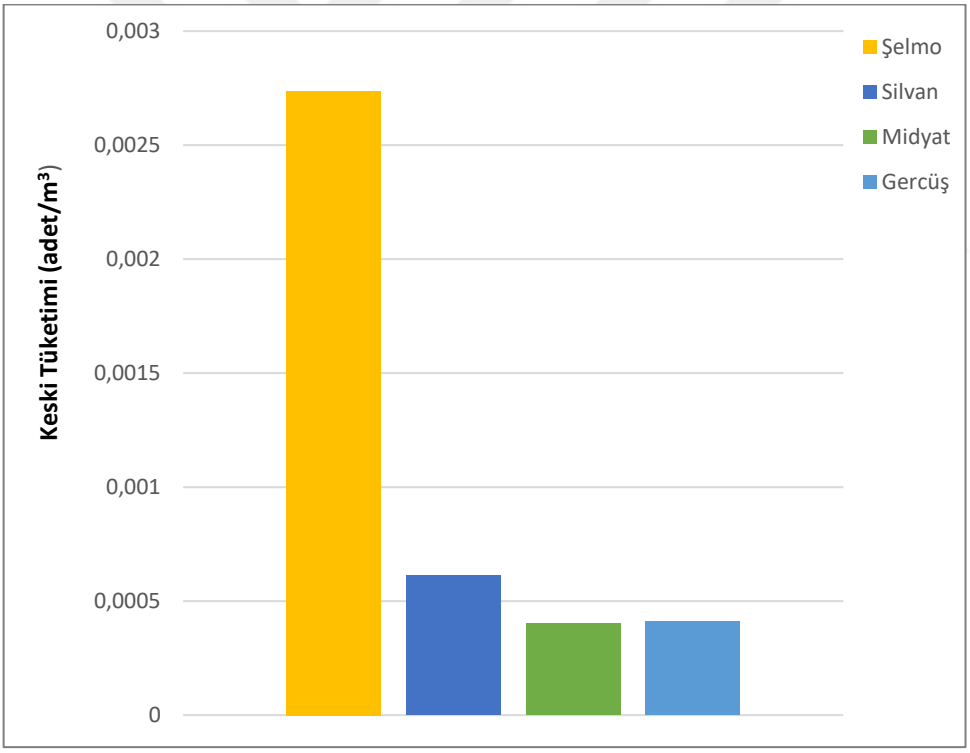
Şekil 4.59. Formasyonların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile delinebilirlik indeksi değerleri arasındaki ilişki.

Diğer mekanik kazı makinalarında olduğu gibi TBM ile açılan tünellerde de, disklerin aşınması sonucunda oluşan disk tüketim (değişim) maliyeti, toplam maliyette önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle disklerdeki aşınma problemi makinaların kazı performansının önemli unsurunu oluşturmaktadırlar. Silvan tüneli güzergahında geçilen formasyonların aşırı aşındırıcı olmaması nedeniyle tünel açılan uzunlukta çok fazla disk (keski) tüketimi gerçekleşmemiştir. Silvan tünelinde keski tüketiminin formasyonlara göre dağılımı Çizelge 4.2 ‘de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Silvan tünelinde keski tüketiminin formasyonlara göre dağılımı.

Formasyon	Keski Tüketimi (adet)
Şelmo	70
Silvan	9
Midyat	11
Gercüş	32

Formasyonlarda tüketilen disklerin adet/m^3 cinsinden miktarları Şekil 4.60'da verilmiştir. En fazla keski tüketimi; konglomera ve kil birimleri içeren Şelmo formasyonunda gerçekleşmiştir. İkinci sırayı geçilen formasyonlar içinde aşındırıcılığı en yüksek olan Silvan formasyonu alırken, farklı birimlerden oluşan Gercüş formasyonu ve karstik boşluklar içeren Midyat formasyonu keski tüketimi açısından birbirine yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.60. Silvan tüneli kazısı sırasında her formasyonda tüketilen disk miktarları.

4.1.3. Silvan Tüneli'nde Performans Tahmin Modellerinin Uygulanması

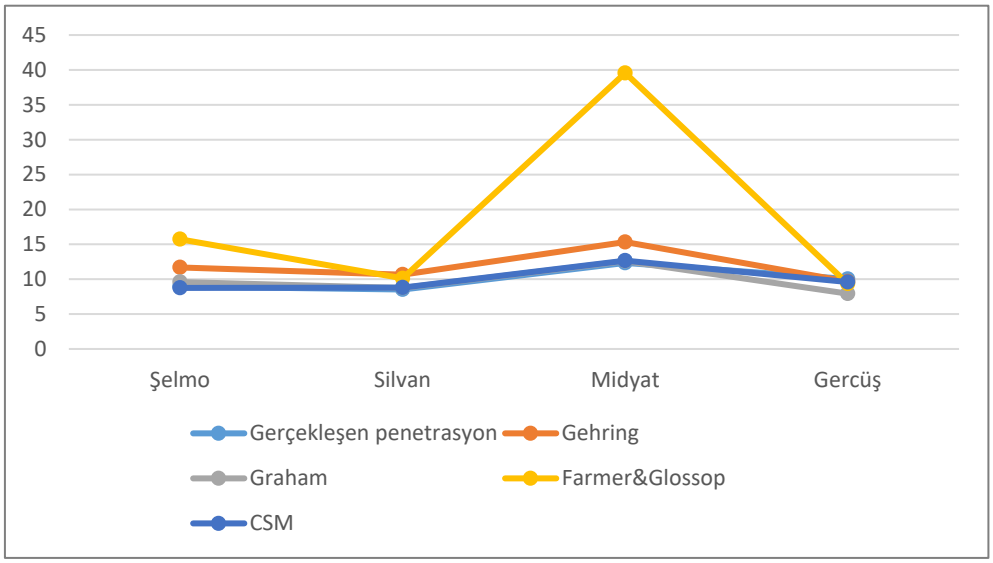
Bu çalışmanın 2. Bölümünde de bahsedildiği gibi; teorik varsayımlardan yola çıkarak kurulan analitik modeller ve farklı projelerde toplanan bir veri kümesinin analizine dayanan ampirik modeller olarak sınıflandırılan çok sayıda TBM performans

tahmin modeli mevcuttur. Bu modeller yardımıyla litoloji, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, aşındırıcılık, kuvars içeriği, çatlak sayısı ve yapısı, RQD, GSI gibi çok sayıda kaya parametresi ile itme kuvveti, disk çapı, kalınlığı ve sayısı, kesici kafa çapı ve dönüş hızı, kesme derinliği gibi makine parametreleri değerlendirerek, performans ve keski tüketimine dair tahminleri yapılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında Silvan tüneli verileri kullanılarak her formasyon için ayrı ayrı olmak üzere; Gehring, Graham, Farmer ve Glossop ve CSM metodları ile penetrasyon hesabı yapılmış ve gerçekleşen penetrasyon değerleri ile kıyaslamıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.3'te, grafiksel gösterimi ise Şekil 4.61'de verilmiştir. Şekil 4.61 incelendiğinde; elde edilen penetrasyon değerleri ile hesaplanan penetrasyon değerlerinin çoğunlukla birbirine yakın çıktığı, gerçeğe en yakın sonucu ise CSM metodunun verdiği görülmektedir. Bununla beraber Gehring modeli ile elde edilen değerler daha yüksek olmasına rağmen CSM ve gerçekleşen penetrasyon değerleri ile benzer eğilim göstermektedir.

Çizelge 4.3. Kullanılan performans tahmin metodları ile elde edilen ve gerçekleşen penetrasyon değerleri.

	Gerçekleşen penetrasyon	**Gehring**	**Graham**	**Farmer&Glossop**	**CSM**
Şelmo	8.96	11.69	9.6	15.73	8.75
Silvan	8.52	10.66	8.75	10.12	8.80
Midyat	12.33	15.33	12.58	39.56	12.33
Gercüş	10.02	9.66	7.93	9.35	9.59



Şekil 4.61. Silvan tünelinde gerçekleşen ve hesaplanan penetrasyon değerleri.

4.1.4. Silvan Tünelinde Yaşanan Su Gelirinin Performansa Etkisi

Karstik boşlukların geçildiği Midyat formasyonunda tünele dolan su ve sediman kazı performansını olumsuz etkilemiştir. Silvan tünelinde geçilen uzunluk boyunca elde edilen en düşük günlük ilerleme değerleri ve TBM'den yararlanma oranı bu bölgelerde olmuştur. Midyat formasyonunun sağlam kaya özelliği gösteren kısımları ile karşılaştırıldığında, karstik boşlukların olduğu kesimlerde ortalama günlük ilerleme değeri %54.68 düşmüştür. Yine bu bölgelerde TBM'den yararlanma oranında %55.88'lik düşüş olduğu gözlenmiştir.

Karstik bölgelerde tünelde günlük ilerleme değerleri çok düşük olmasına rağmen TBM kayıtlarında anlık ilerleme değerleri yüksek çıkmıştır. Bu durum karstik boşluklu bölgelerin genelde daha kolay kazıldığını göstermektedir. Ancak su gelirinin yükselmesi ile birlikte zaman zaman tünele akan ani sediman boşalımı TBM'in anlık ilerleme hızında düşüşlere neden olmuştur.

Su gelirinin yaşandığı bölgelerde kafanın dakikadaki dönüş hızının 2-3- ile 7-8 gibi geniş bir aralıkta arasında değiştiği gözlenmiştir. Bu durum bu kesimlerde kazı ortamının anlık değişim gösterdiğine işaret etmektedir.

4.1.5. Silvan Tünelinde Yaşanan Metan Parlamasının Performansa Etkisi

Mevcut Silvan Tüneli'nin 4668. metresinde 21.04.2015 tarihinde metan (CH_4) parlaması olayı gerçekleşmiştir. Kazının sonlandırılmasına sebep olan metan parlaması vakasında; TBM'in teleskobik kalkan pistonları, hidrolik bağlantılar, kesici kafa motorları, kafaya yakın sensör kamera ve flex gibi önemli üniteleri büyük ölçüde hasar görmüş ve kullanılamaz duruma gelmiştir (Şekil 4.62).



Şekil 4.62. Metan parlaması sonrası kesici kafa motorlarının durumu.

Metan parlama olayı sonucu yangının gerçekleştiği bölgede (aynadan itibaren yaklaşık 48.50 m) taşıma bandının yandığı, oluşan yüksek sıcaklıktan dolayı tünel betonarme tünel destekleme elemanlarında (segment) yer yer kabuk atma olayı neticesinde betonun döküldüğü donatıların açığa çıktığı gözlenmiştir (Şekil 4.63).



Şekil 4.63. Tünel taç kısmında gözlenen yanmaya bağlı beton dökülmeleri.

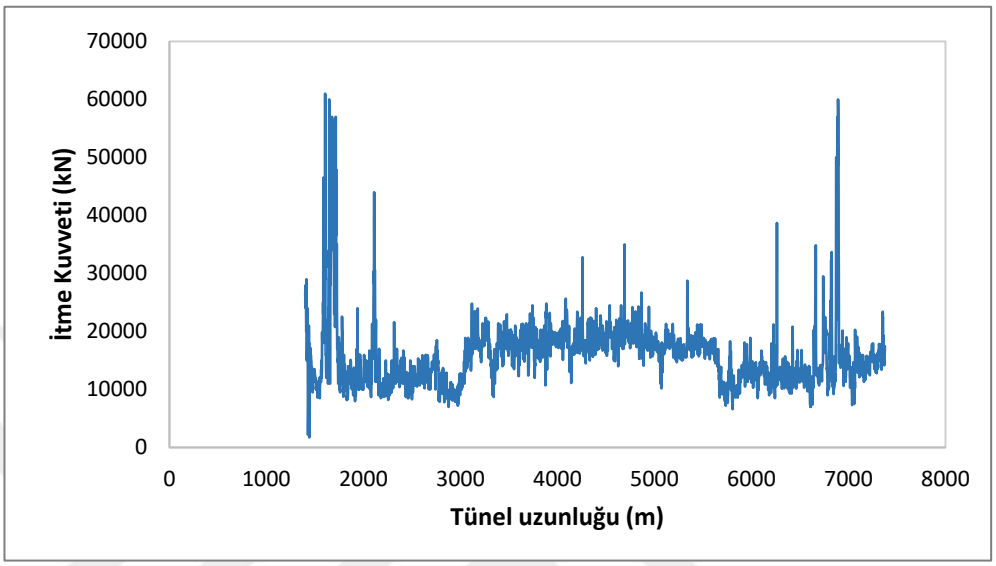
Metan parlama olayından sonra DSİ tarafından yapılan araştırmalar sonucunda; mevcut güzergahta tünelin ilerlemesi halinde gaz gelirinin çok yüksek değerlere çıkacağı kanaati oluşmuştur. İş sağlığı ve güvenliği açısından ciddi sorunların yaşanmaması amacıyla tünel açma faaliyetleri durdurulmuştur. Bunun üzerine idare tarafından Silvan Tüneline alternatif olarak 13400 m uzunluğunda Alternatif Silvan Tüneli güzergahı belirlenmiştir.

4.2. Nurdağı Tüneli Performans Değerlendirmesi

Tek kalkanlı TBM ile açılan Nurdağı hızlı tren tüneli; daha önce de belirtildiği gibi meta kumtaşı, meta çamurtaşları, kuvarsit ve meta-kumtaşı düzeyleri içeren Kızlaç formasyonunda geçmektedir. Mevcut durumda tünel açma faaliyetlerinin devam ettiği Nurdağı tünelinde TBM performansı ile ilgili yapılan değerlendirmeler verilerin sağlıklı tutulduğu 1400-7846 metreler arasında ilgili verilere dayanılarak yapılmıştır.

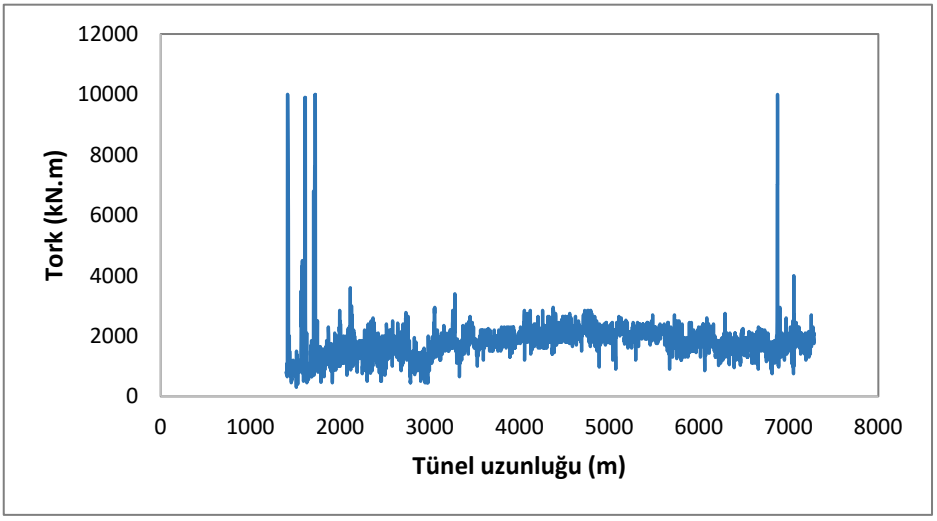
TBM itme kuvveti, tork ve tork/itme kuvveti oranı değerlerinin Kızlaç formasyonunda değişimleri sırasıyla; Şekil 4.64, Şekil 4.65 ve Şekil 4.66'da verilmiştir. 1600-1900 metreler arasında grafit şist ve 3000-6000 metreler arasında meta kuvarsit ve

muskovit kuvarsit birimlerinin kazısı nedeniyle diğer kesimlere oranla itme kuvveti daha yüksek değerler almıştır. Bununla birlikte 1647 ve 6892. metrelerdeki keski değişiminden önce disk aşınmalarının sınır değerlere ulaşmış olması nedeniyle itme kuvvetinde en üst değerlere ulaşılmıştır.

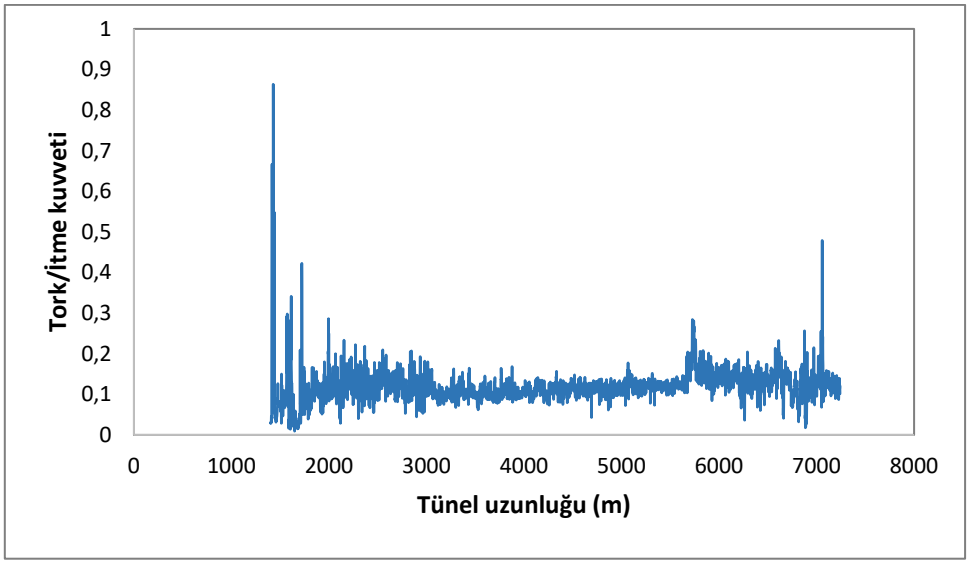


Şekil 4.64. Kızlaç formasyonunda itme kuvvetinin değişimi.

Tork ve tork/itme kuvveti oranının değişimi, itme kuvvetine benzer bir eğilim göstermiştir. İtme kuvvetinin yüksek olduğu bölgelerde tork değerleri de yüksek olduğundan, tork/itme değişiminde yataya yakın bir seyir ortaya çıkmıştır.

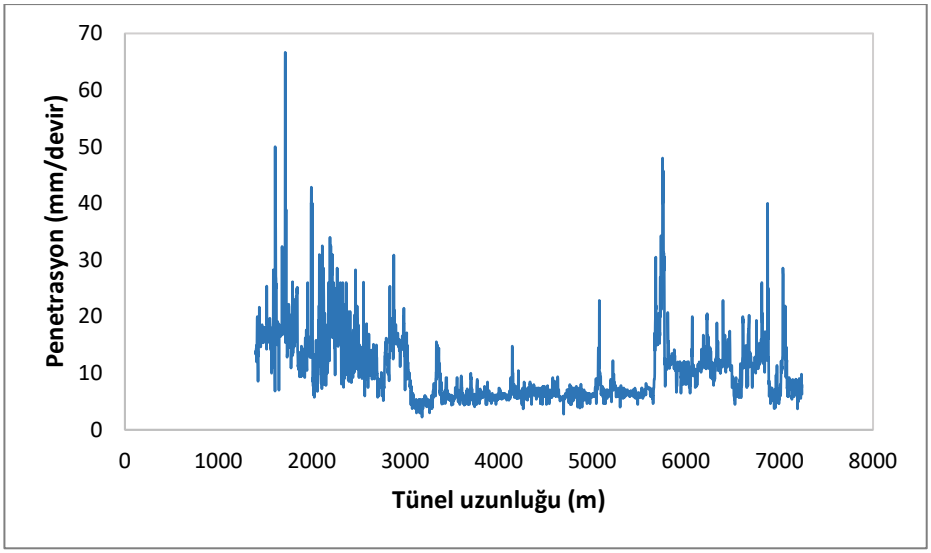


Şekil 4.65. Kızlaç formasyonunda torkun değişimi.



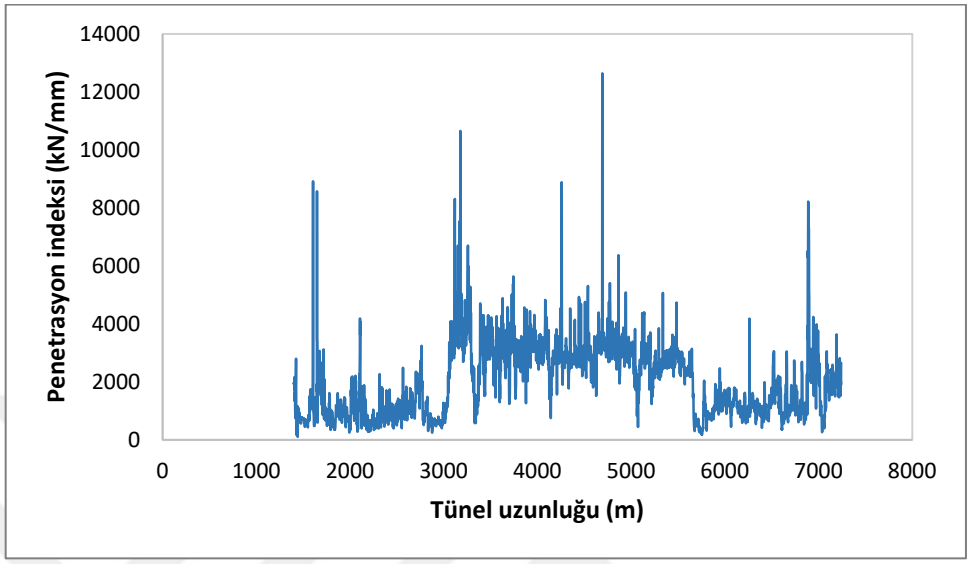
Şekil 4.66. Kızlaç formasyonunda tork/itme kuvveti oranının değişimi.

Kızlaç formasyonunda penetrasyon değerlerinin değişimi Şekil 4.67'de verilmiştir. Penetrasyon değerlerinde görülen dalgalanmalar, tünelin birbirinden farklı özellikteki birimlerden geçmesinden kaynaklanmaktadır. Değerlendirilen metreler arasında Nurdağı tünelinin ortalama penetrasyon değeri 9.40 mm olarak hesaplanmıştır. Formasyonun dayanımın yüksek olduğu 3000-6000 metreler arasında yüksek itme kuvvetine rağmen penetrasyon değeri düşük gerçekleşmiştir. Penetrasyonun yüksek gözlendiği 1500-3000. metreler arasında yer yer kil içerikli, ayrışmış düşük ve orta dayanımlı sleyt, çok zayıf dayanımlı ve çok ayrışmış grafit şist ile metakumtaşı, meta çamurtaşı birimleri geçilmiştir.

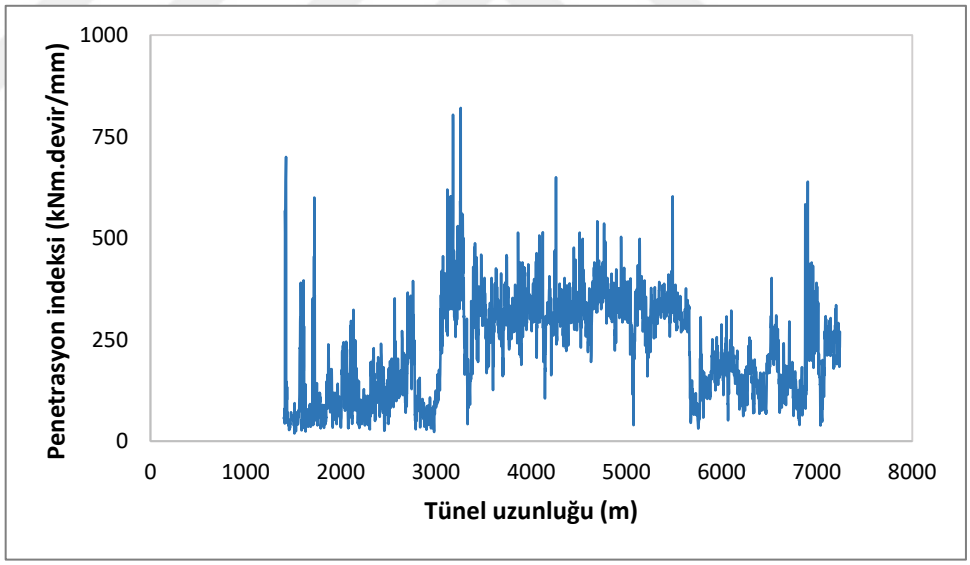


Şekil 4.67. Kızlaç formasyonunda penetrasyonun değişimi.

Kızlaç formasyonunda itmeye ve torka bağlı penetrasyon indeksi değerleri Şekil 4.68 ve Şekil 4.69'da verilmiştir. Hesaplanan penetrasyon indeksi değerleri; yüksek dayanımlı birimler geçilirken yüksek, diğer bölgelerde ise düşük bir eğilim göstermiştir.

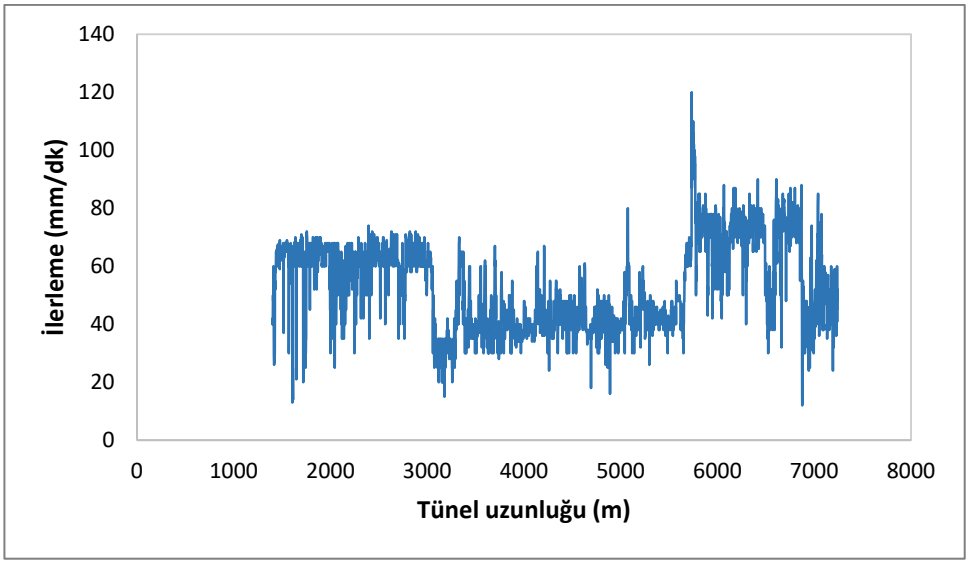


Şekil 4.68. Kızlaç formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksinin değişimi.



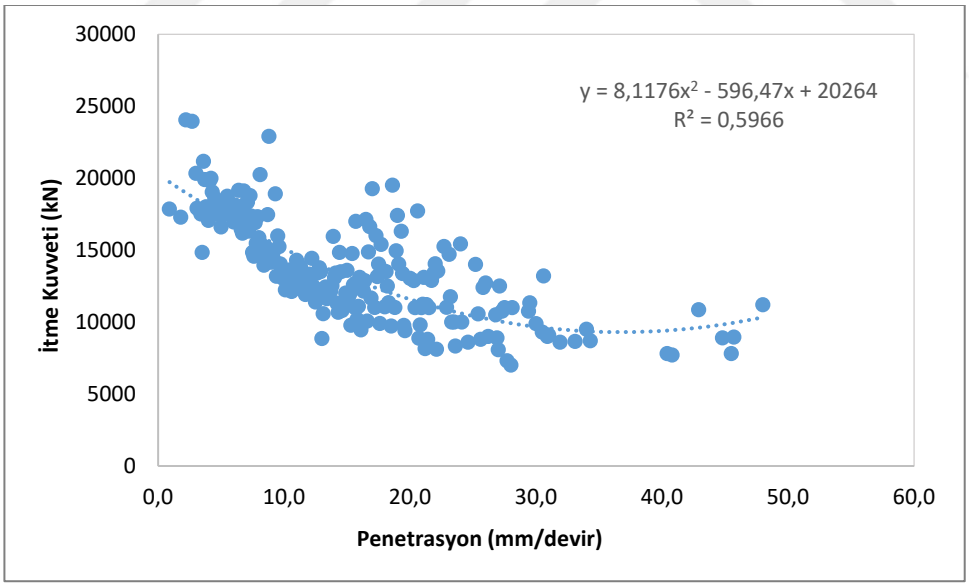
Şekil 4.69. Kızlaç formasyonunda torka bağlı penetrasyon indeksinin değişimi.

