

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜNEL AÇMA MAKİNELERİNİN (TBM) PERFORMANSINA ETKİ EDEN
ETKENLER VE KADIKÖY KARTAL TÜNELİNDE KULLANILAN TBM'İN
PERFORMANSININ ARAZİ PENETRASYON İNDİSİ İLE KESTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sami Enis ARIOĞLU**

Anabilim Dalı : Maden Mühendisliği

Programı : Maden Mühendisliği

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜNEL AÇMA MAKİNELERİNİN (TBM) PERFORMANSINA ETKİ EDEN
ETKENLER VE KADIKÖY KARTAL TÜNELİNDE KULLANILAN TBM'İN
PERFORMANSININ ARAZİ PENETRASYON İNDİSİ İLE KESTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sami Enis ARIOĞLU
(505071003)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Nisan 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cemal BALCI (İTÜ)

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nuh BİLGİN (İTÜ)
Doç. Dr. Ataç BAŞÇETİN (İÜ)**

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Ülkemizde ve dünyada hızla artan nüfusla beraber, bu nüfusun kırsal alanlardan kentsel alanlara taşınması sonucu kentsel alanlarda altyapı ihtiyaçlarının artması kaçınılmaz olmuştur. Bu bağlamda altyapı çalışmalarında mevcut sistemi daha dar boğazlara sokmamak için yeraltı çalışmalarına ağırlık verilmiştir. Bu çalışmaların yerüstündeki mevcut kurulu sisteme ve yapılara zarar vermeden hızlı ve güvenli bir şekilde yapılmasında tünel açma makineleri (TBM) kullanılmaktadır. Gerek yüksek ilk yatırım gerekse de yüksek işletme maliyetleri TBM'lerin zorlu formasyon şartları altında dahi daha hızlı ve daha güvenli kazılar yapması zorunluluğunu ön plana çıkartmıştır. Bu bağlamda, yapılan mevcut çalışmada kaya formasyonlar için literatürde yer bulmuş performans tahmin yöntemleri arazi penetrasyon indeksi (FPI) yardımıyla kestirilmeye çalışılmıştır.

Hazırlanan bu çalışmada gerek literatür araştırması sırasında gerekse de konunun sınırlandırılması ve performans tahmin yöntemleri arasında en yenilikçi kavram olan arazi penetrasyon indeksinin varlığından beni haberdar etmesi, ayrıca her noktada geniş bilgi birikimden yararlanmam ve sorunlara pratik çözüm bulmamda yardımcı olması nedeniyle başta babam Prof. Dr. Müh. Ergin ARIÖĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Maddi ve manevi desteğini bir an olsun eksiltmeyen biricik annem Prof. Dr. Mim. Nihal ARIÖĞLU'na da buradan sonsuz teşekkür ederim. Tezimin her aşamasında manevi desteğini esirgemeyen ablam Doktorant Y. Müh. M. Övül ARIÖĞLU SALMONA'ya ve onun eşi CEM'e ve biricik kızları yeğenim M. Erin' e ve teyzem Av. Nadide FİKİRDANIŞ'a desteklerinden ötürü çok teşekkür ederim.

Çalışmamda kullandığım Anadoluray Kadıköy Kartal Metro Projesi verilerini edinmemde desteğini eksiltmeyen arkadaşım Mak. Müh. Enver KOÇ' a, tezimin her aşamasında rahatlıkla fikir alışverişi yaptığım Mad. Müh. Fevzi AKSU'ya, ayrıca Mad. Müh. Özgür YURTAYDIN'a, İnş. Müh. Suat SEVEN'e ve son olarak da İnş. Müh. Korhan DEMİR'e ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmalarımda Anadoluray verilerini kullanmama izin veren Anadoluray Kadıköy - Kartal Metro Projesi müdürüne, Yapı Merkezi Raylı İşler Koordinatörü Dr. Müh. Ahmet Çivi'ye, ve Yapı Merkezi yönetim kurulu başkanı Y. Müh. Başar ARIÖĞLU'na da buradan teşekkürlerimi iletiyorum. Çalışmalarım esnasında kullandığım kimi şekillerin çizilmesinde yardımlarını esirgemeyen Yapı Merkezi AR-GE çalışanlarından Y. Müh. Gözde KURT'a da teşekkür ederim. Beni yüksek lisansa başlamaya teşvik eden Prof. Dr. Müh. Nuh BİLGİN'e, gerek yazım gerekse de kaynakları bulmamda yardımcı olan tez danışmanım Doç. Dr. Müh. Cemal BALCI'ya, maden mühendisliği bölümünden hocalarım Doç.Dr. Hanifi ÇOPUR'a ve Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum.

NİSAN, 2010

Sami Enis ARIÖĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. TBM TANIMI VE ÖZELLİKLERİ	3
2.1 Tünel Açma Makinelerinin Tarihsel Gelişimi.....	3
2.2 TBM' i Oluşturan Bölümler	9
2.2.1 Kesici kafa.....	11
2.2.2 Güç nakil ünitesi	15
2.2.3 Destek üniteleri	17
2.3 TBM Tipleri	18
2.3.1 Pabuçlu tip (Gripper)	20
2.3.1.1 Kalkansız pabuçlu tip	25
2.3.1.2 Çatı kalkanlı pabuçlu tip	25
2.3.1.3 Çatı ve yan kalkanlı pabuçlu tip.....	25
2.3.1.4 Tam kalkanlı pabuçlu tip.....	26
2.3.2 Kalkanlı tip (Shielded)	26
2.3.2.1 Tek kalkanlı tip	27
2.3.2.2 Teleskopik (Çift) kalkanlı tip	27
2.3.2.3 Ayna basınçlı (kapalı) TBM'ler	29
Pasa basınçlı (EPB)	30
Çamur (Slurry)	31
2.4 TBM'lerin Diğer Kazı Yöntemlerine Göre Üstünlükleri ve Sakıncaları	34
3. KAZILABİLİRLİĞE ETKİ EDEN ETKENLER	35
3.1 Genel	35
3.2 Tek Eksenli Basınç Dayanımı	38
3.3 Delme Oranı İndeksi (DRI).....	42
3.4 Süreksizliklerin - Çatlak - Ortalama Aralığı, Genel Açıları ve Kazı Arınının Yeknesaklığı	44
3.5 İksasız Durma Süresi	55
3.6 Su Gelirinin Etkisi	57
3.7 Derinlik ve Yatay Basınçların Etkileri	60
3.8 Spesifik Enerji Büyüklüğüne Etki Eden Faktörler	65
3.9 Makine Kullanım Oranına Etki Eden Faktörler	68

4. ARAZİ PENETRASYON İNDEKSİ İLE TBM'LERİN	
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ	83
4.1 Arazi Penetrasyon İndeksi ve İlgili Büyüklüklerin Açılımları	83
4.2 Literatür Çalışması	91
4.2.1 2000 yılı öncesi çalışmalar	91
4.2.2 2000 yılı sonrası çalışmalar	105
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	131
KAYNAKLAR.....	135
ÖZGEÇMİŞ.....	141

KISALTMALAR

TBM	: Tünel Açma Makinesi (Tunnel Boring Machine)
FPI	: Arazi Penetrasyon İndeksi (Field Penetration Index)
ROP	: Penetrasyon Hızı (Rate of Penetration)
AR	: İlerleme Miktarı (Advance Rate)
SE	: Spesifik Enerji (Specific Energy)
SP	: Spesifik Penetrasyon (Specific Penetration)
CCS	: Sabit Kesit (Constant Cross Section)
RMR	: Kaya Kütle Puanı (Rock Mass Rating)
CSM	: Colorado School of Mines
NTNU	: Norwegian University of Science and Technology

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Kaya kütlesi kazılabilirlik indeksi, RME, (Bieniawski ve diğ., 2008).	36
Çizelge 3.2 : RME ve " σ_c " göz önünde bulundurularak kaya TBM'lerin tipinin belirlenmesi.	37
Çizelge 3.3 : Kaya türüne göre disk keski sabiteleri (Sato ve diğ., 1991'den değiştirilerek).	40
Çizelge 3.4 : Kimi kaya türlerinde delme oranı indeks değerleri (Bruland, 1998).	43
Çizelge 3.5 : Kaya kütlesindeki çatlak sayısı - TBM temel parametreleri (Arazi penetrasyon indeksi, spesifik enerji ilişkisi), (Tardaguila ve diğ., 2007).	45
Çizelge 3.6 : Karışık kazı kesitlerinde TBM performansı (Oh ve Choi, 2003).	54
Çizelge 3.7 : Kazı arındaki su gelirinin TBM'nin ilerleme hızı üzerine etkisi -Fay zonlarında- (Bieniawski ve diğ., 2009).	59
Çizelge 3.8 : CAI değerlerine göre aşındırıcılık sınıfları ve bunlara ait olası kaya cinsleri (Frenzel ve diğ., 2008'den kısaltılarak).	61
Çizelge 3.9 : Farklı litolojide numunelerin yanal basınç altındaki Cerchar aşınma indeksleri (Alber, 2008a 'dan kısaltılarak).	64
Çizelge 3.10 : TBM'den yararlanma oranını belirleyen RMU puanlama sistemi (Bilgin ve diğ., 1999).	69
Çizelge 3.11 : TBM 'nin çalışma çevrimi (Özdemir, 1992).	74
Çizelge 3.12 : TBM performans Değerleri – IMS sınıflama sistemi (Grandori ve diğ., 1995a).	77
Çizelge 3.13 : 2 adet Tünel Projesinde kullanılan 4 adet TBM'e ait teknik bilgiler ve ortalama ilerleme miktarları (Dolcini ve diğ., 1996).	79
Çizelge 3.14 : Kim (2004) çalışmasında ele alınan tünel projelerinde kullanılan TBM'lere ait bir takım mekanik büyüklükler.	81
Çizelge 4.1 : Arazi penetrasyon indeksine etki eden belli başlı faktörler.	84
Çizelge 4.2 : NTH çatlak sınıfı ile eşdeğer blok hacmi ve şekil faktörü (Palmström, 1995).	97
Çizelge 4.3 : Değişen " α " açısı ile " c_o " arasındaki ilişki (Palmström, 1995).	98
Çizelge 4.4 : Arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile spesifik enerji (SE) değişimi (Leitner ve Schneider, 2003 değiştirilerek).	109
Çizelge 4.5 : Farklı kaya birimlerinde çalıştırılan TBM'lerde spesifik penetrasyon derecesi (Ribacchi ve Fazio, 2005).	116
Çizelge 4.6 : Kozyatağı - Kadıköy Metro Tünelinde TBM açık mod kazı verileri (Balcı, 2009'dan değiştirilerek).	125
Çizelge 4.7 : Kadıköy Kartal Metro Projesi tünelinde çalışan TBM'e ve kullanıldığı formasyona ait kimi mekanik büyüklükler (Balcı, 2009'dan değiştirilerek).	127

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Mark Isambard Brunel dairesel kesitli tünel tekniği (Url-5).....	3
Şekil 2.2 : Germain Sommeiller'in geliştirdiği buhar gücü ile çalışan delgi makinesi (King, 2000).....	5
Şekil 2.3 : Beaumont / English Tünel Açma Makinesi (Maidl ve diğ., 2008).	6
Şekil 2.4 : Dağ Dilimleyicisi Adlı Tünel Açma Makinesi, (Maidl ve diğ., 2008).	7
Şekil 2.6 : TBM' in destek ünitelerinin kesit görünüşü (Maidl ve diğ., 2008).....	10
Şekil 2.7 : Penetrasyon miktarına bağlı olarak 12 (m) çaplı bir TBM' de farklı kesici kafa tasarımlarında oluşan tork kayıpları (Maidl ve diğ., 2008).	11
Şekil 2.8 : CSM modeliyle mekanik büyüklükleri verilen bir kaya numunesi için değişen penetrasyon miktarları altında farklı kesikiler arası mesafenin normal kuvvete etkisi (Rostami, 2008).....	13
Şekil 2.9 : Tipik bir sağlam kaya formasyonlar için tasarlanmış kesici kafa (Url-3).14	
Şekil 2.10 : Tipik zemin formasyonlar için tasarlanmış bir kesici kafa (Url-4).	15
Şekil 2.11 : Farklı pabuç tipleri (Maidl ve diğ., 2008).	16
Şekil 2.12 : TBM'lerin sınıflandırılması (Maidl, 2008'den değiştirilerek).	20
Şekil 2.13 : Değişen TBM çapına bağlı olarak ihtiyaç duyulan pabuç kuvveti ve bu kuvvetin pabuçlar altında yarattığı basınç (Maidl ve diğ., 2008).....	21
Şekil 2.14 : Tek sıra pabuçlu (main beam) TBM'lerde kazı işlemi (Askilsrud, 1998).....	23
Şekil 2.15 : Çift sıra pabuçlu (Kelly Tip) TBM'lerde kazı işlemi (Askilsrud, 1998).....	24
Şekil 2.16 : Kalkansız pabuçlu TBM'ler (Maidl ve diğ., 2008).	25
Şekil 2.17 : Çatı kalkanlı pabuçlu TBM'ler (Maidl ve diğ., 2008).....	25
Şekil 2.18 : Çatı ve yan kalkanlı pabuçlu TBM'ler (Maidl ve diğ., 2008).	26
Şekil 2.19 : Tam kalkanlı pabuçlu tip TBM'ler (Maidl ve diğ., 2008).....	26
Şekil 2.20 : Çift kalkanlı tip TBM'ler (Maidl ve diğ., 2008).	28
Şekil 2.21 : Pasa basınçlı (EPB) tip TBM kesit görünüşü (Url-9).	30
Şekil 2.22 : (a) Alman tip hava cepli çamur TBM (mixshield) (Url-7), (b) Japon Tip hava cepsiz çamur TBM (Url-8).....	33
Şekil 3.1 : (a) Disk keski ile kayada kesinti (chip) oluşumu, (b) Normal disk kuvveti (F_N) ile keskinin altında oluşturulan basınç zonu ve etrafında oluşan çekme çatlakları (Rostami ve Özdemir, 1993; Ramezanzadeh, 2005).....	38
Şekil 3.2 : Kayanın basınç dayanımının keski kuvvetlerine ve penetrasyon üzerine etkileri (F_N, F_R ; normal ve yuvarlanma disk kuvvetleri).	41
Şekil 3.4 : Anadoluray Kadıköy - Kartal Metro projesi S360 adlı TBM 'in aylık ilerleme miktarları (Alan, E. ve Koç, E., 2010).....	47
Şekil 3.5 : Anadoluray Kadıköy - Kartal Metro projesi S363 adlı TBM 'in aylık ilerleme miktarları (Alan, E. ve Koç, E., 2010).....	48

Şekil 3.6 : Boyuna tünel kesintinde kazı aksı ile çatlak sistemi arasındaki " α " açısı (Gong ve diğ., 2005).....	50
Şekil 3.7 : 20 (cm) çatlak aralığı için çatlak düzlemi ile tünel yatay aksı arasındaki açının TBM penetrasyonuna etkisi (P_α , P_0 sırasıyla (α) ve (0) açılarından elde edilen penetrasyonlar) (Gong ve diğ., 2005).....	50
Şekil 3.8 : Artan günlük ilerleme miktarına bağlı olarak kesici kafa ve 10 (m) arkasında ölçülen tünel cidarlarının deplasman değişimi (Schubert, 2000).	52
Şekil 3.9 : RME indeksinde kazı arının homojenliğine ilişkin puanlar (Bieniawski ve diğ., 2009).	55
Şekil 3.10 : RMR ₈₉ kaya sınıflama sisteminde tavan açıklığı -RMR- iksasız kalma süresi ilişkileri (Bieniawski, 1989; Bieniawski ve diğ. 2007b).....	56
Şekil 3.12 : Değişen kesme katsayısı (F_R / F_N) ile kazı için gerek duyulan (elektrik) güç (P) arasındaki ilişki.	67
Şekil 3.13 : Farklı formasyon mekanik özelliklerine bağlı alınan RMU indeks değerleri, TBM'den yararlanma oranları ve sağlanan günlük ilerleme hızlarının değişimi (Bilgin ve diğ., 1999).	71
Şekil 3.14 : (a) Varzo tüneline kümülatif ilerleme grafiği. (b) Ay bazında TBM' den yararlanma oranları ve günlük ilerleme miktarları AR (m/gün).....	73
Şekil 3.15 : Varzo tünel projesinde yapılan işlemlerin genel zaman dağılımları.	75
Şekil 3.16 : (a) Arıza nedenlerinin dağılımı. (b) TBM kazısı esnasında yapılan işlerin genel dağılımları (Bilgin ve diğ., 2005).	76
Şekil 3.17 : Makine yararlanma oranının (U) saatlik ilerleme miktarına etkisi.	78
Şekil 3.18 : (a) 4 adet TBM'e ait kümülatif ilerleme miktarlarının takvim günü bazında değişim grafikleri. (b) TBM ortalama günlük ilerleme miktarı (sadece çalıştığı günler dikkate alındığında) ile RMR kaya kütle sınıf nu. değişimleri. (c) TBM' den yararlanma yüzdesi ile RMR kaya kütle sınıf numarası değişimleri.	80
Şekil 3.19 : Kaya kütle kalitesi ile yararlanma oranı arasındaki ilişki (Kim, 2004)..	82
Şekil 3.20 : Arın su geliri ile yararlanma oranı arasındaki ilişki (Kim, 2004).	82
Şekil 4.1 : Kesme katsayısı, C_c , ile spesifik enerji ararsındaki ilişki (Balcı, 2009 verileri kullanılarak hazırlanmıştır).	90
Şekil 4.2 : California'daki 4 TBM Projesinde arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile σ_b/I_p arasındaki ilişkiler (σ_b = Sağlam numunenin tek eksenli basınç dayanımı, I_p = Nokta yük indeksi), (Klein ve diğ., 1995)..	92
Şekil 4.3 : California'daki 4 TBM Projesinde arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile ($\sigma_z/\sigma_{y,b}$) oranı arasındaki ilişkiler. (σ_z = Derinlik basıncı, $\sigma_{y,b}$ = Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı-Hoek-Brown 1980'e göre kestirilmiş, (Klein ve diğ., 1995).....	93
Şekil 4.4 : NTH çatlak sınıfı, tünel aksı ile çatlak sistemi arasındaki açının (α^0) TBM penetrasyon faktörüne etkisi (Palmström, 1995).	96
Şekil 4.5 : Penetrasyon miktarının eşdeğer çatlak faktörü ($k_{eş}$) ve eşdeğer disk normal kuvveti ($F_{eş}$) ile değişimleri (Palmström, 1995).	99
Şekil 4.6 : Arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile hacimsel çatlak sayısı ve çatlak aralığı ilişkisi (Sundaram ve diğ., 1998).....	101
Şekil 4.7 : Arazi ölçümleri ve benzetim sonucu elde edilen çatlak aralığı ile değişen penetrasyon oranları. P_s istenilen çatlak aralığı, P_0 500 (mm) çatlak aralığı için elde edilen penetrasyon. S_t ve S_p sırasıyla Fisür ve Çatlak sınıfı (Gong ve diğ., 2009).	102

Şekil 4.8 : Kaya kütlelerinin yerinde basınç dayanımı ile spesifik penetrasyon arasındaki ilişki (Alber, 2000).	106
Şekil 4.9 : Tavan açıklığı güvenlik faktörü ile TBM yararlanma oranı (U) arasındaki ilişki (Alber, 2000).	106
Şekil 4.10 : Kaya kütle puanı, RMR, ile penetrasyon hızı, ROP, ilişkisi.	110
Şekil 4.11 : Kaya kütle puanı (RMR) ile spesifik penetrasyon ilişkisi.	110
Şekil 4.12 : (a) IMS sınıflama sistemi. (b) IMS sınıflama sistemi ile itme kuvveti ve penetrasyon hızı ilişkisi (Ribacchi ve Fazio, 2005).	114
Şekil 4.13 : IMS sınıf numarası ile spesifik penetrasyon (SP) ilişkisi.	115
Şekil 4.14 : Çatlak aralığı (S) ile arazi penetrasyon indeksi (FPI) ve buna bağlı olarak ilerleme miktarının kestirilmesi.	119
Şekil 4.15 : Farklı çalışmalardan derlenen kaya kütlelerinin yerinde basınç dayanımı ile SP arasındaki ilişki.	122
Şekil 4.16 : Arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile spesifik enerji (SE) ve hacimsel net kazı miktarı (ICR) değişimleri grafiği.	126
Şekil 4.17 : Penetrasyon (p) ile spesifik enerji (SE) ve arazi penetrasyon indeksi (FPI) değişimleri grafiği.	126
Şekil 4.18 : Farklı hacimsel çatlak sayılarında değişen kaya numunesinin laboratuvar basıncı ile penetrasyon miktarı arasındaki ilişki (Gong ve Zhao, 2009).	130

TÜNEL AÇMA MAKİNELERİNİN (TBM) PERFORMANSINA ETKİ EDEN ETKENLER VE KADIKÖY KARTAL TÜNELİNDE KULLANILAN TBM'İN PERFORMANSININ ARAZİ PENETRASYON İNDİSİ İLE KESTİRİLMESİ

ÖZET

Mevcut çalışmada sağlam kaya tünel açma makinelerinin (açık mod TBM'lerin) performanslarına etki eden faktörler araştırılmış ve bunların TBM'nin performansına nasıl ve ne denli etkilediği literatürden örneklerle ve Anadoluray Kadıköy Kartal Metro Projesi kullanılarak gösterilmeye çalışılmıştır. Değişen formasyon şartlarında sağlam kaya TBM'lerin performanslarının tahminine yönelik çeşitli performans tahmin yöntemleri, arazi penetrasyon indeksi (FPI) cinsinden verilmiş, ve verilen tahmin yöntemlerinin kullanımı sayısal örneklerle gösterilmiştir.

Tünelciliğin dün, bugün ve tünelcilikte yaşanan gelişmelerin TBM'lere nasıl uyarlandığı ile TBM'lerin tarihsel gelişimi özetlenmiştir. Ayrıca günümüzde mevcut TBM tipleri ve bunların hangi formasyonlarda kullanıldıkları ile tasarım farklılıkları kısaca anlatılmıştır.

Kazı performansına etki eden parametrelerin farklı tip TBM'ler için de benzerlik gösterdiği ve etkileşimlerinin hemen hemen aynı olduğu başta Anadoluray Kadıköy Kartal Metro Projesi olmak üzere literatürden farklı örneklerle gösterilmeye çalışılmıştır. Ayrıca kesici kafa tasarımının hatalı yapılmasının gerek TBM performansına gerekse de kazı güvenliği üzerine ne denli etkiler yapabileceği gösterilmiştir. TBM performansına etki eden faktörlerin ne denli çeşitlilik gösterebileceği de bu çalışmada verilmeye çalışılmıştır.

Kazı performansının tahmininde arazi penetrasyon indeksinin (FPI) kullanılması sonucu benzer formasyonlarda benzer değerlerin elde edildiği görülmüştür. Nitekim Anadoluray Kadıköy Metro Projesi için farklı performans yaklaşımlarında kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar elde edilmiş ve literatürde verilen benzer formasyon şartlarında benzer sonuçların alındığı görülmüştür. Böylelikle kullanılan indeksin verilen formasyon özelliklerine bağlı olarak farklı tünel projelerinde ve işletme şartlarında dahi ne denli birbirine yakın sonuçlar verebildiği gösterilmiştir.

Kesici kafa tasarımının ve TBM işletme personelinin, TBM performansına geçilecek olan formasyon şartları kadar etkin ve etkili olduğu gösterilmiştir. Bununla beraber uygulanacak olan itme kuvvetlerine bağlı olarak TBM performansının da ne denli değişebildiği literatürden verilen örneklerle gösterilmeye çalışılmıştır. Ayrıca TBM performansının tahminine yönelik yaklaşımların numune boyutundan çıkarak kazılmış tünel projelerinden elde edilen performans verileri ve kimi TBM büyüklükleri ile ilişkilendirilmesi sonucu daha doğru ve kabul edilebilir performans tahminlerinin yapılabileceği de gösterilmiştir.