Kızlaç formasyonunda ilerleme hızı değişimi Şekil 4.70'de görülmektedir. Formasyon dayanımının yüksek olmadığı bölgelerde, penetrasyon değerleri ve dolayısıyla ilerleme hızı yüksek, dayanımın yüksek olduğu kesimlerde ise penetrasyon değerleri ve ilerleme hızı düşük gerçekleşmiştir.



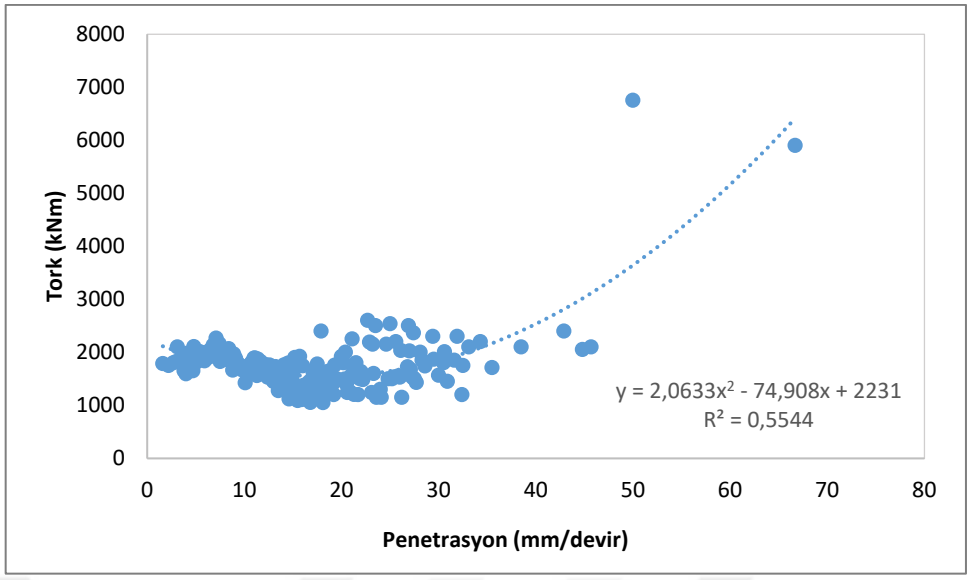
Şekil 4.70. Kızlaç formasyonunda ilerleme hızının değişimi.

Kızlaç formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.71'de verilmiştir. Şekil 4.71'den de görüldüğü gibi itme kuvveti ile penetrasyon değerleri arasında ters orantılı bir ilişki gözlenmiş ve %59.66 oranında korelasyon elde edilmiştir.



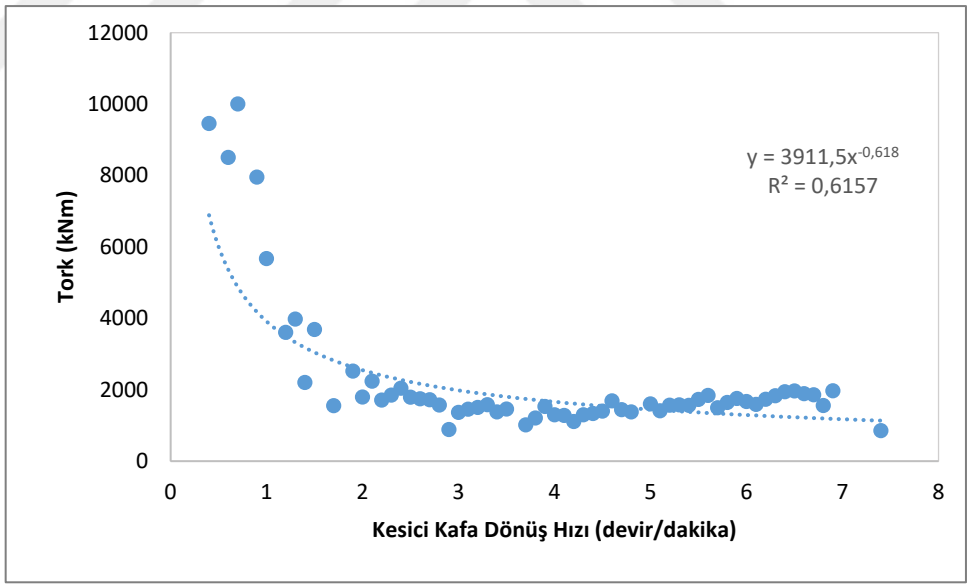
Şekil 4.71. Kızlaç formasyonunda itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Kızlaç formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki Şekil 4.72'de verilmiştir. Tork arttıkça genel olarak penetrasyon değerleri de artış göstermiş ve iki parametre arasında %55.44 değerinde korelasyon gözlenmiştir.



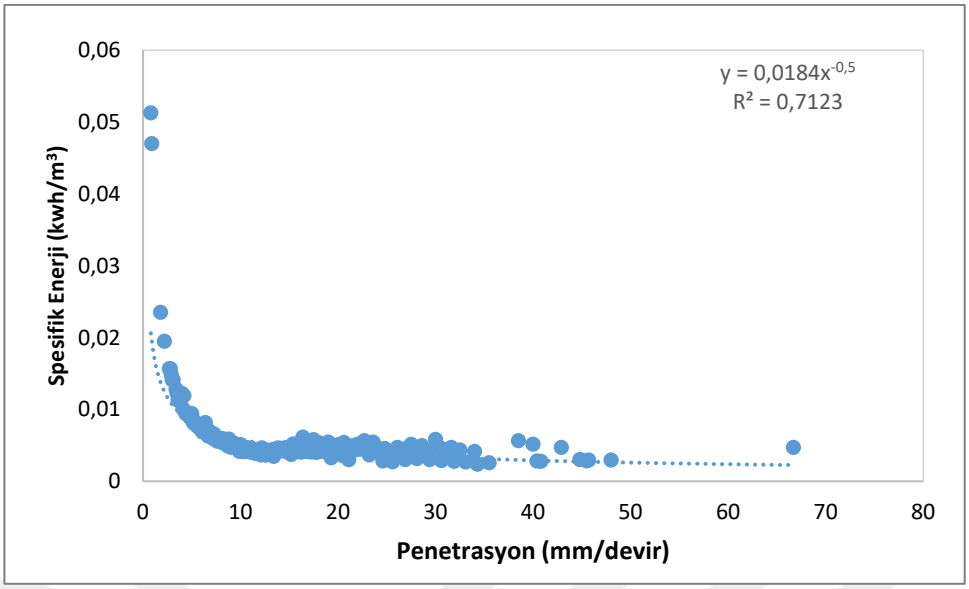
Şekil 4.72. Kızlaç formasyonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki.

Kızlaç formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki Şekil 4.73'te verilmiştir. Bu iki parametre arasında ters orantı bir ilişki belirlenmiş olup, %71.93 korelasyon elde edilmiştir.



Şekil 4.73. Kızlaç formasyonunda tork ile rpm arasındaki ilişki.

Kızlaç formasyonunda penetrasyon ile spesifik enerji arasındaki ilişki Şekil 4.74'te verilmiştir. Penetrasyon arttıkça spesifik enerjide düşüş gözlenmiş ve %71.23 seviyesinde korelasyon elde edilmiştir.



Şekil 4.74. Kızlaç formasyonunda penetrasyon ve spesifik enerji arasındaki ilişki.

Nurdağı Tünelinin 1950-7822 metreleri arasında yapılan kazıda TBM üzerindeki disklerin tüketimleri analiz edilmiştir. Tünelin söz konusu metreleri arasında Kızlaç formasyonuna ait 6 farklı birim geçilmiş ve yaklaşık 295712.64 m^3 kazı yapılmış olup, toplamda 780 adet disk değiştirilmiştir.

Değiştirilen bu disklerin 709 adetinde normal (uniform) aşınma (Şekil 4.75), 48 adetinde disklerin bloke olması ve dönmemesinden kaynaklı olarak tek yönlü aşınma (Şekil 4.76), 2 adetinde ise belirtilen her iki aşınma şekli gerçekleşmiştir (Şekil 4.77). Bununla beraber 3 adet disk kırılmış (Şekil 4.78) ve 18 adet disk ise çevreden alınıp göbeğe yerleştirilmiştir. Geçilen birimlerde birim hacimdeki kazı için keski tüketimi Şekil 4.79'da, disk değişimine sebep olan aşınma türlerinin yüzdesel dağılımı Şekil 4.80'de verilmiştir.



Şekil 4.75. Normal (uniform) disk aşınması.



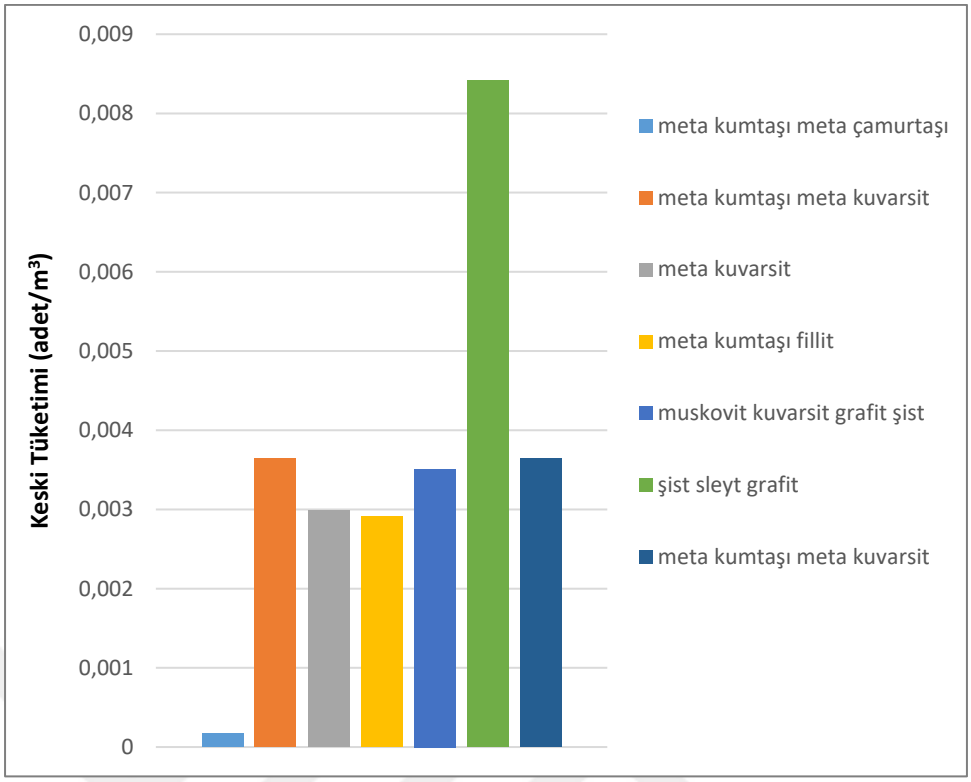
Şekil 4.76. Tek yönlü disk aşınması.



Şekil 4.77. Normal ve tek yönlü disk aşınması.

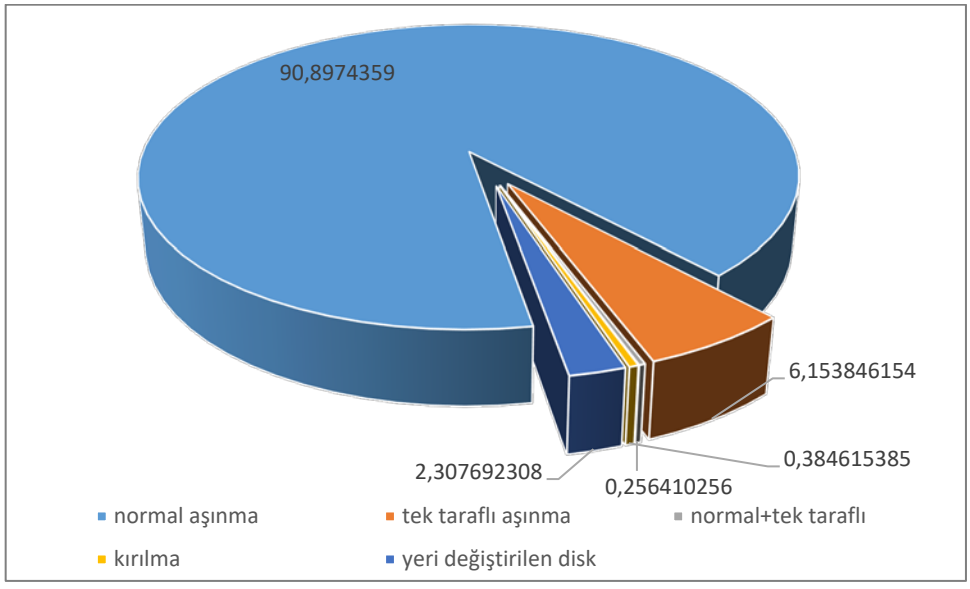


Şekil 4.78. Kırılmış disk.



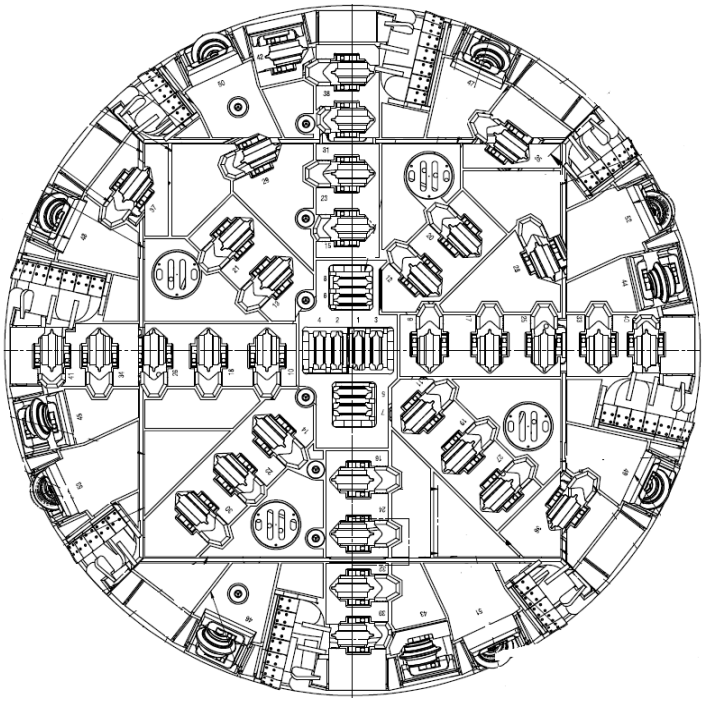
Şekil 4.79. Kazı boyunca geçilen birimlerde gözlenen keski tüketimi (adet/m^3).

Şekil 4.82'den görüldüğü üzere, Kızlaç formasyonunda en yüksek keski tüketimi şist sleyt grafit içerikli birimde gözlenirken en düşük keski tüketimi ise meta kumtaşı meta çamurtaşı biriminde gerçekleşmiştir. Özellikle kuvars içeriği yüksek olan birimlerde keski tüketiminde artış gözlenmiştir.



Şekil 4.80. Nurdağı tünelinde disk aşınma tiplerinin dağılımı.

Değişen diskler incelendiğinde en çok değiştirilmeye ihtiyaç duyulan disklerin beklenildiği gibi en çok yol kat eden ve konumlarından kaynaklanan zor kazı koşullarına maruz kalan çevre diskler olduğu görülmüştür. Disklerin kesici kafa üzerindeki konumlarını gösterir kesit Şekil 4.81'de verilmiştir. Disk numaraları ve disklerin değişim sayıları Çizelge 4.4'te verilmiştir.



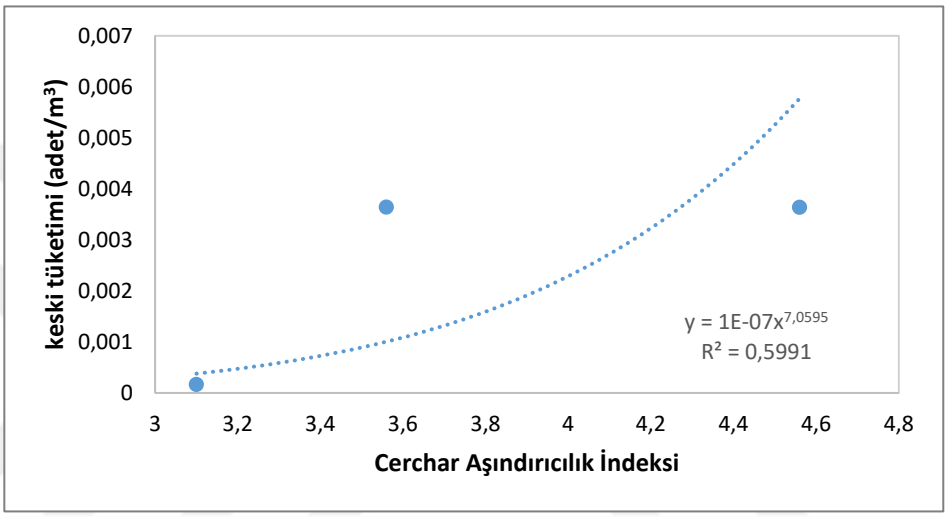
Şekil 4.81. Disklerin kesici kafa üzerindeki konumları.

Çizelge 4.4. Disklerin değişim sayısı (Çoktan aza).

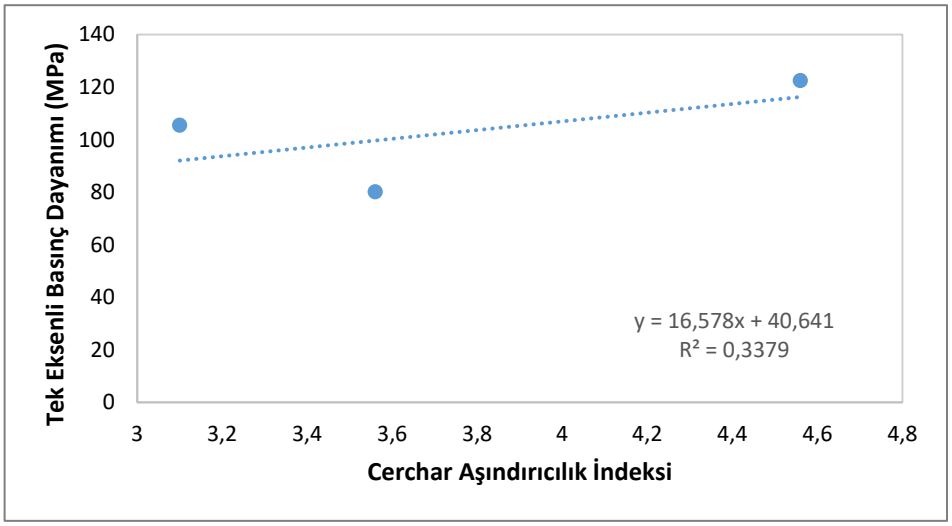
Disk Numarası	Değişim sayısı	Disk Numarası	Değişim sayısı	Disk Numarası	Değişim sayısı	Disk Numarası	Değişim sayısı	Disk Numarası	Değişim sayısı
48	49	42	27	36	11	21	7	16	5
45	42	41	19	2	10	26	7	18	5
46	41	40	17	4	10	28	7	19	5
47	39	39	16	6	10	1	6	20	5
43	36	37	15	8	10	3	6	23	5
44	35	35	13	30	10	15	6	9	4
49	34	38	13	29	9	17	6	12	4
53	34	33	12	31	9	22	6	10	3
52	33	5	11	34	9	25	6	13	3
50	31	7	11	24	8	11	5		
51	31	32	11	27	8	14	5		

Çizelge 4.4'ten de görülebileceği gibi, 42-53 numaralı 12 adet çevre diskin toplam değişiminin tüm disklerin toplam değişim sayısına oranı %55 olmuştur. Çevre disklerin büyük çoğunluğunda normal aşınma gözlenmiştir.

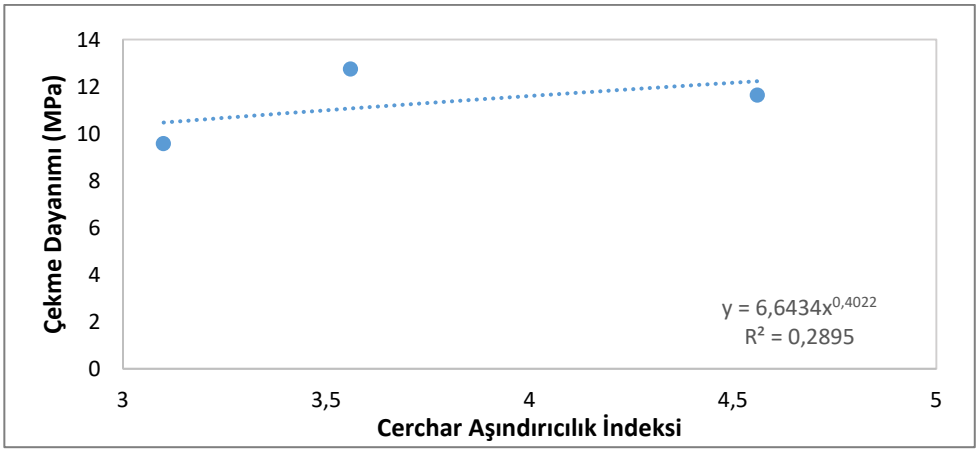
Meta kumtaşı- meta çamurtaşı, meta kumtaşı – meta kuvarsit ve meta kuvarsit birimlerinin keski tüketimi değerlerinin; bu birimlerin CAI, tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 4.82, Şekil 4.83 ve Şekil 4.84'te verilmiştir.



Şekil 4.82. Nurdağı tünelinde keski tüketimi ile Cerchar Aşındırıcılık İndeksi arasındaki ilişki.



Şekil 4.83. Nurdağı tünelinde keski tüketimi ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.



Şekil 4.84. Nurdağı tünelinde keski tüketimi ile çekme dayanımı arasındaki ilişki.

Verilen grafiklerde keski tüketiminin CAI değerinin artması ile artış gösterdiği ancak, tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımları ile tek başına anlamlı bir ilişkinin olmadığı gözlenmiştir.

4.3. Silvan ve Nurdağı Tünellerinde Çift Değişkenli Performans Değerlendirilmesi

Silvan ve Nurdağı tünellerinde elde edilen kazı paremetreleri değerleri ile hesaplanan penetrasyon ve spesifik enerji değerleri arasında MATLAB programının Curve Fitting metodu ile matematiksel fonksiyonlar yazılımsal olarak elde edilmiştir. Fonksiyonlar 5. dereceden polinom olarak seçilmiştir. Grafik ve çizelgelerde kullanılan kısaltmalar Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Çift değişkenli performans değerlendirilmesinde kullanılan parametreler için belirlenen kısaltmalar.

Parametre	Kısaltma
İtme kuvveti	I
Tork	T
Tork/İtme kuvveti	O
Penetrasyon	P
Dakikada devir sayısı	rpm
Spesifik enerji	SE
Güç	G
İtme kuvveti/Penetrasyon	PII
Tork/Penetrasyon	PIT

4.3.1. Penetrasyona Ait Değerlendirmeler

Şelmo, Silvan, Midyat, Gercüş ve Kızlaç formasyonlarında; makine parametrelerinin penetrasyon değeri ile ilişkilerini gösterir korelasyon katsayıları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Her formasyon için beş adet anlamlı ilişki seçilmiş ve bunlara ait grafik (Şekil 4.85-Şekil 4.109) ve eşitlikler (4.1- 4.25) sırası ile verilmiştir.

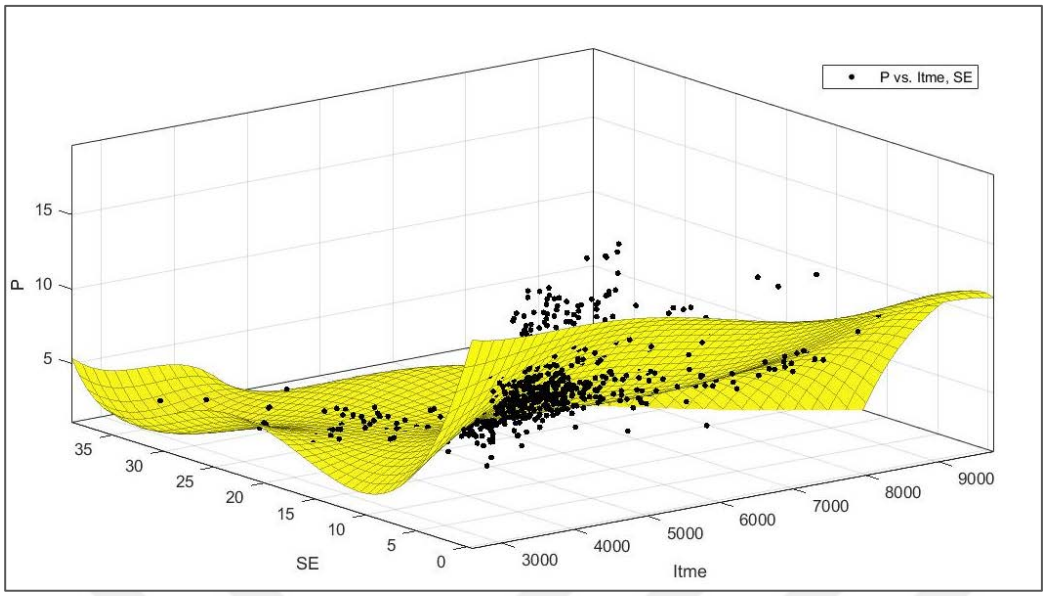
Çizelge 4.6. Seçili çift değişkenlerin formasyonların penetrasyon değeri üzerine etkisi.

x	y	z	R^2					$AdjR^2$				
			Şelmo	**Silvan**	**Midyat**	**Gercüş**	**Kızlaç**	**Şelmo**	**Silvan**	**Midyat**	**Gercüş**	**Kızlaç**
I	T	P	0.2328	0.2328	0.3683	0.5236	0.5391	0.2100	0.2116	0.3342	0.5164	0.5370
I	rpm	P	0.3202	0.3202	0.6973	0.3360	0.8351	0.3014	0.3014	0.6809	0.3258	0.8343
I	G	P	0.2105	0.2105	0.5051	0.4050	0.6521	0.1887	0.1887	0.4784	0.3959	0.6505
I	SE	P	0.6726	0.6726	0.7798	0.6579	0.5789	0.6635	0.6635	0.7679	0.6527	0.5769
T	rpm	P	0.4094	0.3628	0.7134	0.3288	0.7890	0.3931	0.3176	0.6979	0.3186	0.7890
T	G	P	0.4160	0.3631	0.7080	0.3313	0.7878	0.3998	0.3180	0.6923	0.3211	0.7868
T	SE	P	0.9912	0.9999	0.9996	1.0000	0.5672	0.9909	0.9999	0.9995	1.0000	0.5652
O	rpm	P	0.4498	0.5520	0.7492	0.5175	0.8147	0.4346	0.5203	0.7356	0.5101	0.8138
O	G	P	0.3145	0.6796	0.7067	0.5142	0.7721	0.2955	0.6568	0.6909	0.5068	0.7710
O	SE	P	0.8610	0.8355	0.8244	0.8532	0.5624	0.8572	0.8238	0.8149	0.8509	0.5604
rpm	G	P	0.4154	0.3651	0.7007	0.3287	0.7888	0.3993	0.3201	0.6845	0.3185	0.7879
rpm	SE	P	0.7163	0.6026	0.8418	0.7079	0.9987	0.7084	0.5744	0.8332	0.7034	0.9987
SE	G	P	0.8821	0.8751	0.7580	0.8925	0.7412	0.8789	0.8662	0.7450	0.8909	0.7400
PII	rpm	P	0.8573	0.8275	0.8954	0.8224	0.9054	0.8534	0.8152	0.8897	0.8197	0.9050
PII	G	P	0.8498	0.9007	0.8396	0.8494	0.7891	0.8456	0.8936	0.8309	0.8471	0.7881
PII	SE	P	0.8710	0.8334	0.8237	0.8552	0.7791	0.8674	0.8216	0.8142	0.8529	0.7781
PIT	rpm	P	0.7163	0.6026	0.8418	0.7079	0.8872	0.7084	0.5744	0.8332	0.7034	0.8867
PIT	G	P	0.8821	0.8751	0.7580	0.8925	0.7357	0.8789	0.8662	0.7450	0.8909	0.7344
PIT	SE	P	0.6459	0.5138	0.6970	0.6255	0.7370	0.6361	0.4793	0.6806	0.6198	0.7358

x: İtme, y: SE

$$f(x,y) = 8.619 + 0.8438\,x - 4.348\,y - 0.9938\,x^2 - 0.4168\,xy + 0.7972\,y^2 + 0.1509\,x^3 + 0.1512\,x^2y - 0.4986\,xy^2 + 0.2638\,y^3 + 0.04801\,x^4 + 0.07611\,x^3y + 0.3593\,x^2y^2 + 0.3553\,xy^3 - 0.1086\,y^4 - 0.009167\,x^5 - 0.01916\,x^4y - 0.0708\,x^3y^2 - 0.08206\,x^2y^3 - 0.04769\,xy^4 + 0.009685\,y^5 \quad (4.1)$$

Şelmo formasyonunda tünel kazısından elde edilen itme kuvveti ve spesifik enerji değerlerinin penetrasyon değeri ile ilişkisi gösterir matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.1'de grafik ise Şekil 4.85'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %67.26 oranında korelasyon elde edilmiştir.

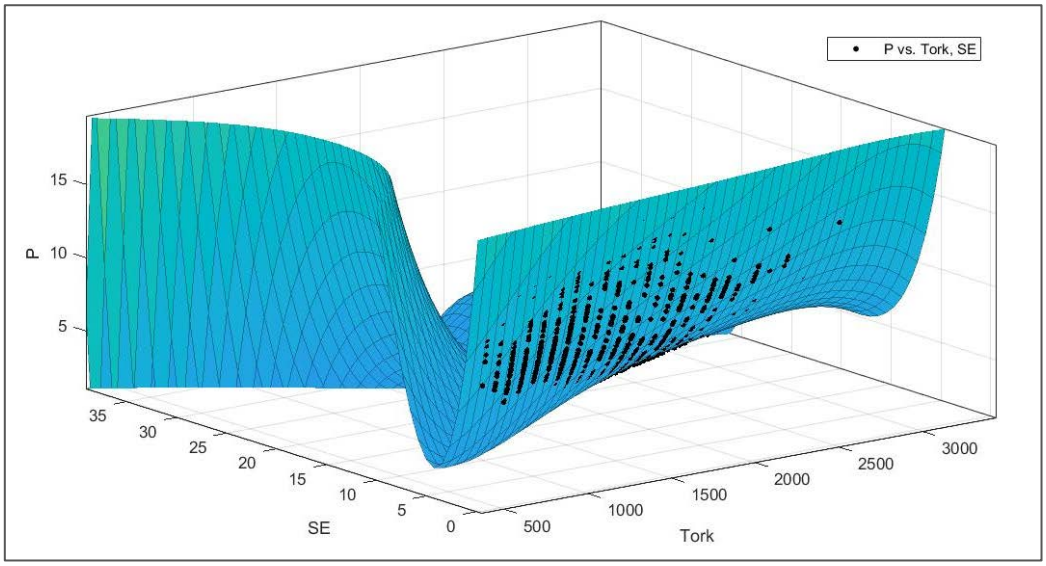


Şekil 4.85. Şelmo formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: Tork, y: SE

$$f(x,y) = 6.695 + 3.273\,x - 6.834\,y - 0.4752\,x^2 - 2.293\,xy + 7.191\,y^2 - 0.1849\,x^3 + 1.291\,x^2y - 1.096\,xy^2 - 3.343\,y^3 + 0.262\,x^4 - 0.9647^{\,x3y} + 1.013\,x^2y^2 + 0.1655\,xy^3 + 0.705\,y^4 - 0.06031\,x^5 + 0.1591\,x^4y - 0.04466\,x^3y^2 - 0.1855\,x^2y^3 + 0.03564\,xy^4 - 0.05898\,y^5 \quad (4.2)$$

Şelmo formasyonunda tork ve spesifik enerji değerlerinin penetrasyon ile ilişkisini gösterir matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.2'de grafik ise Şekil 4.86'da verilmiştir Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %99.12 oranında korelasyon elde edilmiştir.

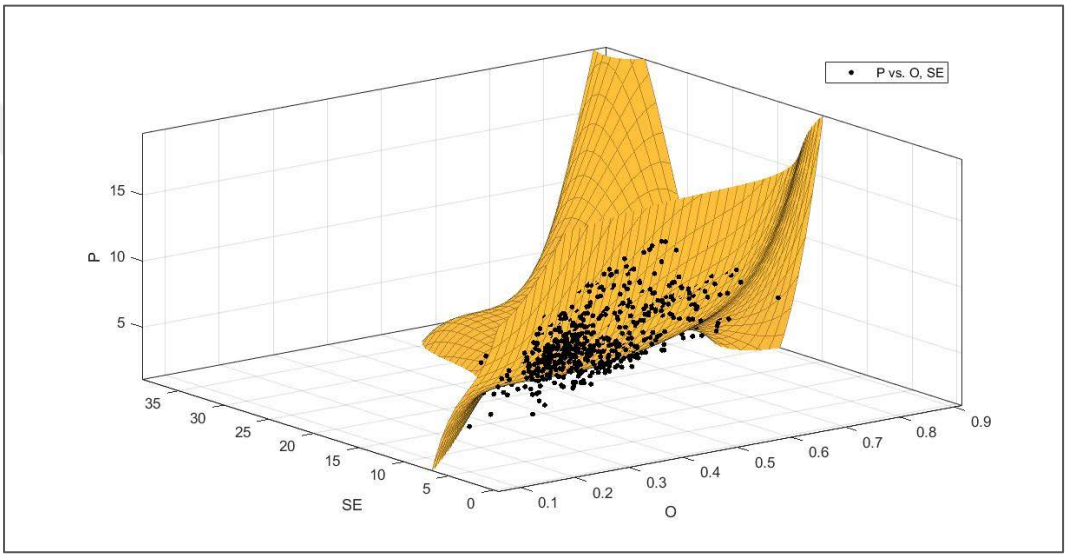


Şekil 4.86. Şelmo formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: Tork/İtme, y: SE

$$f(x,y) = 7.146 + 1.597\,x - 5.182\,y + 1.054\,x^2 - 4.744\,xy + 6.198\,y^2 + -0.3982\,x^3 + 0.7776\,x^2y + 1.795\,xy^2 - 3.319\,y^3 - 0.2435\,x^4 + 1.362\,x^3y - 2.153\,x^2y^2 + 0.6792\,xy^3 + 0.5832\,y^4 + 0.1364\,x^5 - 0.5536\,x^4y + 0.6196\,x^3y^2 - 0.1525\,x^2y^3 - 0.02002\,xy^4 - 0.0424\,y^5 \quad (4.3)$$

Şelmo formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösterir matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.3'te grafik ise Şekil 4.87'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %86.10 oranında korelasyon elde edilmiştir.

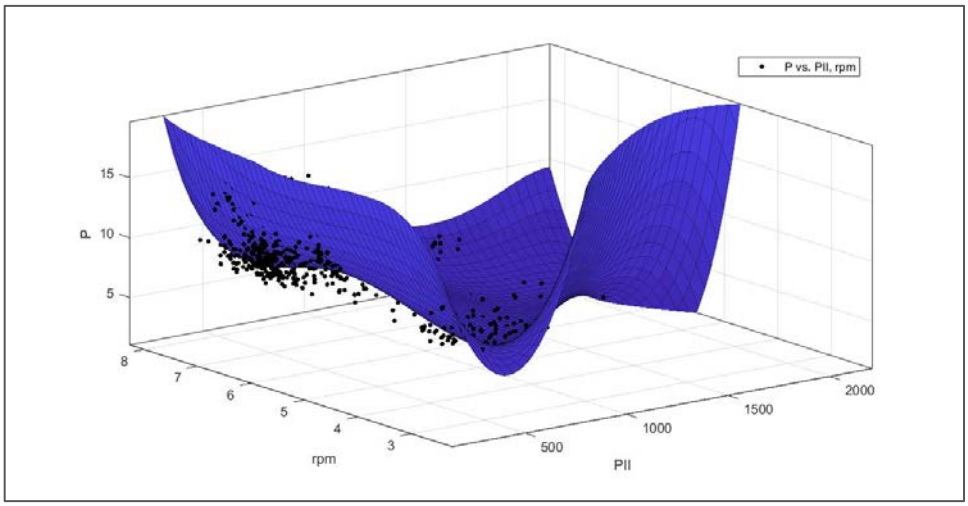


Şekil 4.87. Şelmo formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y: Dakikada devir sayısı

$$f(x,y) = 8.541 - 1.841x - 1.061y + 1.288x^2 + 1.001xy - 1.029y^2 - 1.733x^3 + 1.517x^2y - 1.183xy^2 + 0.4429y^3 + 0.6307x^4 - 0.989x^3y + 0.9136\,x^2y^2 - 0.3058\,xy^3 + 0.3172\,y^4 - 0.06864\,x^5 + 0.1335\,x^4y - 0.08302\,x^3y^2 - 0.0292\,x^2y^3 + 0.07946\,xy^4 + 0.03857\,y^5 \quad (4.4)$$

Şelmo formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.4'te grafik ise Şekil 4.88'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %83.98 oranında korelasyon elde edilmiştir.

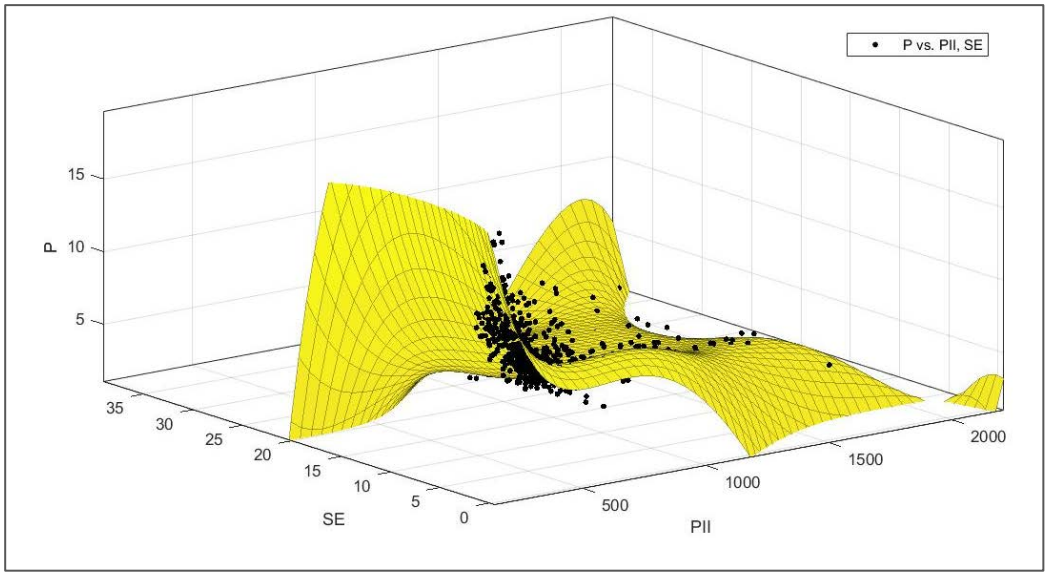


Şekil 4.88. Şelmo formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y: SE

$$f(x,y) = 7.594 - 1.77*x - 1.915y + 3.713x^2 - 2.565xy + 0.08795\,y^2 - 2.782\,x^3 + 1.56x^2y + 0.1301xy^2 + 0.6543y^3 + 0.7461x^4 + 0.3142x^3y - 1.17x^2y^2 + 0.5611xy^3 - 0.2945y^4 - 0.06846^5 - 0.1176x^4*y + 0.2251x^3y^2 - 0.09815x^2y^3 + 0.02504xy^4 + 0.01086y^5 \quad (4.5)$$

Şelmo formasyonunda spesifik enerji ve itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.5'te grafik ise Şekil 4.89'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %87.10 oranında korelasyon elde edilmiştir.

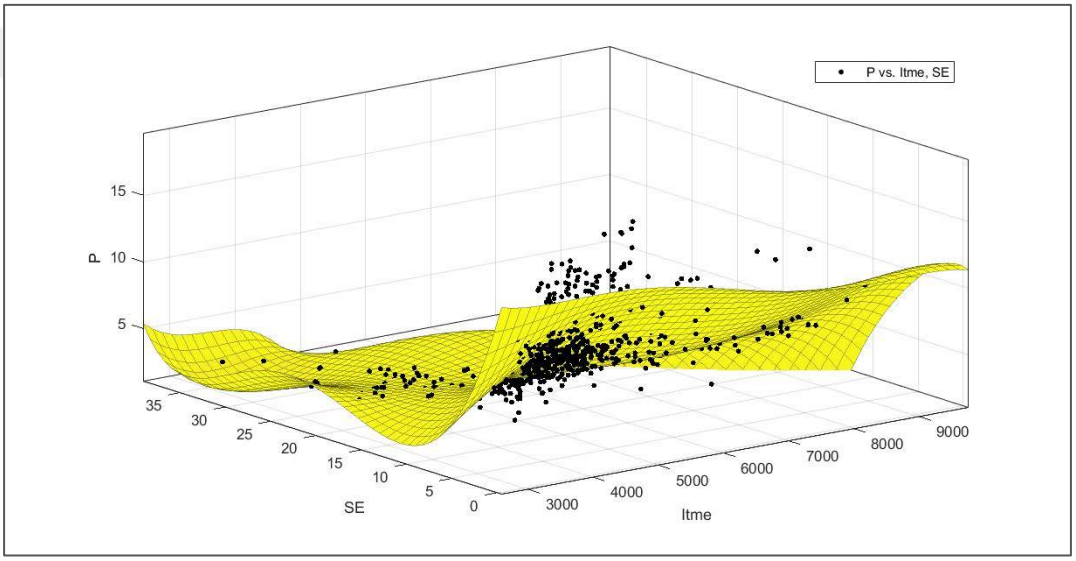


Şekil 4.89. Şelmo formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme, y:SE

$$f(x,y) = 8.619 + 0.8438\,x - 4.348\,y - 0.9938\,x^2 - 0.4168\,xy + 0.7972\,y^2 + 0.1509\,x^3 + 0.1512\,x^2y - 0.4986\,xy^2 + 0.2638\,y^3 + 0.04801\,x^4 + 0.07611\,x^3y + 0.3593\,x^2y^2 + 0.3553\,xy^3 - 0.1086\,y^4 - 0.009167\,x^5 - 0.01916\,x^4y - 0.0708\,x^3y^2 - 0.08206\,x^2y^3 - 0.04769\,xy^4 + 0.009685\,y^5 \quad (4.6)$$

Silvan formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.6'da grafik ise Şekil 4.90'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %67.26 oranında korelasyon elde edilmiştir.

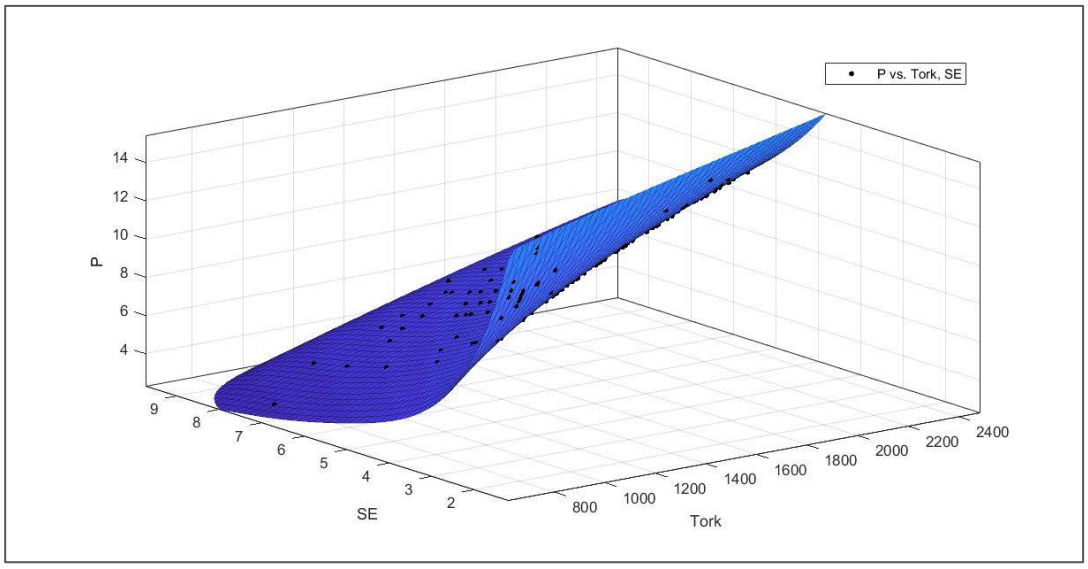


Şekil 4.90. Silvan formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: Tork, y:SE

$$f(x,y) = 8.191 + 1.812\,x - 2.129\,y - 0.0002568\,x^2 - 0.4364\,xy + 0.4996\,y^2 + 0.0008587\,x^3 + 0.00304\,x^2y + 0.1089\,xy^2 - 0.08853\,y^3 + 0.0001125\,x^4 - 0.003803\,x^3y + 0.00228\,x^2y^2 - 0.05623\,xy^3 + 0.06363\,y^4 - 0.0001404\,x^5 - 0.0006094\,x^4y + 0.001214\,x^3y^2 - 0.00426\,x^2y^3 + 0.02222\,xy^4 - 0.02812\,y^5 \quad (4.7)$$

Silvan formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.7'de grafik ise Şekil 4.91'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %99.99 oranında korelasyon elde edilmiştir.

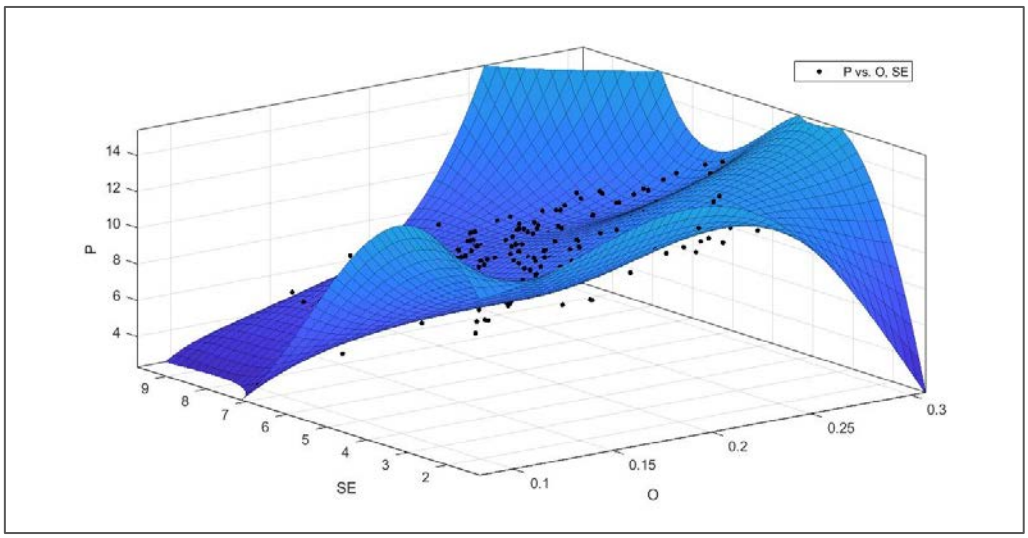


Şekil 4.91. Silvan formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: Tork/İtme, y:SE

$$f(x,y) = 8.408 + 1.174\,x - 1.036\,y - 0.1667\,x^2 - 0.4851\,xy + 0.2828\,y^2 - 0.05316\,x^3 - 0.2304\,x^2y + 0.00341\,xy^2 + 0.1083\,y^3 + 0.01819\,x^4 + 0.0816\,x^3y + 0.1043\,x^2y^2 + 0.1225\,xy^3 - 0.04089\,y^4 + 0.002611\,x^5 + 0.0002617\,x^4y + 0.01946\,x^3y^2 + 0.07876\,x^2y^3 + 0.007028\,xy^4 - 0.02541\,y^5 \quad (4.8)$$

Silvan formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.8'de grafik ise Şekil 4.92'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %83.55 oranında korelasyon elde edilmiştir.

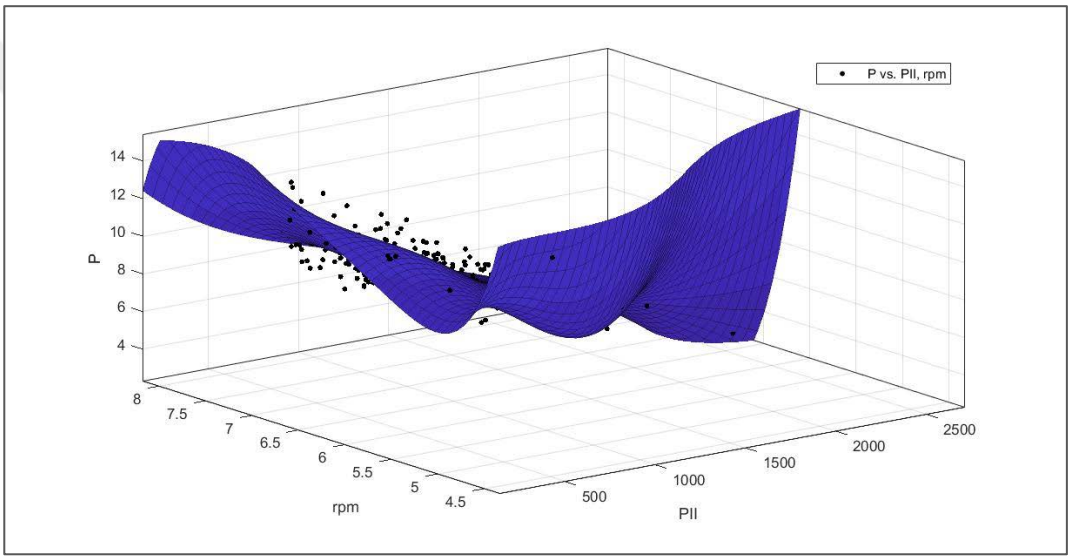


Şekil 4.92. Silvan formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y:rpm (0.8275)

$$f(x,y) = 8.216 - 1.425\,x - 0.6635\,y + 0.4211\,x^2 + 0.09399\,xy + 0.1772\,y^2 - 0.1269\,x^3 + 0.2003\,x^2y - 0.2655\,xy^2 + 0.2544\,y^3 - 0.01008\,x^4 - 0.09138\,x^3y - 0.01972\,x^2y^2 + 0.03306\,xy^3 - 0.05529\,y^4 + 0.002842\,x^5 + 0.01093\,x^4y + 0.05111\,x^3{*}y^2 - 0.09044\,x^2y^3 + .0555xy^4 - 0.02877\,y^5 \quad (4.9)$$

Silvan formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.9'da grafik ise Şekil 4.93'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %82.75 oranında korelasyon elde edilmiştir.

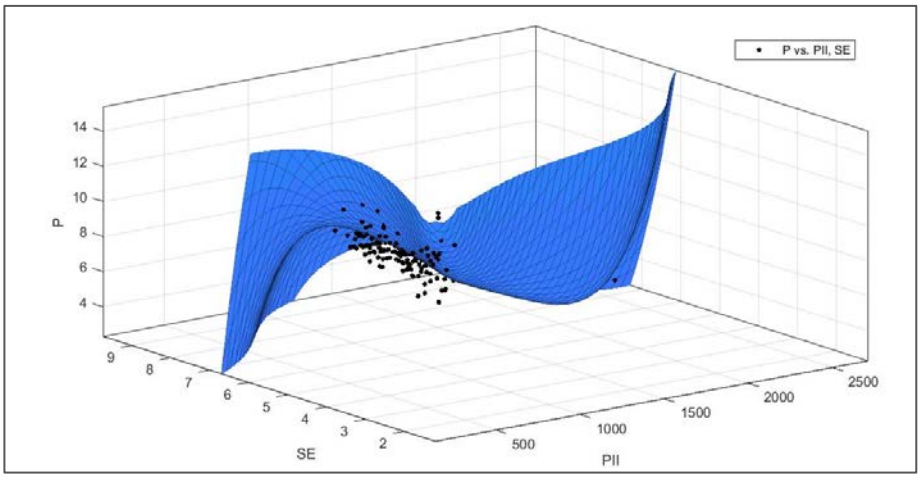


Şekil 4.93. Silvan formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y:SE

$$f(x,y) = 8.119 - 2.28\,x + 0.6467\,y + 0.4953\,x^2 + 0.4075\,xy - 0.1919\,y^2 - 0.09159\,x^3 - 0.694\,x^2y + 0.6042\,xy^2 + 0.1143\,y^3 - 0.04849\,x^4 + 0.6452\,x^3y - 0.7728\,x^2y^2 + 0.1028\,xy^3 + 0.03431\,y^4 + 0.02102\,x^5 - 0.1829\,x^4y + 0.2891\,x^3y^2 - 0.2424\,x^2y^3 + 0.2683\,xy^4 - 0.1672\,y^5 \quad (4.10)$$

Silvan formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.10'da grafik ise Şekil 4.94'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %83.34 oranında korelasyon elde edilmiştir.

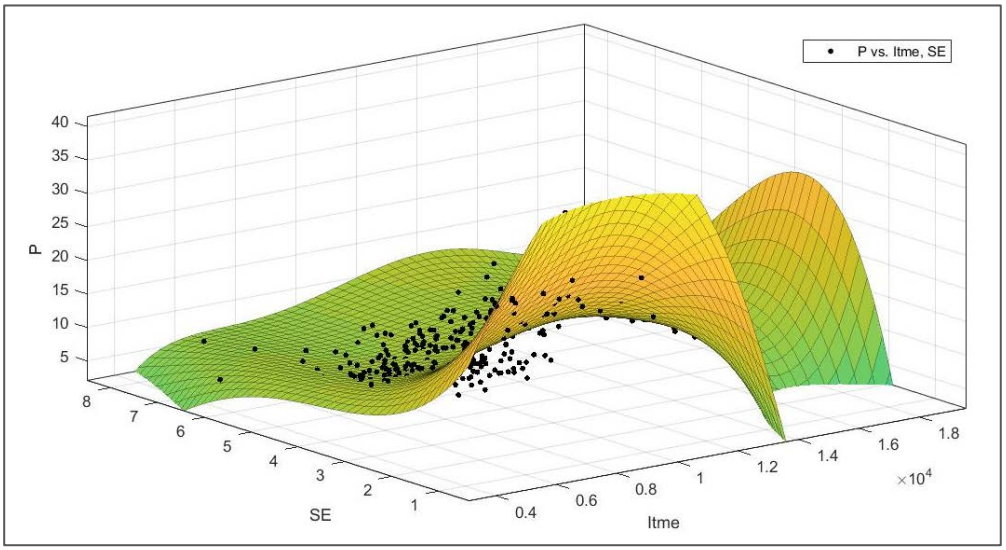


Şekil 4.94. Silvan formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme, y: SE

$$f(x,y) = 10.95 + 2.785\,x - 4.939\,y + 0.9537\,x^2 - 1.76\,xy + 2.303\,y^2 - 0.9684\,x^3 + 1.407\,x^2y - 0.06319\,xy^2 - 0.4\,y^3 - 0.282\,x^4 + 0.3875\,x^3y - 0.7487\,x^2y^2 + 0.2752\,xy^3 - 0.01122\,y^4 + 0.1246\,x^5 - 0.1475\,x^4y + 0.03715\,x^3y^2 + 0.1082\,x^2y^3 - 0.04395\,xy^4 + 0.006364\,y^5 \quad (4.11)$$

Midyat formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.11'de grafik ise Şekil 4.95'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %77.98 oranında korelasyon elde edilmiştir.