THE FACTORS INFLUENCING THE TUNNEL BORING MACHINES (TBMs) PERFORMANCE AND PERFORMANCE ESTIMATION OF THE TBM USED IN KADIKÖY KARTAL TUNNEL BY FIELD PENETRATION INDEX

SUMMARY

In this study; the factors that affect the performance of hard rock TBMs (open type) have been investigated, and the nature and extent of this effect have been established through examples from the literature and the Kadıköy – Kartal Metro Project. Various methods utilized for estimating the performance of hard rock TBMs in different rock formation conditions have been provided in terms of field penetration index (FPI), and the use of the estimation methods has been demonstrated by means of numerical examples.

The know-how of the adaptation of the past and recent advances in tunneling to TBMs and the historical development of TBMs have been summarized. Moreover, today's existing TBM types together with the formations in which they are used and the design differences have also been briefly described.

It has also been intended to show that the parameters affecting the excavation performance share similarities for different kinds of TBMs and that their interactions are almost the same with various examples from the literature, particularly the Kadikoy – Kartal Metro Project. In addition to these, it has been shown that the faulty design of the cutter head may extensively degrade TBM performance and excavation security. The variety of the factors influencing the TBM performance has also been depicted in this study.

It has been seen that the use of the FPI has resulted in similar values for similar formations. Thus, acceptable results have been acquired in the different performance approaches of Kadıköy – Kartal Metro Project. These results also show resemblances with those of similar formation conditions in the literature. This has proved that the index gives accurate results with respect to the given formation characteristics in various tunnel projects with different operational conditions.

It has also become apparent that the design of the cutter head and the operation personnel are as significant and effective as the formation conditions in which TBMs are going to perform. Moreover, it is also evident from the literature examples that the TBM performance may significantly vary depending on the thrust forces to be used. In addition to these, it has been shown that more accurate and acceptable performance estimations can be made by means of associating these approaches with the performance data obtained from excavated tunnel projects and some of TBM mechanical properties rather than the data obtained from laboratory tests.

1. GİRİŞ

Artan altyapı hizmetlerine paralel olarak kamusal yatırımların yeraltına kayması TBM'lerin hızlı ve güvenli bir kazı yöntemi olması sebebiyle kullanılmalarını kaçınılmaz hale getirmektedir. Başta ulaşım yatırımları olmakla beraber kanalizasyon, içme suyu, enerji nakil hatları ve mevcut sistemlerin yenilenmesi için gelecek 10 yılda Avrupa'da altyapı yatırımlarına toplam 100 milyar Avro seviyelerinde bütçe ayrılacağı tahmin edilmektedir (Bilgin ve diğ., 2009a). Bilindiği üzere geleneksel delme patlatma yöntemi yapılaşmanın yoğun olduğu bölgelerde gerek gürültü kirliliği gerek açığa çıkan zehirli gazlar gerekse de patlatma sırasında meydana gelen titreşim dalgalarının yapılarda yaratabileceği hasarlar nedeniyle tünel kazılarında hem tercih edilmemekte hem de uygulaması pratik ve hızlı olmamaktadır.

TBM'ler yüksek yatırım maliyetleri ve işletme giderlerine rağmen doğru tasarlanıp kullanıldıklarında kazı performansı ve güvenliği açısından çok büyük avantajlar sağlamaktadır. Nitekim sağlam kaya formasyonda kullanılan $\varnothing 7,63$ (m) çaplı açık mod bir TBM'in uygun kazı şartları altında 115 (m/gün) gibi çok yüksek kazı hızlarına ulaşabildiği görülmektedir (Url-6). Bu da altyapı yatırımlarının daha çabuk tamamlanmasına ve yatırımın geri dönüşünün daha erken olmasına olanak vermektedir.

Altyapı çalışmalarının çok farklı formasyonlarda gerçekleşebilmesi ve kısıtlı zaman dilimi ve proje maliyetleri göz önüne alındığında TBM'lerin performanslarının kestirilmesinin ne denli bir öneme sahip olduğu açıktır. TBM performansının kestirilebilmesi için önce performansa etki eden etkenlerin bilinmesi ve bunların performansı hangi oranda etkilediklerinin bilinmesi gerekmektedir. TBM performansına birçok parametrenin etkili olması ve bunların farklı etkileşimlere sahip olmaları nedeniyle konunun sınırlandırılması açısından Bieniawski ve diğ. (2006) çalışmasında adı geçen kaya kütle kazılabilirliği, RME, kavramı ve bu kavramda adı geçen değişkenler belli bir ayrıntıda incelenmiştir.

Literatürden ve Anadoluray Kadıköy Kartal Metro Projesi'nden verilen örneklerle de gerek TBM tasarımının gerekse de değişen formasyon parametrelerinin bir TBM' in ilerleme miktarlarına olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca kütle kazılabilirliğinde adı geçen ve geçmeyen birçok parametrenin farklı tünel projelerinde etkileri gösterilmiştir (TBM tasarımı, metan gazı vb.).

TBM performansının kestirilmesinde ise kayanın kütle özelliklerini ve TBM'in tasarımını birlikte barındıran arazi penetrasyon indeksi kullanılmıştır. Arazi penetrasyon indeksinin performans tahmini için tercih edilmesinin ana sebebi farklı tünel projelerinde benzer formasyon şartları için farklı operatörlerin kullanım farklılıklarını büyük oranda minimize etmesi ve formasyonun kazılabilirliğine yönelik daha gerçekçi bilgiler verebilmesidir.

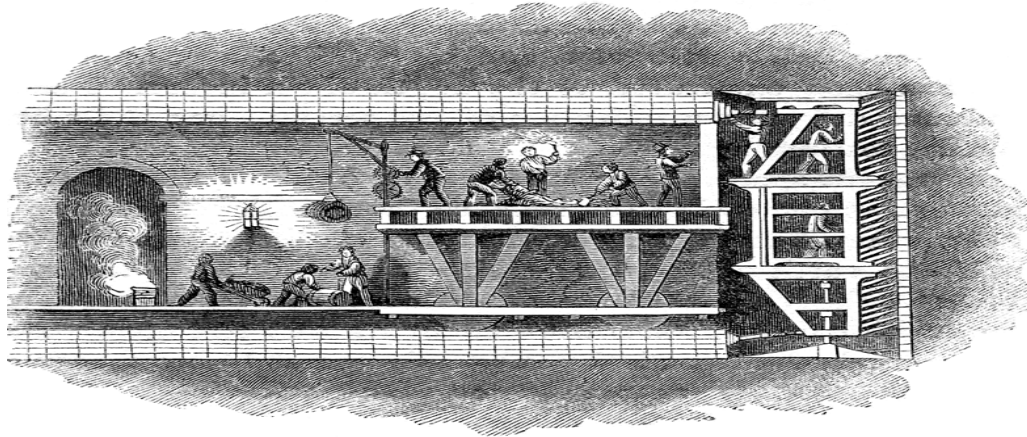
Gerek literatür gerekse de Anadoluray örneklemeleri sayesinde performansa etki eden etkenler daha yakından incelenmiş ve etkileşimleri çok net bir şekilde ortaya konulmuştur. Ayrıca performans tahmininde kullanılan arazi penetrasyon indeksinin (FPI) bu çalışma sonucu bir kez daha benzer formasyon şartları altında farklı tünel projelerinde hemen hemen aynı değerleri aldıkları gösterilmiştir. Buradan elde edilen bulgular ışığında ileriki tünel projelerinde kullanılmak üzere projelendirme aşamasında değişik formasyon senaryoları için gerek TBM tasarımı gerekse de TBM kazı performansına bağlı tünel kazı süreleri kestirilebilir.

2. TBM TANIMI VE ÖZELLİKLERİ

TBM; “Tunnel Boring Machine” Türkçe bir ifadeyle “Tünel Açma Makinesi” kelimelerinin baş harflerinin kısaltmasıdır. TBM’ler genel olarak dairesel kesitli ve çapları 2 ila 15 (m) arasında değişen tünellerde diğer kazı yöntemlerinin gerek güvenli gerekse de hızlı ve ekonomik olmadığı geniş bir jeolojik formasyon aralığında kullanılmaktadır. TBM kazısı basit olarak bir matkabın delme işlemine benzetilebilir. Kesici kafanın formasyona belli bir kuvvet ve hızla bastırılması ile aynı anda döndürülmesi sonucunda kazı işlemi gerçekleşmektedir.

2.1 Tünel Açma Makinelerinin Tarihsel Gelişimi

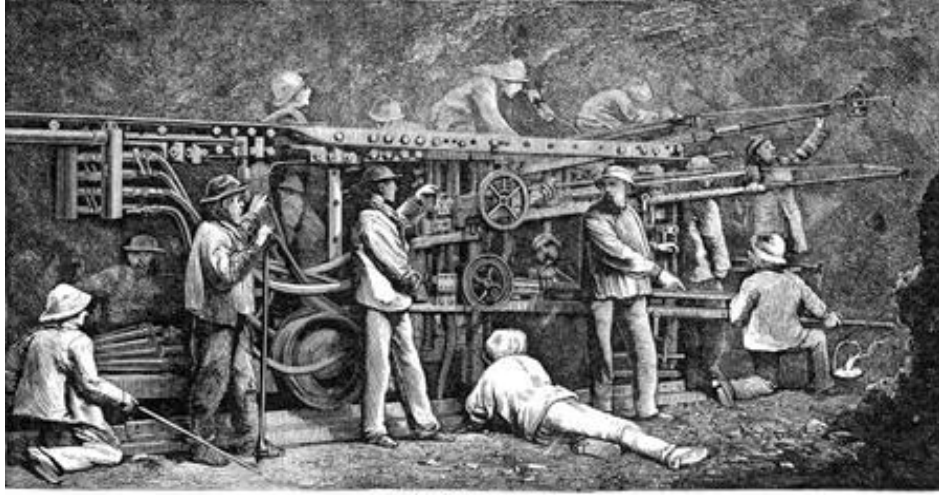
Özellikle 1800’lü yılların başında dünya genelinde endüstride meydana gelen hızlı gelişme ve buna paralel olarak hızla artan nüfus ile beraber kırsaldan şehre gerçekleşen göç nedeniyle şehirlerde gerek ulaşımda gerekse de alt yapı hizmetlerinde birçok tünele ihtiyaç duyulmuştur (Maidl ve diğ., 2008). Bu kapsamda ilk dikkati çeken tünel projesi İngiltere’nin Londra şehrinde Thames nehri altında Rotherhithe ile Wapping arasında dönemin trafik sorununu rahatlatmak amacıyla açılmış olan tünel projesidir (King, 2000). Bu tünel projesi doğrultusunda ilk silindirik kalkanlı tünel kazı tekniğini Mark Isambard Brunel adlı mühendis 1818 yılında tasarlamış ve patentini almıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Mark Isambard Brunel dairesel kesitli tünel tekniği (Url-5).

Ancak bu yöntem mekanize bir kazı tekniği dışında sadece tünel cidarlarının içeriye akmamasını ve içeride çalışan personeli korumak amaçlı olarak tasarlanmıştır. Tünel projesi kazısı esnasında, güzergah boyunca formasyonun yumuşak zemin olması, arının denge durumunun olmaması ve arın su gelirin fazla olması sebepleriyle daha yenilikçi tasarımlara ihtiyaç duyulmuştur (Cornejo, 2001). Bu nedenle ilk tasarımı takiben 1823 yılında gene Mark Isambard Brunel tarafından kendi tasarımı geliştirilmiş ve yenilenmiştir (King, 2000). Takip eden yıllarda en büyük yenilikçi tasarım ise basınçlı havanın arın su gelirin önlenmesi ve arın denge durumunun korunması amacı ile kullanılmasıdır (Cornejo, 2001). Bu doğrultuda ilk olarak 1831 yılında Lord Cochrane patent almıştır (Cornejo, 2001). Bu yöntem ilk olarak M.I. Brunel tarafından Saltash'da yapımına başlanan köprünün temel inşaatında kullanılmıştır (King, 2000). Yöntemin tünelcilikte ilk kullanılması ise 1874 yılında De Witt Haskins tarafından Newyork'ta Hudson nehri altında açılan Antwerp Docks adlı tünel projesidir. Tünel projesi kapsamında arın su gelirini azaltmaya ve arın denge durumunu korumaya yönelik 2,4 (bar) hava basıncında kazı gerçekleştirilmiştir (Cornejo, 2001). Günümüz kapalı mod tünelcilik yöntemlerinin de bu sayede temeli atılmıştır. İleride de TBM tipleri başlığı altında anlatılacağı üzere arın su gelirin yüksek olduğu tünel kazılarında suyun arın içinde kalmasını sağlamak ve böylelikle arında ani basınç kayıplarının yaşanmasının önüne geçmek için kazı esnasında su basıncına eş bir basınçla kesici kafa bölmesine hava basılmaktadır. Kesici kafa bölmesini basınçlandırarak kazı yapabilen TBM' lere kapalı mod TBM'ler denmektedir.

Tünelcilik yöntemleri zamanın teknolojik gelişmelerine ön ayak olduğu gibi mevcut yeniliklerinde iyi bir takipçisi olmuştur. Bu bağlamda ilk buharlı lokomotif 1814 yılında, ilk havalı kırıcı 1844 yılında icat edilmiş ve bu icatların tünelcilik faaliyetlerinde kullanılmasına başlanmıştır. 1849 yılında Couch tarafından ilk olarak buharlı kaya delgi makinesinin patenti alınmıştır (Cornejo, 2001). Takip eden yıllarda kaya delgi makinesi üzerine gelişmeler devam etmiş ve birçok kişi bu konuda patent almıştır. Bunlar arasında dikkati çeken ise 1857 yılında Germain Sommeiller tarafından patenti alınan ve başarı ile Fransa – İtalya arasında Alp sıra dağlarında 12,8 (km) uzunluğa sahip Mont Cenis tünellinde kullanılan tasarımıdır (Şekil 2.2) (King, 2000). Tünelin kazılmasında kullanılan yöntem del patlat yöntemidir.

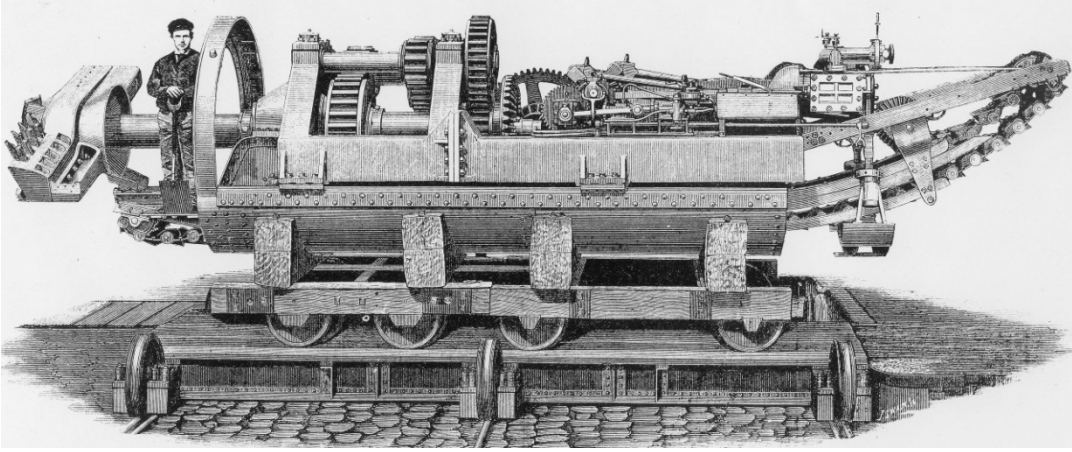


Şekil 2.2 : Germain Sommeiller'in geliştirdiği buhar gücü ile çalışan delgi makinesi (King, 2000).

Delme işlemi, üzerinde birçok havalı delgi matkabı bulunduran bir makine tarafından gerçekleştirmiştir. Bu tasarım öyle başarılı olmuştur ki, tünelin tamamlanması 50 yıl öngörülmesine rağmen geliştirilen mekanize kazı makinesi sayesinde bu süre 10 yıla düşmüştür (King, 2000).

Tünelcilikte bir diğer önemli gelişme ise J.H. Greathead tarafından 1874 yılında arından çıkartılan pasanın bulamaç haline dönüştürülüp hidrolik olarak borular vasıtasıyla uzaklaştırılması düşüncesine aldığı patenttir. Bu da günümüz bulamaç tip makinelerin (slurry) pasa taşıma prensibinin temelini oluşturmaktadır. Aynı yıl yine J.H. Greathead tarafından kalkanlı bir tünel kazı yönteminde ilk basınçlı hava kullanımına yönelik bir patent alınmış ancak hayata geçirilememiştir. Bu gelişmelere paralel olarak arının denge durumunun korunması ve su gelirin azaltılması amacı ile kohezif olmayan zeminlerde bentonit ve su karışımının arına basılması fikri ilk olarak H. Lorenz tarafından yine 1874 yılında önerilmiştir. Bu fikir ancak 1896 yılında H.H. Dlarymple tarafından denenebilmiştir (Cornejo, 2001). Fikir ve uygulaması günümüz bulamaç teknolojisine sahip tünel açma makinelerinin basınç dengelemesi konusunda temel teşkil etmektedir.

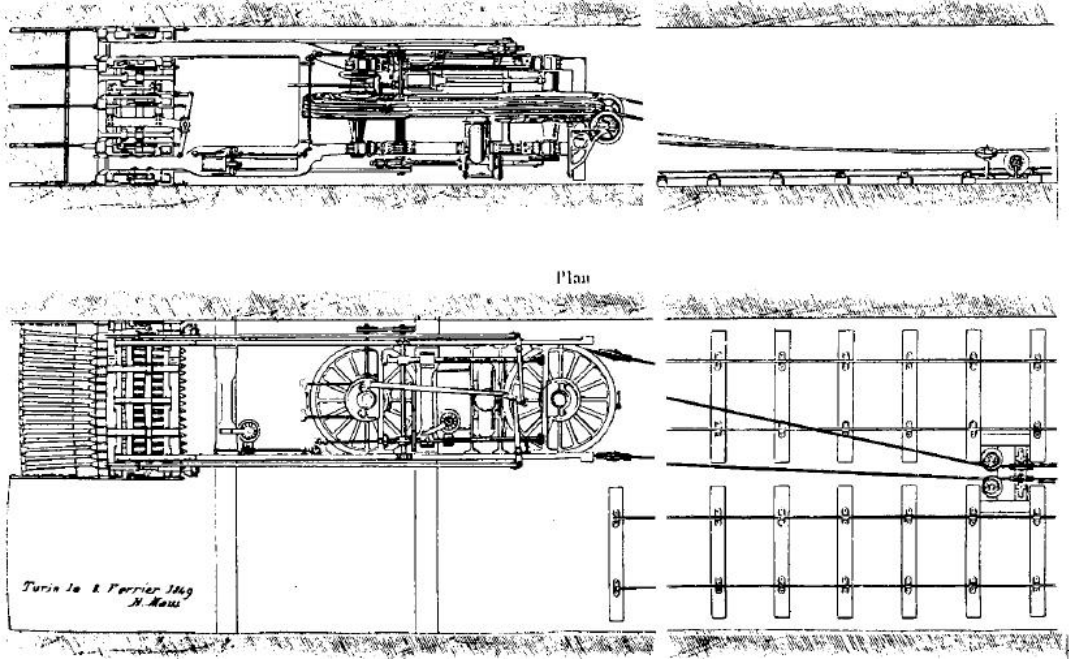
Döner bir kafaya ve tırnak keskilere sahip ilk yumuşak zemin tünel açma makinesi ise 1875 yılında Beaumont tarafından patenti alınmıştır (Maidl ve diğ., 2008). Takip eden yıllarda 2,1 metrelik çapa sahip bu tasarım İngiliz mühendisleri tarafından geliştirilerek “Beaumont/English TBM” adı ile 1880 yılında yeniden patenti alınmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Beaumont / English Tünel Açma Makinesi (Maidl ve diğ., 2008).

Geliştirilen bu son tasarım sayesinde İngiliz kanalı tünel projesinde günlük 24,5 metrelik ilerleme miktarları kaydedilmiştir (Balcı ve diğ., 2007). Zamanın teknolojik imkanları ile günümüzde mevcut onca teknolojik yeniliğe ve bilgi birikimine rağmen kimi tünellerden elde edilen ilerleme miktarlarının çok daha düşük seviyelerde kaldığı göz önüne alındığında bu tasarımın ne denli başarılı olduğu görülmektedir.

Mekanize kazı makineleri üzerine sadece İngiltere’de değil dünyanın farklı ülkelerinde de birçok patent alınmıştır. Bunlar arasında en çok dikkati çeken 1846 yılında Belçikalı mühendis Henri Joseph Maus tarafından Frejus raylı tünel projesi (Mont Cenis Tunnel) için tasarlanan ve inşa edilen “Mountain Slicer” yani “Dağ Dilimleyici” adlı tam cephe kazı makinesi tasarımıdır (Kırbaş, 1995). H.J. Maus delpatlat yönteminde açığa çıkan zehirli gazların havalandırma yoluyla dışarıya atılması ve patlatıcıların yerleştirileceği deliklerin delinmesi için geçen zaman kayıpları ile patlatıcıların taşınması ve yerleştirilmesi esnasında açığa çıkabilecek sorunların önüne geçmek amacıyla günümüzde tünelcilikte kullanılan hidrolik kırıcıların çalışma prensibi ile aynı prensipte bir makine tasarlamıştır (Url-1). Tasarımda yüzden fazla havalı kırıcı mevcut olup bu kırıcıların arına vurması yöntemiyle arından kaya blokları koparmak suretiyle kazı yapılmaktadır (Şekil 2.4). Yukarıda anılan tünel açma makinesi ana tünel projesinden önce 2 yıl süre ile farklı bir güzergah üzerinde denenmiştir (Url-1). Ancak bu deneme süresi boyunca, 12,8 (km) uzunluğunda olan bir tünel projesinde zamanın teknolojisi olan basınçlı havanın taşınması esnasında sızıntılar olması ve bunların büyük enerji kayıplarına yol açmasından ötürü daha güçlü kompresörlere ve daha yüksek işletme maliyetlerine gerek duyulacağı saptanmıştır (Maidl ve diğ., 2008).



Şekil 2.4 : Dağ Dilimleyicisi Adlı Tünel Açma Makinesi, (Maidl ve diğ., 2008).

Maliyetlerin yüksek olması ve 1848 yılında Fransa’da patlak veren devrimin yarattığı ekonomik sıkıntılardan ötürü Henri Joseph Maus’un tünelcilik yöntemi ve geliştirdiği tünel makinesi rafa kaldırılmış ve Mont Cenis tüneli yukarıda da bahsedildiği üzere Germain Sommeillers tarafından geliştirilen delgi makinesi tarafından del patlat yöntemi kullanılarak açılmıştır (Url-2).

Diğer bir dikkat çeken tünel açma makinesi ise “Wilson’s Patented Stone-Cutting Machine” yani “Wilson patentli kaya kesme makinesi” adıyla patenti alınmış tasarımıdır. Bu tünel açma makinesi 1851 yılında Hoosac tünel projesi için Amerika’lı mühendis Charles Wilson tarafından geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Balcı ve diğ., 2007). Bu tasarımın önemi bilinen ilk tam cephe kaya formasyonlar için geliştirilmiş ve döner bir kesici kafaya sahip tünel açma makinesi olmasıdır (Maidl, 2008). Makinenin tünelin 7,64 kilometre uzunluğundaki kısmının kazısında kullanılması planlanırken maalesef sadece 3 metrelik kısmında kullanılabilmiş ve ardından bozulmuştur (Çınar ve diğ., 2002).

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 çok sonraları rastlanmaktadır. Bu bağlamda günümüzde kullanılmakta olan TBM’ lere benzer ilk TBM 1952 yılında Robbins firması tarafından 7,85 metre çapta ve şeyl formasyonda kazı yapabilmesi için üretilmiştir.