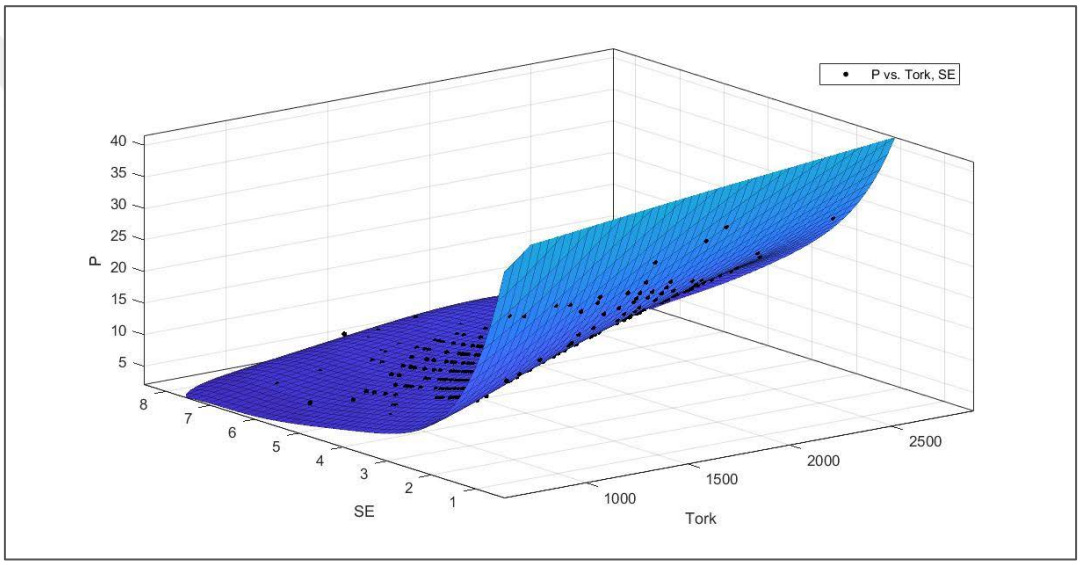


Şekil 4.95. Midyat formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: Tork, y: SE

$$f(x,y) = 10.98 + 2.65\,x - 3.453\,y - 8.394e\text{-}05\,x^2 - 0.8445\,xy + 0.8316\,y^2 + 0.001504\,x^3 + 0.01709\,x^2y + 0.3455\,xy^2 - 0.4272\,y^3 + 0.005611\,x^4 + 0.01294\,x^3y - 0.006016\,x^2y^2 - 0.1395\,xy^3 + 0.2918\,y^4 - 0.002395\,x^5 - 0.01013\,x^4y - 0.006583\,x^3y^2 - 0.0006287\,x^2y^3 + 0.02442\,xy^4 - 0.06054\,y^5 \quad (4.12)$$

Midyat formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.12'de grafik ise Şekil 4.96'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %99.96 oranında korelasyon elde edilmiştir.

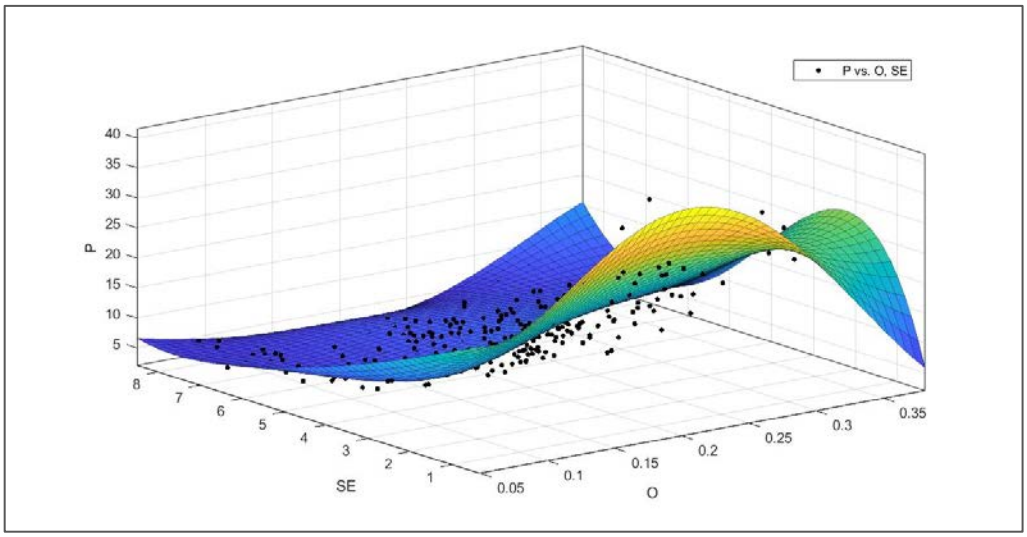


Şekil 4.96. Midyat formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: Tork/İtme, y: SE

$$f(x,y) = 10.72 + 2.51\,x - 3.426\,y - 0.4486\,x^2 - 1.451\,xy + 1.875\,y^2 - 0.2329\,x^3 - 0.009316\,x^2y + 0.07343\,xy^2 - 0.3394\,y^3 + 0.1548\,x^4 + 0.1293\,x^3y - 0.231\,x^2y^2 + 0.1056\,xy^3 - 0.04894\,y^4 - 0.01506\,x^5 - 0.04493\,x^4y + 0.004637\,x^3y^2 + 0.102\,x^2y^3 - 0.02309\,xy^4 + 0.003933\,y^5 \quad (4.13)$$

Midyat formasyonunda tork/itme oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.13'te grafik ise Şekil 4.97'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %82.44 oranında korelasyon elde edilmiştir.

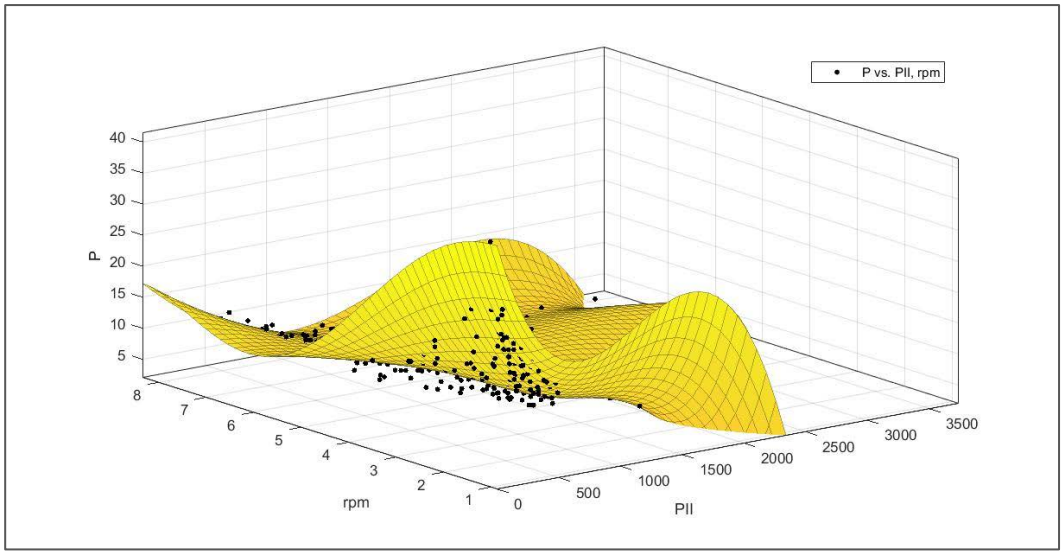


Şekil 4.97. Midyat formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y: rpm

$$f(x,y) = 9.948 - 2.323\,x - 1.13\,y + 1.766\,x^2 + 3.585\,xy - 1.165\,y^2 - 0.4315\,x^3 - 2.334\,x^2y - 2.218\,xy^2 + 0.4719\,y^3 - 0.03947\,x^4 + 1.062\,x^3y + 0.6061\,x^2y^2 - 2.157\,xy^3 + 1.002\,y^4 + 0.006795\,x^5 - 0.0432\,x^4y - 0.4314\,x^3y^2 + 0.4497\,x^2y^3 + 1.151\,xy^4 - 0.5483\,y^5 \quad (4.14)$$

Midyat formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.14'te grafik ise Şekil 4.98'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %89.54 oranında korelasyon elde edilmiştir.

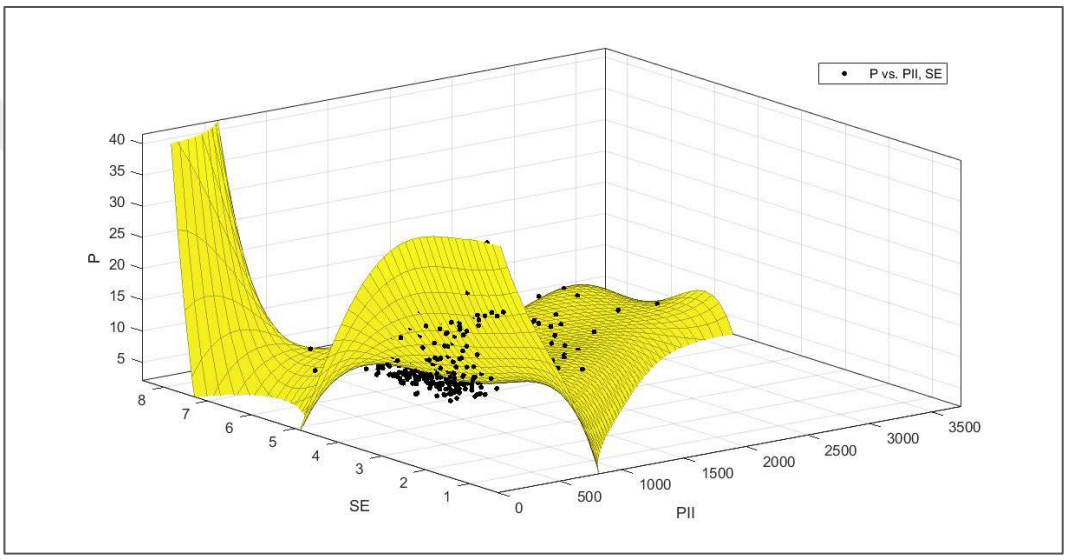


Şekil 4.98. Midyat formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y: SE

$$f(x,y) = 9.37 - 4.717\,x - 0.5901\,y + 3.35\,x^2 + 0.1524\,xy + 1.269\,y^2 + 0.3892\,x^3 - 5.036\,x^2y + 3.39\,xy^2 - 0.592\,y^3 - 0.5579\,x^4 + 2.441\,x^3y - 1.962\,x^2y^2 + 0.6124\,xy^3 - 0.245\,y^4 + 0.04435\,x^5 - 0.002978\,x^4y - 0.7054\,x^3y^2 + 1.314\,x^2y^3 - 0.8007\,xy^4 + 0.1054\,y^5 \quad (4.15)$$

Midyat formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.15'te grafik ise Şekil 4.99'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %82.37 oranında korelasyon elde edilmiştir.

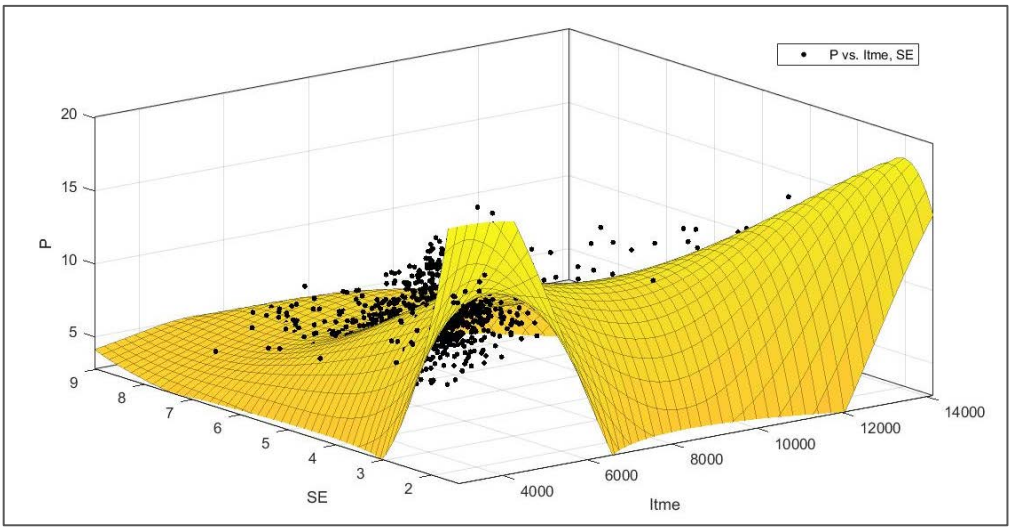


Şekil 4.99. Midyat formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme, y: SE

$$f(x,y) = 10.38 - 0.08775\,x - 3.422\,y - 0.6498\,x^2 - 0.03322\,xy - 0.2336\,y^2 + 0.3294\,x^3 + 0.3471\,x^2y - 0.02088\,xy^2 + 0.6753\,y^3 - 0.05293\,x^4 - 0.1366\,x^3y + 0.1721\,x^2y^2 + 0.378\,xy^3 - 0.0815\,y^4 + 0.001416\,x^5 + 0.008308\,x^4y - 0.02051\,x^3y^2 - 0.09989\,x^2y^3 - 0.1176\,xy^4 - 0.01504\,y^5 \quad (4.16)$$

Gercüş formasyonunda itme ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.16'da grafik ise Şekil 4.100'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %65.79 oranında korelasyon elde edilmiştir.

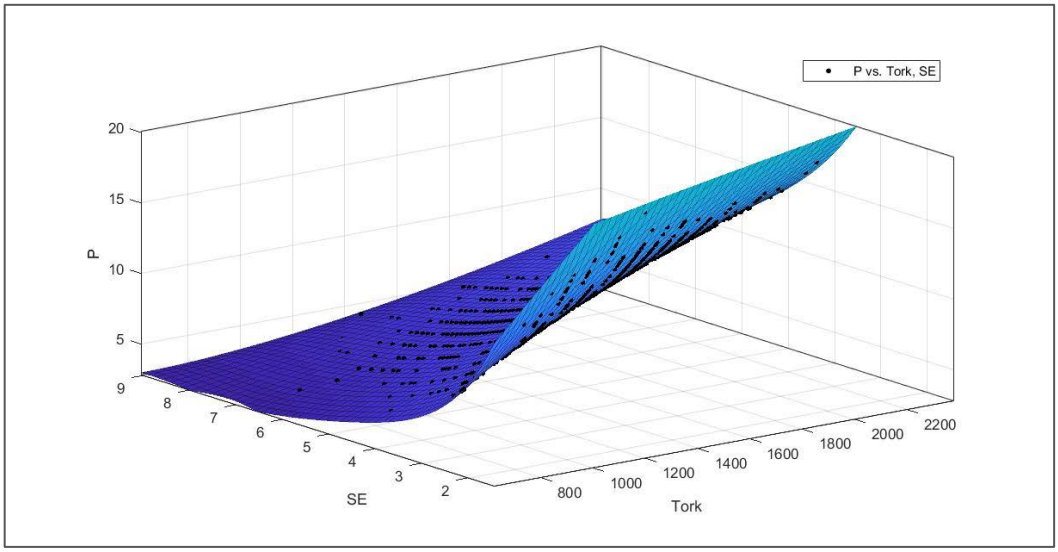


Şekil 4.100. Gercüş formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: Tork, y: SE

$$f(x,y) = 9.404 + 1.762\,x - 2.63\,y + 0.001771\,x^2 - 0.5002\,xy + 0.719\,y^2 + 0.0003593\,x^3 - 0.005637\,*x\text{^}2*y + 0.1601\,xy^2 - 0.2418\,y^3 + 0.0001937\,x^4 - 6.357e\text{-}05\,x^3y - 0.006208\,x^2y^2 - 0.04335\,xy^3 + 0.0866\,y^4 - 0.0001265\,x^5 + 0.0001725\,x^4y - 0.0003471\,x^3y^2 + 0.004227\,x^2y^3 + 0.004206\,xy^4 - 0.01418\,y^5 \quad (4.17)$$

Gercüş formasyonunda itme ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.17'de grafik ise Şekil 4.101'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %100.00 oranında korelasyon elde edilmiştir.

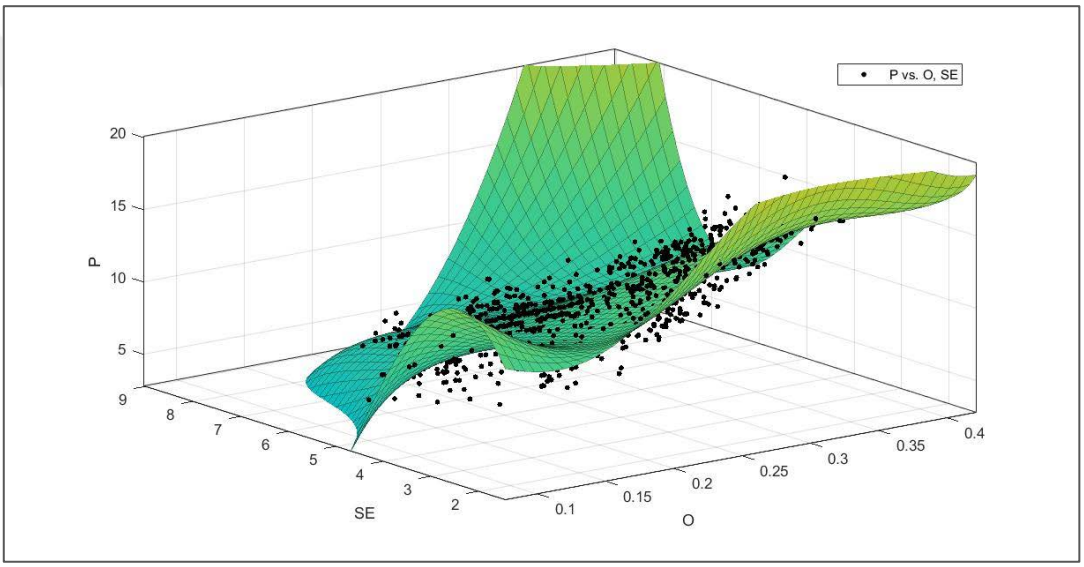


Şekil 4.101. Gercüş formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: Tork/İtme, y: SE

$$f(x,y) = 9.745 + 1.774\,x - 1.772\,y + 0.3617\,x^2 - 0.6796\,xy - 0.25\,y^2 - 0.2171\,x^3 - 0.2647\,x^2y - 0.291\,xy^2 + 0.05886\,y^3 - 0.05542\,x^4 + 0.1937\,x^3y - 0.09103\,x^2y^2 - 0.02846\,xy^3 + 0.1088\,y^4 + 0.02158\,x^5 - 0.04024\,x^4y + 0.02383\,x^3y^2 + 0.08182\,x^2y^3 + 0.06521\,xy^4 - 0.03569\,y^5 \quad (4.18)$$

Gercüş formasyonunda itme ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.18'de grafik ise Şekil 4.102'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %85.32 oranında korelasyon elde edilmiştir.

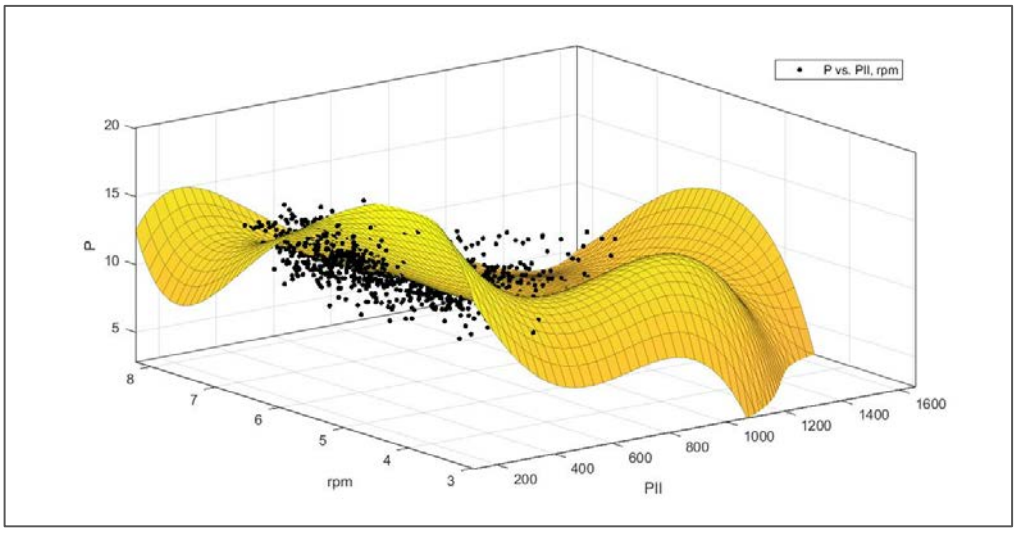


Şekil 4.102. Gercüş formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y: rpm

$$f(x,y) = 9.258 - 2.838\,x - 0.1368\,y + 1.105\,x^2 + 0.2074\,xy - 0.2623\,y^2 + 0.1184\,x^3 - 0.3883\,x^2y + 0.185\,xy^2 - 0.02634\,y^3 - 0.2595\,x^4 + 0.1125\,x^3y + 0.06681\,x^2y^2 - 0.0894\,xy^3 + 0.05855\,y^4 + 0.05991\,x^5 - 0.01427\,x^4y - 0.04335\,x^3y^2 + 0.03172\,x^2y^3 - 0.01622\,xy^4 + 0.009977\,y^5 \quad (4.19)$$

Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.19'da grafik ise Şekil 4.103'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %82.24 oranında korelasyon elde edilmiştir.

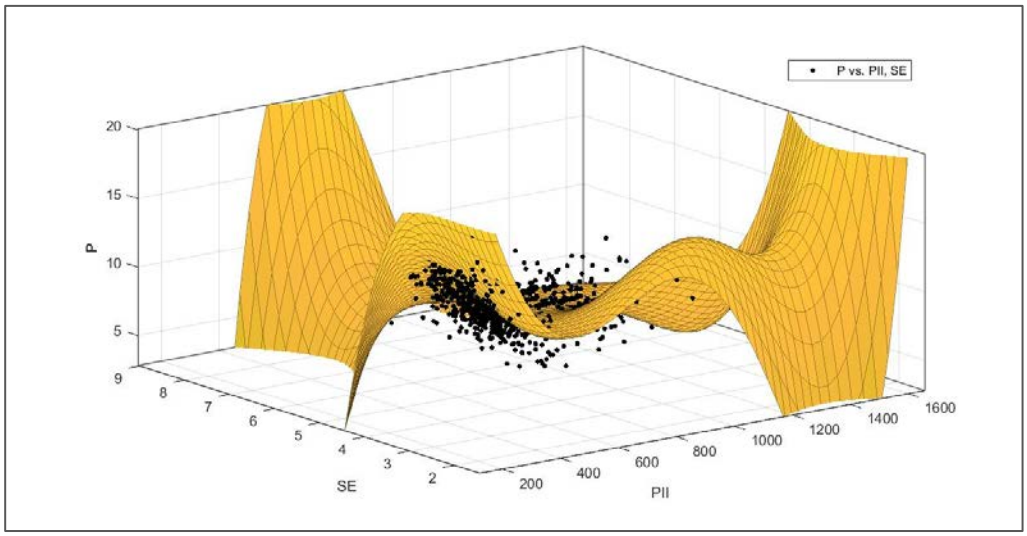


Şekil 4.103. Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y:SE

$$f(x,y) = 9.296 - 2.755\,x + 0.2441\,y + 2.263\,x^2 - 1.793\,xy - 0.0285\,y^2 + 0.166\,x^3 - 2.194\,x^2y + 2.885\,xy^2 - 0.8768\,y^3 - 0.8696\,x^4 + 2.101\,x^3y - 1.443\,x^2y^2 + 0.3633\,xy^3 + 0.02392\,y^4 + 0.21\,x^5 - 0.4789\,x^4y + 0.3225\,x^3y^2 + 0.05472\,x^2y^3 - 0.2881\,xy^4 + 0.09854\,y^5 \quad (4.20)$$

Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.20'de grafik ise Şekil 4.104'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %85.52 oranında korelasyon elde edilmiştir.

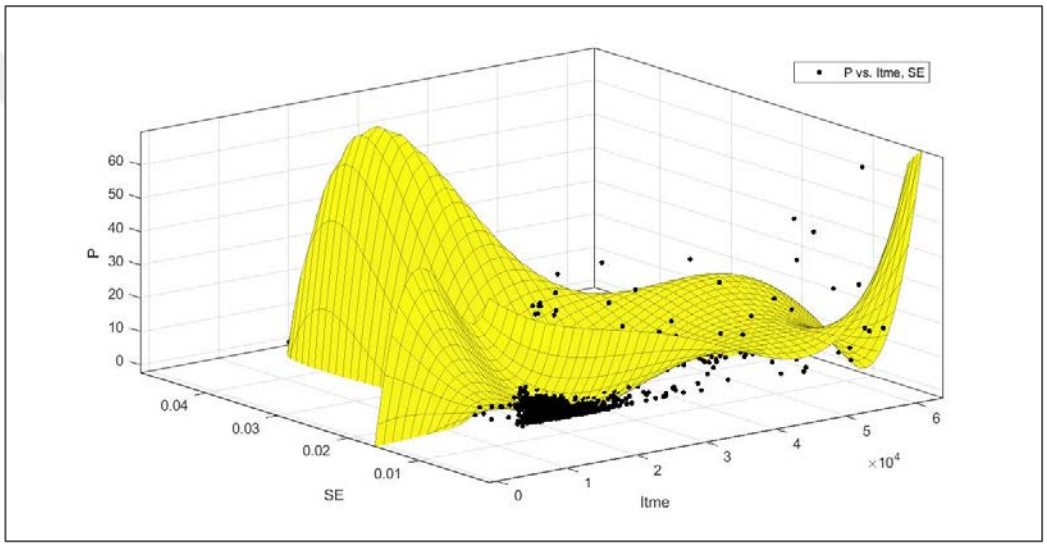


Şekil 4.104. Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme, y: SE

$$f(x,y) = 7.739 - 1.452\,x - 3.267\,y + 2.642\,x^2 - 1.189\,xy + 1.347\,y^2 - 0.3779\,x^3 + 0.608\,x^2y - 0.1531\,xy^2 - 0.2666\,y^3 - 0.009854\,x^4 - 0.0003791\,x^3y - 0.1267\,x^2y^2 + 0.118\,xy^3 + 0.01957\,y^4 + 0.002716\,x^5 - 0.008644\,x^4y + 0.02006\,x^3y^2 - 0.01061\,x^2y^3 - 0.004504\,xy^4 - 0.0004685\,y^5 \quad (4.21)$$

Kızlaç formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.21'de grafik ise Şekil 4.105'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %57.89 oranında korelasyon elde edilmiştir.