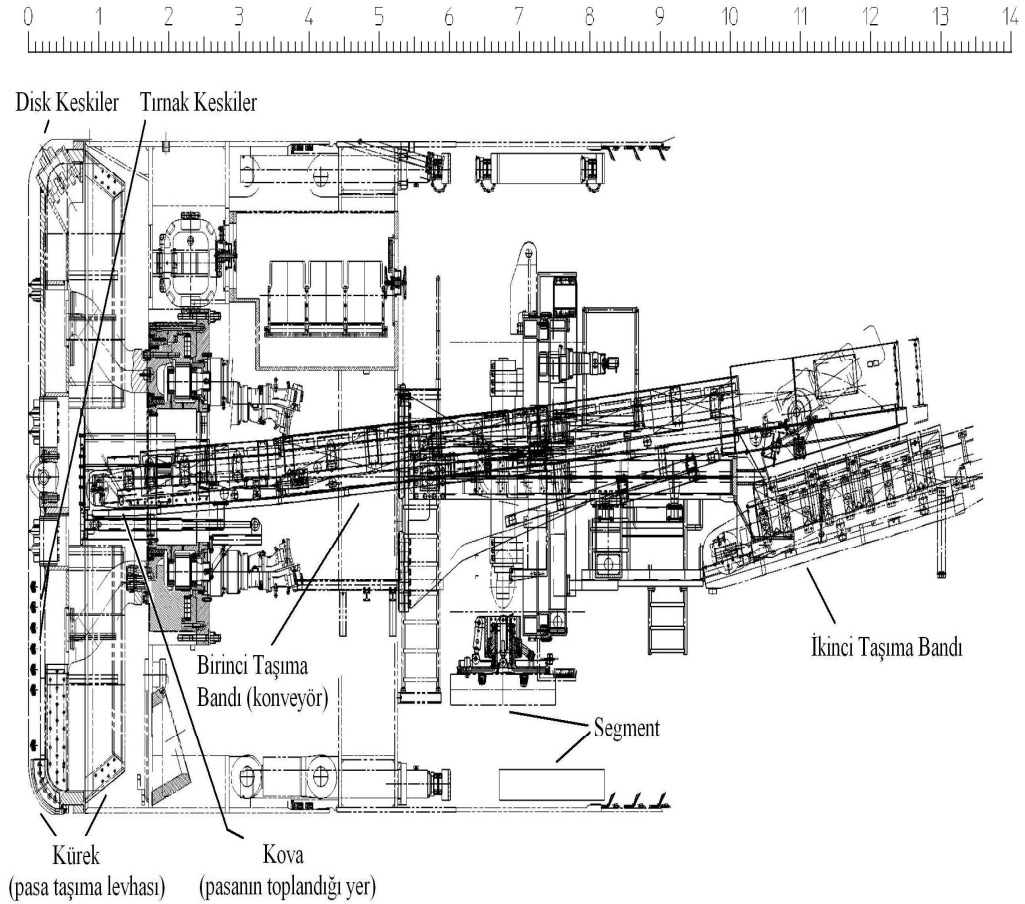
Bu TBM tasarımımda günümüzde de tek eksenli basınç dayanımı düşük kaya formasyon kazılarında kullanılan tırnak keskiiler kullanılmıştır. Takip eden yıllarda TBM'lerin tek eksenli basınç dayanımı yüksek ve sert kaya formasyonlarda da kullanılabilmesi için çalışmalar devam etmiştir. 1956 yılında yine Robbins firması tarafından Kanada'da Humber atık su tünel projesinde kullanılmak üzere kesici disklere sahip 3,3 metre çapında ilk sağlam kaya tünel makinesi tasarlanmış ve kullanılmıştır. Bu tasarımda ilk başta tırnak keskiiler ile beraber disk keskiiler de kullanılmıştır. Ancak tünel güzergahı boyunca tırnak keskiilerin sık sık değiştirilmesi ve bu değişimlerin makine yararlanma oranlarını düşürmesinden ötürü tırnak keskiiler tamamen disk keskiiler ile değiştirilmiştir (Balcı ve diğ., 2007).

Takip eden on yıllarda TBM'lerde en önemli gelişme ise hiç kuşkusuz bilgisayar sistemlerinin mevcut mekanik sistemlerle bütünleştirilmesi olmuştur. Bilgisayar sistemlerinin hali hazırda mekanik sistemlerle bütünleştirilmesinden evvel tünel açma makinesinde (TBM) mevcut bütün valfların ve göstergelerin hepsinin istenilen konumda ve istenilen şekilde düzgün çalışıp çalışmadığının manüel olarak kontrol edilmesi gerekmekte idi. Bu durum yaşanan arızaların tespitini ve olası sebepleri hakkında bilgi sahibi olmayı zorlaştırmaktadır. Bununla beraber gerek tünel açma makinesinin kazı işleminin gerçekleştirebilmesi gerekse de yaşanacak olası arızalara hızlı bir şekilde müdahale edilebilmesi için çok daha kalifiye iş gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak günümüzde bilgisayar sistemlerinin mekanik sistemlerle bütünleştirilmesi sayesinde tek bir kontrol odasından tek bir operatörün makine üzerinde mevcut bütün dijital algılayıcıları, elektronik valf gruplarını ve kapalı devre kamera sistemlerini takip etmesi mümkün hale gelmiştir. Bu noktada onlarca sensörden gelen sinyallerin işlenmesini ve gerek arıza halinde gerekse de istenildiği takdirde kontrol monitörüne yansıtılmasını sağlayan, bir nevi kendi kendine düşünebilen yazılımların olması çok büyük önem taşımaktadır.

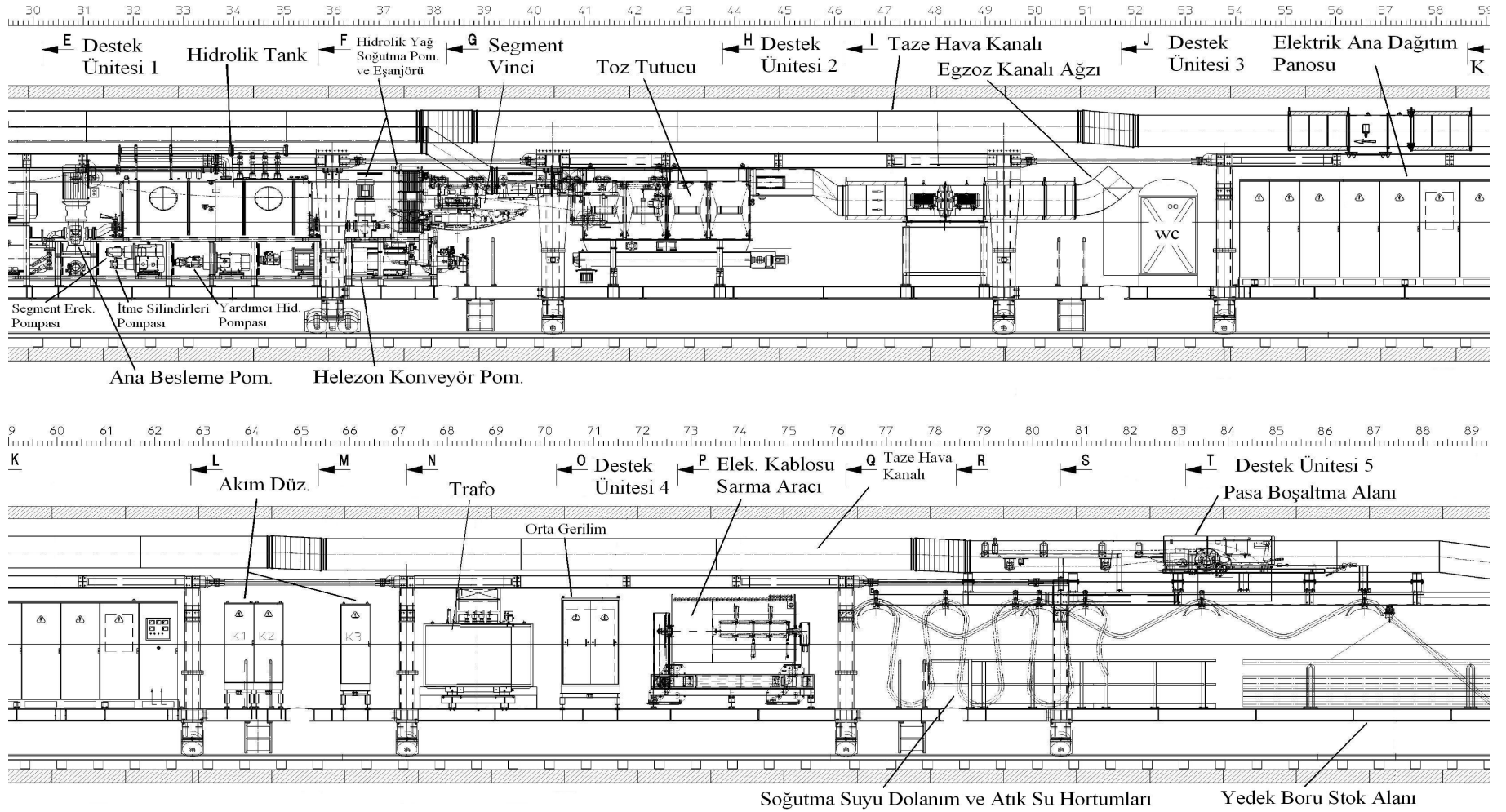
Makine üreticisi tarafından önceden girilmiş sınır değerler dışında herhangi bir sensörün okuma yapması halinde kendi kendine düşünebilen yazılımlar operatörü uyarmakta ve arızanın nerede olduğunu ve hatta muhtemel sebebini söyleyebilmektedirler. Bu sayede arızanın tespitinde ve giderilmesinde büyük zaman ekonomisi sağlanmaktadır. Bu bağlamda TBM'e uygulanan teknolojik yeniliklerin makine faydalanma oranlarının dolaylı olarak artmasını sağladığı söylenebilir.

2.2 TBM' i Oluşturan Bölümler

Genel olarak TBM'ler üç ana kısımdan oluşmaktadırlar. Bunlar; geçilecek jeolojik formasyona göre tasarlanmış ve kazı işlemini gerçekleştirecek olan kesici kafa, bu kesici kafanın dönmesini ve aynı zamanda ilerlemesini sağlayan güç nakil üniteleri ve diğer yardımcı donanımların bulunduğu destek üniteleridir (Şekil 2.5 ve Şekil 2.6). Her bir kısmın tasarımı ayrı ayrı çok büyük öneme sahiptir. Basit bir örnek vermek gerekirse kesici kafanın tünel güzergahına uygun tasarlanmasına rağmen güç nakil ünitelerinde yaşanacak bir tasarım hatası makinenin istenilen kesme derinliğine (penetrasyona) ulaşamamasına ve hatta bloke olmasına neden olabilmektedir. Kullanılacağı formasyona, makine çapına ve özellikle makine tipine bağlı olarak TBM'i oluşturan bu kısımlar çok büyük değişikliklere uğrayabilmektedirler. Bu değişikliklerden başlıcaları kesici kafa tasarımı ve pasanın kesici kafa bölmesinden alınmasında kullanılan yöntemdir. Bu değişikliklere ait detaylı bilgi ilerleyen bölümlerde anlatılmaktadır.



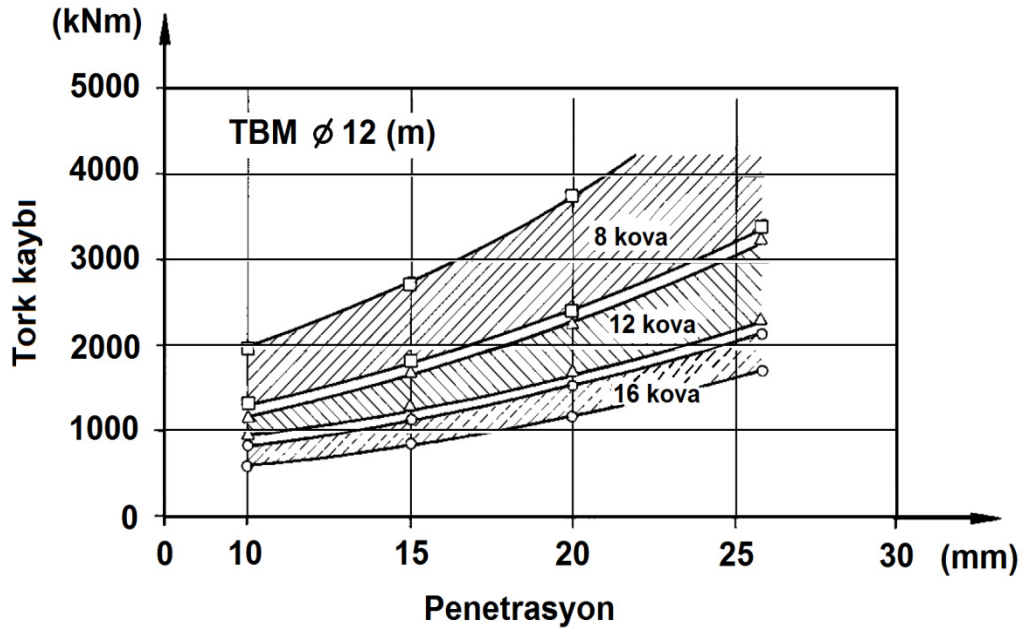
Şekil 2.5 : Açık modda çalışan bir TBM' in kesit görünüşü (Maidl ve diğ., 2008).



Şekil 2.6 : TBM' in destek ünitelerinin kesit görünüşü (Maidl ve diğ., 2008).

2.2.1 Kesici kafa

Gerek kaya gerekse de zemin formasyonların kazıları esnasında en düşük enerji sarfıyatı ile izin verilen ebatta kontrollü bir şekilde homojen ve sürekli pasa akışının sağlanması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda tünel kazısının gerçekleştirilebilmesi için en önemli parametre kesici kafa tasarımıdır. Kesici kafa tasarımı tünel kazısı sırasında TBM' in geçeceği formasyona bağlı olarak üretici firmaların geçmiş tecrübelerinden yararlanılarak yapılmaktadır. Kesici kafa tasarımı içinde kafanın açıklık oranı, açıklıkların geometrileri ve bu açıklıkların kesici kafadaki dağılımları ile kesici kafada kullanılacak olan disk ve/veya tırnak keskilerin boyutları, sayıları ve kesici kafadaki dağılımları yer almaktadır. Özellikle kesici kafa açıklıkları TBM'in güç ihtiyacını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Nitekim kullanılacak farklı açıklık oranlarında sağlam kaya TBM'lerinde pasa, kesici kafa ile arın arasına sıkışarak disk keskilerin arına istenilen oranda gücü aktaramamasına ve ciddi tork kayıplarının yaşanmasına neden olabilmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Penetrasyon miktarına bağlı olarak 12 (m) çaplı bir TBM' de farklı kesici kafa tasarımlarında oluşan tork kayıpları (Maidl ve diğ., 2008).

Ayrıca kazı esnasında açığa çıkan pasa ne kadar çabuk kazı ortamından uzaklaştırılrsa gerek kesici disklerde gerekse de kesici kafanın ana yapısında o denli az aşınma ve bu aşınmaya bağlı daha az hasar oluşmaktadır.

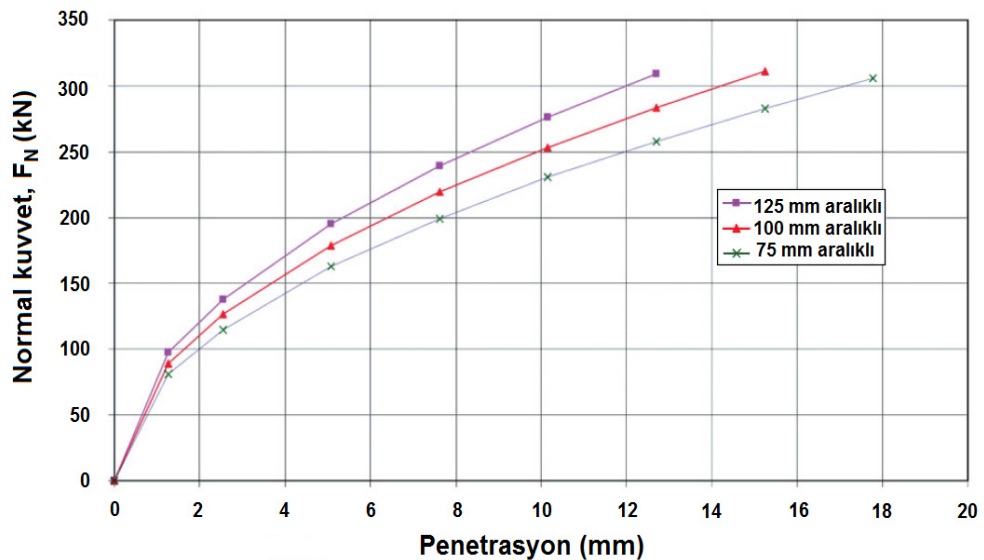
Oluşan pasa kesici kafada (*)kova adı verilen bu boşluklardan sadece belli boyutların altında kalabildiği takdirde girebilmektedir. Kapalı modda çalışan başka bir anlatımla zemin veya arazi basıncının mevcut olduğu ayrışmış kırıklı çatlaklı kaya formasyonlarda kullanılan TBM'lerde ise kesici kafa tasarımı kazı için gerekli olan enerji miktarı göz önünde tutulduğunda daha büyük bir öneme sahiptir.

Kesici kafa açıklık oranının dışında tasarımda bir diğer önemli husus açıklıkların geometrileridir. Kaya formasyonlar için geçilecek olan formasyonun çatlak sistemine bağlı olarak kazı esnasında oluşabilecek parçaların boyutları istatistiksel ve benzetim çalışmaları sonucu kestirilebilmektedir. Sağlam kaya TBM'lerinde açıklıkların boyutları çok küçük tutulmaktadır. Bunun nedeni kazı esnasında kopabilecek bir kaya bloğunun bir kısmının formasyon içinde kalıp diğer kısmının kesici kafadaki açıklıktan girmesi sonucu kafayı bloke edebilmesi hatta kırılmayıp TBM 'in uyguladığı yüksek tork sonucu kesici kafanın kendi ekseninde etrafında döndürebilmesidir. Ayrıca büyük ebatlı kaya blokları kesici kafanın ortasında ana kovayı tıkayabilmekte ve burada bulunan ilk taşıma bandını yırtabilmektedir. Bununla beraber Şekil 2.5'den de görüldüğü üzere ikinci taşıma bandının tasarımı nedeniyle ortamdan uzaklaştırılamayıp gerisin geriye segment erektörünün altına düşebilmekte veya ikinci taşıma bandında ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenlerle kesici kafadaki açıklıkların geometrileri küçük tutularak kopan parçaların arın ile kesici kafa arasında kalması ve ufalanması sağlanmaktadır. Benzer bir durum bulamaç tip (slurry) makineler için de söz konusudur. Özellikle kıyı kesimlerinde açılacak olan tünel projelerinde formasyonun oluşumuna bağlı olarak kazı esnasında büyük boyutta çakıl taşları (boulder) ile karşılaşılabilir. Bu nedenle bulamaç tip TBM'lerde kesici kafanın hemen altında basınçlı pasanın bulunduğu bölümde hidrolik bir kaya kırıcı mevcuttur. Bu sayede kesici kafa tasarımında hidrolik kırıcının kapasitesinin el verdiği ölçüde büyük ebatlarda açıklık geometrilerine izin verilebilmektedir.

Açıklık oranlarının doğru belirlenememesi ve pasanın arından istenilen hızda alınamaması sonucunda tork kayıplarına bağlı olarak birim kazı hacmi başına tüketilen enerji miktarı da ciddi oranda artma eğilimi göstermektedir.

(*)Kimi tünel projelerinde adı geçen boşluklar kova yerine kürek olarak adlandırılmaktadır.

Sağlam kaya formasyonlarda çalışacak olan TBM'lerde kesici kafa tasarımında bir diğer önemli büyüklük ise disk keski arası mesafedir. Farklı penetrasyon miktarlarında optimum güç ile en verimli kazının gerçekleştirilebilmesi için geçilecek olan formasyonun mekanik özelliklerine bağlı olarak bir disk keski aralığının belirlenmesi gerekmektedir. Karşılaşılabilecek farklı basınç dayanımına sahip formasyonlarda da başarı ile kazı işleminin yapılabilmesi için disk keski arası mesafenin doğru hesaplanması gerekmektedir. Keski arası mesafe arttıkça sabit basınç dayanımına sahip bir formasyonda birim penetrasyon için uygulanan normal kuvvetin artırılması gerekmektedir (Şekil 2.8). Bu nedenle yanlış hesaplanan keski arası mesafelerde veyahut kazı esnasında çok yüksek basınç dayanımlarına sahip kayalar (dayklarda) ile karşılaşılması durumlarında disk keski formasyonu kazamayacaklardır. Bu durum da aşırı disk tüketimine veya çok düşük penetrasyon miktarlarıyla (2 - 5 mm/dev) kazı yapılmasına ve bu etkilere bağlı olarak da proje maliyetlerinin çok hızlı bir şekilde artmasına neden olmaktadır. TBM'lerde genel olarak 65 (mm) - 95 (mm) aralığında keski arası mesafe kullanılmaktadır. Ancak keski arası mesafe kısaldıkça keski sayısının artmasına bağlı olarak artan maliyetler (değişim,bakım), birim kazı başına tüketilen enerjinin artması nedeniyle günümüzde gelişen disk keski yatak kapasiteleri sayesinde 80 (mm) - 95 (mm) keski arası mesafe tercih edilmektedir (Maidl ve diğ., 2008).



Kabuller : $\sigma_{lab} = 150$ (MPa), $\sigma_c = 15$ (MPa), Disk keski çapı = 431 (mm), Uç kalınlığı = 12,5 (mm)

Şekil 2.8 : CSM modeliyle mekanik büyüklükleri verilen bir kaya numunesi için değişen penetrasyon miktarları altında farklı keski arası mesafenin normal kuvvete etkisi (Rostami, 2008).

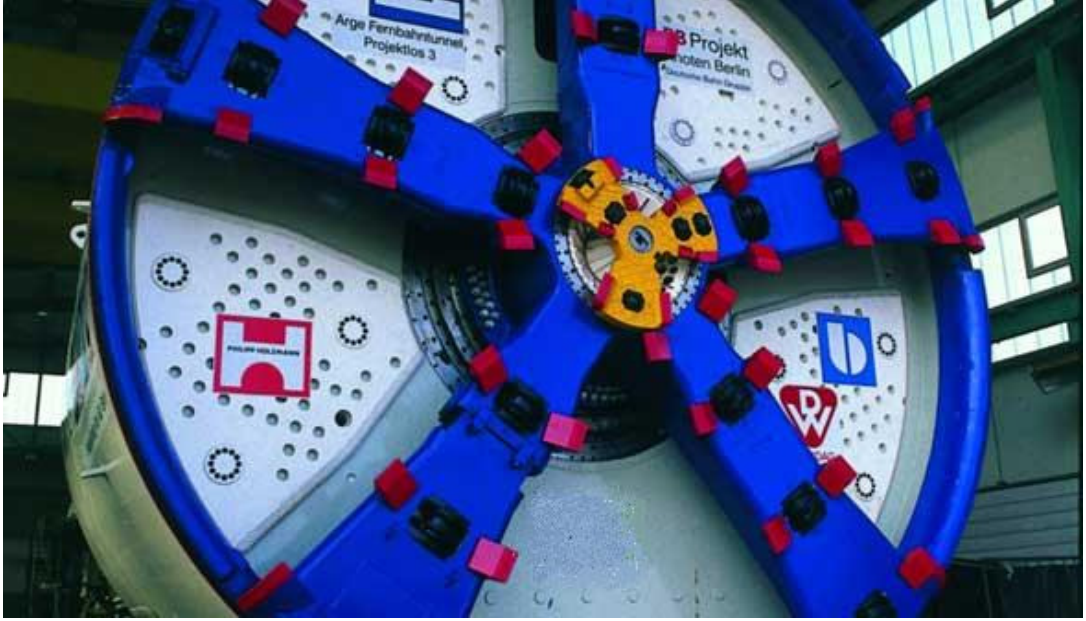
Sağlam kaya formasyonların kazısında kullanılacak olan TBM'lerde kesici kafada sadece disk keskiler kullanılmaktadır. Bunun nedeni tırnak keskilerin yüksek basınç dayanımlarına sahip formasyonlarda çok çabuk parçalanıp iş görememesi sonucunda sık sık değiştirilme gereksinimleridir (Resim 2.9).



Şekil 2.9 : Tipik bir sağlam kaya formasyonlar için tasarlanmış kesici kafa (Url-3).