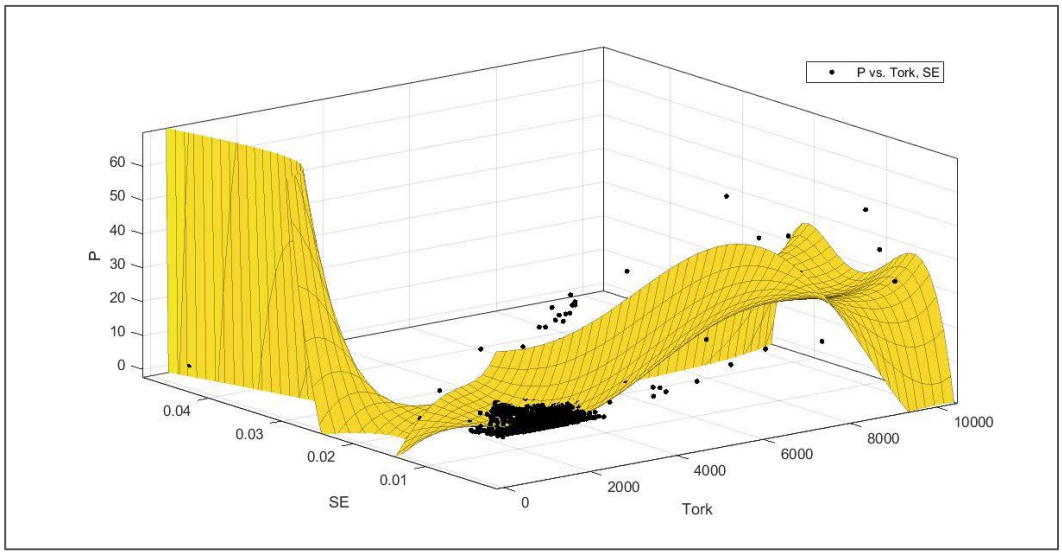


Şekil 4.105. Kızlaç formasyonunda itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: Tork, y: SE

$$f(x,y) = 8.252 - 1.441\,x - 3.871\,y + 1.244\,x^2 - 0.6364\,xy + 1.416\,y^2 - 0.007531\,x^3 - 0.04334\,x^2y + 0.3556\,xy^2 - 0.271\,y^3 - 0.01748\,x^4 + 0.02684\,x^3y - 0.06863\,x^2y^2 + 0.00396\,xy^3 + 0.02769\,y^4 + 0.0009409\,x^5 - 0.001344\,x^4y + 0.001247\,x^3y^2 + 0.005174\,x^2y^3 - 0.004504\,xy^4 - 0.001208\,y^5 \quad (4.22)$$

Kızlaç formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.22'de grafik ise Şekil 4.106'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %56.72 oranında korelasyon elde edilmiştir.

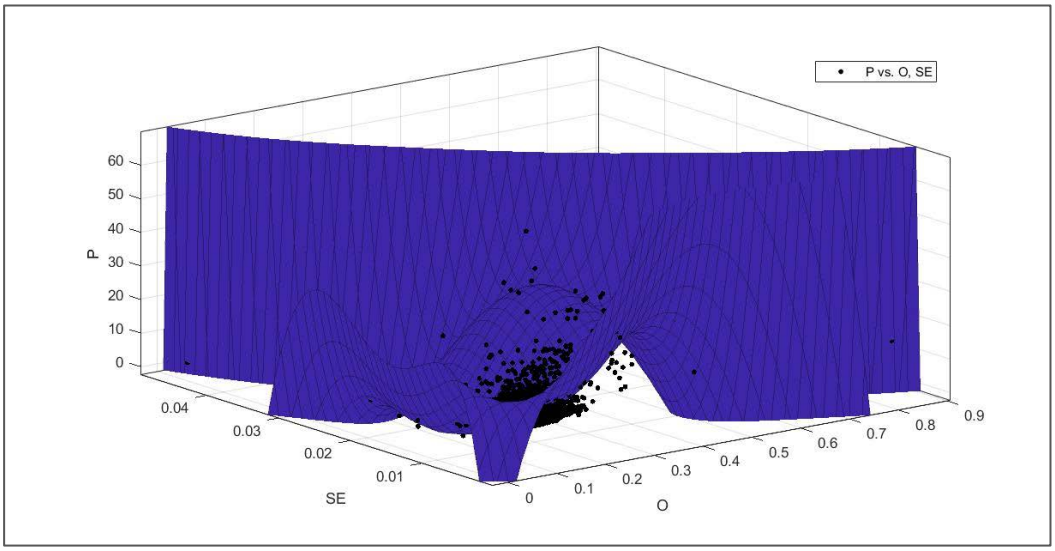


Şekil 4.106. Kızlaç formasyonunda tork ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: Tork/İtme, y: SE

$$f(x,y) = 8.239 - 0.2836\,x - 4.146\,y + 1.295\,x\text{^}2 + 1.21\,xy + 1.405\,y^2 - 0.03924\,x^3 + 0.2212\,x^2y + 0.6675\,xy^2 + 0.02945\,y^3 - 0.01641\,x^4 - 0.108\,x^3y - 0.1032\,x^2y^2 - 0.164\,xy^3 - 0.03028\,y^4 + 0.000783\,x^5 + 0.006084\,x^4y + 0.00838\,x^3y^2 + 0.008848\,x^2y^3 + 0.008832\,xy^4 + 0.001506\,y^5 \quad (4.23)$$

Kızlaç formasyonunda tork/itme kuvveti ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.23'te grafik ise Şekil 4.107'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %56.24 oranında korelasyon elde edilmiştir.

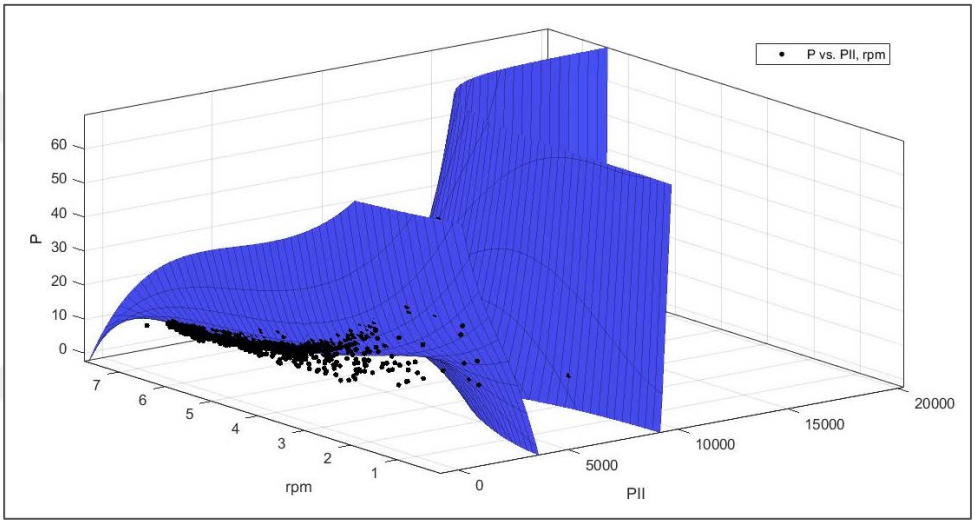


Şekil 4.107. Kızlaç formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y: rpm

$$f(x,y) = 8.369 - 1.827\,x - 2.385\,y + 1.769\,x^2 - 2.954\,xy + 1.667\,y^2 - 0.7178\,x^3 - 0.6389\,x^2y + 1.125\,xy^2 + 0.2394\,y^3 + 0.0884\,x^4 + 0.7671\,x^3y - 0.5931\,x^2y^2 + 0.8541\,xy^3 - 0.1266\,y^4 - 0.001038\,x^5 - 0.1104\,x^4y + 0.07602\,x^3y^2 - 0.06117\,x^2y^3 + 0.06083\,xy^4 - 0.02691\,y^5 \quad (4.24)$$

Kızlaç formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.24'te grafik ise Şekil 4.108'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %90.54 oranında korelasyon elde edilmiştir.

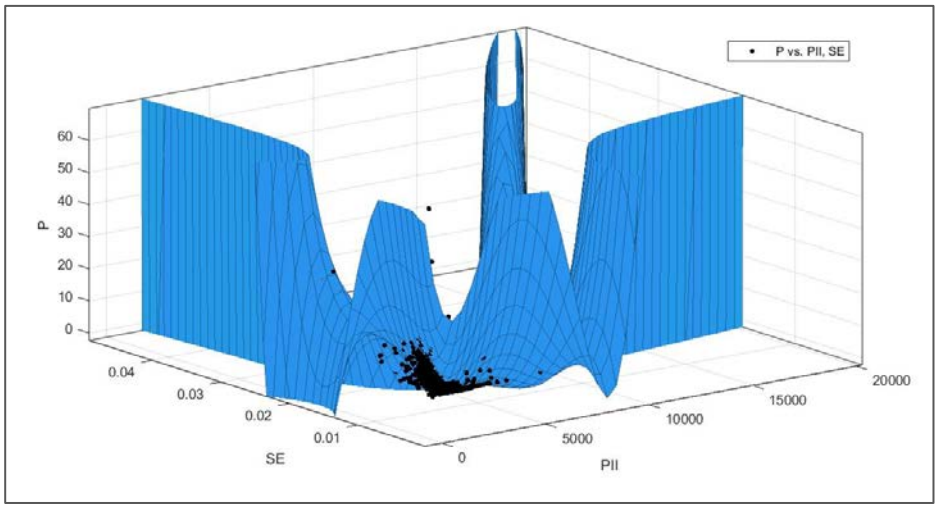


Şekil 4.108. Kızlaç formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisi.

x: *İtme/Penetrasyon*, y: SE

$$f(x,y) = 6.921 - 0.8106\,x - 1.981\,y + 5.36\,x^2 - 5.611\,xy + 2.973\,y^2 - 2.274\,x^3 - 0.1492\,x^2y + 1.305\,xy^2 - 0.6402\,y^3 + 0.1505\,x^4 + 0.8409\,x^3y - 0.6342\,x^2y^2 - 0.001618\,xy^3 + 0.05659\,y^4 + 0.02222\,x^5 - 0.123\,x^4y + 0.04184\,x^3y^2 + 0.05215\,x^2y^3 - 0.02085\,xy^4 - 0.001788\,y^5 \quad (4.25)$$

Kızlaç formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi kafa dönüş hızının penetrasyon ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.25'te grafik ise Şekil 4.109'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %77.91 oranında korelasyon elde edilmiştir.



Şekil 4.109. Kızlaç formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve spesifik enerjinin penetrasyon ile ilişkisi.

4.3.2. Spesifik Enerjiye Ait Değerlendirmeler

Şelmo, Silvan, Midyat, Gercüş ve Kızlaç formasyonlarında; makine parametrelerinin spesifik enerji değeri ile ilişkilerini gösterir korelasyon katsayıları Çizelge 4.7'de verilmiştir. Her formasyon için beş adet anlamlı ilişki seçilmiş ve bunlara ait grafik (Şekil 4.110-Şekil 4.134) ve eşitlikler (4.26- 4.50) sırası ile verilmiştir.

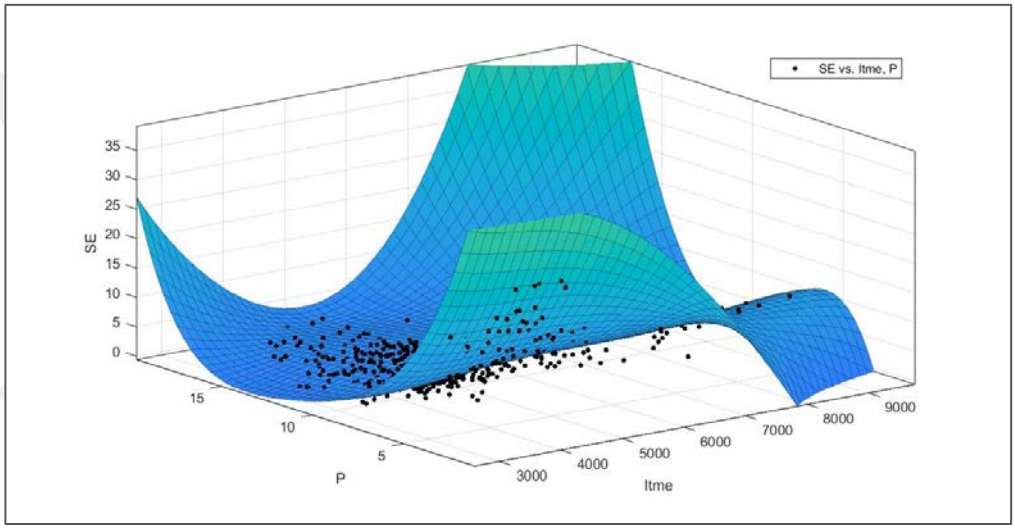
Çizelge 4.7. Seçili çift değişkenlerin formasyonların spesifik enerji değeri üzerine etkisi.

x	y	z	R^2					$AdjR^2$				
			Şelmo	**Silvan**	**Midyat**	**Gercüş**	**Kızlaç**	**Şelmo**	**Silvan**	**Midyat**	**Gercüş**	**Kızlaç**
I	T	SE	0.6272	0.7950	0.2818	0.4220	0.3797	0.6169	0.7804	0.2430	0.4131	0.3768
I	P	SE	0.8872	0.8601	0.7492	0.7749	0.8061	0.8841	0.8501	0.7536	0.7715	0.8052
I	rpm	SE	0.2618	0.7745	0.6501	0.4158	0.4409	0.2414	0.7585	0.6312	0.4069	0.4383
I	G	SE	0.5209	0.7973	0.7195	0.4393	0.3560	0.5076	0.7829	0.7043	0.4307	0.3529
T	P	SE	0.9988	1.0000	0.9995	1.0000	0.8515	0.9987	1.0000	0.9995	1.0000	0.8508
T	rpm	SE	0.6396	0.5501	0.6418	0.2559	0.2604	0.6297	0.5182	0.6225	0.2446	0.2569
T	G	SE	0.6594	0.5496	0.6381	0.2606	0.2478	0.6499	0.5176	0.6185	0.2493	0.2442
O	P	SE	0.9588	0.6976	0.7132	0.7774	0.8058	0.9577	0.6762	0.6977	0.7740	0.8049
O	rpm	SE	0.6796	0.2271	0.5084	0.1469	0.4253	0.6707	0.1723	0.4818	0.1339	0.4226
O	G	SE	0.6722	0.7810	0.6650	0.4093	0.3696	0.6631	0.7654	0.6469	0.4002	0.3667
rpm	G	SE	0.6445	0.5553	0.6387	0.2578	0.2854	0.6347	0.5216	0.6197	0.2465	0.2821
rpm	P	SE	0.8935	0.5900	0.6805	0.6946	0.9549	0.8905	0.5610	0.6632	0.6900	0.9547
P	G	SE	0.9577	0.9321	0.8002	0.9206	0.8311	0.9565	0.9273	0.7894	0.9193	0.8303
PII	rpm	SE	0.8398	0.8348	0.7285	0.7135	0.8479	0.8354	0.8231	0.7139	0.7091	0.8472
PII	G	SE	0.7845	0.9476	0.8328	0.7974	0.7829	0.7786	0.9439	0.8238	0.7943	0.7819
PIT	rpm	SE	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.7058	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.7044
PIT	G	SE	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9989	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9989

x: İtme, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 4.664 + 1.074\,x - 1.529\,y - 0.6419\,x^2 + 0.01399\,xy + 1.944\,y^2 - 0.1128\,x^3 - 0.4906\,x^2y + 0.008278\,xy^2 - 1.127\,y^3 + 0.1182\,x^4 + 0.09525\,x^3y - 0.04713\,x^2y^2 + 0.1493\,xy^3 + 0.09463\,y^4 - 0.01566\,x^5 - 0.009997\,x^4y + 0.008623\,x^3y^2 + 0.17\,x^2y^3 - 0.1008\,xy^4 + 0.03399\,y^5 \quad (4.26)$$

Şelmo formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.26'da grafik ise Şekil 4.110'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %88.72 oranında korelasyon elde edilmiştir.

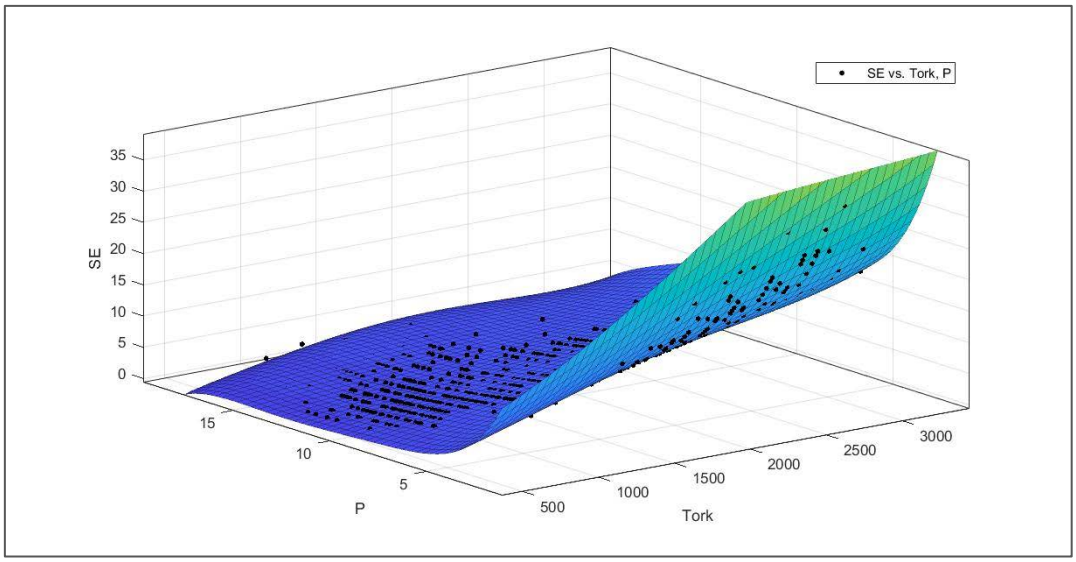


Şekil 4.110. Şelmo formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: Tork, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 5.135 + 1.94\,x - 1.74\,y - 0.04\,x^2 - 0.5818\,xy + 0.1587\,y^2 - 0.04207\,x^3 + 0.05262\,x^2y + 0.1512\,xy^2 - 0.1915\,y^3 + 0.00629\,x^4 + 0.02946\,x^3y + 0.01999\,x^2y^2 - 0.1989\,xy^3 + 0.2775\,y^4 + 0.007321\,x^5 + 0.0008637\,x^4y - 0.007782\,x^3y^2 - 0.03113\,x^2{*}y^3 + 0.06422\,xy^4 - 0.06702\,y^5 \quad (4.27)$$

Şelmo formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.27'de grafik ise Şekil 4.111'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %99.88 oranında korelasyon elde edilmiştir.

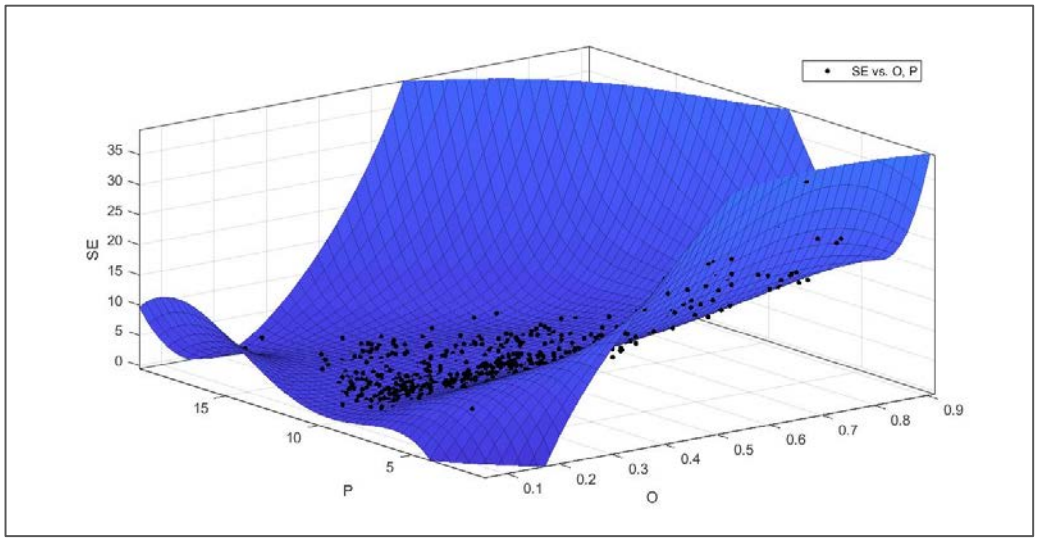


Şekil 4.111. Şelmo formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: Tork/İtme, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 4.992 + 1.848\,x - 1.975\,y - 0.116\,x^2 + 1.011\,xy + 1.329\,y^2 - 0.1104\,x^3 - 0.4513\,x^2y - 0.7837\,xy^2 - 0.5839\,y^3 + 0.02805\,x^4 - 0.2734\,x^3y - 0.01633\,x^2y^2 - 0.5371\,xy^3 - 0.02995\,y^4 + 0.02221\,x^5 + 0.1518\,x^4y + 0.05256\,x^3y^2 + 0.145\,x^2y^3 + 0.2889\,xy^4 + 0.04619\,y^5 \quad (4.28)$$

Şelmo formasyonunda tork/itme oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.28'de grafik ise Şekil 4.112'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %95.88 oranında korelasyon elde edilmiştir.

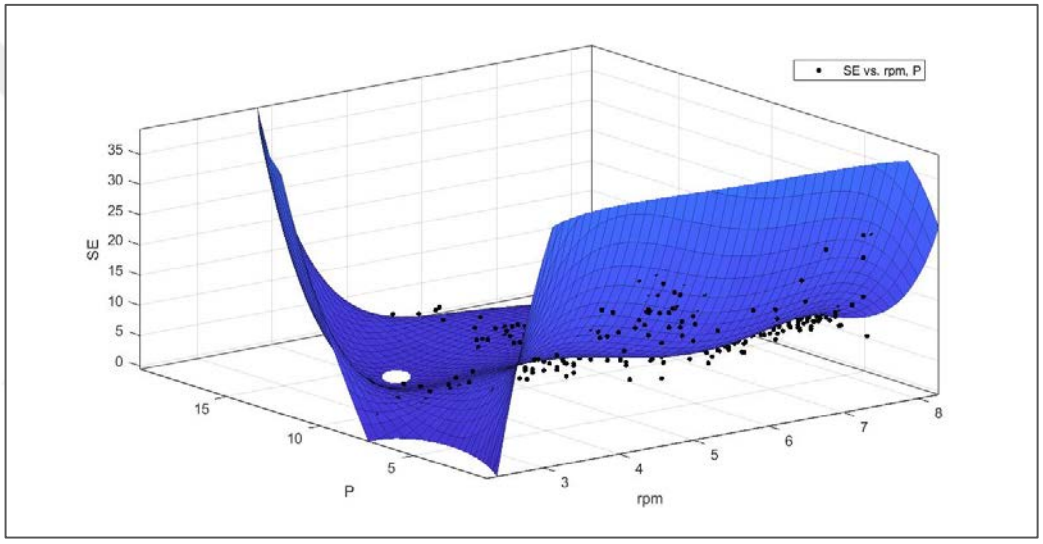


Şekil 4.112. Şelmo formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: rpm, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 3.79 - 0.4933\,x - 0.8038\,y + 1.518\,x^2 - 1.268\,xy + 0.8016\,y^2 + 0.4487\,x^3 - 1.818\,x^2y + 0.4917\,xy^2 - 0.7369\,y^3 - 0.3425\,x^4 + 0.7564\,x^3y - 0.2401\,x^2y^2 + 0.2545\,xy^3 + 0.4416\,y^4 - 0.09962\,x^5 + 0.4187\,x^4y - 0.1416\,x^3y^2 + 0.2373\,x^2y^3 - 0.1161\,xy^4 - 0.1018\,y^5 \quad (4.29)$$

Şelmo formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.29'da grafik ise Şekil 4.113'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %89.35 oranında korelasyon elde edilmiştir.

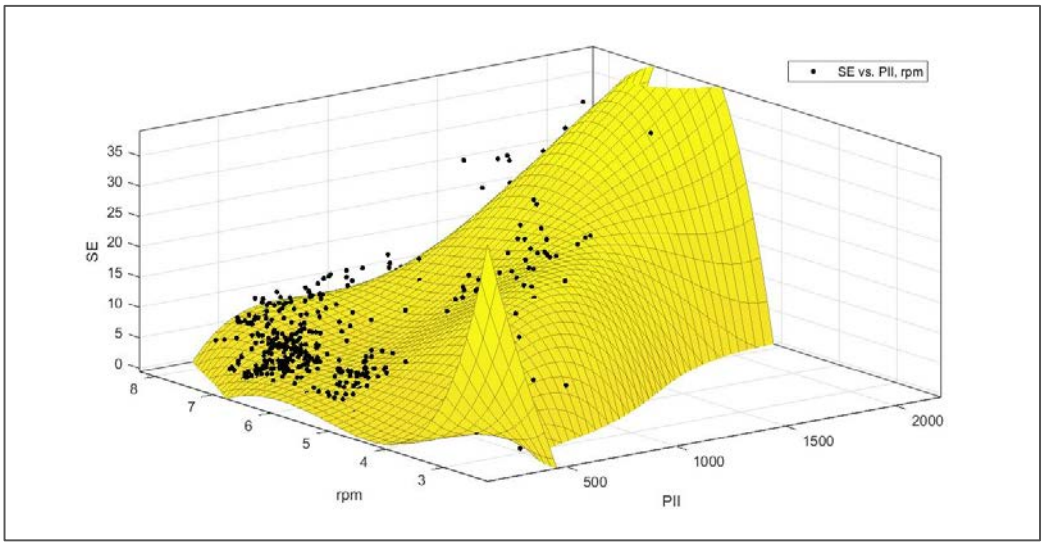


Şekil 4.113. Şelmo formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y: rpm

$$f(x,y) = 4.439 + 1.781\,x - 0.3741\,y + 1.233\,x^2 - 2.453\,xy + 2.817\,y^2 + 0.8389\,x^3 - 1.47\,x^2y + 2.856\,xy^2 - 0.07067\,y^3 - 0.3109\,x^4 + 1.376\,x^3y - 1.641\,x^2y^2 + 0.3891\,xy^3 - 0.6213\,y^4 + 0.02973\,x^5 - 0.1838\,x^4y - 0.02948\,x^3y^2 - 0.1885\,x^2y^3 - 0.3313\,xy^4 - 0.07984\,y^5 \quad (4.30)$$

Şelmo formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.30'da grafik ise Şekil 4.114'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %83.98 oranında korelasyon elde edilmiştir.

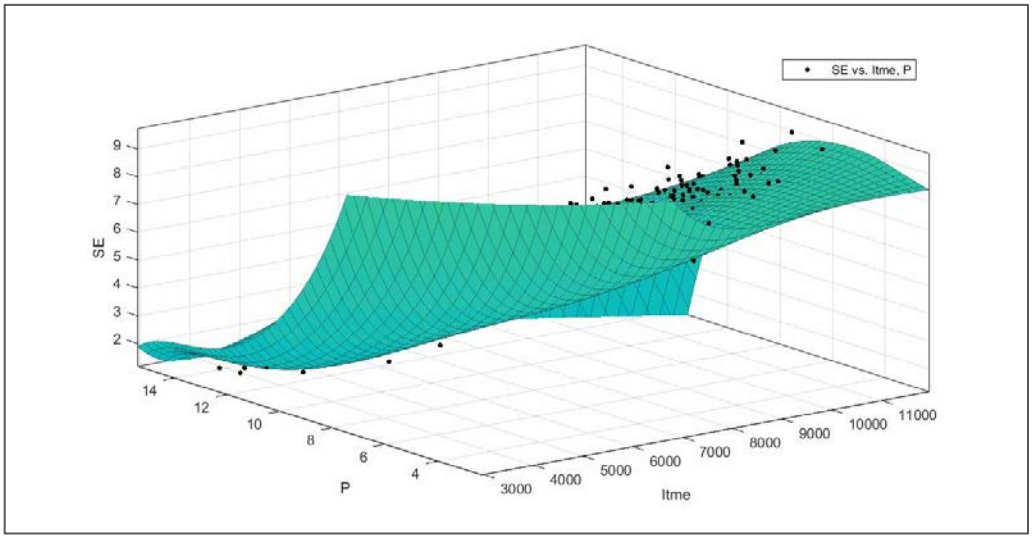


Şekil 4.114. Şelmo formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: İtme, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 6.019 + 0.9825\,x - 0.7412\,y - 0.1565\,x^2 + 0.1003\,xy + 0.1716\,y^2 + 0.1136\,x^3 + 0.09381\,x^2{*}y + 0.1099\,xy^2 + 0.127\,y^3 + 0.01713\,x^4 - 0.05085\,x^3y - 0.1178\,x^2y^2 - 0.08206\,xy^3 - 0.03122\,y^4 - 0.01943\,x^5 - 0.04633\,x^4y - 0.07437\,x^3y^2 - 0.06474\,x^2y^3 - 0.03993\,xy^4 - 0.01555\,y^5 \quad (4.31)$$

Silvan formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.31'de grafik ise Şekil 4.115'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %86.01 oranında korelasyon elde edilmiştir.

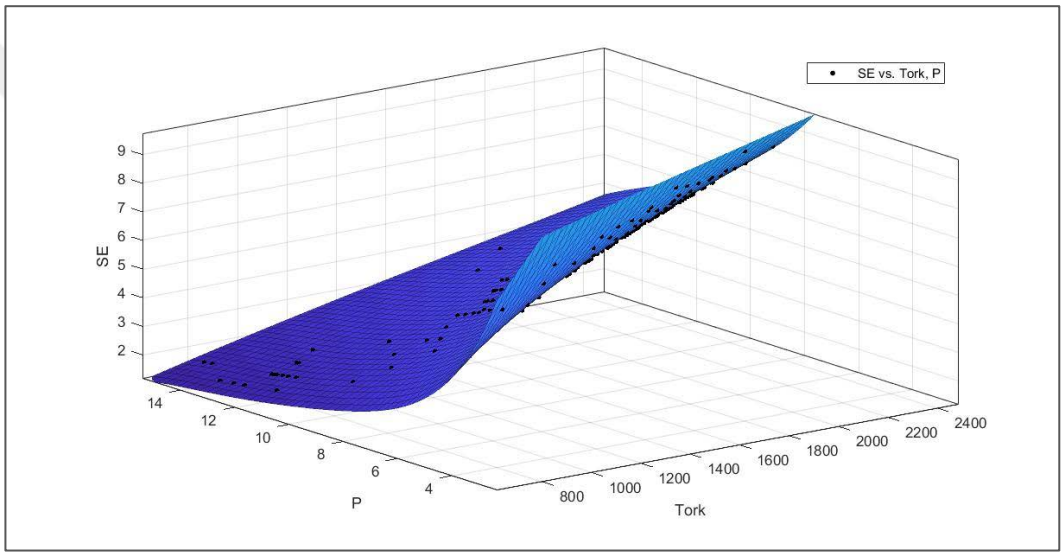


Şekil 4.115. Silvan formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: Tork, y: Penetrasyon

$f(x,y) = 5.77 + 1.278\ x - 1.258\ y + 0.0005962\ x^2 - 0.278\ xy + 0.271\ y^2 - 0.0008738\ x^3 + 0.0002124\ x^2y + 0.06532\ xy^2 - 0.06302\ y^3 - 0.0001327\ x^4 - 0.001542\ x^3y - 0.0003514\ x^2y^2 - 0.01352\ xy^3 + 0.01586\ *y\text{^}4 + 0.0002198\ x^5 + 0.0002578\ x^4y + 0.0006434\ x^3y^2 - 0.0002516\ x^2y^3 + 0.001046\ xy^4 - 0.002146\ y^5$ (4.32)

Silvan formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.32'de grafik ise Şekil 4.116'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %100.00 oranında korelasyon elde edilmiştir.

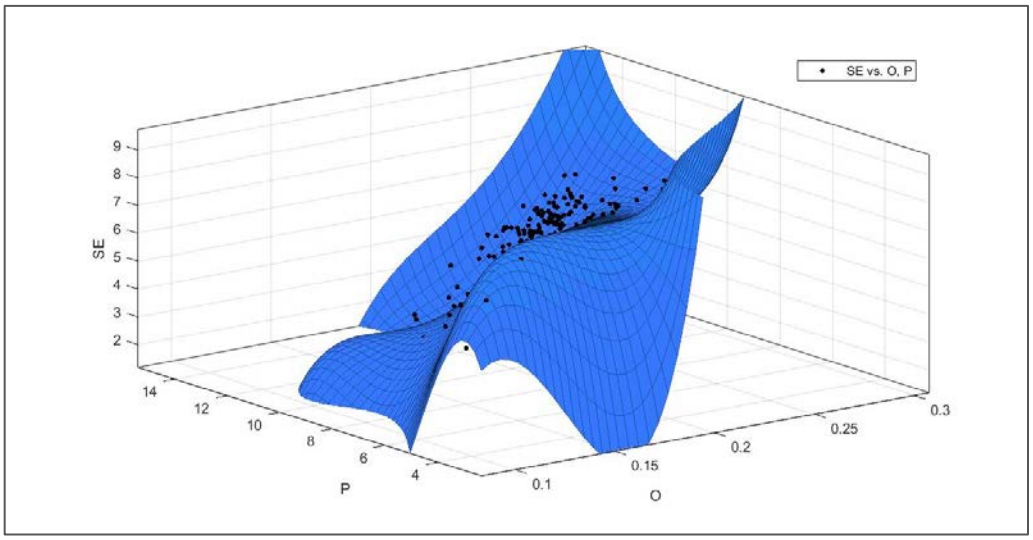


Şekil 4.116. Silvan formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: Tork/İtme, y:Penetrasyon

$f(x,y) = 6.222 + 0.9594\ x - 1.553\ y - 0.5914\ x^2 + 1.008\ xy + -0.393\ y^2 - 0.06974\ x^3 + 0.2819\ x^2y - 0.4014\ xy^2 + 0.03843\ y^3 + 0.04869\ x^4 - 0.2949\ x^3y + 0.5449\ x^2y^2 - 0.329\ xy^3 + 0.03387\ y^4 + 0.01656\ x^5 - 0.06505\ x^4y + 0.1613\ x^3y^2 - 0.2013\ x^2y^3 + 0.1136\ xy^4 - 0.002741\ y^5$ (4.33)

Silvan formasyonunda tork/itme oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.33'te grafik ise Şekil 4.117'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %69.76 oranında korelasyon elde edilmiştir.

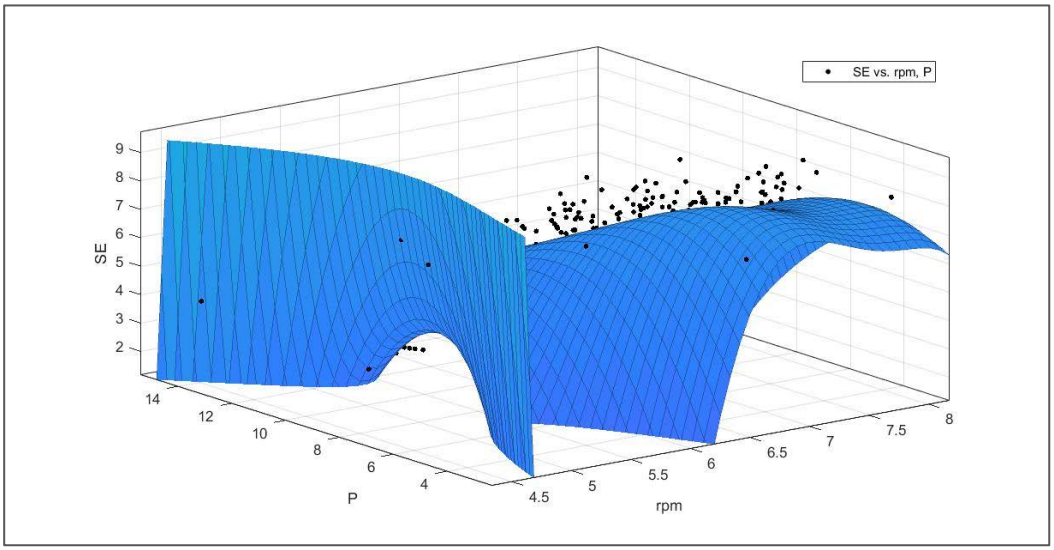


Şekil 4.117. Silvan formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: rpm, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 5.882 - 0.5792\,x - 1.236\,y + 0.7617\,x^2 + 0.2667\,xy + 0.1595\,y^2 + 0.4977\,x^3 + 0.3215\,x^2y + 0.04341\,xy^2 + 0.06836\,y^3 + -0.2801\,x^4 - 0.2024\,x^3y - 0.1716\,x^2y^2 - 0.04673\,xy^3 - 0.0277\,y^4 - 0.1058\,x^5 - 0.06788\,x^4y + 0.006323\,x^3y^2 - 0.01479\,x^2y^3 - 0.007459\,xy^4 - 0.004506\,y^5 \quad (4.34)$$

Silvan formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.34'te grafik ise Şekil 4.118'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %59.00 oranında korelasyon elde edilmiştir.

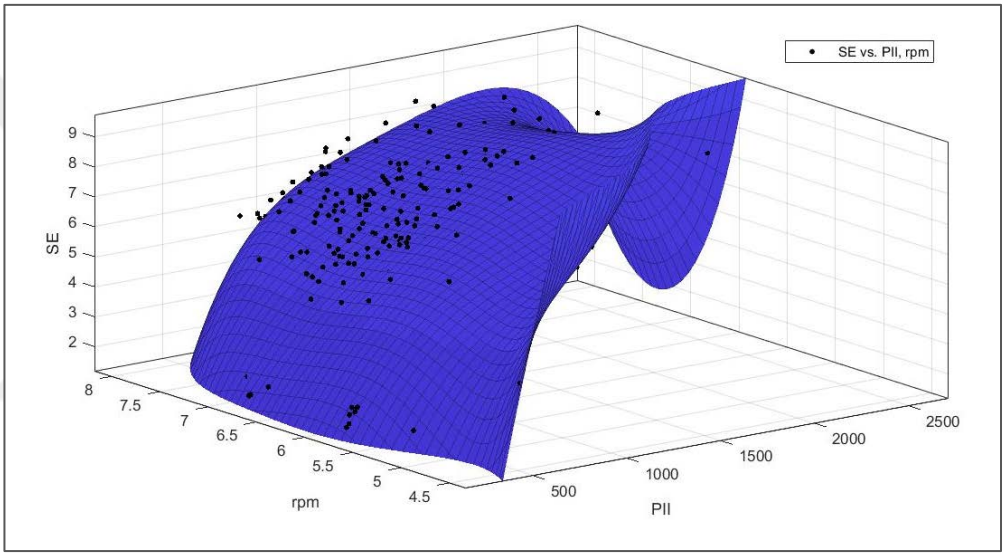


Şekil 4.118. Silvan formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y: rpm

$$f(x,y) = 6.199 + 1.489\,x - 0.06736\,y - 0.149\,x^2 - 0.3231\,xy + 0.3397\,y^2 + 0.02133\,x^3 + 0.01413\,x^2y - 0.2197\,xy^2 + 0.08286\,y^3 - 0.03539\,x^4 + 0.08321\,x^3y - 0.1367\,x^2y^2 + 0.1512\,xy^3 - 0.1078\,y^4 + 0.002755\,x^5 - 0.02346\,x^4y + 0.07112\,x^3y^2 - 0.06264\,x^2y^3 + 0.06177\,xy^4 - 0.02991\,y^5 \quad (4.35)$$

Silvan formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.35'te grafik ise Şekil 4.119'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %83.48 oranında korelasyon elde edilmiştir.

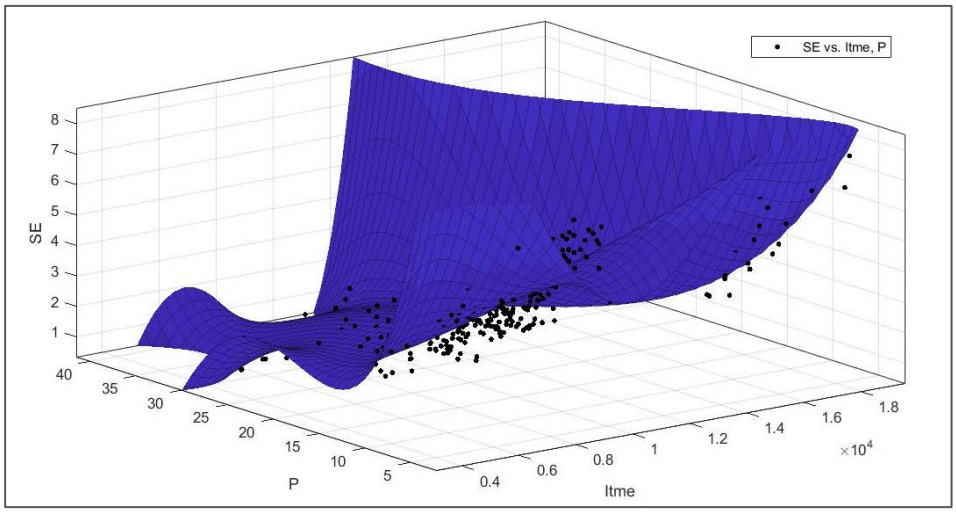


Şekil 4.119. Silvan formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisi.

x: İtme, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 3.906 + 1.121\,x - 1.047\,y - 0.02698\,x^2 - 0.212\,xy + 0.1735\,y^2 - 0.4239\,x^3 - 0.8263\,x^2y - 0.603\,xy^2 + 0.0756\,y^3 - 0.07164\,x^4 - 0.08653\,x^3y + 0.3644\,x^2y^2 + 0.3341\,xy^3 - 0.04622\,y^4 + 0.06204\,x^5 + 0.1838\,x^4y + 0.1379\,x^3y^2 - 0.04879\,x^2y^3 - 0.04766\,xy^4 + 0.005523\,y^5 \quad (4.36)$$

Midyat formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.36'da grafik ise Şekil 4.120'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %74.92 oranında korelasyon elde edilmiştir.

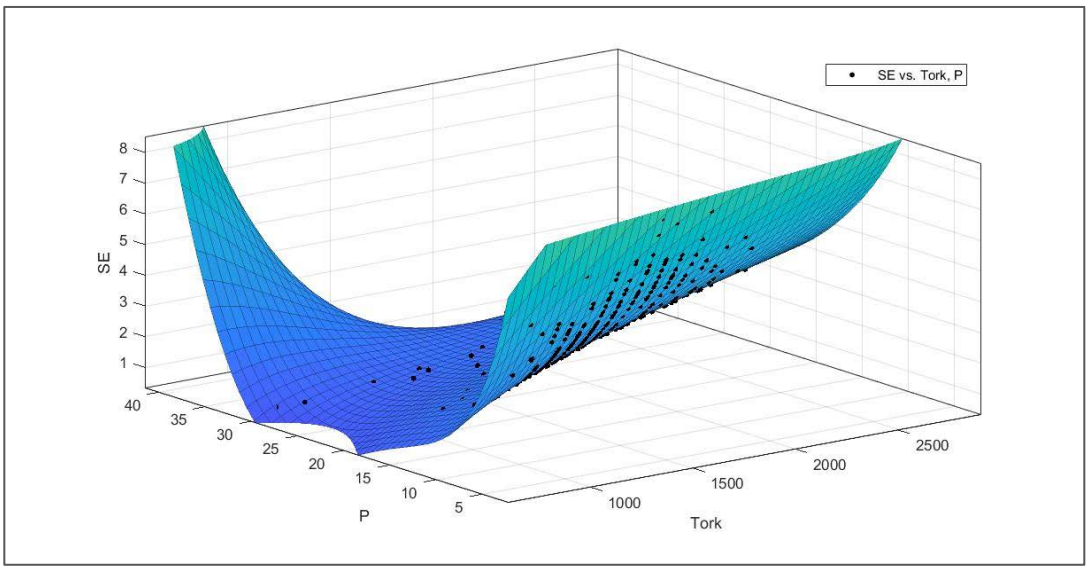


Şekil 4.120. Midyat formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: Tork, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 3.533 + 0.8423\,x - 1.591\,y + 0.01617\,x^2 - 0.4806\,xy + 0.8772\,y^2 + 0.004031\,x^3 - 0.0032\,x^2y + 0.2297\,xy^2 - 0.501\,y^3 - 0.00534\,x^4 + 0.01576\,x^3y - 0.03472\,x^2y^2 - 0.02325\,xy^3 + 0.1518\,y^4 + 0.00133\,x^5 - 0.002732\,x^4y - 0.002738\,x^3y^2 + 0.01326\,x^2y^3 - 0.007611\,xy^4 - 0.01571\,y^5 \quad (4.37)$$

Midyat formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.37'de grafik ise Şekil 4.121'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %99.95 oranında korelasyon elde edilmiştir.

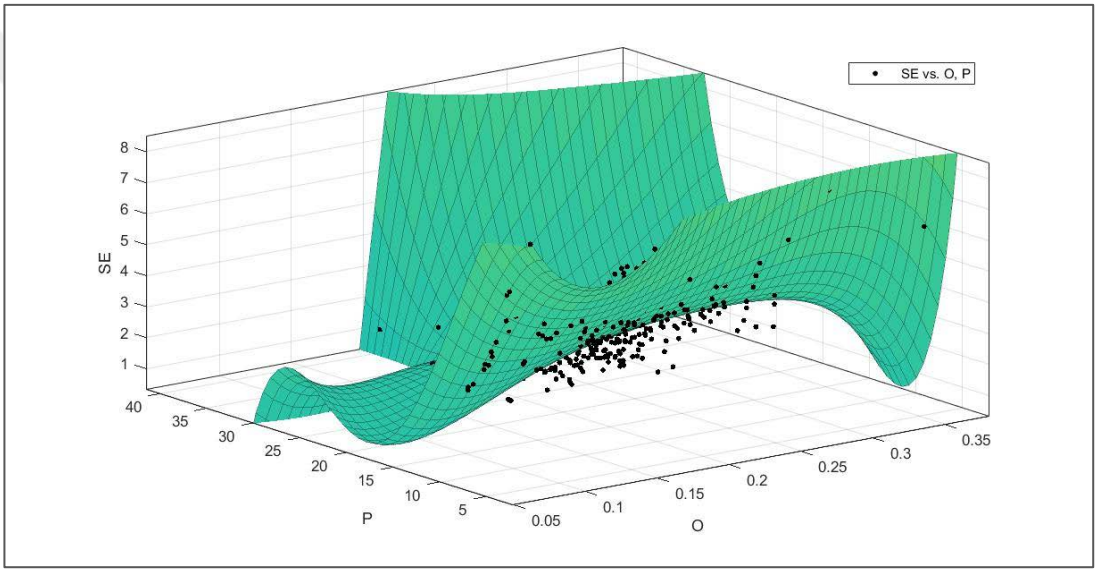


Şekil 4.121. Midyat formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: Tork/İtme, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 3.657 + 0.4887\,x - 1.158\,y - 0.2844\,x^2 + 0.3149\,xy + 0.5492\,y^2 + 0.04229\,x^3 - 0.2415\,x^2y + 0.1074\,xy^2 - 0.2647\,y^3 + 0.03333\,x^4 + 0.05462\,x^3y + 0.2185\,x^2y^2 - 0.424\,xy^3 + 0.05815\,y^4 - 0.01615\,x^5 + 0.009729\,x^4y - 0.01041\,x^3y^2 - 0.04645\,x^2y^3 + 0.1147\,xy^4 - 0.006235\,y^5 \quad (4.38)$$

Midyat formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.38'de grafik ise Şekil 4.122'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %71.32 oranında korelasyon elde edilmiştir.

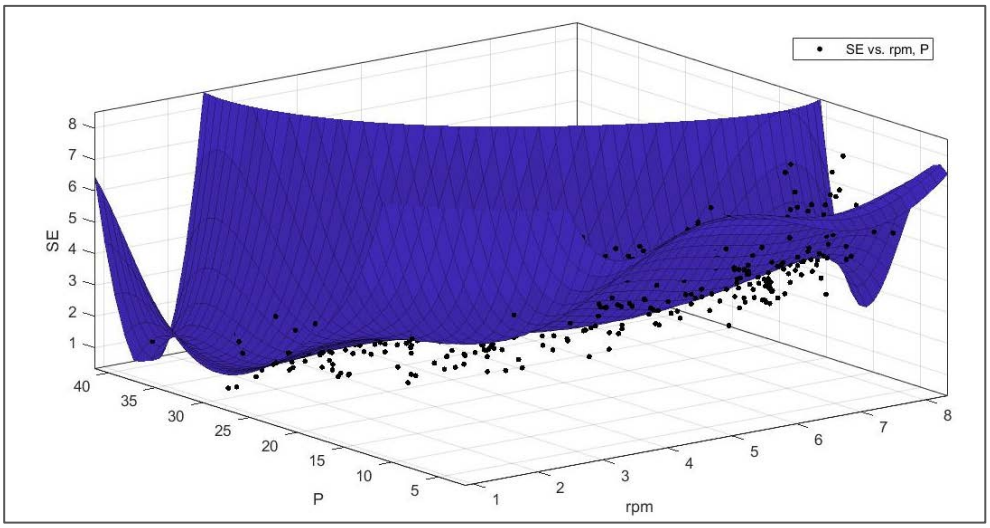


Şekil 4.122. Midyat formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: rpm, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 3.445 - 0.9191\,x - 2.147\,y - 0.07969\,x^2 - 0.166\,xy + 1.068\,y^2 + 1.779\,x^3 + 4.333\,x^2y + 3.512\,xy^2 + 0.8759\,y^3 + 0.3381\,x^4 + 1.171\,x^3y + 1.836\,x^2y^2 + 1.35\,xy^3 + 0.08618\,y^4 - 0.6081\,x^5 - 1.344\,x^4y - 0.6835\,x^3y^2 - 0.07219\,x^2y^3 - 0.169\,xy^4 - 0.02955\,y^5 \quad (4.39)$$

Midyat formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.39'da grafik ise Şekil 4.123'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %68.05 oranında korelasyon elde edilmiştir.

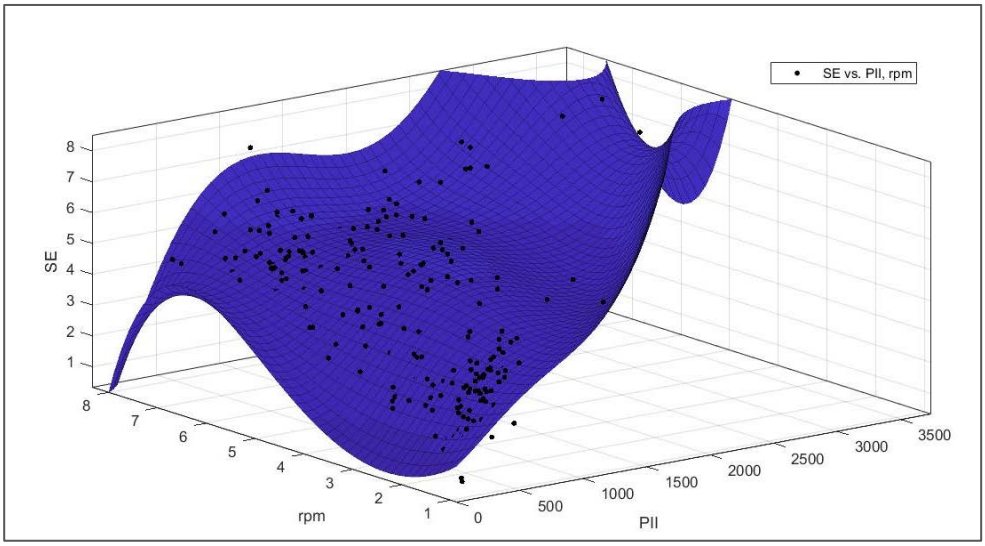


Şekil 4.123. Midyat formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y: rpm

$$f(x,y) = 4.523 + 1.671\,x - 0.0501\,y - 0.8282\,x^2 - 0.1046\,xy - 0.394\,y^2 - 0.2647\,x^3 + 0.8451\,x^2y - 1.071\,xy^2 + 0.3611\,y^3 + 0.173\,x^4 - 0.1965\,x^3y + 0.1582\,x^2y^2 + 0.02212\,xy^3 + 0.1847\,y^4 - 0.01716\,x^5 - 0.03124\,x^4y + 0.2209\,x^3y^2 - 0.4426\,x^2y^3 + 0.3502\,xy^4 - 0.08293\,y^5 \quad (4.40)$$

Midyat formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.40'ta grafik ise Şekil 4.124'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %72.85 oranında korelasyon elde edilmiştir.

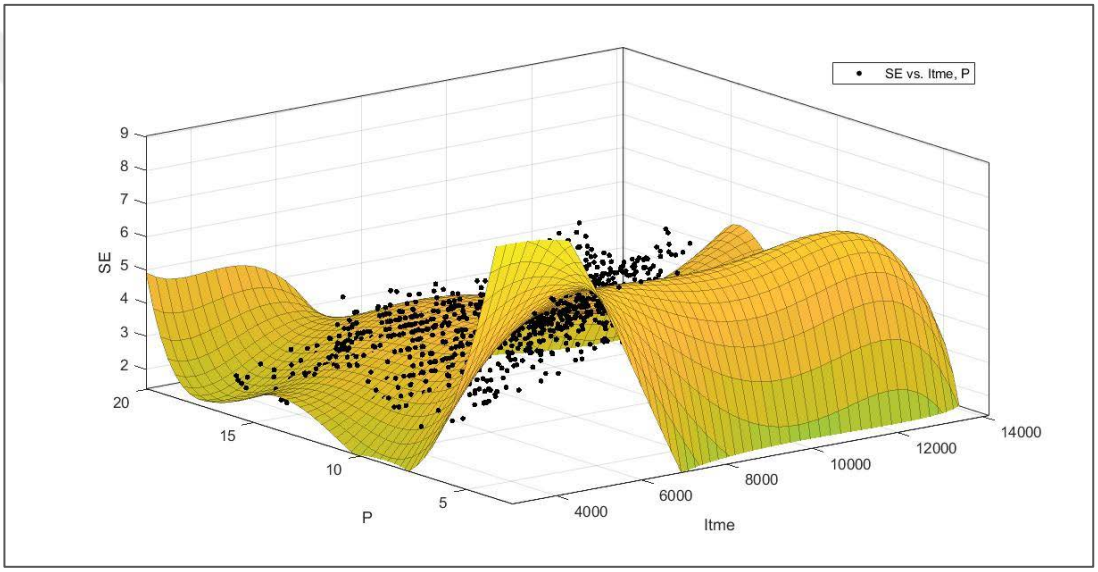


Şekil 4.124. Midyat formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisi.

x: İtme, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 4.437 + 0.5295\,x - 0.8153\,y - 0.3709\,x^2 - 0.1758\,xy + 0.6504\,y^2 + 0.02918\,x^3 + 0.06194\,x^2y + 0.014\,xy^2 - 0.09518\,y^3 + 0.01582\,x^4 - 0.0482\,x^3y + 0.02362\,x^2y^2 + 0.1722\,xy^3 - 0.1265\,y^4 - 0.002462\,x^5 + 0.007875\,x^4y + 0.002667\,x^3y^2 - 0.02664\,x^2y^3 - 0.05973\,xy^4 + 0.03323\,y^5 \quad (4.41)$$

Gercüş formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.41'de grafik ise Şekil 4.125'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %77.49 oranında korelasyon elde edilmiştir.

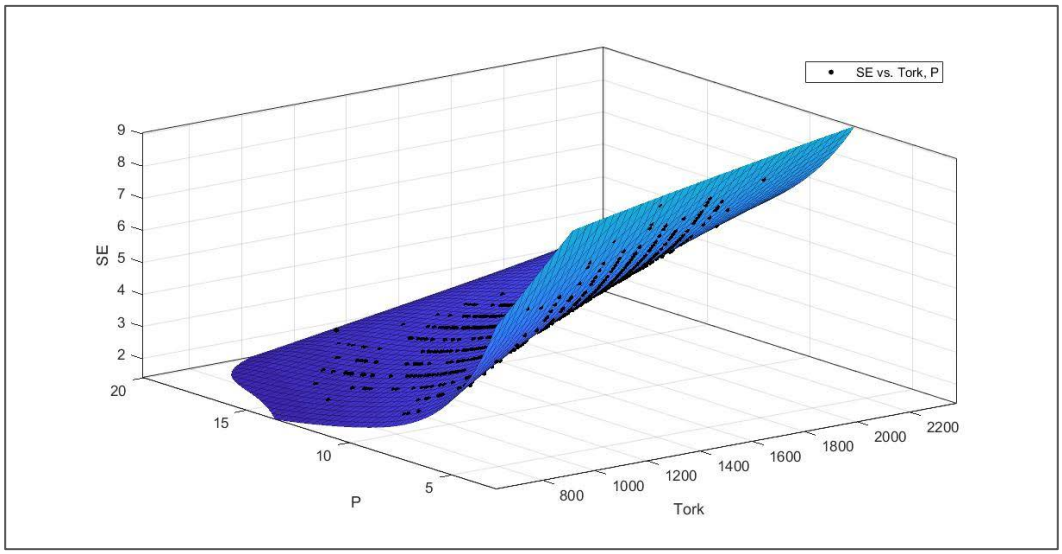


Şekil 4.125. Gercüş formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: Tork, y:Penetrasyon

$$f(x,y) = 4.305 + 0.808\,x - 1.221\,y - 0.0009447\,x^2 - 0.2321\,xy + 0.3415\,y^2 + 0.0001959\,x^3 - 0.0004845\,x^2y + 0.07478\,xy^2 - 0.1144\,y^3 + 0.0003562\,x^4 - 0.0005324\,x^3y - 0.001495\,x^2y^2 - 0.01944\,xy^3 + 0.03888\,y^4 - 0.0001541\,x^5 + 0.0002746\,x^4y + 0.0001747\,x^3y^2 + 0.0004717\,x^2y^3 + 0.001831\,xy^4 - 0.006077\,y^5 \quad (4.42)$$

Gercüş formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.42'de grafik ise Şekil 4.126'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %100.00 oranında korelasyon elde edilmiştir.