Zemin formasyonlarda kazı yapacak olan TBM'lerde ise tırnak keskiler tercih edilmektedir. Bilindiği üzere disk keskilerin kendi eksenleri etrafında dönebilmeleri ve kazı esnasında çevresel olarak eşit bir aşınma sergileyebilmeleri için arına uygulanan penetrasyona bağlı olarak belli bir tepki kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tepki kuvveti penetrasyon arttıkça disk keskinin formasyonla olan temas alanının artması nedeniyle artar. Ancak özellikle zemin formasyonlarda ve bununla beraber ayrışma derecesi yüksek kaya formasyonlarda bu tepki kuvvetinin sağlanamaması sonucu disk keski kendi eksenini etrafında dönmeyemekte ve arına basan kısmı arın içine gömülmek suretiyle heterojen bir şekilde tek taraflı olarak aşmaktadır. Bu nedenle zemin formasyonlarda kazı yapacak olan TBM'lerde daha çok tırnak keskiler tercih edilmektedir.

Tünel projesi güzergahı boyunca hem kaya hem de zemin formasyonların geçilmesi durumunun da ise tırnak keskiler ile beraber disk keskiler de kullanılmaktadır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : Tipik zemin formasyonlar için tasarlanmış bir kesici kafa (Url-4).

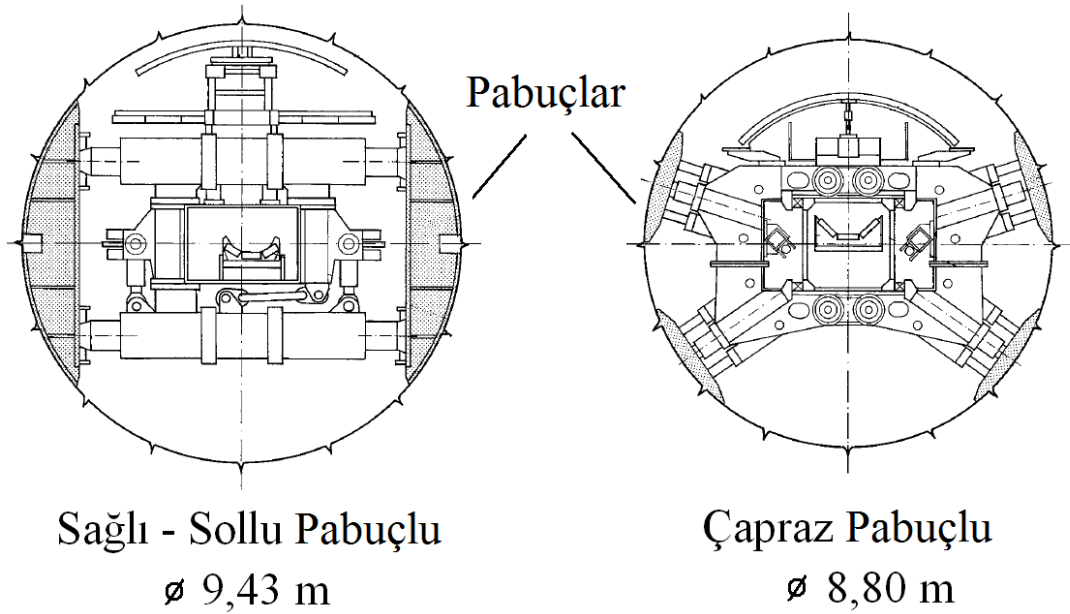
2.2.2 Güç nakil ünitesi

TBM kesici kafası kazı esnasında dönerek ilerlemektedir. Kesici kafanın hem dönmesini hem de ilerlemesini güç nakil üniteleri sağlamaktadır. TBM’lerde en büyük enerji sarfıyatı kesici kafanın dönmesini sağlayan motorlar tarafından tüketilmektedir. Kesici kafanın dönmesini sağlamak üzere kalkanlı ve kalkansız tip TBM’lerde kesici kafanın hemen arkasında elektrik veya hidrolik güç ile çalışan motorlar mevcuttur (Şekil 2.5). Elektik gücü ile çalışan motorlar genel olarak sağlam kaya formasyonların kazılarında veya özellikle düşük tork ihtiyaçları (kum formasyonlar) olduğunda tercih edilmektedirler.

Hidrolik motorların çalışması için gerekli olan güç hidroliğin istenilen debide ve basınçta pompalanması yardımıyla temin edilmektedir. İstenilen basınçta ve debide hidroliği sağlamak üzere pompa grubu, kalkanlı ve kalkansız tip TBM’lerde genel olarak kesici kafayı takiben ilk destek ünitesinde yer almaktadır (Şekil 2.6). Bu sayede borularda yüksek basınç ve debiden kaynaklı oluşacak büyük sürtünme kayıplarının önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Elektrik motorlarının aksine hidrolik motorlar yüksek tork ihtiyacı olan zemin (kil ve/veya silt) veya kırıklı çatlaklı kaya formasyonların kazılarında kullanılmaktadırlar. Ancak hidrolik sistemlerin verimleri hidroliğin basınçlandırılması, borular vasıtasıyla basınçlı bir şekilde kesici kafadaki hidrolik motorlara aktarılması ve hidrolik motorların çalışması sırasında yaşanan kayıplar nedeniyle elektrik motorlarına oranla daha düşük kalmaktadır.

TBM'in istenilen tork ve devirde dönmesini sağlamak üzere gerekli güç basit bir ifade ile formasyonun mekanik özelliğine, makine çapına ve makine üreticisinin geçmiş tecrübelerinden elde ettiği çıkarımlara bağlı olarak değişmektedir. Bu bağlamda aynı formasyon için iki farklı TBM üreticinin öngördükleri kesici kafa güçleri büyük farklılık gösterebilmektedir.

TBM'lerde kazının istenilen hızda yapılabilmesini sağlamak için kesici kafayı döndüren motorlar kadar kesici kafanın ilerlemesini sağlayan itme düzenekleri de büyük önem taşımaktadır. TBM'lerin ilerletilmesini sağlamak üzere iki farklı yöntem mevcuttur. İlk yöntem "Gripper" yani "Kıskaç/Pabuç" yöntemidir. Pabuç yöntemi ile kesici kafanın arkasında yer alan tek veya çift sıra halinde sağlı sollu iki veya çapraz dört hidrolik pistonun önlerinde bulunan pabuçların yardımıyla açılan tünel cidarlarına basılması sonucu ilerleme sağlanmaktadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 : Farklı pabuç tipleri (Maidl ve diğ., 2008).

İkinci yöntemde ise kalkanlı tip TBM'lerde kalkan içine döşenen segment halkalarına bir dizi hidrolik pistonun basması yardımıyla ilerleme yapılmaktadır. Her iki yöntemde de ilerleme genel olarak kesici kafayı takiben ilk destek ünitesinde yer alan hidrolik pompalar yardımıyla belli bir debide ve basınçta basılan hidroliğin pistonları hareket ettirmesiyle sağlanmaktadır (Şekil 2.6)

İtme silindirleri için gerekli olan gücün kesici kafanın istenilen torkta ve devirde dönmesini sağlamak üzere kullanılan güce oranla çok küçük olması nedeniyle TBM tasarımıda büyük bir öneme sahip değildir. Ancak itme kuvvetlerinin çok büyük alınması itme silindirlerinin kesitlerinin çok fazla artmasına neden olmaktadır. Bu da özellikle TBM içinde hali hazırda yeterli alanların olmaması nedeniyle çalışma emniyeti ile alakalı bir takım sıkıntılar yaşanmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle TBM içinde mevcut alanların gözetilmesi ve gerek segment gerekse de tünel cidarlarının taşıma kapasitelerinin bilinmesi itme silindirlerinin tasarımında büyük önem taşımaktadır.

2.2.3 Destek üniteleri

Yardımcı donanımları taşıyan birimlere destek üniteleri (Gantry) denilmektedir. Destek üniteleri genel olarak dört veya beş ana parçadan oluşmakta ve toplam uzunlukları 70 ila 150 metre arasında değişmektedir. Bu üniteler; elektrik dağıtım donanımlarından, enjeksiyon ve gres pompalarından, kompresörlerden, soğutma ve filtre ekipmanlarından ayrıca kontrol kabininden oluşmaktadır (Şekil 2.6).

Kalkanlı tip TBM’lerde kalkan ile tünel cidarı arasında kalan boşluğun doldurulması amacı ile arazi basıncının üstünde bir basınçta enjeksiyon basılması gerekmektedir. Bu sayede sıkı tünel projelerinde yüzeyde oluşabilecek oturmaların önüne geçilebilmektedir. Bu bağlamda genellikle kesici kafaya yakın olan destek ünitelerinden birinde enjeksiyon pompası mevcuttur.

Kesici kafanın hidrolik güç ile çalıştırılması durumunda hidrolik yağ yüksek basınçta ve debide kullanılmasından kaynaklı olarak ısınmaktadır. Isınan yağın viskozitesinin düşmesi yağın yağlama özelliğini yitirmesine ve piston keçelerinden sızmasına neden olmaktadır. Piston keçelerinde yaşanan sızıntılar sonucunda pistonlar istenilen itme kuvvetlerine çıkamamaktadırlar. Bu bağlamda genel olarak ilk destek ünitesinde zaman içinde kirlenmiş ve ısınmış yağın hem temizlenmesi hem de soğutulması amacıyla filtre donanımları ile ısı değiştiricileri mevcuttur.

Destek ünitelerinde bulunan bir diğer önemli donanım ise gres pompalarıdır. Gres özellikle ana dişli yatağına pasanın girmesini engellemek ve dişlilerin yağlanması sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Gres ayrıca kalkanlı tip TBM’lerde kalkan ile segment arasında su ve enjeksiyon geçirimsizliğini sağlayarak kalkan içinde temiz ve güvenli bir çalışma alanı oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır.

TBM içinde gerek kaya çivilerini gerekse de segment cıvalarını torklamak, gres pompalarını çalıştırmak ve enjeksiyon borularını temizlemek amacıyla basınçlı hava kullanılmaktadır. Basınçlı hava ayrıca arın dengesinin olmadığı kapalı mod kazıları sırasında arın su gelirini azaltmak ve kesici kafada yapılacak olan bakım çalışmaları esnasında arın dengesinin korunmaya devam ettirilmesini sağlamak amacıyla da kullanılmaktadır. Basınçlı hava destek ünitelerinde bulunan bir veya birden çok kompresör yardımıyla üretilmektedir.

Kaya formasyonlarda açık yöntemle kazı esnasında ve kazı sonrası oluşan pasanın gerek konveyör bant yardımıyla taşınması gerekse de konveyör banttan vagonlara boşaltılması esnasında büyük miktarda toz açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan tozun çalışma emniyetini tehdit etmemesi amacıyla ortamdan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bunun için de destek ünitelerinin birinde toz tutucunun bulunması ve bakımının düzenli olarak yapılması zorunludur.

Gerek kesici kafada gerekse de TBM'in belirli kısımlarında gaz sensörleri mevcuttur. Bu sensör yardımıyla CO₂, CO, H₂S ve CH₄ gazlarının takibi ve gerekli havalandırmanın yapılıp yapılmadığının da kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Kazı esnasında makinede mevcut her türlü sensörden gelen bilginin izlenebilmesi ve kazının doğru rotada istenilen hızda gerçekleşebilmesi amacıyla bütün verilerin işlendiği ve operatör tarafından takip edildiği bir odaya ihtiyaç duyulmaktadır. Operatörün kazı işlemini yönettiği kontrol odası genel olarak kesici kafayı takiben ilk destek ünitesinde yer almaktadır.

2.3 TBM Tipleri

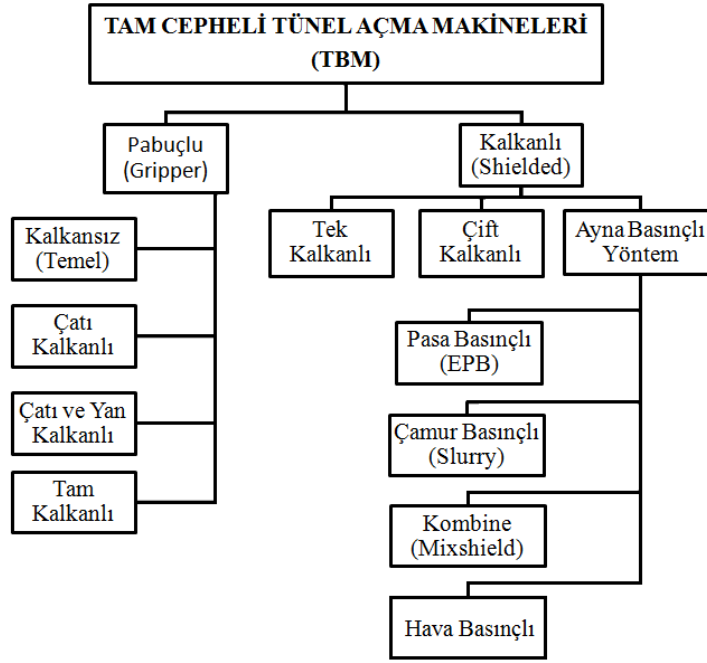
Yukarıda da bahsedildiği üzere TBM kazısı basit olarak bir matkabın delme işlemine benzetilebilir. Kazı işlemi TBM'in kesici kafasının aynı anda dönmesi ve ilerlemesi yardımıyla yapılmaktadır. Kesici kafada mevcut disk ve/veya tırnak keskinliklerinin formasyona istenilen miktarlarda nüfus etmesi sonucu arından belli büyüklüklerde kaya veya zemin parçaları kopmaktadır. Kazı esnasında kopan bu parçaların bütününe genel bir ifade ile pasa denilmektedir. Pasanın kesici kafada bulunan açıklıklardan geçerek kazı bölmesine girmesi ve kazı bölmesinden boşaltılacağı alana taşınması sonucunda ilerleme sağlanmaktadır.

Bahsedilen kazı işleminin farklı formasyon mekanik özelliklerinde güvenli ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için farklı tipte TBM'lere ihtiyaç duyulmaktadır. TBM'lerde genel kazı mantığının aynı olmasına karşın ilerleme ve kazı yöntemleri makine tipine göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle literatürde çok çeşitli sınıflandırma yöntemleri mevcuttur. TBM sınıflandırmasına ait daha detaylı bilgi Balcı ve diğ. (2009) çalışmasından takip edilebilir.

TBM sınıflandırmasına esas olan hususlar şu şekilde sıralanabilir:

- Kazı esnasında ilerleme işleminin pabuçların (gripper) tünel cidarlarına basması veya itme silindirlerinin segment halkalarına basması yöntemine göre,
- Kazı esnasında açığa çıkan pasanın kazı bölmesinden uzaklaştırılması yöntemine ve arının denge durumuna göre basınçsız (open) veya ayna basınçlı (closed),
- TBM'de kesici kafası ve diğer kısımlarında kullanılan bir koruyucu zırhın olup olmama durumuna göre (kalkanlı - shielded-, kalkansız),
- Kesici kafanın tasarımında kullanılan keski tiplerine göre sadece disk keski ise sert (hard), sadece tırnak keski ise yumuşak (soft) veya hem tırnak hem disk keski kombine kesici kafa (mixfaced) gibi isimlendirilmektedir.

Bir tünel güzergahı üzerinde çok çeşitli formasyonlar ile karşılaşılabilmesinden ve günümüzde TBM üreticilerinin çok çeşitli modifikasyonlar yaparak TBM çeşitliliğini arttırmasından ötürü TBM'leri sınıflandırmak veya farklı isimler altında tek bir çatıda toplamak çok zor olmaktadır. Nitekim bunun en yakın örneği ülkemizde Anadoluray Kadıköy-Kartal Metro Projesinde kullanılan iki adet Herrenknecht marka TBM'lerdir. Adı geçen TBM'ler kesici kafasında hem tırnak kesikleri hem de disk kesikleri barındırmasının yanı sıra tünel kazısına arazi basınçsız (open) olarak başlamış ve formasyonun kaya kütle kalitelerinin (RMR) düşmesini takiben bir takım ilave donanımların kesici kafaya montajı sonrasında pasa basınçlı (EPB) kazı moduna geçmiştir. Bu ve buna benzer birçok örnek TBM'lerin sınıflandırmasına yönelik zorlukları göz önüne koymaktadır. Bu çalışmada gerek anlatım ekonomisi sağlamak gerekse de sade ve akışı bir bilgi vermek amacıyla tam cepheli tünel açma makinelerinin sınıflandırılmasına yönelik olarak Maidl ve diğ. (2008) çalışmasına ait sınıflandırma yöntemi temel alınmış ve alt başlıklar bu sisteme göre hazırlanmıştır (Şekil 2.12). Bu bağlamda TBM'ler pabuç (gripper) ve kalkanlı (shielded) tip olarak iki ana başlıkta anlatılacaktır.



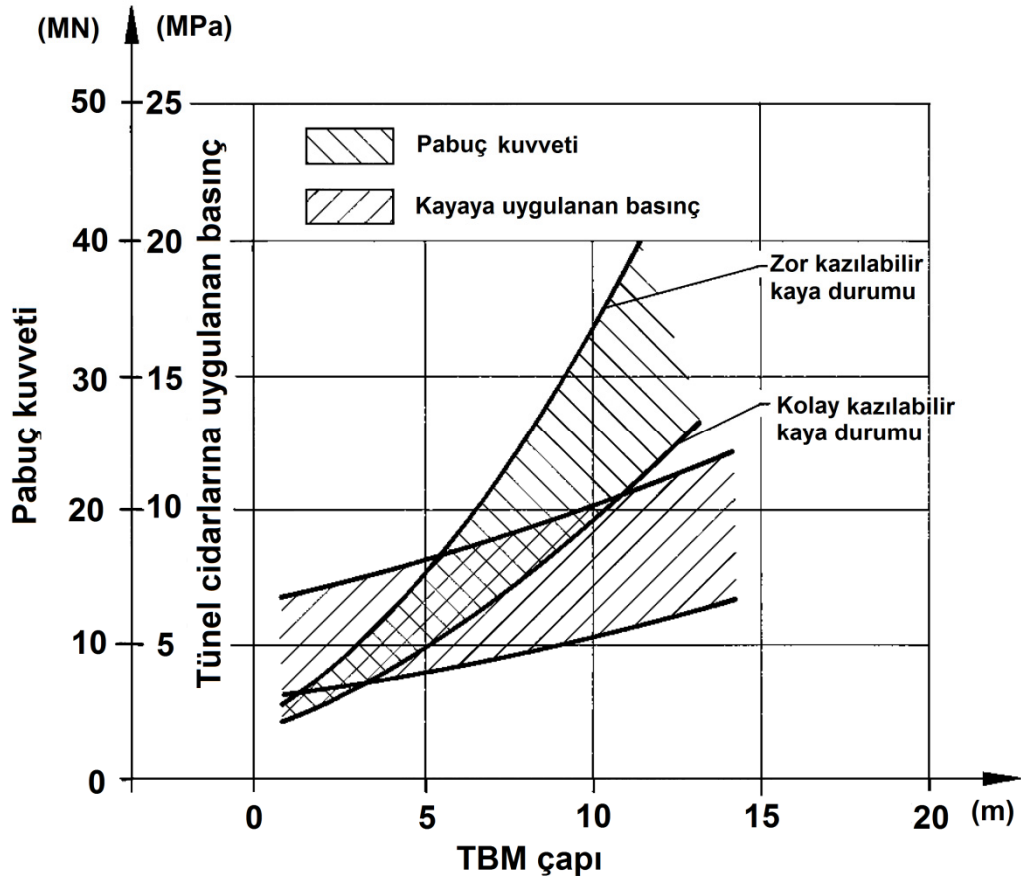
Şekil 2.12 : TBM'lerin sınıflandırılması (Maidl, 2008'den değiştirilerek).

Pabuçlu tip TBM'ler arının ve tünel cidarlarının kendi kendini taşıdığı ve pabuçlar yardımıyla ilerlemenin sağlanabileceği oranda yerinde basınç dayanımına sahip olan kaya formasyonlarda kullanılmaktadırlar. Kalkanlı tip TBM'ler ise gerek çalışanların ve makine aksamının kalın bir çelik kalkan içinde korunaklı bir alanda kazı işlemini gerçekleştirmesi gerekse de nihai taşıma sistemi olan kalın segment halkalarının tünelin içini tünel cidarlarının olası deplasman hareketlerinden korunması sayesinde çok geniş bir formasyon aralığında kullanılabilmektedirler. Genel bir yaklaşım olması açısından kalkanlı tip TBM'ler zemin ve kendi kendini taşıyamayan kırıklı çatlaklı kaya formasyonların kazılarında tercih edilmektedirler.

2.3.1 Pabuçlu tip (Gripper)

Pabuçlu tip (Gripper) TBM'ler basit bir ifade ile arının ve tünel cidarlarının kazı esnasında ve sonrasında kendini belli bir süre taşıyabildiği kaya formasyonlarda kullanılmaktadırlar. Burada dikkat edilmesi gereken husus tünel cidarlarının yerinde basınç dayanımının makinenin ağırlığı ile formasyonun kazısı için gerekli olan kesme kuvvetlerinin toplamını taşıyabilecek kapasitede olmasıdır. Bu yerinde basınç dayanımı kestirimci bir yaklaşımla literatürde minimum 4 - 5 (MPa) olarak verilmektedir (Maidl ve diğ., 2008). Değişen TBM çaplarında pabuçların tünel cidarlarına uyguladıkları kuvvet ve pabuçların altında oluşan basınç değişimi Şekil 2.13 verilmiştir.

Pabuçlu tip TBM’lerde tünel cidarlarının hareketini sınırlamak ve taşıma sistemi oluşturmak amacıyla “Yeni Avusturya Yöntemi” kullanılmaktadır. Basit bir anlatımla bu yöntem tünel cidarlarına bir dizi kaya cıvatasını saplayarak ve gerekli durumlarda bunlara ilave olarak hasır çeliklerle destekleyerek püskürtme beton yardımıyla kaplanmasıdır. Kısaca "Yeni Avusturya Yöntemi" kayacın gene kayanın kendisi yardımıyla taşınması prensibidir. Bununla beraber kimi ufak çaplı tünel projelerinde çok sağlam (masif) kaya geçişlerinde kaya kütlelerinde her hangi bir desteğe ihtiyaç duyulmayabilmektedir. Bu tip formasyonların kazısı sırasında bahsedildiği üzere bir taşıma sistemine ihtiyaç duyulmamasından ötürü makine yararlanma oranları çok yüksek olması dolayısıyla günlük ilerleme miktarları da olağanüstü bir şekilde artmaktadır.



Şekil 2.13 : Değişen TBM çapına bağlı olarak ihtiyaç duyulan pabuç kuvveti ve bu kuvvetin pabuçlar altında yarattığı basınç (Maidl ve diğ., 2008).

Pabuçlu tip TBM’lerde kazı esnasında açığa çıkan pasa kesici kafada bulunan açıklıklardan geçerek kürek (kova) adı verilen metal levhalar yardımıyla kazı bölmesinin ortasında bulunan ana kovaya düşmektedir.