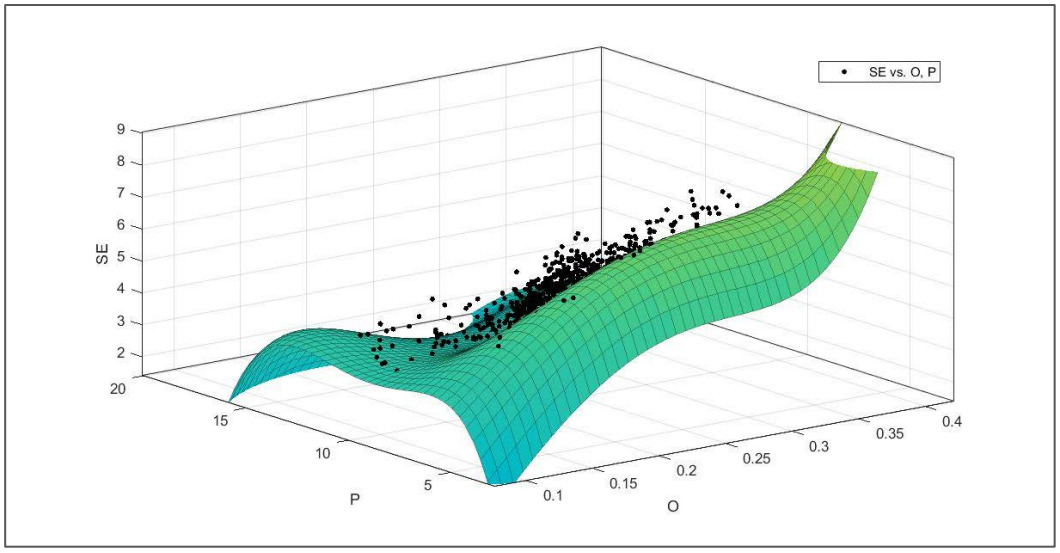


Şekil 4.126. Gercüş formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: Tork/İtme, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 4.224 + 0.6759\,x - 1.664\,y + 0.04935\,x^2 - 0.09294\,xy + 0.5864\,y^2 - 0.07206\,x^3 + 0.2821\,x^2{*}y - 0.1653\,xy^2 + 0.03264\,y^3 + 0.002719\,x^4 - 0.04205\,x^3y + 0.005993\,x^2y^2 + 0.0147\,xy^3 - 0.1115\,y^4 + 0.005276\,x^5 - 0.0239\,x^4y + 0.02949\,x^3y - 0.02669\,x^2y^3 + 0.01437\,xy^4 + 0.01806\,y^5 \quad (4.43)$$

Gercüş formasyonunda tork/itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.43'te grafik ise Şekil 4.127'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %77.74 oranında korelasyon elde edilmiştir.

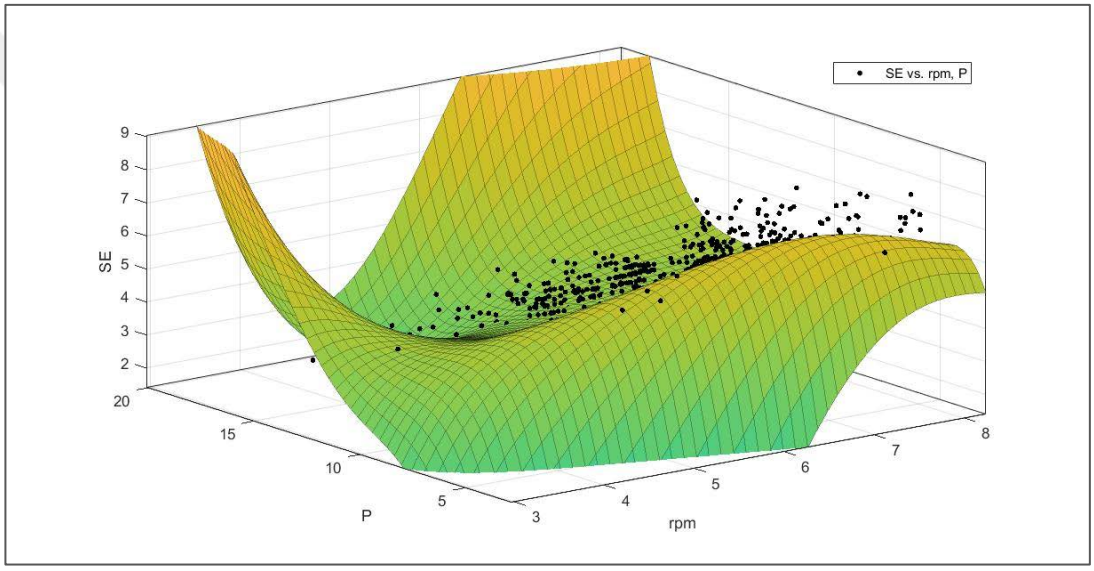


Şekil 4.127. Gercüş formasyonunda tork/itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: rpm, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 4.246 - 0.2122\,x - 1.096\,y - 0.1133\,x^2 + 0.2673\,xy + 0.761\,y^2 + 0.01325\,x^3 + 0.057\,x^2y + 0.09612\,xy^2 - 0.09486\,y^3 + 0.01524\,x^4 - 0.006633\,x^3y - 0.04503\,x^2y^2 - 0.08377\,xy^3 - 0.1389\,y^4 + 0.002133\,x^5 + 0.0008936\,x^4y - 0.01006\,x^3y^2 + 0.006392\,x^2y^3 + 0.0332\,xy^4 + 0.04766\,y^5 \quad (4.44)$$

Gercüş formasyonunda penetrasyon ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.44'te grafik ise Şekil 4.128'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %69.46 oranında korelasyon elde edilmiştir.

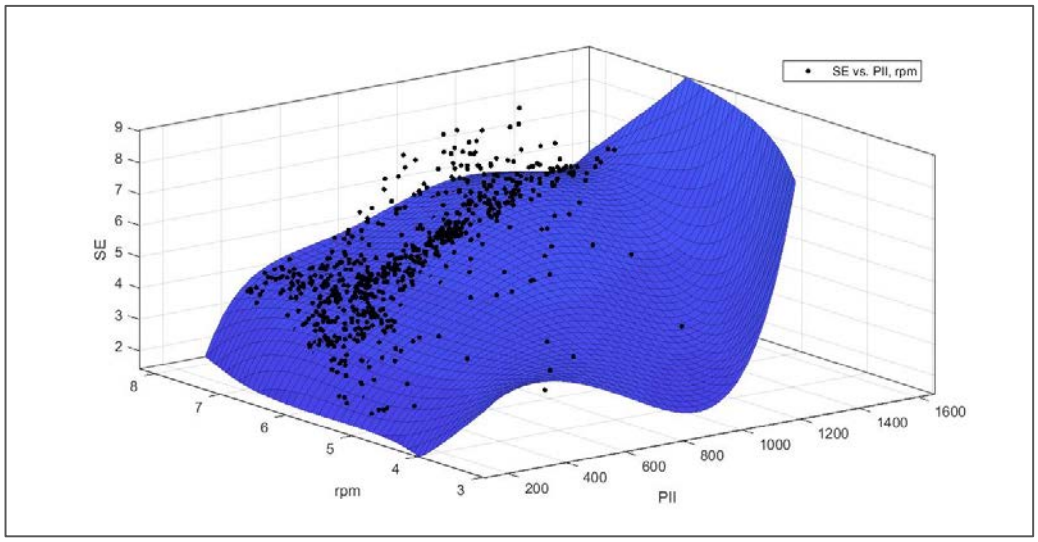


Şekil 4.128. Gercüş formasyonunda penetrasyon ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisi.

x: İtme/Penetrasyon, y: rpm

$$f(x,y) = 4.748 + 1.336\,x - 0.2669\,y + 0.2364\,x^2 - 0.2402\,xy - 0.07913\,y^2 - 0.1468\,x^3 + 0.2605\,x^2y - 0.1374\,xy^2 + 0.02497\,y^3 - 0.1651\,x^4 + 0.1522\,x^3y - 0.09551\,x^2y^2 + 0.02904\,xy^3 + 0.006488\,y^4 + 0.05146\,x^5 - 0.06657\,x^4y + 0.04934\,x^3y^2 - 0.02512\,x^2y^3 + 0.005516\,xy^4 + 0.0005202\,y^5 \quad (4.45)$$

Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.45'te grafik ise Şekil 4.129'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %71.35 oranında korelasyon elde edilmiştir.

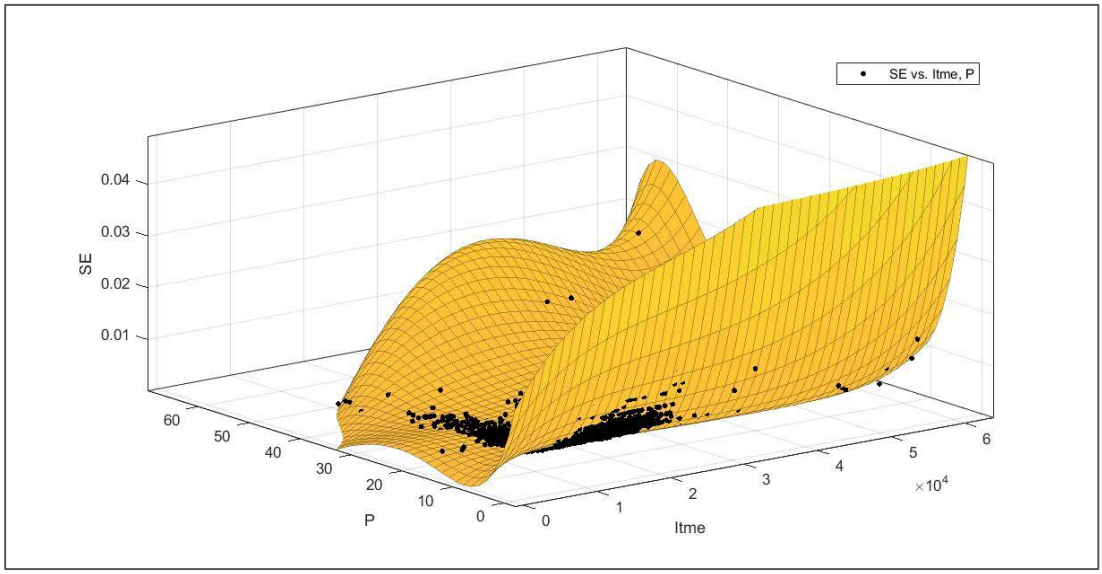


Şekil 4.129. Gercüş formasyonunda itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksi ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisi.

x:İtme, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 0.004374 - 0.0002445\,x - 0.001613\,y - 3.766e\text{-}05\,x^2 + 2.822e\text{-}05\,xy + 0.002569\,y^2 + 4.844e\text{-}05\,x^3 + 0.0001743\,x^2y + 0.0003528\,xy^2 - 0.00125\,y^3 - 1.22e\text{-}05\,x^4 - 4.005e\text{-}05\,x^3y - 1.304e\text{-}05\,x^2y^2 - 0.0001238\,xy^3 + 0.0002432\,y^4 + 9.724e\text{-}07\,x^5 + 8.036e\text{-}07\,x^4y + 6.384e\text{-}06\,x^3y^2 - 7.032e\text{-}06\,x^2y^3 + 1.401e\text{-}05\,xy^4 - 1.566e\text{-}05\,y^5 \quad (4.46)$$

Kızlaç formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.46'da grafik ise Şekil 4.130'da verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %80.61 oranında korelasyon elde edilmiştir.

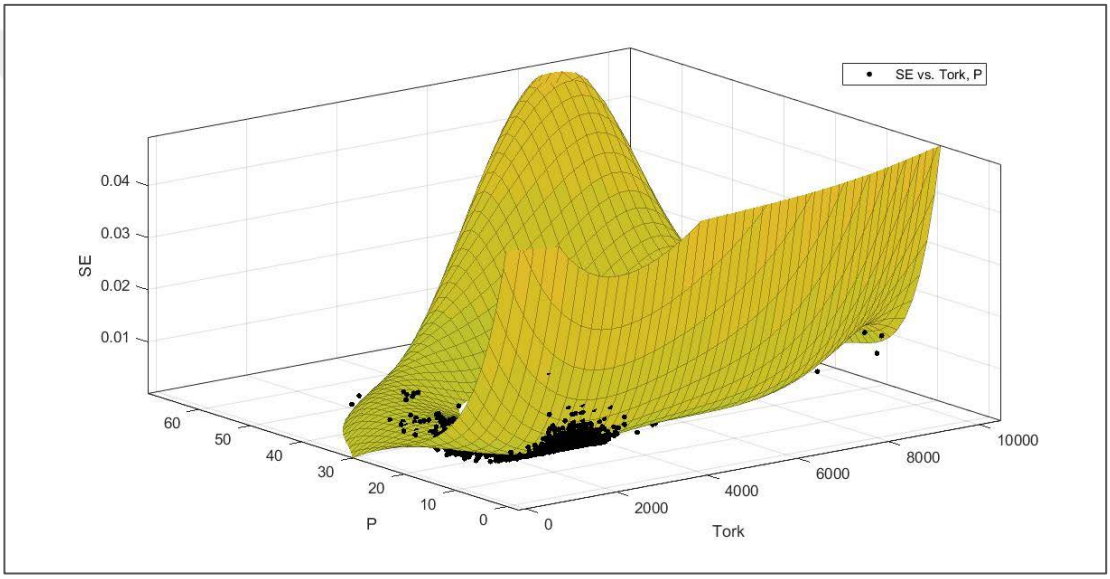


Şekil 4.130. Kızlaç formasyonunda itme kuvveti ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: Tork, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 0.004341 + 0.000116\,x - 0.001379\,y + 0.0004186\,x^2 + 0.0006696\,xy + 0.002616\,y^2 - 0.0001327\,x^3 - 0.0003004\,x^2y - 0.0001833\,xy^2 - 0.001362\,y^3 + 1.351e\text{-}05\,x^4 + 4.878e\text{-}05\,x^3y + 6.929e\text{-}05\,x^2y^2 - 7.916e\text{-}05\,xy^3 + 0.0002706\,y^4 - 3.549e\text{-}07\,x^5 - 3.604e\text{-}06\,x^4{*}y + 3.726e\text{-}06\,x^3y^2 - 1.359e\text{-}05\,x^2y^3 + 1.649e\text{-}05\,xy^4 - 1.83e\text{-}05\,y^5 \quad (4.47)$$

Kızlaç formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.47'de grafik ise Şekil 4.131'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %85.15 oranında korelasyon elde edilmiştir.

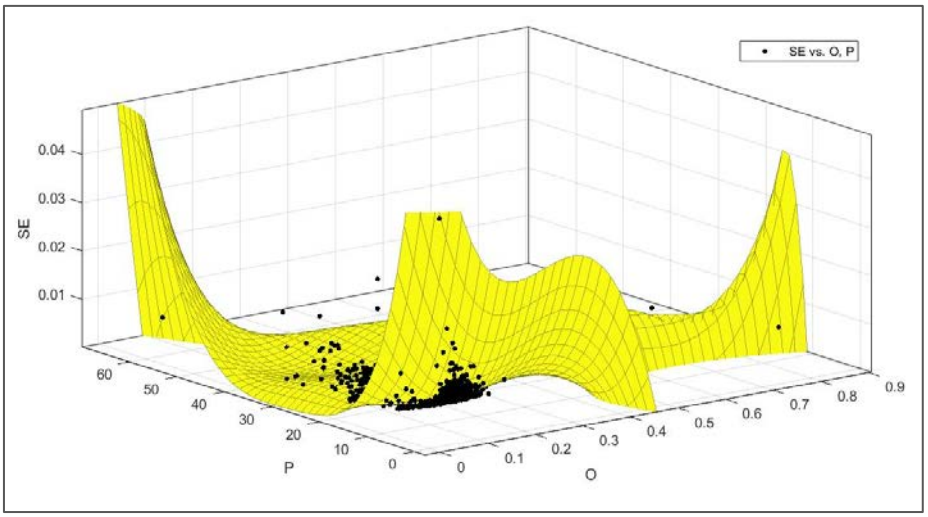


Şekil 4.131. Kızlaç formasyonunda tork ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: Tork/İtme, y:Penetrasyon

$$f(x,y) = 0.004349 + 0.0001398\,x - 0.001596\,y + 0.0002736\,x^2 - 3.947e\text{-}05\,xy + 0.002413\,y^2 - 3.929e\text{-}05\,x^3 - 0.0003508\,x^2y - 0.0003004\,xy^2 - 0.0009973\,y^3 - 9.969e\text{-}07\,x^4 + 6.51e\text{-}05\,x^3y + 0.000115\,x^2y^2 + 0.0001198\,xy^3 + 0.0001487\,y^4 + 9.964e\text{-}08\,x^5 - 1.668e\text{-}06\,x^4y - 1.089e\text{-}05\,x^3y^2 - 8.501e\text{-}06\,x^2y^3 - 1.11e\text{-}05\,xy^4 - 7.229e\text{-}06\,y^5 \quad (4.48)$$

Kızlaç formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.48'de grafik ise Şekil 4.132'de verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %80.58 oranında korelasyon elde edilmiştir.

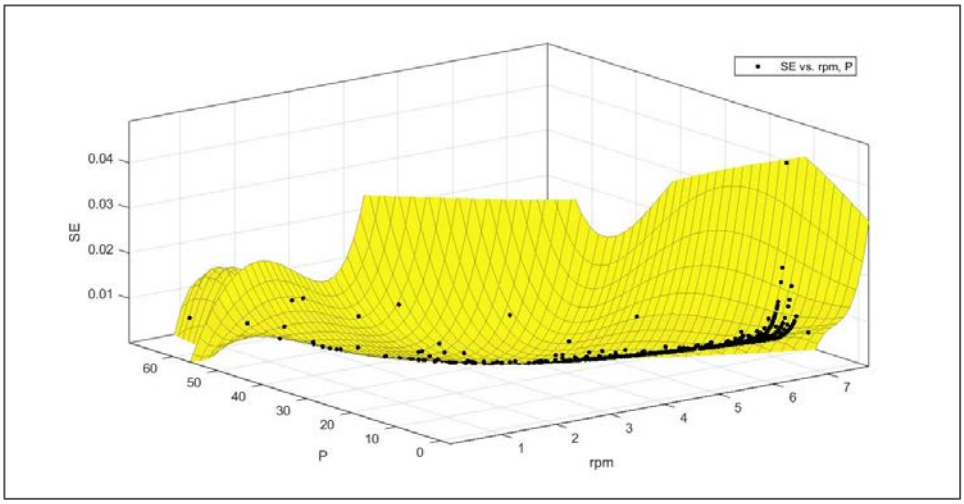


Şekil 4.132. Kızlaç formasyonunda tork/itme kuvveti oranı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x: rpm, y: Penetrasyon

$$f(x,y) = 0.004503 - 0.0007148\,x - 0.002519\,y + 0.001545\,x^2 + 0.003553\,xy + 0.003963\,y^2 - 0.0004372\,x^3 - 0.002339\,x^2y - 0.004016\,xy^2 - 0.002691\,y^3 - 0.0008422\,x^4 - 0.003187\,x^3y - 0.004448\,x^2y^2 - 0.002128\,xy^3 - 8.37e\text{-}05\,y^4 - 0.0002026\,x^5 - 0.0007318\,x^4y - 0.001029\,x^3y^2 - 0.0005358\,x^2y^3 - 8.058e\text{-}05\,xy^4 - 7.805e\text{-}06\,y^5 \quad (4.49)$$

Kızlaç formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.49'da grafik ise Şekil 4.133'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %95.49 oranında korelasyon elde edilmiştir.

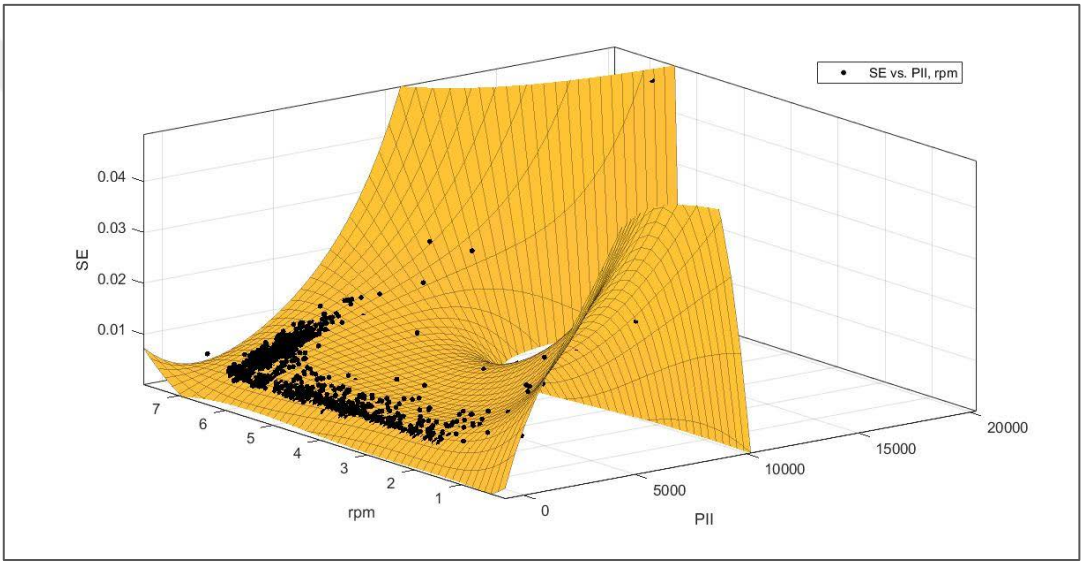


Şekil 4.133. Kızlaç formasyonunda kafa dönüş hızı ve penetrasyonun spesifik enerji ile ilişkisi.

x:İtme/Penetrasyon, y:rpm

$$f(x,y) = 0.006041 + 0.001628\,x + 0.0001627\,y - 0.0005307\,x^2 + 0.001122\,xy - 0.0006558\,y^2 + 0.0001537\,x^3 + 0.0002344\,x^2y - 0.0004821\,xy^2 - 0.0003946\,y^3 - 2.003e\text{-}05\,x^4 - 0.0001334\,x^3y + 0.0003701\,x^2y^2 - 0.0003656\,xy^3 - 0.00011\,y^4 + 4.28e\text{-}07\,x^5 + 1.944e\text{-}05\,x^4y - 2.004e\text{-}05\,x^3y^2 + 6.228e\text{-}05\,x^2y^3 - 2.798e\text{-}05\,xy^4 - 2.512e\text{-}05\,y^5 \quad (4.50)$$

Kızlaç formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisini gösteren matematiksel fonksiyon Eşitlik 4.50'de grafik ise Şekil 4.134'te verilmiştir. Ölçülen değerlerle elde edilen eşitlik arasında %84.79 oranında korelasyon elde edilmiştir.



Şekil 4.134. Kızlaç formasyonunda itmeye bağlı penetrasyon ve kafa dönüş hızının spesifik enerji ile ilişkisi.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Silvan tünelinde; 1293 m uzunluğunda geçilen Şelmo formasyonu; kiltaşı silttaşı ardalanmalı birimi içinde yer alan çoğunlukla kalsit çimentolu konglomera seviyeleri, iyi pekişmiş kilttaşı silttaşı ardalanması ve çimentolanmamış ince kumlu siltli birimlerden oluşmaktadır.

Şelmo formasyonunda ortalama itme kuvveti 4489 kN, ortalama tork 1504.03 kNm, ortalama penetrasyon 8.96 mm, ortalama itme kuvvetine bağlı penetrasyon 595.44 kN/mm, torka bağlı penetrasyon indeksi ortalama 217.08 kNm.devir/mm (tork/mm), ortalama ilerleme miktarı 57.94 mm/dk olmuştur.

Şelmo formasyonunda kazının zor olduğu konglomeralı bölgelerde itme kuvveti, tork ve tork/itme kuvveti oranı yüksek, penetrasyon ve dolayısıyla ilerleme hızı ise düşük gerçekleşmiştir. Kiltaşı silttaşı ardalanmalı bölgelerde yoğun kil varlığından dolayı kesici kafanın bloke olması nedeniyle tork değerleri ortalamanın oldukça üzerinde gerçekleştiği gözlenmiştir.

447 m uzunluğunda geçilen Silvan formasyonu; resifal masif kireçtaşı ve killi kireçtaşı marn ardalanmasından oluşmaktadır.

Silvan formasyonunda ortalama itme kuvveti 8476.35 kN, ortalama tork 1649.24 kNm, ortalama penetrasyon 8.52 mm/devir, ortalama itme/penetrasyon 1046.66 kN.devir/mm, ortalama tork/penetrasyon 201.21 kNm.devir/mm, ortalama kafa dönüş hızı 7.02 devir/dakika, ortalama ilerleme hızı 59.41 mm/dakika olarak hesaplanmıştır.

Şelmo-Silvan formasyonu geçiş bölgesinde itme kuvvetinde ve torkta azalma, penetrasyonda ise artış gözlenmiştir. Yüksek dayanımlı masif kireçtaşı seviyeleri geçilirken penetrasyon ve ilerleme hızı düşük, kolay kazılabilir diğer kesimlerde ise penetrasyon ve ilerleme hızı yüksek elde edilmiştir. Penetrasyon indeksleri için ise tersi sonuçlar elde edilmiştir.

611 m uzunluğunda geçilen Midyat formasyonu kazılabilirlikleri farklı zorlukta olan üç farklı kireçtaşı serisinden oluşmaktadır.

Midyat formasyonunda ortalama itme kuvveti 8468.47 kN, ortalama tork 1466.75 kNm, ortalama penetrasyon 12.33 mm/devir, ortalama itme/penetrasyon 840.71

kN.devir/mm, ortalama tork/penetrasyon 134.38 kNm.devir/mm, ortalama kafa dönüş hızı 4.32 devir/dakika, ortalama ilerleme hızı 44.32 mm/dakika olarak hesaplanmıştır.

Midyat formasyonunda itme kuvveti masif kireçtaşlarının olduğu bölgelerde ortalamanın neredeyse iki katı seviyelerine ulaşmıştır. Karstik boşluk bulunan bölgelerde tork değerlerinde azalma gözlenmektedir ancak bu bölgelerde tünele yer yer suyla beraber gelen sedimanın kafayı sararak kazıyı zorlaştırması ile tork değerlerinde artış olmasına sebep olmuştur.

Tamamen karasal birimlerinden oluşan ve 2187 m uzunluğundaki Gercüş formasyonu; kiltaşı, çamurtaşı, çakıltaşı ve jipsli seviyeler içermektedir.