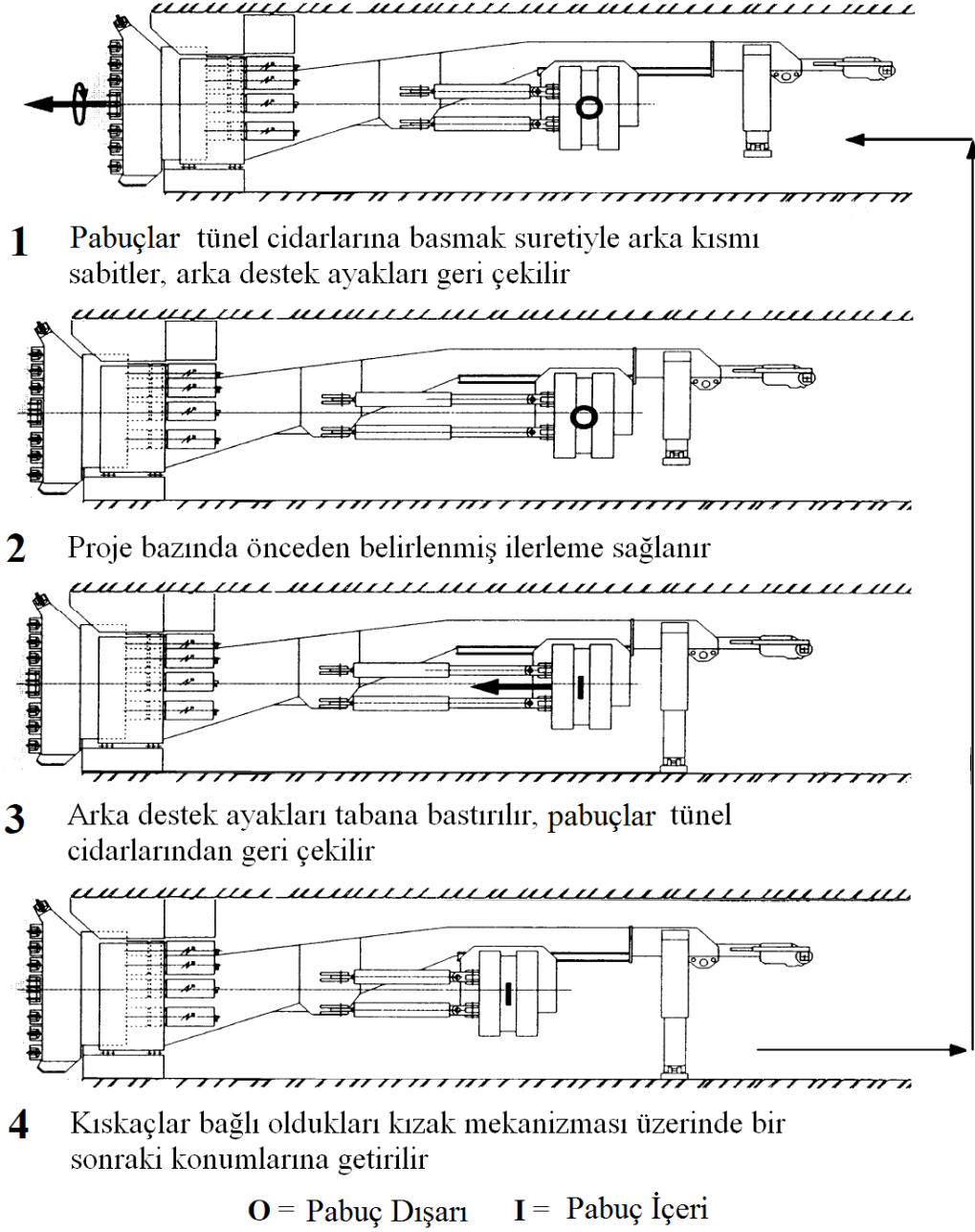
İzin verilen boyut aralığında kovaya düşen pasa buradan bir veya birden fazla konveyör bant yardımıyla destek üniteleri boyunca istenilen boşaltma alanına taşınmaktadır. Kesici kafada bulunan açıklıkların geometrileri kazı esnasında arının kazı bölmesine kontrolsüz dolmaması ve arından kopan kaya parçalarının konveyör banda zarar vermemesi amacıyla sınırlandırılmıştır.

Bu bağlamda arından kopan büyük ebattaki kaya blokları kesici kafada bulunan açıklıklardan geçebilecek boyuta indirgenene kadar arın ile kesici kafa arasında sıkıştırılarak ufaltılmaktadır. Kazı işlemi hem tek ve hem de çift kalkanlı tip TBM’lerde yukarıda anlatılan şekilde gerçekleşmektedir. Burada tek fark kalkansız tip TBM’lerde formasyonun kazılabilmesi için gerekli olan toplam itme kuvvetlerinin sağlanış biçimi ile tünel cidarlarının desteklenmesi yöntemidir.

Kalkansız tip TBM’lerde kazı esnasında hem ilerlemenin hem de kayacın kesilebilmesi için gerekli olan kesme kuvvetinin sağlaması için pabuçlar mevcuttur. Pabuçların tünel cidarlarına basması ve makinenin arka kısmını sabitlemesi sonucu ilerleme yönünde hareketi sağlayan pistonlar yardımıyla kazı işlemi için gerekli olan toplam itme kuvveti elde edilmektedir. Formasyonun mekanik özelliklerine ve makine üreticilerinin geçmiş tecrübelerine bağlı olarak günümüzde iki tip pabuç sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır.

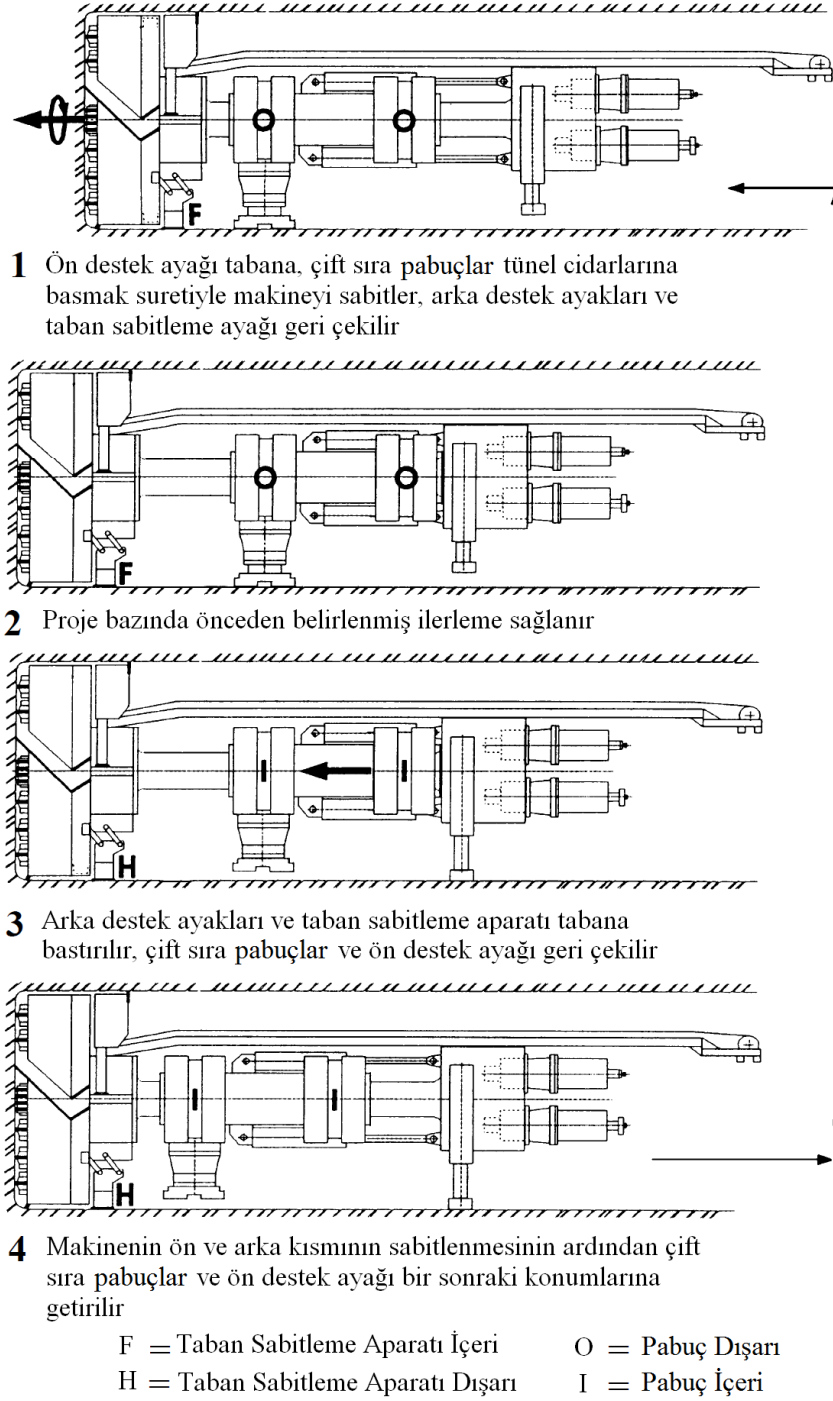
İlk tasarım “Main Beam” yani “Ana Kiriş” adlı tasarımıdır. Tasarımda tek sıra pabuç sistemi kullanılması yardımıyla kazı işlemi gerçekleşmektedir.

Tek sıra pabuçlu TBM’lerde kazı işlemine başlamadan önce sağlı sollu bulunan pabuçların tünel cidarlarına basması suretiyle makinenin arka kısmını sabitlenir ve makinenin arka kısmının sabitlenmesinden sonra arka destek ayakları geri çekilir. Proje bazında önceden belirlenmiş ilerleme (itme silindirlerinin tasarıma bağlı uzunluk, strok) sağlandıktan sonra makinenin arka kısmını dengelemek amacıyla arka destek ayakları tekrardan tabana bastırılır. Destek ayaklarının tabana basmasını takiben pabuçlar tünel cidarlarından geri çekilir ve geriye çekilen pabuçlar ilerleme yönünde bağlı bulundukları kızak mekanizması üzerinde kayarak bir sonraki konumlarına getirilir (Şekil 2.14). Böylelikle kazı işlemi için gerekli olan bir çevrim tamamlanmaktadır.



Şekil 2.14 : Tek sıra pabuçlu (main beam) TBM’lerde kazı işlemi (Askilsrud, 1998).

İkinci yöntemde 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. Önceden belirlenmiş ilerleme sağlandıktan sonra arka destek ayakları ile taban sabitleme aparatı tünel tabanına bastırılarak makine tekrardan sabitlenir. Ön destek ayağı ve çift sıralı kıskaçlar geri çekilerek bir sonraki konumlarına getirilir (Şekil 2.15).

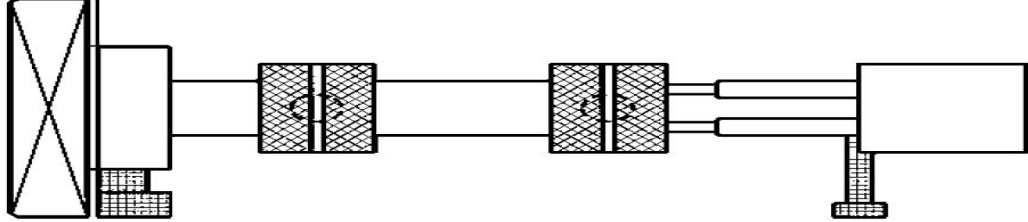


Şekil 2.15 : Çift sıra pabuçlu (Kelly Tip) TBM’lerde kazı işlemi (Askilsrud, 1998).

Kazı esnasında makinenin sabitlenmesi amacı ile yüksek basınçlarda tünel cidarlarına basılması sonucu formasyonun mekanik özelliklerine bağlı olarak yer yer irili ufaklı kaya parçaları tünel cidarlarından kopabilmektedir. Geçilecek olan formasyonun özellikleri doğrultusunda kopan parçaların büyüklükleri ve kopma sıklıkları değişmektedir. Çalışanları ve ekipmanları tünel cidarlarından kopan kaya parçalarından korumak amacıyla farklı tipte kısıkaçlı TBM’ler geliştirilmiştir.

2.3.1.1 Kalkansız pabuçlu tip

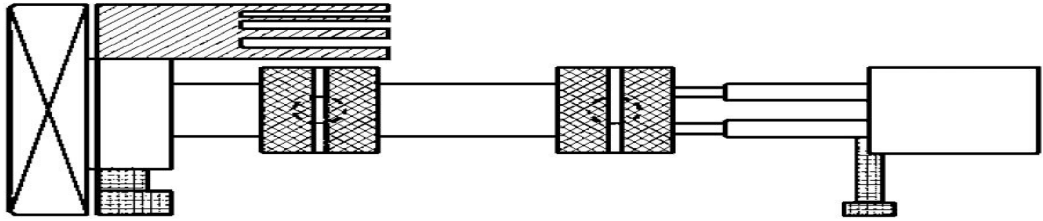
Kesici kafanın arkasında yer alan personeli ve makine aksamını korumaya yönelik her hangi bir koruma bulunmamaktadır. Günümüzde bu tip TBM'ler sadece ufak çaplı tünel projelerinde kullanılmaktadır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 : Kalkansız pabuçlu TBM'ler (Maidl ve diğ., 2008).

2.3.1.2 Çatı kalkanlı pabuçlu tip

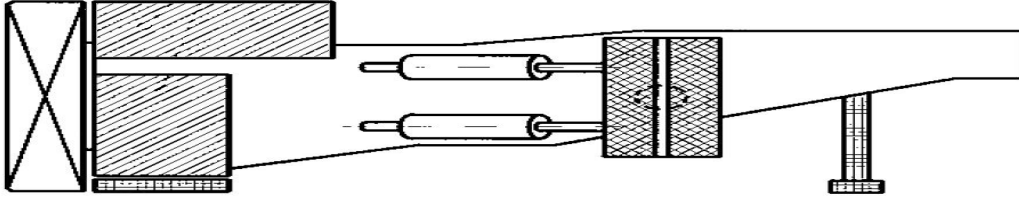
Hasır çeliklerin, kaya çivilerinin ve iksaların yerleştirilmesinde çalışan personeli tavandan düşebilecek kaya parçalarına karşı korumak amacıyla kesici kafanın arkasında tavanda ileri geri hareket edebilen veya sabit metal levhalar mevcuttur. Kazının duraksamaması amacıyla koruma levhalarının altından hasır çelik ve kaya çivileri yardımıyla kaya parçaları askıda tutulur (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 : Çatı kalkanlı pabuçlu TBM'ler (Maidl ve diğ., 2008).

2.3.1.3 Çatı ve yan kalkanlı pabuçlu tip

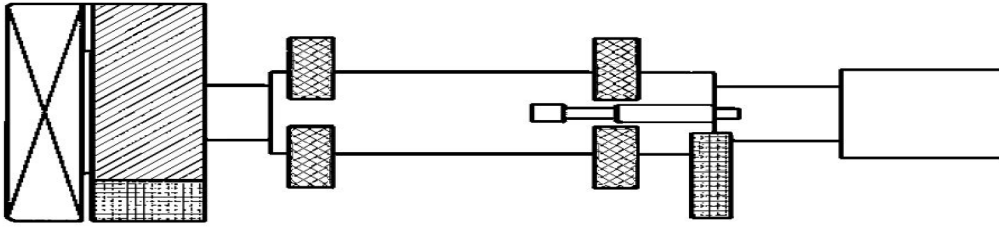
İlerleme esnasında tavan ile beraber tünel cidarlarından da kaya kopmaları olabilmektedir. Hem tünel cidarlarından kopan kayaların tünel tabanında birikip ilerlemeyi aksatmasını önlemek hem de kazı esnasında tünel güzergahından sapmaları en alt düzeye indirmek amacıyla çatı kalkanı ile beraber kenar yüzeylerde de kalkan mevcuttur. Alt tarafta yer alan metal koruma pistonlar yardımıyla alçaltılıp yükseltilebilmektedir. Bu sayede yukarıda da belirtildiği üzere rotada yaşanan sapmaların önüne geçilmektedir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 : Çatı ve yan kalkanlı pabuçlu TBM'ler (Maidl ve diğ., 2008).

2.3.1.4 Tam kalkanlı pabuçlu tip

Özellikle tünel güzergahı boyunca yapılacak olan kazı çalışması esnasında kaya kopmalarının yüksek olduğu durumlarda personeli ve makine aksamını korumak amacıyla tam bir kalkana ihtiyaç duyulmaktadır. Tam bir kalkana sahip olmasına rağmen ilerleme yine kıskaçlar yardımıyla yapılmaktadır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 : Tam kalkanlı pabuçlu tip TBM'ler (Maidl ve diğ., 2008).

2.3.2 Kalkanlı tip (Shielded)

Bilindiği üzere kalkanın ana görevi formasyondan gelebilecek suyun makine içine dolmasını ve/veya tünel cidarlarından kopabilecek parçaların personele ve makine donanımlarına zarar vermesini engellemektir. Kalkanlı tip TBM'lerde kalkan içine döşenen segment halkalarına bir dizi hidrolik güç ile çalışan pistonun belli bir kuvvetle ve hızla bastırması yardımıyla ilerleme gerçekleştirilmektedir. Segment halkaları ayrıca tünelin nihai taşıma sistemini oluşturmaktadır (Şekil 2.6).

Segment halkaları birden çok segmentten oluşmakta ve boyutları güzergâh boyunca geçilecek olan formasyonun mekanik özellikleri ile kullanılacak olan makinenin çapına, tipine ve ağırlığına göre değişmektedir. Segment halkasının montajı kalkan içinde bulunan mekanik veya vakum gücü ile çalışan segment erektörü yardımıyla yapılmaktadır. Montajı yapılan segment halkalarının yerleştirilme düzenleri tünel rotasını belirlemektedir. Bu nedenle kazı esnasında tünel güzergahında yaşanan sapmaların telafi edilmesinde segment halkalarının yerleştirilme düzenleri çok büyük öneme sahiptir.

Bu bağlamda segment halkasının montajına başlanmadan evvel makinenin güzergâhtaki mevcut konumunun, bir önceki segment halkasının kalkan ile arasındaki mesafenin ve makinenin kazı yapacağı bir sonraki konumun bilinmesi gerekmektedir. TBM operatörü kazı işlemini en son döşenen segment halkasının yerleştirme düzenine ve kalkan ile arasında kalan boşluğa göre yapmak zorundadır. Burada unutulmaması gereken husus tünel güzergahı ne olursa olsun kalkan ile segment halkası arasında kalan boşluğun makinenin yön verme işlemini belirlediği gerçeğidir.

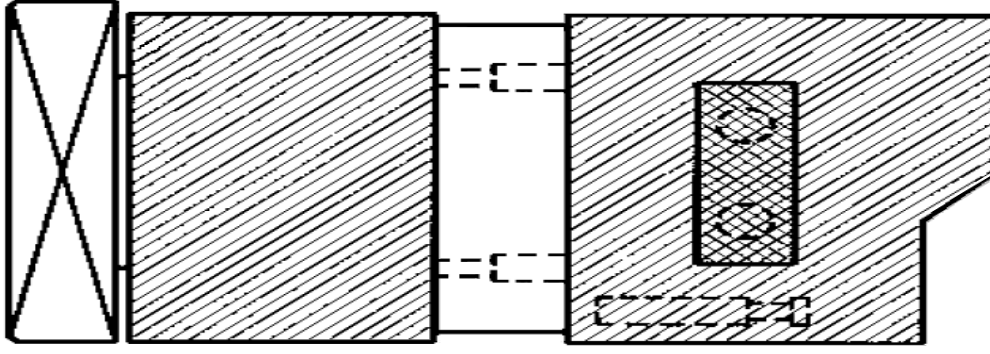
Kalkanlı tip TBM'ler kalkan sayılarına veya pasanın kazı bölmesinden alınma yöntemlerine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilirler. Bu çalışmada ise kalkanlı tip TBM'ler tek kalkanlı, çift kalkanlı ve ayna basınçlı yöntem olmak üzere üç farklı başlıkta sınıflandırılmaktadır.

2.3.2.1 Tek kalkanlı tip

Tek kalkanlı tip TBM'lerde kazı esnasında açığa çıkan pasa kısaçlı tip TBM' ler ile aynı şekilde taşınmaktadır. Kısaca hatırlatmak gerekir ise, açığa çıkan pasa kazı bölmesinden basınç farkı olmaksızın konveyör bantlar yardımıyla alınmakta ve boşaltma alanına taşınmaktaydı. Ancak kazı işlemi için gerekli olan toplam itme kuvveti yukarıda da bahsedildiği üzere kalkan içine döşenen segment halkalarına hidrolik güç ile çalışan pistonların basması yardımıyla elde edilmektedir. Tek kalkanlı tip TBM'ler genel bir yaklaşım olması açısından tünel cidarlarının ve arının denge durumunun korunduğu ancak kısaçlar yardımıyla ilerleme yapılmasına elverişli olmayan kaya formasyonlarda kullanılmaktadırlar. Tipik tek kalkanlı TBM detaylı kesiti Şekil 2.5 'de verilmiştir.

2.3.2.2 Teleskopik (Çift) kalkanlı tip

Bölüm 2.3.1'den de hatırlanacağı üzere kazı işlemi esnasında çıkan pasanın tahliyesi çift kalkanlı TBM'ler ile tek kalkanlı ve pabuçlu tip TBM'lerde aynı şekilde yapılmaktadır. Çift kalkanlı TBM' ler adından da anlaşılacağı üzere iki kalkandan oluşmaktadır. Ön kalkanda kesici kafa ve kafanın dönmesini sağlayan motorlar, arka kalkanda ise segment halkalarına basan yardımcı hidrolik pistonlar ile pabuçlar yer almaktadır. İki kalkanın ortasında ise ana ilerleme pistonları mevcuttur (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 : Çift kalkanlı tip TBM’ler (Maidl ve diğ, 2008).

Kazı işlemi için gerekli olan toplam itme kuvveti çift kalkanlı tip TBM’lerde iki farklı yöntem ile elde edilebilmektedir. Pabuçların kullanılmasına elverişli olan formasyonlarda kazı işlemi arka kalkanda bulunan pabuçların makineyi sabitlemesi ile başlar. Makinenin arka kalkanın sabitlenmesinin ardından aynı anda hem segment halkasının montajına hem de ana ilerleme pistonları yardımıyla kesici kafanın arına istenilen kuvvette ve hızda bastırılmasına başlanır. Ana ilerleme pistonlarının açılımının tamamlanmasının ardından pabuçlar tünel cidarlarından geri çekilir ve arka kalkan yardımcı hidrolik pistonların segment halkasına basması yardımıyla ileri itilir. Ön ve arka kalkan arasındaki boşluğun kapanmasını takiben yukarıda anlatılan işlemler tekrarlanır. Kazı esnasında yardımcı hidrolik pistonlar sadece montajı yapılan segment halkalarının yerinde durmasını sağlamaktadır. Formasyonun pabuçların kullanılmasına elverişli olmadığı 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 diğ., 2008).

Bilindiği üzere tek kalkanlı ve kapalı yöntem ile kazı yapan TBM’lerde kazı esnasında segment halkası montajı yapılamamaktadır. Kazının bitmesini takiben yapımına başlanan segment halkasının montajı büyük zaman kaybına neden olmaktadır. Ancak yukarıda da anlatıldığı üzere 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.

2.3.2.3 Ayna basınçlı (kapalı) TBM'ler

Kazı esnasında arın denge durumunun olmadığı ve/veya su gelirin diğer tip TBM'lerin kullanılmasına izin vermediği veyahut kullanılması durumunda da yararlanma oranlarına bağlı çok düşük ilerleme miktarlarının olması koşullarında ayna basınçlı yöntemle kazı yapan TBM'ler kullanılmaktadırlar. Kapalı yöntem kazılarında açığa çıkan pasa arın denge durumu söz konusu olmadığından arazi basıncına eş bir basınçta kazı bölmesine girmek ve buradan yine aynı basınçta çıkmak zorundadır.

Tünel güzergâhı boyunca yapılan sondaj çalışmaları her zaman formasyonun tamamını temsil edememektedir. Bununla beraber yağış rejimi ile yer altı su seviyesinde ciddi değişimler söz konusu olmaktadır. Bütün bu unsurların etkisi nedeniyle önceden hesaplanan arazi basınçları ile kazı esnasında uygulanan basınçlar farklılık gösterebilmektedir. Düşük hesaplanmış arazi basınçlarının kazı esnasında uygulanması sonucu arından gerekli olan miktardan fazla pasa alınmakta, bu da özellikle sık tünellerde yüzeyde ciddi oturmalar veya göçüklere neden olabilmektedir. Olması gerekenden fazla hesaplanan arazi basınçlarının kazı esnasında uygulanması sonucunda ise kazı bölmesinden gereğinden az miktarda pasa alınmakta, bu da pasanın sıkışmasına ve çok sık tünellerde yüzeyde kabarmalara sebebiyet vermektedir. Ancak uygulanan hatalı arın basınçlarında çıkan pasanın miktarına bağlı olarak kazı esnasında derhal müdahale etmek suretiyle gerçek arazi basıncının uygulamasını sağlamak mümkündür. Bu nedenle uygulanan arın basınçları ile beraber çıkan pasanın miktarının bilmesi ve takip edilmesi ayna basınçlı TBM'lerde çok büyük öneme sahiptir.

Açığa çıkan pasanın kazı bölmesinden alınmasında veya bir başka deyişle kazı bölmesinin basınçlandırılmasında çok farklı yöntemler mevcuttur.