Gercüş formasyonunda ortalama itme kuvveti 6157.12 kN, ortalama tork 1447.33 kNm, ortalama penetrasyon 10.03 mm/devir, ortalama itme/penetrasyon 679.78 kN.devir/mm, ortalama tork/penetrasyon 154.00 kNm.devir/mm, ortalama kafa dönüş hızı 6.63 devir/dakika, ortalama ilerleme hızı 65.76 mm/dakika olarak hesaplanmıştır.

Sağlam çimentolu kazılabilirliği zor birimlerden geçilirken itme kuvveti ve penetrasyon indeksi değerlerinde artış, penetrasyon ve ilerleme hızı değerlerinde ise düşüş gözlenmiştir.

Silvan tünelinde geçilen formasyonların penetrasyon ile itme kuvveti, penetrasyon ile tork, tork ile rpm, penetrasyon ile spesifik enerji parametreleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Geçilen formasyonlarda; penetrasyon ile itme kuvveti, tork ile rpm ve penetrasyon ile spesifik enerji parametreleri arasında ters, tork ile penetrasyon parametreleri arasında ise doğru orantılı bir ilişki gözlenmiştir.

Silvan tünelinde geçilen formasyonlarda TBM kullanım oranları incelenmiş ve en yüksek oranların durma zamanında olduğu görülmüştür. En uzun durma süresi Midyat formasyonun karstik boşluk içeren kısımlarında, en kısa durma süresi ise Silvan formasyonunda gerçekleşmiş; tünel boyunca durma oranı %40.53-66.51 arasında değişmiştir. Segment döşeme oranları %24.35-35.51; ilerleme oranları ise %5.97-23.96 arasında değişmiştir.

Formasyonlarda disk tüketimi adet/m^3 cinsinden değerlendirilmiştir. En fazla keski tüketimi; konglomera ve kil birimleri içeren Şelmo formasyonunda gerçekleşmiştir. İkinci sırayı geçilen formasyonlar içinde aşındırıcılığı en yüksek olan

Silvan formasyonu alırken, farklı birimlerden oluşan Gercüş formasyonu ve karstik boşluklar içeren Midyat formasyonu keski tüketimi açısından birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

Geçilen formasyonlar için; Gehring, Graham, Farmer ve Glossop ve CSM metodları ile penetrasyon hesabı yapılmış ve gerçekleşen penetrasyon değerleri ile kıyaslanmıştır. Kazıda gerçekleşen penetrasyon değerleri ile hesaplanan penetrasyon değerleri arasında çoğunlukla birbirine yakın çıkmış, gerçeğe en yakın sonucu ise CSM metodu vermiştir.

Silvan tünelinde geçilen iki karstik boşluktan toplam 2200 lt/dk lık bir su geliri yaşanmış ve bu durum günlük ilerleme hızı değerinde %54.67; TBM'den yararlanma oranında ise %55.88'lik düşüşe sebep olmuştur.

Tünel güzergahının Taşpınar petrol ve doğalgaz havzasından geçmesi sebebiyle tünel açımı sırasında metan parlama olayı yaşanmıştır. Olay sonrası yapılan ölçümlerde izin verilebilir sınır değerinin çok üzerinde olan %28 oranında metan gazı geliri tespit edilmiş ve tünel açma faaliyetleri durdurulmuş olup yeni tünel güzergahı belirlenmiştir. Silvan tüneli açımında yaşanan yüksek oranda su ve gaz problemleri sağlıklı bir jeoteknik çalışma yapılması ile birlikte tünel jeolojisine göre makine seçiminin önemini ortaya koymaktadır.

Nurdağı tüneli; meta kumtaşı, meta çamurtaşları, kuvarsit ve meta-kumtaşı düzeyleri içeren Kızlaç formasyonunda açılmaktadır. Formasyonda meta kuvarsit ve muskovit kuvarsit birimleri geçilirken itme kuvveti, tork, tork/itme kuvveti ve penetrasyon indeksi değerleri diğer kesimlere oranla yüksek, penetrasyon ve ilerleme hızı değerleri ise bu kesimlerde düşük gerçekleşmiştir.

Nurdağı tünelinde geçilen formasyonların penetrasyon ile itme kuvveti, penetrasyon ile tork, tork ile rpm, penetrasyon ile spesifik enerji parametreleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Geçilen formasyonlarda; penetrasyon ile itme kuvveti, tork ile rpm ve penetrasyon ile spesifik enerji parametreleri arasında ters, tork ile penetrasyon parametreleri arasında ise doğru orantılı bir ilişki gözlenmiştir.

Nurdağı tünelinde disk tüketimi adet/m^3 cinsinden değerlendirilmiştir. Kızlaç formasyonunda en yüksek keski tüketimi şist sleyt grafit içerikli birimde gözlenirken en

düşük keski tüketimi ise meta kumtaşı meta çamurtaşı biriminde gerçekleşmiştir. Özellikle kuvars içeriği yüksek olan birimlerde keski tüketiminde artış gözlenmiştir.

Meta kumtaşı- meta çamurtaşı, meta kumtaşı – meta kuvarsit ve meta kuvarsit birimlerinin keski tüketiminin Cerchar Aşındırıcılık İndeksi'nin artması ile artış gösterdiği ancak, tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımları ile ise tek başına anlamlı bir ilişkinin olmadığı gözlenmiştir.

Silvan ve Nurdağı tünellerinde elde edilen kazı paremetreleri değerleri ile hesaplanan penetrasyon ve spesifik enerji değerleri arasında MATLAB programının Curve Fitting metodu ile matematiksel fonksiyonlar yazılımsal olarak elde edilmiştir.

Kazı yapılmış her beş formasyonda (Şelmo, Silvan, Midyat, Gercüş ve Kızlaç) penetrasyon ile en yüksek korelasyonu tork ve spesifik enerji sağlarken; en düşük korelasyonları ise itme kuvveti ve tork ile itme kuvveti ve güç vermiştir. Bununla birlikte kesici kafa dönüş hızı ve spesifik enerji ile penetrasyon arasında tüm formasyonlarda güçlü bir ilişki gözlenmiştir.

Spesifik enerji analizlerinde ise en yüksek korelasyonu tork ve penetrasyon sağlamıştır. Bununla beraber itme kuvveti ve penetrasyon ile kesici kafa dönüş hızı ve itme kuvvetine bağlı penetrasyon indeksinin spesifik enerji arasında güçlü bir ilişki olduğu ortaya konmuştur.

Bu değerlendirmeler sonucunda yüksek korelasyon sağlayan matematiksel eşitliklerin, veri alınamayan fakat çalışma alanı ile benzer jeolojik özellik gösteren ve benzer makine ile kazı yapılan projelerde performans parametrelerinin tahmin edilebilmesi için kullanılabilirliği ortaya çıkmıştır.

4667 metre kazısı ve desteklenmesi tamamlanmış Silvan tünelinin yaşanan metan parlaması sebebiyle terkedilmek zorunda kalınması, gazın ortamdan uzaklaştırılması ve yeni bir güzergah belirlenmesi için yapılan çalışmalar da düşünüldüğünde ekonomik ve zamansal kaybın büyüklüğü ortadadır. Yaşanan bu problem jeoteknik etüdün yetersiz yapılması sebebiyle, kazı ortamına uygun makine seçiminin doğru yapılmamasının bir sonucudur.

6. KAYNAKLAR

Aksu, F. 2010. Zemin şartlandırmanın pasa basınçlı (EPB) TBM'in performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 153.

Alber, M. 1996. Prediction of penetration and utilization for hard rock TBMs. In Proc. ISRM Int. Symp. Eurock, 1996, Balkema, Rotterdam, 721–725.

Alber, M. ve Ruhl, S. 2005. Tunnel support by fully grouted rock bolts for fast TBM Advance. Underground Space Use: Analysis of the past and lessons for the future, World Tunnel Congress, 7-12 May 2005, Istanbul, 743–758.

Alvarez Grima, A., Bruines, P.A. ve Verhoeh. P.N.W. 2000. Modeling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods. ***Tunnelling and Underground Space Technology,*** 15(3):259–269.

Arıoğlu, E.ve Yılmaz A.O. 2006. Tünel/galerilerin sismik analizi, Maden Mühendisleri Odası Yayını No:111, Sayfa: 312. İstanbul.

Arıoğlu, S., E. 2010. Tünel açma makinelerinin (TBM) performansına etki eden etkenler ve Kadıköy Kartal tünelinde kullanılan TBM'in performansının arazi penetrasyon indisi ile kestirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 161.

Ateş, U. 2013. TBM tasarım parametreleri arasındaki ilişkilerin araştırılması ve buna bağlı olarak iki büyük çaplı TBM projesinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 133.

Aydın, D., Ayhan, M., İmamoğlu, M.Ş. ve Çoğalan, M. 2017. TBM ile açılan Silvan sulama tünelinde yaşanan metan parlaması. IMCET 2017, 11-14 Nisan 2017, Antalya, 384-391.

Ayhan, M., Aydın, D., İmamoğlu, M.Ş., Çoğalan, M. ve Karakuş, A. 2018. Investigation of a methane flare during the excavation of the Silvan irrigation tunnel, Turkey. ***Bulletin of Engineering Geology and the Environment,*** 78(4):2641-2652.

Avunduk, E. 2011. Kadıköy-Kartal metrosunda zor jeolojik koşullarda kullanılan EPB-TBM in performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 106.

Balcı, C., Bilgin, N., Çopur, H. ve Tumaç, D. 2007. Tünel açma makinelerinin (TBM) tam boyutlu kesme deneyi ile performans tahmini. I. Maden Makineleri Sempozyumu, 10 - 12 Mayıs 2007, Kütahya, 61-70.

Balcı, C. 2009. Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: a case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey. ***Tunneling and Underground Space Technology,*** 24, 423-435.

Barla, G. 2001. Tunneling Under Squeezing Rock Conditions, In: Kolymbas D. (ed) Tunneling Mechanics, Eurosummer School, Logos Verlag, Innsbruck,169-268, 2001.

Barton, N. 2000. TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. Balkema, Brookfield, Rotterdam, 2000.

Barton, N. 2000. TBM Tunneling Jointed and Faulted Rocks, Chapter 18, 63-64.

Bell, F.G. 1994. *Engineering in Rock Mass*. Great Britain: Butterworths.

Bilgin, N., Feridunoglu, C., Tumac, D., et al. 2006. TBM cutting performance in Istanbul. ***Tunnels and Tunneling International,*** February:17-19.

Bilgin, N., Balci, C. 2006. Correlative study of linear smal and full scale rock cutting tests to select *mechanized* excavation machines, ***International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,*** 43 (1), 139-156.

Brino, G. 2015. Prediction of performance and cutter wear in rock TBM: Application to Koralm tunnel project. Master Thesis, Politecnico di Torino, Turin, 326.

Bruland, A. 1998. Hard rock tunnel boring. PhD thesis, NTNU Trondheim Norwegian University of Sciences and Technology, Vol. 1, Background and Discussion.

Bruland, A. 1998. Prediction model for performance and cost. ***Norwegian TBM Tunnelling,*** volume 11, 150–158.

Bruland, A. 2014. The NTNU Prediction model for TBM performance. ***Norwegian TBM Tunnelling,*** volume 23, 179–189.

Bruland, A. Hard Rock Tunnel Boring. PhD thesis, NTNU Trondheim Norwegian University of Sciences and Technology, 1998. Vol. 5, Geology and Site Investigations.

Buergi C., Parriaux A., Franciosi G., Rey J. 1999. Cataclastic rocks in underground structures- terminology and impact on the feasibility of projects (initial results). ***Engineering Geology***, 51, 225–253.

Caner, E. 2010. Sıkışan zeminlerde tam cepheli tünel açma makinelerinin performans analizi ve Uluabat kuvvet tüneli örneği. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 155.

Canik, B. 1997. Mühendislik Jeolojisi. Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, No: 43, 111.

Cardu, M., Oreste, P., Guidarelli, D. 2006. Analysis of the performances of the EPB excavation system in urban areas. International Congress on Mine planning and equipment selection, 20-22 September, Turin (Italy), 10-17.

Cassinelli, F., Cina, S., Innaurato, N., Mancini, R. ve Sampaolo, A. 1982. Power Consumption and Metal Wear in Tunnel Boring Machines: Analysis of Tunnel Boring Operation in Hard Rock. In Tunnelling 1982, London, 1982. pp. 73 – 81.

Chakeri, H. 2012. Zemin basıncı dengeleme tünelcilik yönteminde ayna duraylılığı ve yer üstü oturmalarının incelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 151.

Cingöz, A., C. 2013. NATM ve TBM yöntemlerinin deneysel olarak maliyet ve süre kriterleriyle karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 117.

Cornejo, L. 2001. Tunnel mechanical excavation in soft ground its historical evolution, ITA-AITES World Tunnel Congress, Geoconsult, Madrid, Spain.

Çınar, M. Feridunoğlu, C. 2004. Tünel Açma Makineleri (TBM). http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/41dd99a69df0404_ek.pdf. Erişim tarihi: 25.04.2018.

Çilsal M. 2003. Ankara metrosu 3. aşama projesinde TBM ile açılan tünellerin duraylılığının analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 113.

Çimentepe, A., G. 2010. tbm iç kaplama segmanlarının tasarımında kullanılan yapısal analiz metotlarının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 174.

Çopur, H., Çınar M., Ökten G., Bilgin N. 2012. A case study on the methane explosion in the excavation chamber of an EPB-TBM and lessons learnt including some recent accidents. ***Tunneling and Underground Space Technology,*** 27, 159-167.

Dayanç, C. 2011. Pasa basınçlı tünel açma makinesinin (EPB) risk analizi ile performans tahmini. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 65.

Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilsen, B. ve Grov, E. 2012. Classifications of properties ınfluencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. ***Tunnelling and Underground Space Technology,*** 28: 150–158.

Demir, K. 2015. TBM tüneli kazısı oluşan oturmalar ve gerçekleşen saha okumalarıyla karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 107.

Doğruoğlu, M., T. 2009. TBM metodu ile açılan ikiz tünellerde meydana gelebilecek deformasyonların sonlu elemanlar metodu ve numerik hesaplarla tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 144.

Dollinger, G.L. and Raymer, J.H. 2002. Rock mass conditions as baseline values for TBM performance evaluation. ***North American Tunnelling,*** 21, 3-7.

DSİ, 2011. Silvan Projesi Silvan 1. Kısım Sulaması İletim Tünelleri ve Kanalı Proje Yapımı Mühendislik Jeolojisi Raporu, 320 s., Ocak 2011, Diyarbakır.

Einstein H.H. and Bobet A. 1997. Mechanized tunneling in squeezing rock - From basic thoughts to continuous tunneling. In Proceedings of 23rd Assembly of the ITA, April, Rotterdam, 619-632.

Emiroğlu, A. 2010. İstanbul (4.Levent-Hazıosman Arası) metro tünelindeki mühendislik uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 139.

Erguner, U. 2008. Marmaray Projesi ve çamur sistemli tünel açma makinasının performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 89.

Esmer, C. 2017. İstanbul Kaynarca-Sabiha Gökçen metro hattı mühendislik jeolojisi ve karşılaşılan problemlerin tünel mühendisliği açısından incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 105.

Farrokh, E., Rostami, J. ve Laughton, C 2012. Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. ***Tunnelling and Underground Space Technology,*** 30:110–123.

Feridunoğlu, O., C. 2001. Tarabya atıksu tünelinde kullanılan tam cepheli tünel açma makinesinin S13-S10 şaftları arasındaki performansının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 100.

Fernandez, E. 2007. The Madrid renewal inner ring calle 30 with the largest EPB machines, planning and results, Rapid Excavation and Tunneling Conference, Toronto, Canada, June 11-13, 769-783.

Frenzel, C.,. K¨asling, H. and Thuro K. 2008. Factors influencing disc cutter wear. ***Geomechanik und Tunnelbau***, 1(1):55–60.

FUGRO ve SİAL, 2014. TCDD Bahçe-Nurdağı geçiş tüneli jeolojik-jeoteknik proje raporu, 965s., Ankara.

Gehring, K. 1995. Leistungs- und Verschleissprognosen im Maschinellen Tunnelbau (Prognosis of advance rates and wear for underground mechanized excavations, in German). Felsbau, 13: 439–448, 1995.

Genç, D. 1983. Tünel Açımı Esnasında Karşılaşılan Jeolojik Sorunlar, Tünelcilik Semineri Bildiriler Kitabı, 5-12 Ocak, Ankara, 143-163.

Gong Q.M. and Zhao J. 2007. Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite. ***Tunnelling and Underground Space Technology,*** 22: 17–24.

Gong Q.M., Zhao J. and Jiang Y.S. 2007. In-situ TBM penetration tests and rock mass boreability analys is in hard rock tunnels. ***Tunnelling and Underground Space Technology,*** 22: 303–316, 2007.

Gong Q.M. ve Zhao J. 2009. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction. ***International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,*** 46: 8 –18.

Grandori, R. 2006. Abdalajis East Railway Tunnel (Spain) double shield universal TBM cope with extremely poor and squeezing formations. ***Tunnelling and Underground Space Technology***, 21, 268.

Grima, M., A., Bruines, P.A., Verhoef, P., N. 2000. Modeling tunnel boring machine performance by nero-fuzzy methods. ***Tunneling and Underground Space Technology,*** Vol 15, No 3, pp 259-269.

Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., Xu, S. 2008. Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control. Taylor ve Francis, s. 363-378.

Gürkan, B. 2011. İSKİ Avrupa Yakası 2. Kısım Yenikapı atıksu tünelinde kullanılan EPB-TBM'in S6 - S7 kuyuları arasındaki performansının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 103.

Hajebi, D. 2008. TBM ile açılan ikiz tüneller çevresinde gözlenen oturma ve deformasyonlar. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 98.

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,*** 25:333–345.

Hasanpour, R. 2013. Çift kalkanlı tünel açma makinelerinin sıkışan zemin koşullarında kullanabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 141.

Hassanpour, J., Rostami, J. ve Zhao, J. 2011. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. ***Tunnelling and Underground Space Technology,*** 26: 595–603.

Hoek, E. and Brown, E.T. 1980. Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.

Innaurato, N., Mancini, R., Rondena, R. ve Zaninelli, A. 1991. Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy. In Proceedings of the Seventh International Congress ISRM, September 16-19, Aachen, 1009 – 1014.

ITA 2018. [http://tunnel.ita-aites.org/en/cases-histories]. Erişim tarihi: 25.04.2018

Khave, G.J. 2014. Delineating subterranean water conduits using hydraulic testing and machine performance parameters in TBM tunnel post-grouting***. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,*** 70, 308–317.

King, J. 2000. Our century of tunnelling and where we go now, British Tunnel Society, The 2000 Harding Lecture, Tunnels And Tunnelling International.

Kissel, F.N. 2006. Preventing Methane Gas Explosions During Tunnel Construction. Handbook for Methane Control in Mining. IC 9486, pp. 169–184 (Chapter 14).

Kitajima, M. 2010. Methane gas explosion hazard during construction of headrace tunnel for agriculture. <http://shippai.jst.go.jp/en/Detail?fn=0&id=CD10000989&>

Kolymbas, D. 2005. Tunnelling and Tunnel Mechanics A Rational Approach to Tunnelling. Springer Berlin Heidelberg, 436, Almanya. ISBN: 10 3-540-25196-0

Kömürlü, E. ve Kesimal, A. 2013. Geçmişten Günümüze Tünelcilik ve Tahkimat Malzemeleri. Madencilik, Cilt 52 (Sayı 2-3): 33-47.

Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H., Aksoy, C. O. 2007. Tünel ve Kuyu Açma. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No:145, 310, İzmir.

Köse, H. ve Kahraman, B. 2009. Kaya Mekaniği, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No:177, İzmir.

Lockyer, J.W., Howcroft, A. 1997. The Abbeystead explosion disaster. ***Annals of Burns and Fire Disasters,*** 10, September 1–4.

Maidl, B., Schmid, L. and Ritz, W., Herrenknecht, M. 2008. Hard Rock Tunnel Boring Machines, Ernst & Sohn, Berlin

Mare´chal J.C., Etcheverrya, D. 2003. The use of 3H and 18O tracers to characterize water inflows in Alpine Tunnels. ***Applied Geochemistry,*** 18, 339–351.

Nelson, P. 1993. TBM performance analysis with reference to rock properties, J.A.Hudson (Ed.), Comprehensive Rock Engineering, Oxford, London: Pergamon Press, 261-291.

Nuti, M. 2017. TBM performance analysis in hard rock: Acase study on “La Maddelana” exploratory tunnel. Master Thesis, Politecnico di Torino, Turin, 209.

O’Carroll, J. B. 2005. A guide to planning constructing and supervising earth pressure balance TBM tunneling, 2002 William Barclay Parsons Fellowship, (Monograph 18). New York, USA: Parsons Brinckherhoff.

O’Carrol, B., J., A 2005. Guide to planning, constructing ans supervising earth pressure balance TBM tunneling, Professional Associate Parsons Brinckerhof.

Oğul, K. 2017. Yüksek hızlı demiryollarında jeolojik-jeoteknik çalışmalar ve tünel uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 210.

Osmanoğlu, S. 2018. Kahramanmaraş kılavuzlu sulama projesi Belpınar tünelinde kullanılan pasa basıçlı tünel açma makinesinin (EPB-TBM) kazı performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 113.

Öz, A. 2012. İstanbul-Kadıköy-Kartal metro tünelince kullanılan tünel açma makinesinde (TBM) kazı performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 86.

Özbaş, B. 2007. Tandoğan-Keçiören metro tünelinin mecidiye-tandoğan kısmında TBM-EPB ile kazılabilme güçlüğünün CBS tabanında belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 135.

Proctor, R.J. 2002. The San Fernando tunnel explosion. ***Engineering Geology.*** 67, 1–3.

Poşluk, E. 2002. Ankara-İstanbul hızlı tren projesi 26 nolu tünelin TBM kazı performansının Q_{TBM} metodu ile tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 120.

Ramezanzadeh, A. 2006. Performance analysis and development of new model for performance prediction of hard rock TBMs in rock mass. PhD thesis. Institut National des Sciences Appliqu´es de Lyon, France, 2006.

Ramezanzadeh, A. 2005. Performance analysis and development of new models for performance prediction on hard rock TBMs in rock mass, Le Grande Docteur Thesis, No d'ordre 2005 ISAL 0049, Institute National das Sciences Appliquees de Lyon,Anne'e.

Ribacchi, R. ve Lembo Fazio, A. 2005. Influence of rock mass parameters on the performance of a TBM in a Gneissic formation (Varzo Tunnel). ***Rock Mechanics and Rock Engineering,*** 38(2):105–127.

Rostami, J. ve Özdemir, L. 1993. A New model for performance prediction of hard rock TBM. InL.D.et al Bowerman,editor, Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Boston, 1993, 793 – 809.

Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D.M. 1994. Performance prediction a key issue in mechanical hard rock mining. ***Mining Engineering,*** 24, 1263-1267.

Rostami, J., Özdemir, L. ve Nilsen L. 1996. Comparison between CSM and NTH hard Rock TBM performance prediction models. In The Annual Conference of the Institution of Shaft Drilling Technology (ISDT), 1-3 May, Las Vegas, 1 – 11.

Rostami, J., Gertsch, R. and Gertsch. L. 2002. Rock fragmentation by disc cutter a critical review and an update. Proceedings North American Rock Symposium, July 7-10, Toronto, 977-986.

Rostami, J., Ozdemir, L., Bruland, A. and Dahl. F. 2005. Review of issues related to Cerchar Abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates. In Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Rapid Excavation and Tunnelling Conference, June 27-29, Seatle, 738 – 751.

Rostami, J. 2008. Hard Rock TBM cutter head modelling for desing and performance prediction. Geomechanik und Tunelbau, 1, Heft-1, 18-28.

Sakcalı, A. 2018. Zayıf kayalarda TBM ile kazılan tünellerin 3-boyutlu sayısal modellemesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 190.

Sapigni, M., Berti, M. Bethaz, E., Busillo A. and Cardone G. 2002. TBM performance estimation using rock mass classifications. ***International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,*** 39: 771–788.

Sarbangholi, F.S. 2014. Tünel açma makinelerinin (TBM), kazı zamanı, makine ve kaya özelliklerine göre istatiksel analizi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 83.

Seven, S. 2010. TBM projelerinde zorlu zemin koşullarında ön ve sonradan enjeksiyon uygulamaları, türkiye'den iki farklı örnek uygulama. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 103.

Shahriar, K., Rostami, J., Hamidi, J.K. 2009. TBM tunneling and analysis of high gas emission accident in Zagros long tunnel. In: Proceedings of the World Tunnelling Congress, May 23-28, Budapest-Hungary, 171–172.

Tseng, Y. Y., Wong, S. L., Chu, B. ve Wong, C. H. 1998. The Pinglin mechanized tunnelling in difficult ground, 8th Congress IAEG, 21-25 Eylül, Vancouver, Kanada.

Tokgöz, N. 1998. Yeraltı kömür madenlerindeki olası kaya patlama tehlikelerinin yerinde ve laboratuvar çalışmalarla saptanması. Türkiye 11. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 10-12 Haziran, Bartın-Amasra, 77-90.

Tunçdemir, H. 1998. Arazi basıncının dengelenmesi esasına göre çalışan tam cephe tünel açma makinelerinin kazı performansını etkileyen zemin özellikleri ve İzmir Metrosu örneği. 4.Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, 22-23 Ekim, Zonguldak,

Tüysüz, L. 2012. İstanbul'da açılacak metro tünellerinde TBM (Tünel Açma Makinesi) performansını tahmin etmek için yeni bir yaklaşım. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 101.

Ünlü, K. 2010. Bir demiryolu tünelinin tahkimat analizi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 144.

Yılmaz, E. ve Duran, O. 1997. Güneydoğu Anadolu Bölgesi Otokton ve Allokton Birimler Stragrafi Adlaa Sözlüğü (Lexicon), TPAO Araştırma Merkezi Grubu Başkanlığı Eğitim Yayınları No:31, 460 s., Ankara.

Yağız, S. 2008. Utilizing rock mass properties for predicting TBM Performance in hard rock condition. ***Tunnelling and Underground Space Technology,*** 23, 326–339.

Yağız. S. 2009. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. ***Tunnelling and Underground Space Technology,*** 24, 66–74.

Yalçın, T. ve Vardar M. 2006. DSİ Zamantı tünelinde karşılaşılan aşırı su geliri ve çözüm önerileri. 8. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 2-3 Kasım, İstanbul, 409-414.

Yıldırım, Ü., E. 2009. Şişen killer ve tünel tasarımına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 135.

Yurtaydın, H., Ö. 2011. İstanbul'daki iki tünelde TBM Performansları ve kaya kütle sınıflandırmasının etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 105.

Yüksel, A. 2014. TBM makinelerinde kayaç özellikleri ve makro süreksizliklerin kazı performansına etkilerinin araştırılması. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 270.

Zare, S. ve Bruland, A. 2013. Applications of NTNU/SINTEF Drillability indices in hard rock tunneling. ***Rock Mechanics and Rock Engineering,*** 46, 179–187.

ÖZGEÇMİŞ

Deniz AYDIN, 1984 yılında İstanbul'da dünyaya geldi. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2008 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2012 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Yüksek Lisans eğitimi sırasında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladığı Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde 2012 yılında Doktora eğitimine başladı.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Deniz AYDIN
ÖĞRENCİ NO	12807501
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2018-2019
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	Maden Mühendisliği
PROGRAM	Doktora
TEZ KONUSU	Zor Koşullarda TBM ile Açılan Tünellerin Performans Analizi: Silvan ve Nurdağı Tünelleri
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	243
BENZERLİK ORANI	%16
RAPORLAMA TARİHİ	30/09/ 2019

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 243 sayfalık kısmına ilişkin, 30/09/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 16 'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

☐ Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐ Kaynakça hariç
☐ Alıntılar hariç/dâhil
☐ Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Deniz AYDIN

30/09/2019

Prof. Dr. Mustafa AYHAN **Tez Danışmanı** 30/09/2019	Prof. Dr. Mustafa AYHAN **Anabilim Dalı Başkanı** 30/09/2019

Formdaki bilgiler bilgisayar ortamında doldurulmalıdır. El yazısı ile doldurulan formlar geçersiz sayılmaktadır.