Kesici kafa bölmesinin basınçlandırılması için kullanılan yöntemler aşağıda sıralanmıştır:

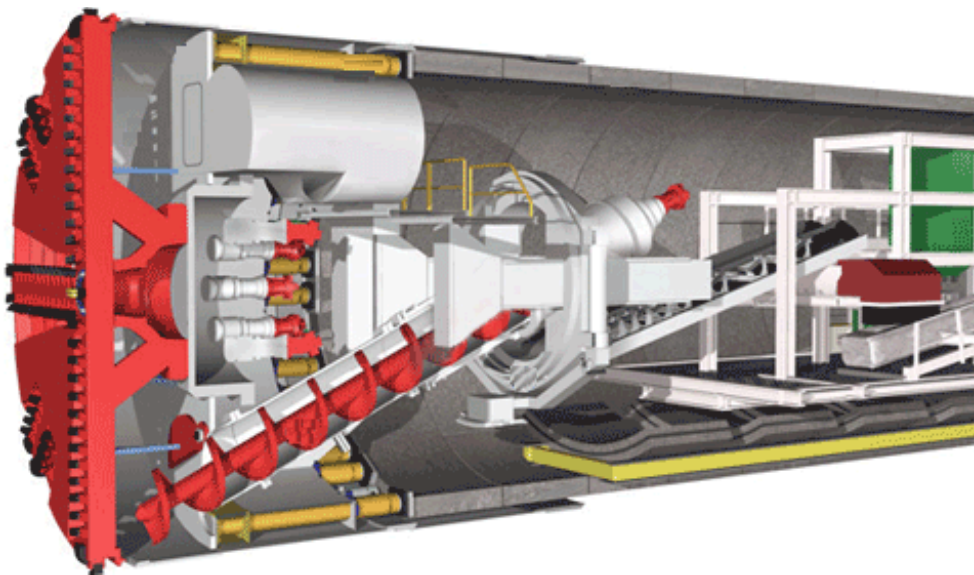
- Çamur basınçlı (Slurry)
- Pasa basınçlı (EPB)
- Hava basınçlı (Compressed Air) -Anlatılmayacak-
- Kombine (Mixshield)

Arın basıncının oluşturulmasında kullanılan kombine (mixshield) ve çamur basınçlı (Slurry) tipteki TBM'lerde pasa taşıma yönteminin her ikisinde de borular yardımıyla yapılması ve anlatım ekonomisi sağlanması açısından bu çalışmada tek başlık altında anlatılacaktır.

Pasa basınçlı (EPB)

Bu kazı yönteminde açığa çıkan pasa kazı bölgesinden basınçlı olarak helezon konveyör yardımıyla çıkartılmaktadır. Pasanın helezon konveyör içinde taşınması esnasında basıncı arazi basıncından nakledileceği ortam basıncına kadar düşürülmektedir. Pasanın basıncının kontrollü olarak düşürülmesindeki ana amaç kazı bölmesinden çıkartılan pasa miktarını kontrol altında tutmak ve kazı bölmesinde ani basınç dalgalanmalarının önüne geçmektir. Arazi basıncını dengelemek ve emniyetli bir şekilde kazı yapabilmek için kazı bölgesine giren ve çıkan pasanın miktarının ayarlanması ve kontrol edilmesi gerekmektedir.

Bu bağlamda sondaj verilerine göre önceden hesaplanmış arazi basıncılarını sağlamak için TBM'in penetrasyon miktarlarını (mm/dev) ve helezon konveyörün dönüş hızlarını (dev/dk) sürekli bir şekilde kontrol etmek ve değiştirmek gerekmektedir. Kazı bölmesi içinde oluşan basınçlar anlık olarak basınç sensörleri yardımıyla izlenebilmektedir. Bu sayede değişen ilerleme hızlarında kesici kafa içinde sıkışan pasanın basıncına bağlı olarak helezon konveyörün çalışma devrini yükseltmek veya alçaltmak mümkündür (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 : Pasa basınçlı (EPB) tip TBM kesit görünüşü (Url-9).

Arazi basıncının dengelemesi sırasında arazi basıncının gene zeminin kendisi yardımıyla sağlanması ve kazı bölmesinde bulunan pasanın sıkışabilme özelliği olması nedenleriyle basınçlarda dalgalanmalar yaşanmaktadır. Ayrıca arının heterojen (alt yarının sağlam üst yarının ise daha düşük basınç dayanımına veya akışkan olması) ve kazının sadece arazi basınçlarına göre yapılması durumunda kesici kafa bölmesindeki basınç sürekli olarak üst yarıdan gelen pasa tarafından sağlanmaktadır. Bu da ilerleme esnasında üst yarıdan çok fazla pasa alınmasına sebep olmaktadır. Kontrolsüz pasa alımı sonrasında büyük çaplı göçükler oluşabilmektedir.

EPB tip TBM'lerde pasanın kazı bölmesine girişini, helezon konveyör içinde akışını kolaylaştırmak ve bu bölmelere yapışmasını önlemek ile sudan ayrışmasını engellemek için formasyonun özelliğine bağlı olarak bir takım kimyasallar kazı bölmesinin ve helezon konveyörün içine ve kesici kafanın önüne verilmektedir.

Bununla beraber su gelirinin veyahut su basıncının yüksek olduğu kimi durumlarda suyun formasyon içinde kalmasını sağlayarak gerek pasanın daha yoğun kıvamda olmasını ve buna bağlı olarak da yüksek basınç dalgalanmalarının önüne geçmek gerekse de yüksek kimyasal tüketimlerini azaltmak amacıyla kesici kafaya basınçlı hava verilmektedir.

Çamur (Slurry)

EPB tip TBM'lere göre daha yüksek su geliri ve toplam arın basıncı olan formasyonlarda Slurry tip TBM'ler tercih edilmektedir. Pasa nakli EPB tip TBM'lerin aksine borular yardımıyla bulamaç halinde kesici kafa bölmesinden alınarak yapılmaktadır.

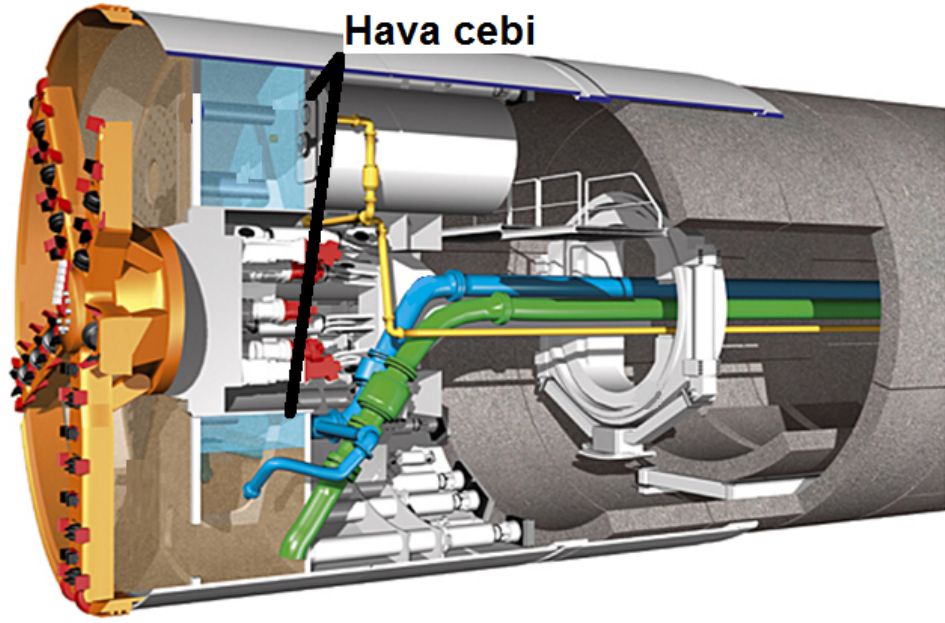
Kesici kafa bölmesindeki basıncı dengelemek için kesici kafa bölmesine basılan bulamaç ve kesici kafa bölmesinden alınan pasayla karışık bulamacın debilerini ayarlamak gerekmektedir. Ayrıca pasa naklinde kullanılan borular içindeki bulamacın birim hacim ağırlığını bilmek büyük önem taşımaktadır. Nitekim kesici kafa bölmesine sabit debide bulamaç verilir, ve kesici kafa bölmesinden sabit debide bulamaç alınır iken kesici kafa bölmesinden alınan bulamacın giderek birim hacim ağırlığının artması kafaya kontrolsüz bir şekilde formasyonun aktığı ve arından gerçekte gereğinden fazla miktarda pasa alındığı anlamına gelmektedir.

Bu durumun sürmesi sonucu fazladan alınan pasa miktarına ve formasyonun mekanik özelliklerine bağlı olarak özellikle sığ tünellerde yüzeye kadar ulaşabilen göçüklerin oluşabilmektedir.

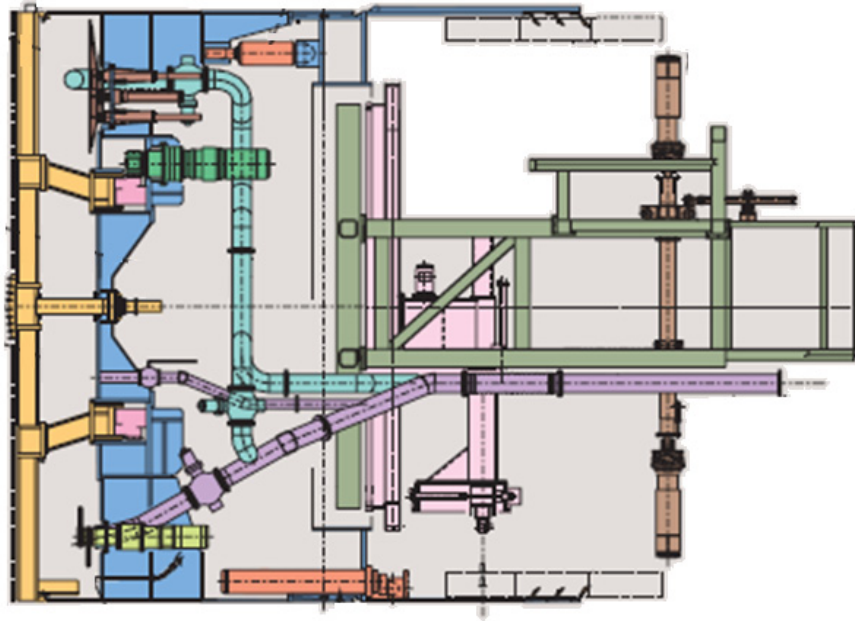
EPB tip TBM’lerde arın basıncını dengelenmek için zeminin kendisi kullanmasına karşın çamur tip (Slurry) TBM’lerde arın basıncı geçilen formasyonun özeliğine göre farklı bileşenlerden ve bunların farklı oranlarda birleşmelerinden oluşan bulamaç yardımıyla oluşturulmaktadır. Bulamaç olarak su - bentonit, su - bentonit - kimyasal katkılardan veya sadece sudan oluşabilmektedir. EPB kazı yöntemine nazaran bu yöntem sayesinde daha güvenilir bir basınç dalgalanması aralığında kazı işlemi yapılabilmektedir. Bununla beraber gerek açığa çıkan pasanın pasa işleme istasyonuna gerekse de arazi basıncını dengelemekte kullanılan bulamacın kesici kafaya borular yardımıyla basınçlı bir şekilde pompalanmasından ötürü çok yüksek enerji tüketimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sözü edilen enerji tüketimi TBM çapına, ortalama ilerleme miktarlarına dolayısıyla açığa çıkan pasa hacmine, tünel uzunluğuna, borular ile taşıma esnasında taşınacak olan malzemenin mekanik ve geometrik özelliklerine göre borularda çökelmemenin ve buna bağlı boru tıkanıklıklarının olmaması için gerekli olan kritik hıza, tünel eğimine ve son olarak da tünel derinliğine göre değişmektedir. Ayrıca pasanın işlenmesi ve arazi basıncının sağlanmasında kullanılan bulamacın hazırlanması ve pompalanması için yer üstünde büyük bir tesise dolayısıyla da yüksek bir ilk yatırıma ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde iki farklı tip Slurry TBM mevcuttur. Bunlar Alman tip ve Japon tip olarak adlandırılmaktadır. Alman tip kombine makinelerde (mixshield) 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 havanın fiziksel özelliğinden dolayı hava cebinin sıkışıp genişmesi sayesinde kazı esnasında çok düşük basınç dalgalanmaları sağlanmaktadır. Böylelikle anlık olarak azalan formasyon basınçlarında kesici kafa bölmesinden arın içine bulamaç kaçmasının veya anlık olarak artan formasyon basınçlarında ise arından kesici kafa bölmesine kontrolsüz bir şekilde pasa akmasının önüne geçilmektedir (Şekil 2.22a). Hava cebinin olmadığı, kesici kafanın tek bölmeden oluştuğu Japon tip Slurry makinelerde ise arın basıncında oluşan yüksek dalgalanmalar nedeniyle bulamacın arına kaçma ve arının kesici kafa bölmesine kontrolsüz girme riskleri daha büyük olmaktadır (Şekil 2.22b).



(a)



(b)

Şekil 2.22 : (a) Alman tip hava cepli çamur TBM (mixshield) (Url-7), (b) Japon Tip hava cepsiz çamur TBM (Url-8).

2.4 TBM'lerin Diğer Kazı Yöntemlerine Göre Üstünlükleri ve Sakıncaları

TBM'lerin diğer kazı yöntemlerine göre üstünlükleri kısaca şu şekilde sıralanabilir;

- Kalifiye iş gücü ve yüksek bilgi birikimiyle kullanılan TBM'ler ile açılan tünel projelerinde çevre emniyeti açısından büyük riskler (büyük çaplı göçüklere bağlı ölümler veya TBM' in kaybedilmesi) söz konusu değildir.
- Aynı formasyon özelliklerinde diğer kazı yöntemlerine göre daha yüksek ilerleme miktarlarının başarılabilmesi.
- Çalışma şartları açısından daha konforlu ve emniyetli olması (toz yoğunluğu, zehirli gazlar ve kopan kayaçlar).
- Çok daha az personele ihtiyaç duyulması ve buna bağlı olarak personel giderlerinin az olması.
- Kazı işleminin tamamen mekanize ve bilgisayar destekli olması.
- Düzgün ve kesin bir arın kesiti oluşturması.
- Çevre dostu kazı yapması (gürültü, titreşim, zehirli gazlar çıkarmaması vb.).

TBM'lerin diğer kazı yöntemlerine göre sakıncaları aşağıda kısaca belirtilmiştir;

- Daha kapsamlı jeolojik araştırmaların yapılmasına ihtiyaç duyması.
- Jeolojik araştırmalar için bütçeden daha fazla pay ayrılması.
- Uzun ve büyük çaplı tüneller projelerinde ilk yatırım maliyetinin çok yüksek olması.
- Çok değişken formasyonlarda adaptasyon kabiliyetinin sınırlı olması.
- Çok uzun tasarım ve projelendirme sürelerine ihtiyaç duyması.
- Çok kısa tünellerde (<2km) ekonomik olmaması (Kolymbas, 2005)
- Tünel geometrik kesiti, eğimi ve kurp çaplarının sınırlı olması.
- Aynı formasyon için kullanılabilecek farklı tipte TBM' lerin işletme maliyetleri arasında çok büyük farklılıkların olması.
- Lojistik destek ihtiyacının fazla olması (elektrik, su, segment v.s.).
- Kalifiye iş gücüne ve çok iyi bir projelendirmeye ihtiyaç duyulması.

3. KAZILABİLİRLİĞE ETKİ EDEN ETKENLER

TBM performansına etki eden etkenlerin çok geniş kapsamlı olması ve aynı zamanda gerek makine tipinin belirlenmesine gerekse de kesici kafa ve güç üniteleri ile pasa nakillerinin tasarımına etki etmesi nedeniyle mevcut çalışmada konuyu sınırlandırmak açısından kaya kütlesinin kazılabilirliği ele alınmıştır. TBM performansına etki eden faktörlere ait daha detaylı ve kapsamlı bilgi Çopur ve diğ. (1997) çalışmasından takip edilebilir.

3.1 Genel

İncelenen konunun hacmi dikkate alındığında anlatım ekonomisini sağlamak amacıyla Bieniawski ve diğ. (2008) çalışmasında yer alan kaya kütle kazılabilirliği indeksini (RME) tanımlayan faktörlerin belirli bir ayrıntı içinde ele alınıp açıklanması uygun bulunmuştur.

RME indeksi ilk olarak Bieniawski ve diğ. (2006) çalışmasında gerek TBM'lerin ilerleme hızlarının kestirilmesi gerekse de kaya formasyonların özellikleri doğrultusunda doğru tip makine seçiminin yapılması için ortaya konmuş, geçilecek olan formasyona uygulanan bir puanlama sistemidir. İlave veriler geldikçe uygulanan "2006" puanlama sistemi yazarlar tarafından değiştirilmiştir. Bu çalışmada, hem güncel olması hem de daha çok verinin işlenmesi sebebiyle Bieniawski ve diğ. (2008) çalışmasındaki puanlama sistemi incelenmektedir.

RME indeksini tanımlayan temel kavramlar ve puanlama sisteminde aldığı puanlar aşağıda sıralanmıştır (Çizelge 3.1):

- Sağlam kaya numunesinin basınç dayanımı, (0- 25)
- Delme oranı indeksi, (0- 15)
- Tünel kazı arınında süreksizliklerin-çatlak-geometrisi, (0- 30)
- Tünel kazı arınının iksasız durma süresi, (0- 25)
- 10 m tünel uzunluğunda gözlenen-beklenen-su geliri, (0 - 5)

Çizelge 3.1 : Kaya kütlesi kazılabilirlik indeksi, RME, (Bieniawski ve diğ., 2008).

Kaya Malzemesinin Tek Eksenli Basınç Dayanımı (0 - 25 puan)										
σ_{lab} , MPa		< 5	5 - 30	30- 90	90 - 180	> 180				
Puan		4	14	25	14	0				
Delme Oranı İndeksi (0 - 15 puan)										
DRI		>80	80-65	65-50	50-40	< 40				
Puan		15	10	7	3	0				
Tünel Kazı Aramında Süreksizliklerin - Çatlak - Geometrisi (0 - 30 puan)										
Yeknesaklık			1 Metre Uzunluktaki Çatlak Sayısı					Çatlak Yönelim Açısı- Tünel Aksına Göre		
Homojen		Heterojen	0 - 4	4-8	8-15	15-30	>30	Dik	Oblik	Paralel
Puan	10	0	2	7	15	10	0	5	3	0
İksasız Kalma Süresi (0 - 25 puan)										
Saat		< 5	5 - 24	24 - 96	96 - 192	> 192				
Puan		0	2	10	15	25				
Su Geliri (10 m Tünel Uzunluğu İçin) (0 - 5 puan)										
Litre/dak		>100	70-100	30 - 70	10 - 30	< 10				
Puan		0	1	2	4	5				

Çizelge 3.1 'den de görülebileceği üzere RME indeksi (0 - 100) arasında bir değer alabilmektedir. Kazılmış kilometrelerce tünel projesinden elde edilen veriler ışığında geriye dönük olarak çıkartılan bu çizelgede, ilk göze çarpan unsur, yazarların TBM kazısının en iyi bir şekilde yapılabilmesi için ideal formasyon şartlarını belirli bir ölçüde ortaya koymalarıdır. Bir başka anlatımla uygun formasyon şartları altında kazılabilirlik indeksinin arttığı gözlenmektedir. Kazılabilirlik indeksinin artması, ileride de kısaca anlatılacağı üzere teorik kazı hızlarının artması anlamını taşımaktadır. Yazarlar aynı zamanda farklı tip TBM'lere ait ortalama ilerleme miktarlarını karşılaştırarak, ilerleme miktarlarını, TBM'lerin kullandıkları formasyonların basınç dayanımları ve kaya kütle kazılabilirlik indeksleri (RME) ile ilişkilendirmek suretiyle sağlam kaya TBM'lerin seçimine yönelik basit ve yol gösterici bir kılavuz da ortaya koymaktadırlar.

Farklı basınç dayanımları ve kaya kütle kazılabilirlik indekslerinde (RME) Bieniawski ve diğ. (2008) çalışmasından alıntılanarak kaya TBM'lerin tipinin belirlenmesine yönelik ön fikir vermesi amacıyla Çizelge 3.2 hazırlanmıştır.

Çizelge 3.2 : RME ve " σ_c " göz önünde bulundurularak kaya TBM'lerin tipinin belirlenmesi.

	$\sigma_{lab} < 45 \text{ Mpa}$	$\sigma_{lab} > 45 \text{ Mpa}$
RME < 80	Tek Kalkanlı TBM*	Tek Kalkanlı TBM*
RME > 80	Çift Kalkanlı TBM	Pabuçlu TBM

* Tek kalkanlı TBM'lerin ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması sebebiyle.

TBM türü ve tek eksenli basınç dayanımı (σ_{lab}) bazında teorik günlük ilerleme miktarı ile RME arasında kurulan regresyon bağıntıları gereğince artan RME değerleriyle birlikte teorik ortalama ilerleme miktarı $(ARA)_T$ artmaktadır. Teorik ilerleme miktarı $(ARA)_T$ 'in bilinmesiyle çalışma koşullarında beklenen ortalama günlük ilerleme miktarı " $(ARA)_B$ " **(3.1)** bağıntısından bulunabilir (Bieniawski ve diğ. 2008).

$$(ARA)_B = (ARA)_T * (F_D \cdot F_A \cdot F_E) \quad (3.1)$$

Burada; F_D = TBM çap düzeltme faktörü, $10 / D$. (D makine çapı, m); F_A = Makinenin öğrenme süresiyle ilgili ampirik faktör olup tünel uzunluğunun fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Sözelimi $L = 500 \text{ (m)}$ 'de $F_g = 0,70$, $L = 4.000$ ve $L = 15.000 \text{ (m)}$ 'de ise sırasıyla $F_g = 1,0$ ve $F_g = 1,20$ 'dir. F_E = Makinayı kullanan ekibin deneyimini yansıtan faktör, $0,7 - 1,2$ arasında değer alabilmektedir. Personel deneyimi arttıkça F_e faktörü $0,7$ 'den $1,2$ 'e doğru artmaktadır. Faktörler hakkında daha detaylı bilgi Bieniawski ve diğ. (2008) çalışmasından takip edilebilir.

Örneğin, çift kalkanlı tip TBM'lerde teorik ortalama günlük ilerleme miktarı **(3.2a)** ve **(3.2b)** bağıntılarından kestirilebilir (Bieniawski ve diğ. 2007a).

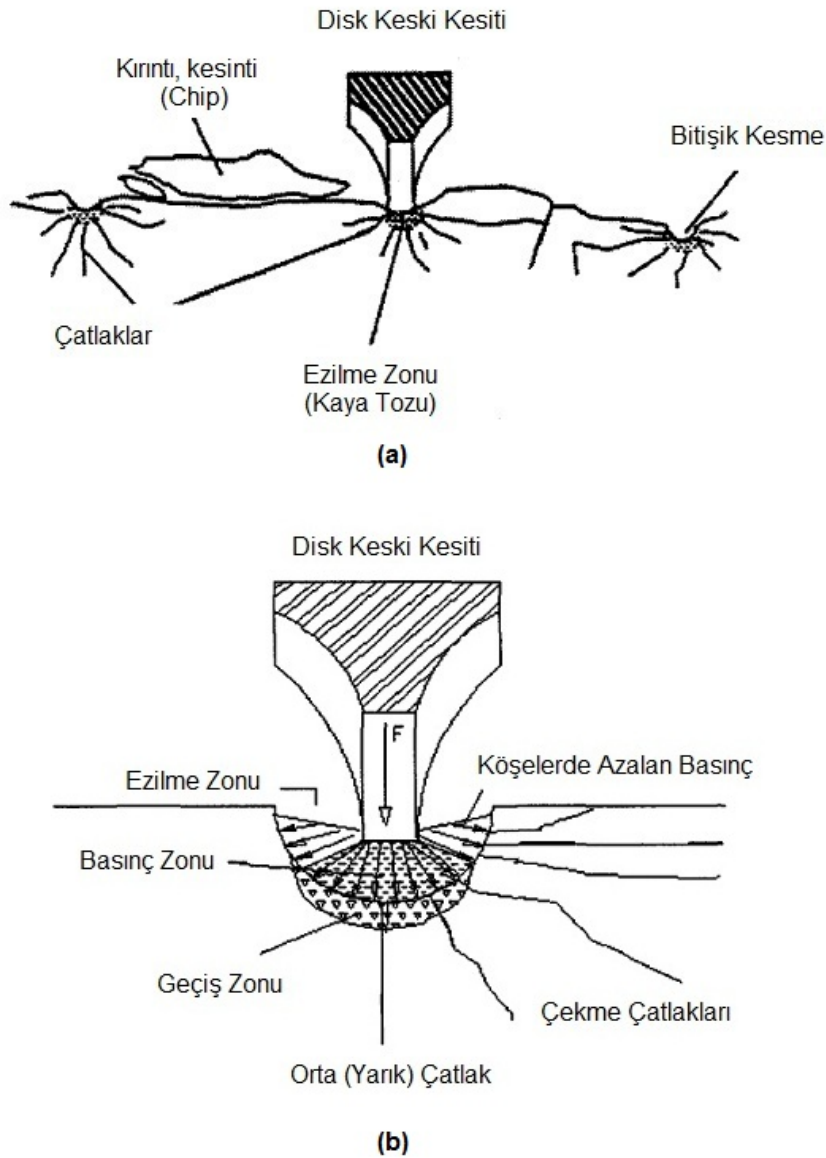
$$\sigma_{lab} > 45 \text{ (MPa)}; ARA_T = 0,597 * RME - 24,88 \text{ , (m/gün) } ; R = 0,744 \quad (3.2a)$$

$$\sigma_{lab} < 45 \text{ (MPa)}; ARA_T = 0,813 * RME - 32,56 \text{ , (m/gün) } ; R = 0,865 \quad (3.2b)$$

σ_{lab} = Sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç dayanımı olup yukarıdaki ifadelerin kullanım aralığı $45 < RME < 100$ 'dür. Yazarlar RME < 50 durumunda çift kalkanlı TBM modu önermemektedirler.

3.2 Tek Eksenli Basınç Dayanımı

Disk keski vasıtasıyla kazı arınına aktarılan normal kuvvet (F_N) keskinin hemen altında basınç gerilmesine maruz bir zon oluşturur (Şekil 3.1). Bu zonun yenilmesi ve çevresinde çekme çatlaklarının oluşması için diskin kayaya penetrasyonu sırasında uygulanan gerilmenin büyüklüğü " P^0 " kayanın tek eksenli basınç dayanımına, σ_{lab} , eşit veya büyük olması gerekmektedir.



Şekil 3.1 : (a) Disk keski ile kayada kesinti (chip) oluşumu. (b) Normal disk kuvveti (F_N) ile keskinin altında oluşturulan basınç zonu ve etrafında oluşan çekme çatlakları (Rostami ve Özdemir, 1993; Ramezanzadeh, 2005).

Rostami ve diğ. (1996) çalışmasında 17" sabit kesitli (CCS) tip disk keskilerle (*)tam boyutlu doğrusal kazı deney seti ile yapılan sayısız deney sonucunda normal kuvveti (F_N) ve yuvarlanma kuvvetini (F_R) diskin altında oluşan temas basıncı (P^0) cinsinden **(3.3a)**, **(3.3b)**, **(3.3c)** ve **(3.3d)** yardımıyla vermektedir.

$$P^0 = C \cdot \left[\frac{(s \cdot \sigma_{lab}^2 \cdot \sigma_c)}{(\phi \cdot (R \cdot T)^{0,5})} \right]^{1/3} \quad (3.3a)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left[\frac{(R-p)}{R} \right] \quad (3.3b)$$

$$F_N = F_T \cdot \cos \left(\frac{\phi}{2} \right) = \left[\frac{(P^0 \cdot R \cdot T \cdot \phi)}{(1+\phi)} \right] \cdot \cos \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (3.3c)$$

$$F_R = F_T \cdot \sin \left(\frac{\phi}{2} \right) = \left[\frac{(P^0 \cdot R \cdot T \cdot \phi)}{(1+\phi)} \right] \cdot \sin \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (3.3d)$$

Bağıntılardaki terimler;

F_T = Toplam bileşke keski kuvveti, N, (lbf) ; F_N = Normal keski kuvveti, N, (lbf) ; F_R = Yuvarlanma keski kuvveti N, (lbf) ; ϕ = Temas alanının açısı, (verilen ifadelerde radyan cinsinden yazılacaktır) ; R, T = Disk keskinin yarıçapı ve uç kalınlığı, mm, (in.) ; S = Disk keski aralığı, mm, (in.) ; C = Formül sabiti, 2,12 ; σ_{lab} , σ_c = Sırasıyla sağlam numunenin tek eksenli basınç ve çekme dayanım değerleri, MPa, (Psi) ; ϕ = Basınç dağılım fonksiyonu için sabit. "V" şekilli çok sivri uçlu disk keskilerde (0,2), geniş uçlu keskilerde ise (-0,2) değeri önerilmektedir. Günümüzde yaygın olarak sabit kesitli tip disk keskiler kullanıldığından yukarıda verilen bağıntılarda " $\phi = 0$ " olarak kabul edilebilir (Rostami ve diğ., 2002 ; Rostami, 2008).

Sağlam kaya numuneleri için çıkartılan Lade (1993) regresyon bağıntıları kullanılarak, yukarıda verilen **(3.3a)** bağıntısında yer alan çekme dayanımı (σ_c), basınç dayanımı (σ_{lab}) cinsinden yazılabilir **(3.4)**;

$$\sigma_c = A \cdot p_a \cdot (\sigma_{lab}/p_a)^B, \text{ (MPa)} \quad (3.4)$$

A, B = Regresyon sabitleri, başkalaşım kayaları için A = 0,0518 ve B = 1,017, magmatik kayalar için A = 0,435 ve B = 0,740, tortul kökenli kayalar için A = 0,316 ve B = 0,770; tüm kaya türleri için A = 0,219 ve B = 0,825; $p_a = 0,1$ (MPa) referans atmosfer basıncı (Lade, 1993; Zhang, 2005).

(*)Tam boyutlu doğrusal kazı deney seti yardımıyla geçilecek olan formasyondan alınan büyük boyutlu kaya numunesi üzerinde farklı disk keski aralıklarında ve penetrasyon değerlerinde bir disk keski ile yapılan kesme işlemi sonucu disk keskiye etki eden kuvvetler bulunabilir. Böylelikle TBM kesici kafası ve güç ünitelerinin tasarımı hakkında ön bir bilgi elde edilebilir (Balcı ve diğ., 2009).

Rostami'nin bağıntılarından da görülebileceği üzere verilen bir disk keski çapı ve disk keski aralığında disk keskinin penetrasyonunu sağlamak için gereken disk kuvvetleri kaya numunesinin basınç dayanımıyla artmaktadır.

Sato ve diğ. (1991) çalışmasında dairesel kesme deney aletinde limitli sayıda "V" tip disk keskilerle gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarına göre normal ve yuvarlanma disk kuvvetleri sırasıyla **(3.5a)** ve **(3.5b)** bağıntılarıyla verilmektedir.

$$F_N = k_N * p^{0,5} * s^{0,43} , (kN) \quad (3.5a)$$

$$F_R = k_R * p * s^{0,43} , (kN) \quad (3.5b)$$

Burada; " k_N , k_R " kesme sabiteleri (Çizelge 3.3, Sato ve diğ., 1991'den değiştirilerek) olup, p = Disk penetrasyon derinliği, (mm) ve s = Keski aralığı, (mm)'dir.

Çizelge 3.3 : Kaya türüne göre disk keski sabiteleri (Sato ve diğ., 1991'den değiştirilerek)

Kaya Türü	σ_{lab}	σ_{ϕ}	$\sigma_{lab} / \sigma_{\phi}$	K	k_N	k_R
Kyosho graniti	232	11,5	20	0,93	0,447	0,486
Kyosho graniti	139	26,5	5,24	1,74	0,408	0,396
Tüf	18	1,5	12	0,35	0,094	0,076

σ_{lab} , σ_{ϕ} : Sağlam kaya numunesinin basınç ve çekme dayanımları, (MPa)
K : Kırılma tokluk indeksi, (MN/m^{3/2})

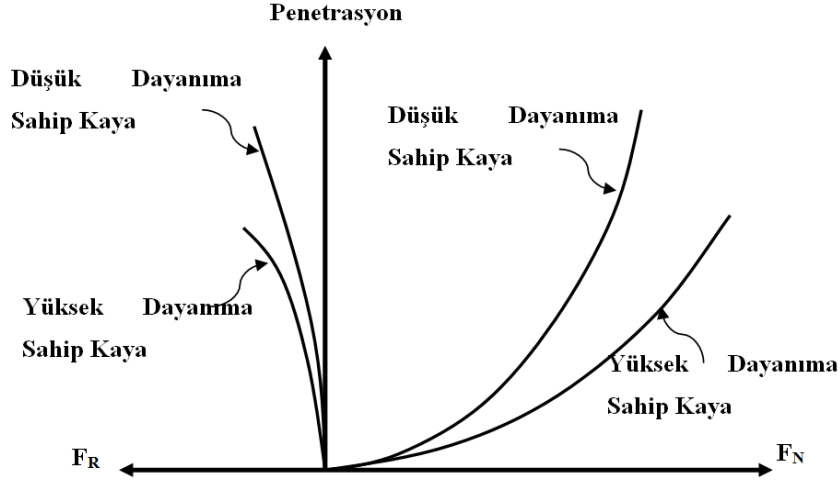
Çizelge 3.3 ve verilen disk kuvveti eşitliklerinden aşağıda sıralanan pratik çıkarımlar elde edilebilir:

- Normal ve yuvarlanma disk kuvvetlerine ilişkin regresyon katsayıları k_N , k_R kaya malzemesinin basınç dayanımıyla ilintili gözükmektedir. Azalan basınç dayanımı ile anılan büyüklükler belirgin ölçüde azalmaktadır.
- Verilen kaya türü için (F_R / F_N) oranı sadece penetrasyon miktarının kare kökü, $p^{0,5}$, ile değişmektedir.

Benzer bir sonuç Rostami ve diğ. (1993) çalışmasında da gözlenmektedir. Nitekim (F_R / F_N) oranı sonucunda $\tan(\phi / 2)$ ifadesi kalmaktadır. Hatırlanacağı üzere temas açısı (ϕ) sadece disk keskinin çapının ve penetrasyon miktarının fonksiyonudur.

Kısaca tekrarlamak gerekirse kazı sırasında disk keski çapı sabit kabul edildiğinde, (F_R / F_N) sadece penetrasyonun fonksiyonu olmaktadır.

Basınç dayanımının disk keski kuvvetlerine (F_N , F_R) ve penetrasyona (p) etkisi Şekil 3.2'de verilmiştir (Nelson, 1993; Ramezanzadeh, 2005).



Şekil 3.2 : Kayanın basınç dayanımının keski kuvvetlerine ve penetrasyon üzerine etkileri, (F_N, F_R ; normal ve yuvarlanma disk kuvvetleri).

Şekil 3.2 yakından incelendiğinde aşağıda sıralanan sonuçlar ön plana çıkmaktadır:

- İstenen bir penetrasyonu sağlamak için yüksek basınç dayanımına sahip kaya birimi daha büyük keski kuvvetleri gerektirmektedir.
- Verilen keski kuvvetinde (F_N , F_R) düşük basınç dayanımlı kayada daha büyük penetrasyon sağlamakta, başka ifadeyle aynı TBM kullanım oranında daha büyük ilerleme hızlarına ulaşılabilir. Özellikle fark yüksek normal disk kuvvetlerinde daha da anlamlı olmaktadır. Başka bir anlatımla mevcut bir formasyon için, F_N , normal disk keski kuvvetinin artışına izin verilmesi sonucu ilerleme miktarlarında ciddi artış sağlanabilmektedir. Bu konunun bilinmesi pratik tünelcilik için çok büyük öneme sahiptir.

Nitekim formasyon hakkında bilgi sahibi olmayan veya verilen bilgileri yeterli düzeyde işleme kabiliyeti gelişmemiş TBM operatörlerinin, makinenin ve kesici disklerin sağlamış olduğu itme kuvvetlerinden çok verimsiz yararlanmaları sonucu TBM kazısı esnasında düşük basınç dayanımlarına sahip formasyonlarda dahi istenilen ilerleme hızlarına ulaşamamaktadır.

Aynı şekilde yüksek basınç dayanımlarına sahip formasyonlardan geçilirken de itme kuvvetlerinin izlenmemesi sonucunda disklere etki eden yüksek basınçlar nedeniyle kesici diskler kullanılamaz hale gelebilmekte ve artan disk keski tüketimleri neticesinde ortalama makine ilerleme miktarları düşebilmektedir.

3.3 Delme Oranı İndeksi (DRI)

Kaya kütlesinin delinebilirliği, delme oranı indeksi (DRI) ile ifade edilir. DRI, Norveç tünel pratiğinde sert kayaç kazısında kullanılan tam cepheli tünel-TBM-makinelerinin performans tahmin modelinde yer alan temel bir parametredir. Anılan değer TBM performansı ile ilişkisi ileriki bölümde ayrıntılı olarak incelenecektir.

DRI iki temel laboratuvar deneyine (Gevreklik deneyi, S_{20} ; Sievers minyatür delme değeri deneyi, S_J) bağlı olarak geliştirilen $DRI = f(S_{20}, S_J)$ bağıntısından kestirilir. Bu deneylere ait ayrıntılı bilgi Yarah ve Soner (2007) kaynağından izlenebilir.

Bruland (1998) çalışmasında delme oranı indeksi (DRI) gevreklik değeri (S_{20}) ve Sievers değeri (S_J) cinsinden sırasıyla **(3.6a)** ve **(3.6b)** bağıntılarıyla verilmektedir.

$$DRI = 1,1122 * S_{20} - 3,66 \quad (188 < S_{20} < 90) \quad , r = 0,894 \quad (3.6a)$$

$$DRI = 7,396 * \ln(S_J) + 29,9 \quad (0,8 < S_J < 250) \quad , r = 0,616 \quad (3.6b)$$

Yukarıda verilen eşitliklerden $DRI = f(S_{20}, S_J)$ bağıntısı olmadığı durumlarda veya abak değerinin kontrolünde yararlanılabilir. Eşitliklerden açıkça anlaşılabileceği üzere artan gevreklik indeksiyle delme oranı indeksi doğrusal bir şekilde artmaktadır. Açık bir ifadeyle, delme oranı indeksinin büyük değer alması kaya kütlesinin delinebilmesinin kolaylaşması anlamını taşımaktadır. Kaya kütle kazılabilirliği indeksinde (RME) değişen delme oranı indeksleri (DRI) için (0 - 15) arasında bir puan alınabilmektedir. $DRI > 80$ durumunda en yüksek puan (15) ile, $DRI < 40$ da ise en düşük puan (0) ile değerlendirilmektedir. Farklı delme oranı indeksleri için alınan RME puanları Çizelge 3.1 'den takip edilebilir.

Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nde (NTNU) gerçekleştirilen deney sonuçları kimi kaya türleri bazında Çizelge 3.4 'de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Kimi kaya türlerinde delme oranı indeks değerleri (Bruland, 1998).

Kaya Türü	Deney Sayısı	Alt-Üst Sınır	Medyan Değer
Bazalt	50	(21 – 84)	44
Andezit	6	(39 – 91)	51
Kiltaşı	7	(24 – 78)	55
Diyabaz	17	(18 – 43)	35
Gabro	60	(17 – 80)	39
Gnays	314	(18 – 92)	45
Granit	93	(25 – 91)	52
Granitik Gnays	247	(25 – 91)	52
Kireçtaşı	36	(29 – 83)	60
Kuarsit	172	(17 – 84)	30
Kumtaşı	71	(15 – 88)	44
Siltaşı	7	(32 – 86)	57
Mermer	22	(56 – 100)	77

Delme oranı indeksi (DRI) kaya kuvars yüzdesine (Q %) bağlı olarak uç aşınma indeksi (BWI) ile ilişkilendirilebilir. Buna göre aşağıda verilen **(3.7a)**, **(3.7b)**, **(3.7c)**, **(3.7d)**, **(3.7e)** bağıntılarından farklı kuvars yüzdeleri ve DRI değerleri için uç aşınma indeksi (BWI) bulunabilir (Bruland, 1998).

$$BWI = 0,007 * DRI^2 - 1,39 * DRI + 78 \quad ; \quad \%0 < Q < \%10 \quad (3.7a)$$

$$BWI = 0,009 * DRI^2 - 1,77 * DRI + 94 \quad ; \quad \%11 < Q < \%20 \quad (3.7b)$$

$$BWI = 0,013 * DRI^2 - 2,32 * DRI + 121 \quad ; \quad \%21 < Q < \%40 \quad (3.7c)$$

$$BWI = 0,014 * DRI^2 - 2,58 * DRI + 133 \quad ; \quad \%41 < Q < \%70 \quad (3.7d)$$

$$BWI = 0,017 * DRI^2 - 2,99 * DRI + 149 \quad ; \quad \%71 < Q < \%100 \quad (3.7e)$$

Yukarıdaki regresyon ifadelerin korelasyon katsayıları yüksek olup ($r > 0,80$) $20 < DRI < 80$ aralığında geçerlidir. Yukarıdaki bağıntılardan şu pratik çıkarımlar yapılabilir;

- Verilen bir kuvars yüzdesinde artan DRI değeriyle uç aşınma indeksi (BWI) dramatik ölçüde azalmaktadır. BWI değerinin artması disk ömürlerinin azalmasına ve disk tüketimlerinin artmasına neden olmaktadır. BWI ile disk ömürlerinin kestirimi hakkında daha detaylı bilgi Bruland (1998) çalışmasından takip edilebilir.

- Verilen "DRI" değerinde uç aşınma indeksi (BWI) kuvars yüzdesine bağlı olup, artan kuvars yüzdesiyle artmaktadır. BWI' deki artış hızı özellikle $20 < \text{DRI} < 40$ aralığında daha belirgindir.

Sözgelimi $\text{DRI} = 20$ değerinde %5 kuvars içeriğinde sahip kayada beklenen uç aşınma indeks değeri; BWI yaklaşık 53 düzeyindeyken %50 kuvars içeriğindeki bir kaya türünde anılan değer 85'e yükselmektedir. Daha büyük DRI değerlerinde ($\text{DRI} > 60$) artan kuvars içeriğinin uç aşınma indeksi (BWI) üzerindeki etkisi önemli ölçüde azalmaktadır.

Bilindiği gibi hızla aşınan disk keskinliklerinin TBM performansı açısından şu sakıncaları söz konusudur:

- Tünel arınına aşınan disk keskinliklerle istenen normal ve yuvarlanma keski kuvvetleri transfer edilemediğinden, arzu edilen kesme derinliği -penetrasyon- sağlanamaz. Bir başka deyişle aynı formasyonda aynı penetrasyon değerini sağlamak için aşınmış disklerin aşınmamış disklerle göre daha büyük F_N ve F_R değerlerine sahip olması gerekmektedir. Bu durum birim kazı hacmi için harcanan enerjinin (SE) artması anlamını taşımaktadır.
- Ayrıca kesici kafada disk keskinliklerinin değiştirilmesi için harcanan zaman, TBM'nin kullanım süresini önemli ölçüde azaltacağından genel ilerleme hızlarının düşmesine neden olmaktadır. Bu da proje maliyetlerini arttıracaktır.

3.4 Süreksizliklerin - Çatlak - Ortalama Aralığı, Genel Açıları ve Kazı Arınının Yeknesaklığı

Birim uzunluktaki çatlak sayısı veya ortalama çatlak aralığı ve her bir çatlak düzleminin tünel yatay aksı ile yaptığı açı TBM'nin kazı performansını etkileyen doğal faktörlerdir. Bunların etkilerini ilk defa etraflı şekilde inceleyen araştırmalar NTNU araştırma kurumunda yapılmıştır. Anılan araştırmanın sayısal değerlendirilmesi 4. bölümde yapılacağından burada Tarda'guila ve diğ. (2007) çalışmasında yer alan çatlak sayısı ve çatlak aralığının arazi penetrasyon indeksi (FPI) ve spesifik enerji (SE) büyüklükleri üzerindeki etkisi kısaca incelenmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 : Kaya kütleindeki çatlak sayısı - TBM temel parametreleri (Arazi penetrasyon indeksi, spesifik enerji ilişkisi), (Tardaguila ve diğ., 2007).

Kaya Kütle Türü	Çatlak Aralığı (cm)	Çatlak Sayısı (1m uzunlukta)	FPI (kN/mm/dev)	SE (kJ/m ³)	Kesinti geometrisi
I	> 40	4	20 - 30	40 - 60	Kesinti (Çip)
II	20	4 - 8	10 - 15	20 - 30	Kesinti (Çip) ve blok
III	10	8 - 15	4 - 7	10 - 15	(cm) ve (dm) boyutunda bloklar
IV	5	15 - 30	1	5	Heterojen boyutlu bloklar (dm, cm, ince malzeme)
V	< 5	> 30	> 0	< 5	Kum ve ince boyutlu pasa

FPI = Arazi penetrasyon indeksi, SE = Spesifik enerji

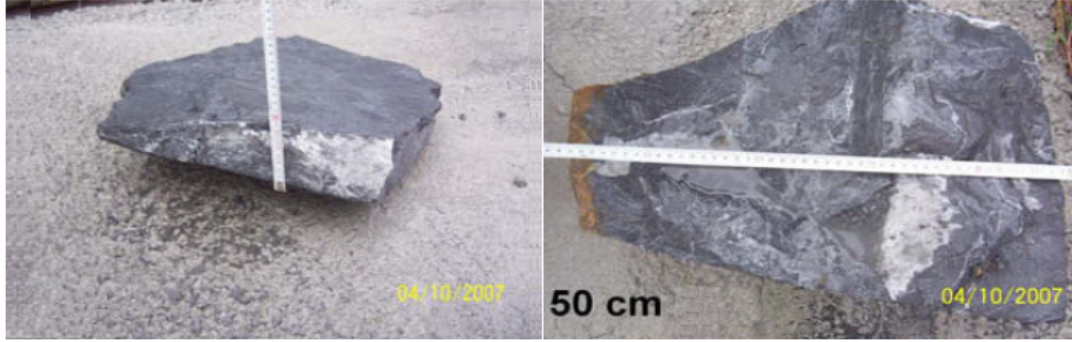
$$SE = \left(\frac{F}{A} + \frac{2\pi \cdot RPM \cdot T}{A_k \cdot ARA} \right) \quad \text{Teale, (1965)'den alıntılan Tarda'guila ve diğ. (2007).}$$

RPM = 1 sn'de kesici kafanın devir sayısı, devir/sn, T = Tork (kNm), A_k = Kesici kafanın kesit alanı A_k = 0,785. D² (m²), D = Tünel çapı (m), ARA = Ortalama İlerleme miktarı (m/sn), F = Toplam itme kuvveti (kN).

Çizelge 3.5 yakından incelendiğinde pratik mühendislik bakımından şu değerlendirmeler yapılabilir;

- Ortalama çatlak aralığının azalması, diğer bir deyişle 1 (m) uzunluk başına çatlak sayısının artmasıyla arazi penetrasyon indeksi ve spesifik enerji büyüklükleri belirgin ölçüde azalmaktadır.
- Spesifik enerji (SE) ile arazi penetrasyon indeksi (FPI) arasında anlamlı bir ilişki vardır. Nitekim artan arazi penetrasyon indeksiyle beraber birim (m³) kazı malzemesi (pasa) başına enerji tüketimi de artmaktadır.
- Bloklı ve çatlaklı kaya kütlelerinde (III) kazılan malzemenin boyutları (dm) ve (cm) mertebelerindedir. Bu durum büyük boyutlu kaya bloklarının kesici kafanın boşluklarından içeriye girerek kafanın bloke olmasına sebebiyet verebilmektedir. Bu husus, her tipte TBM'nin yararlanma oranlarında ciddi düşüöşlere neden olmaktadır. Bu nedenle TBM kesici kafa tasarımıda kesici kafanın açıklık oranlarının yanı sıra açıklıkların geometrileri (boyutları) de büyük öneme sahip olmaktadır.

Nitekim Anadoluray Kadıköy Kartal metro projesi için üretilen Herrenknecht marka 2 adet açık ve kapalı mod çalışabilen TBM'ler, açık mod kazı esnasında arından sürekli olarak büyük ebatlı kaya bloklarının kopması nedeniyle proje esnasında ciddi tasarım değişiklikleri geçirmişlerdir (Şekil 3.3).

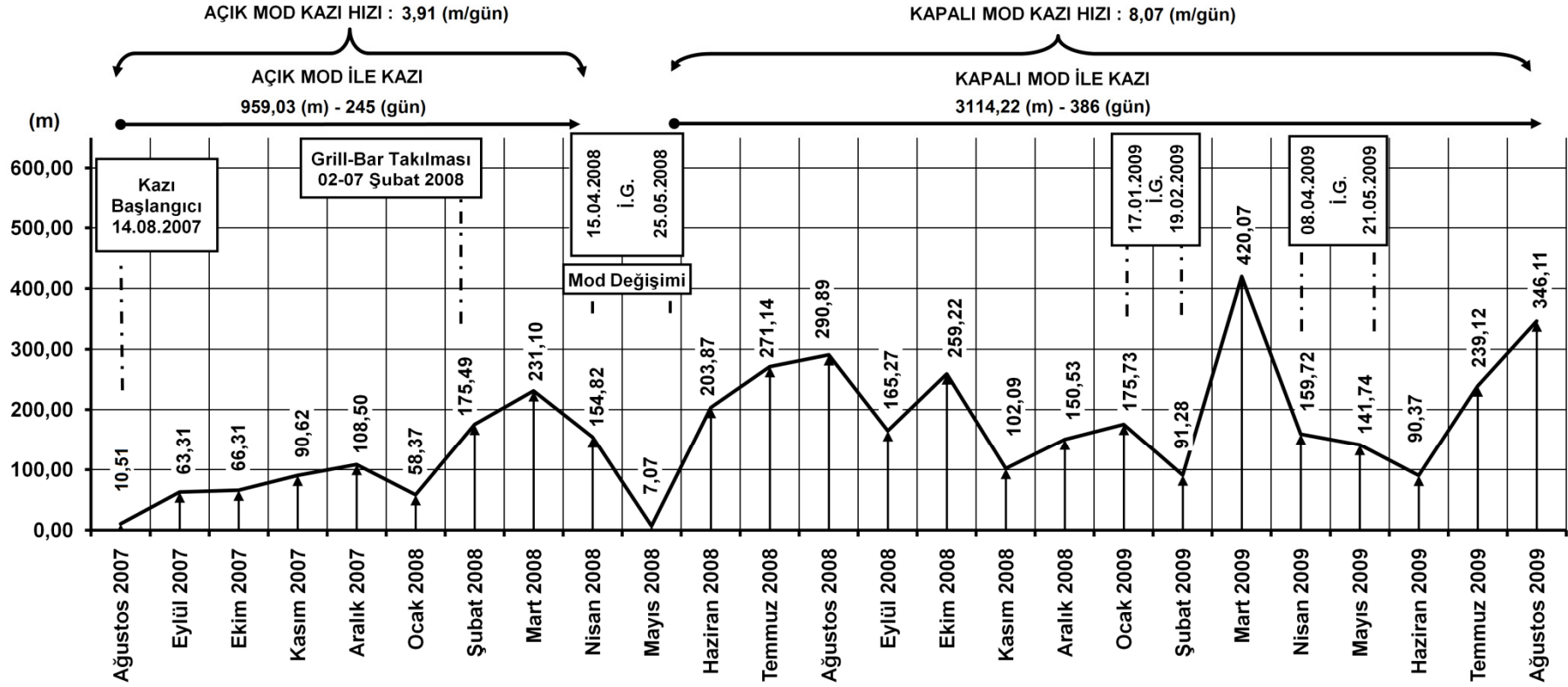


**TBM kazı sırasında oluşan bloklar
(yer yer > 50 cm)**

Şekil 3.3 : Kadıköy - Kartal Metro Projesinde kazı esnasında arından kopan büyük bloklar (Balcı, 2009).

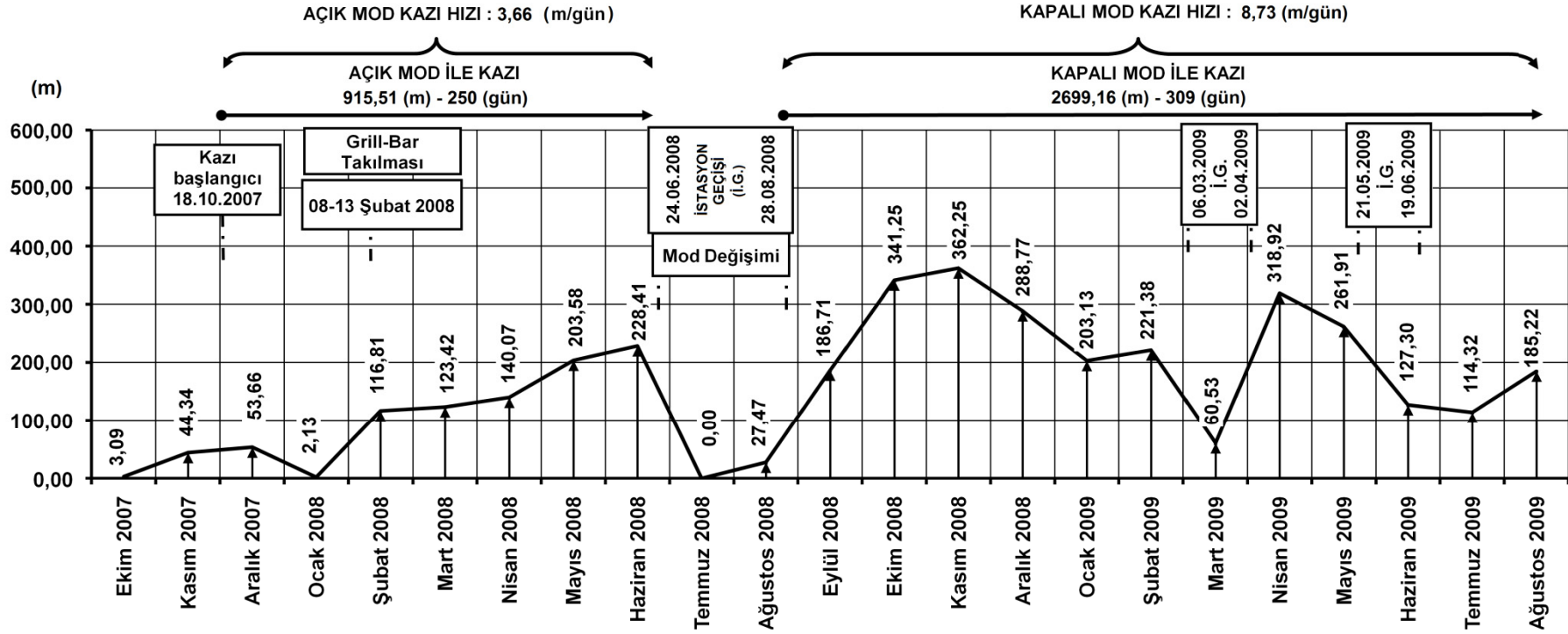
Bölüm 2' den hatırlanacağı üzere açık mod kazları esnasında açığa çıkan pasa kesici kafa bölmesinin ortasında bulunan bir kovaya oradan da birinci taşıma bandı ile kalkan boyunca taşınarak nihai olarak uzaklaştırılacağı ikinci taşıma bandına dökülmektedir. Kesici kafa bölümünde bulunan ana kovanın bu ebatlardaki kayalar nedeniyle sürekli olarak dolup tıkanacağı rapor edilmiştir. Bu tıkanmalarla beraber gerek birinci gerekse de ikinci taşıma bantlarının bu ağırlıklara sahip blokları taşıyamaması ve sürekli olarak yırtılması nedeniyle yararlanma oranlarında ciddi düşüşlerin de yaşandığı bildirilmiştir. Gerek bantların tamiri için gereken süre ve bütçe gerekse de ilerleme miktarlarındaki ciddi düşüşler nedeniyle proje maliyetleri yükselmiş ve yukarıda da bahsedildiği üzere kesici kafada ciddi tasarım değişikliklerine gidilmiştir. Bu kapsamda kesici kafadaki açıklıkların etrafına açıklık oranlarını değiştirmeksizin geometrilerini sınırlandırmak amacıyla bir dizi tırnak benzeri metal plaka (Grill-bar) kaynatılmıştır. Böylelikle izin verilen en büyük kaya ebadı 25 (cm) ile sınırlandırılmıştır. Yapılan bu değişikliğin ilerleme miktarları üzerinde etkisi çok net bir biçimde Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 'ten takip edilebilmektedir.

S360



Şekil 3.4 : Anadoluay Kadıköy - Kartal Metro projesi S360 adlı TBM 'in aylık ilerleme miktarları (Alan, E. ve Koç, E., 2010).

S363



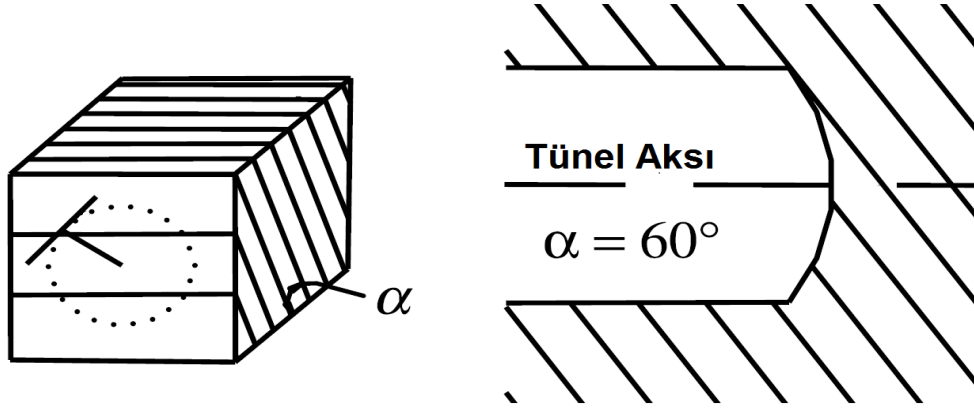
Şekil 3.5 : Anadoluray Kadıköy - Kartal Metro projesi S363 adlı TBM 'in aylık ilerleme miktarları (Alan, E. ve Koç, E., 2010).

Nitekim S360 TBM ile yapılan kazı işleminde kesici kafa tasarımının iyileştirilmesinden önce ortalama ilerleme miktarları 2,31 (m/gün) seviyelerinden toplamda 3,91 (m/gün) 'e ulaşarak %69'luk bir artış ile %169 seviyelerine gelmiştir.

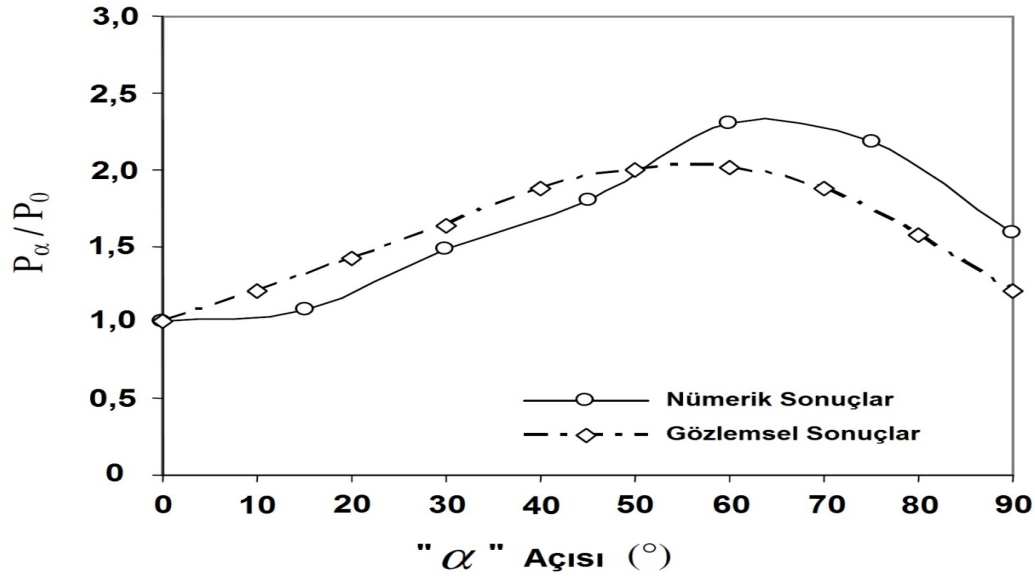
Benzer bir durum S363 TBM ile yapılan kazı işleminde de görülmektedir. Burada açıklıkların geometrileri küçültülmeden evvel ortalama günlük ilerleme miktarı 0,91 (m/gün) iken kafa tasarımındaki değişiklikten sonra toplamda 3,66 (m/gün) seviyelerine ulaşılmıştır. S363 TBM'de artış oranı S360'a oranla daha büyük olup %302'lik bir artış ile %402 seviyelerindedir. Kesici kafanın tasarımının değiştirilmesi esnasında yaşanan duraksamalara kıyasla ilerleme miktarlarından elde edilen yüksek artış göz önüne alındığında toplamda proje süresinin azalması yoluyla proje maliyetlerinde ciddi geri kazanımlar elde edilmiştir. Ayrıca açıklıkların geometrilerinin küçültülmesi yoluyla çok kırıklı çataklı ve özellikle fay geçişlerinde arından çözölen büyük blokların kesici kafayı bir anda doldurmasının bir başka deyişle arının boşalıp göçük olmasının da büyük ölçüde önüne geçilmiştir.

Güçlücan ve diğ., (2007) çalışmasında, 3,175 m çaplı Beykoz - Kavacık Atık su tünelinin 417'inci metresinde bir dasit daykları geçilirken, tünel arınından kopan büyük boyutlu kaya bloklarının kesici kafanın boşluklarından kama gibi girmesi sonucu makinenin "bloke olduğı" rapor edilmektedir. Aynı çalışmada TBM'nin az çatlaklı (masif) kartal formasyonundan (Gri koyu kireçtaşı şeyl, siltaşı/çamurtaşı, kireçtaşı) geçerken faydalanma oranının %44, segment halkası döşemeye harcanan zamanın %51 olduğı, buna karşın killi zemin kısımları geçilirken killi formasyonun kesici kafaya sıvanması sonucunda TBM 'den faydalanma oranı %17'ye kadar düştüğü rapor edilmektedir. Çatlaklı Trakya Formasyonu'nda kapalı modda çalıştırılan (ø7.85 m) bulamaç tip bir TBM'de de benzer sorunların yaşandığı ve sık sık hidrolik taşıma devresinde ciddi zaman kayıplarına yol açan boru tıkanmalarının gözlemlendiğı rapor edilmiştir (Erguner, 2008). Bu konu TBM'den yararlanma bölümünde ayrıntılı şekilde incelenecektir.

Hakim çatlak sisteminin tünel kazısının yatay aksı ile yaptığı açı da kazılabilirlik bakımından ciddi bir öneme sahiptir. Tanımlanan " α " açısı daha net anlaşılabilirliği için Şekil 3.6 verilmiştir. Şekil 3.7'de ise çatlak düzleminin tanımladığı " α " açısının, TBM penetrasyonu üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir (Gong ve diğ. 2005).



Şekil 3.6 : Boyuna tünel kesintinde kazı aksı ile çatlak sistemi arasındaki " α " açısı (Gong ve diğ. 2005).



Şekil 3.7 : 20 (cm) çatlak aralığı için çatlak düzlemi ile tünel yatay aksı arasındaki açının TBM penetrasyonuna etkisi (P_{α} , P_0 sırasıyla (α) ve (0) açılarından elde edilen penetrasyonlar) (Gong ve diğ. 2005).

Şekil 3.7 'den şu pratik sonuçlar çıkartılabilmektedir;

- En ideal kazı şartlarının elde edilmesi istendiğinde söz konusu açının (50° - 60°) arasında olması gerektiği gözlemlenmektedir. Daha açık bir anlatımla, çatlak düzleminin tünel yatay aksı ile (50° - 60°) arasında bir açı mevcut ise, sıfır açiya kıyasla TBM penetrasyonu yaklaşık 2,5 kat artmaktadır. Bu bulgu, Bruland (1998)'a ait sonuçlarla da uyumludur.
- $\alpha > 60^{\circ}$ durumun da ise TBM penetrasyonu belirgin ölçüde azalmaktadır.

Yukarıda kısaca belirtilen bulgular ayrıca kaya kütlesinin basınç dayanımının çatlak açısıyla da yakından ilintilidir. Verilen çatlak aralığı, dolgun malzemesi ve sağlam numunesinin tek eksenli basınç dayanımı için en düşük yerinde dayanım " $\alpha = 60^\circ$ " civarında oluşmaktadır. Daha açık bir ifade ile yapılan deneyler sonucunda aynı formasyon şartları altında çatlak sisteminin tünel aksı ile yapmış olduğu " α " açısının 60° 'ye eşit olduğu durumlarda kaya kütlesinin yerinde basınç dayanımı en düşük değerleri almaktadır (Ramamurthy ve Arora, 1994).

Kestirilebileceği üzere bu durum, TBM kazısı için daha yüksek penetrasyon miktarlarına ulaşılmasını kolaylaştırmaktadır.

Özellikle derin TBM tünel geçişleri çatlaklı/ayırışmış kaya kütlelerinden geçiliyorsa böyle arazi koşullarında "sıkışma" sorunları beklenmelidir. Aşırı sıkışma düzeyinde TBM'nin kesici kafasının bloke olma riski mevcuttur. Projenin başlangıç çalışmalarında bu husus özenli bir şekilde tahkik edilmelidir. Kaya mekaniği literatürde sıkışma olgusunun kestirilmesinde Singh ve diğ. (1992) tarafından önerilen ampirik bağıntı (3.8) kullanılabilir (Singh ve Goel 1999).

$$H_k = 350 * Q^{0,333} \quad (3.8)$$

Burada;

" H_k " kritik tünel derinliği, (m).

(*) Q = Tünel açılacağı kaya formasyonuna ait Q faktörü.

Eğer hesaplanan " H_k " değeri verilen tünel derinliğinden büyük ise arazi hareketi (sıkışma) söz konusu değildir. Tünel derinliği (H) > kritik tünel derinliği (H_k) durumda ise tünelde "sıkışma" beklenmelidir.

Örneğin; proje derinliği $H = 280$ (m) olan bir tünelin bir kesimi $Q = 0,1$ ile temsil edilen kaya kütlesinden oluşmakta ise;

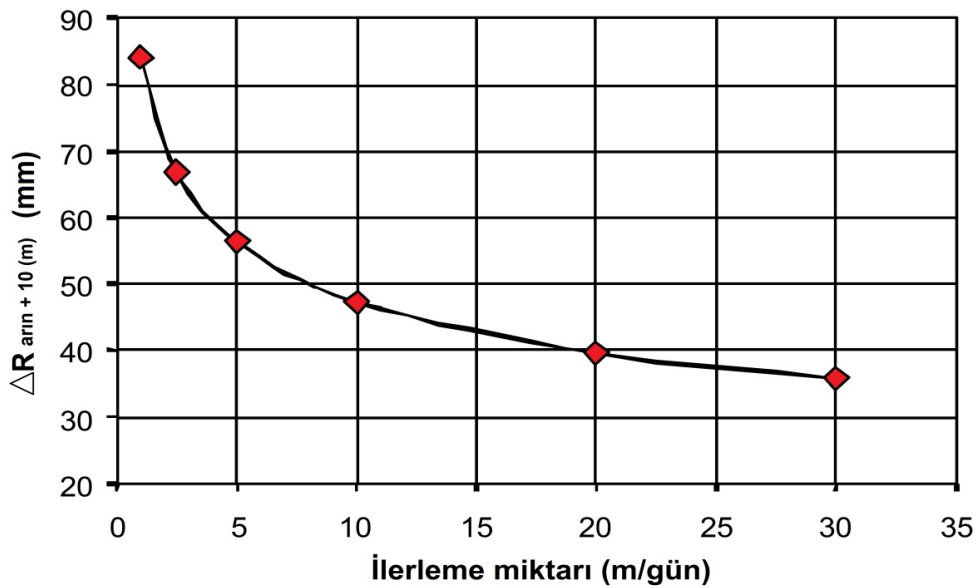
Sıkışma tahkikine göre kritik derinlik; $H_k = 162,5$ (m) olmaktadır. Bu durumda $H = 280$ (m) > $H_k = 162,5$ (m) olduğundan, anılan kesimde "sıkışma" arazi hareketinin oluşma riski vardır.

(*)RMR gibi kaya kütlesinin kalitesine ilişkin puanlama sistemidir ve $RMR = 9 \cdot \ln(Q) + 44$ eşitliği ile kestirilebilir (Barton, 2000).

Sıkışma potansiyelinin yüksek olduğu tünel geçişlerinde kesici kafanın tasarımda en önemli unsur fazladan kesme (over-cut) miktarının belirlenmesidir.

Genel olarak TBM'ler sabit bir dış çap başka bir anlatımla sabit bir fazladan kesme miktarı ile üretilmektedir. TBM üreticileri fazladan kesme miktarını normal şartlar için 6 - 8 (cm), sıkışma potansiyeli olan tünel geçişlerinde 15 - 25 (cm) olarak vermektedir. Ancak çok yüksek kapanma hızlarına sahip formasyonlarda verilen fazladan kesme miktarları da yeterli olamayabilmektedir (Maidl ve diğ, 2008).

TBM'nin bloke olmasının ana nedeni kesici kafaya ve eğer kalkanlı bir TBM ise kalkana tünel cidarlarından çok yüksek miktarlarda basıncın etki etmesi ve bu basıncın itme silindirlerinin kapasitelerinin üstünde kalmasıdır. Bu nedenle bu tip formasyonlarda kalkanlı tip TBM'lerde çok kısa kalkan uzunlukları tercih edilmelidir. Fazladan kesme kadar önemli bir diğer husus da makine penetrasyon hızları ve kazının sürekliliğinin sağlanmasıdır. Nitekim TBM'de kazı işleminin durması ile tünel cidarlarının kapanma hızına bağlı olarak tünel cidarları kalkanı ve kesici kafayı sarabilir ve kafanın bloke olmasına neden olabilir. Schubert (2000) çalışmasında artan ilerleme miktarları ile tünel cidarlarının deplasmanına bağlı olarak kesici kafanın bloke olma riskinin azaldığı rapor edilmiştir (Şekil 3.8). Bu durum artan kazı performansı ile TBM'nin bloke olma riskinin azaldığının bir göstergesidir.



Şekil 3.8 : Artan günlük ilerleme miktarına bağlı olarak kesici kafa ve 10 (m) arkasında ölçülen tünel cidarlarının deplasman değişimi (Schubert, 2000).

Kazı arının karışık yapıda (ayrışmış kaya zemin geçişleri, farklı basınç dayanımı ve çatlak geometrisine sahip kaya katmanlarının varlığı) olması TBM performansı üzerinde çok önemli etkileri vardır. Aynı kazı kesitinde farklı rijitlikleri olan katmanların bulunma durumunda disk keskilere etki eden normal kuvvetlerin dağılımı uniform değildir, diğer kelimelerle, kaya kütlesi-disk keski etkileşimine bağlı olarak bazı diskler çok büyük kuvvetler alırken bazıları da istenen penetrasyonu sağlayacak düzeyde yük alamazlar. Bunların sonucunda ise TBM' de ciddi titreşimler oluşmaktadır. Bu titreşimler gerek ana mil yatağının çabuk deforme olması ve bir daha kullanılamamasına gerekse de kazı esnasında lazer ölçüm cihazlarının odaklanmasının yapılamamasına ve ölçüm alamamasına neden olmaktadır. Bu nedenle makine tasarımı esnasında kalkanlı tip TBM'lerde sabitleyici ufak pabuçlar kullanılmaktadır. Kalkan içinden çıkan bu pabuçlar tünel cidarlarına basmak suretiyle oluşan titreşimin önüne geçmeyi amaçlamaktadır. Oluşan titreşimin yanında özellikle %50 sağlam %50 zayıf arın kesiti formasyonlarında açılacak olan tünel projelerinde TBM 'in kazı esnasında istenilen güzergahı takip etmesi de zorlaşacaktır. Sağlam kazı kesitiyle zayıf kazı kesitine itme silindirleri vasıtasıyla aynı penetrasyon hızı verildiğinde TBM zayıf formasyon hangi tarafta ise o tarafa daha çok nüfus etme eğilimi sergileyecek ve güzergahtan sapacaktır.

Bununla beraber değişik kazı kesitlerinde farklı pozisyondaki disklere farklı kuvvetlerin etkimesi fakat aynı penetrasyonun sağlanmaya çalışılmasından ötürü disk keskilere kafanın dönme hareketine karşılık yataklarında dönmemekte ve bloklu tip aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Bu tip aşınmaya maruz kalan disk keskilere kesici kafada herhangi bir kesme işlemine yardımcı olmadığı gibi geriye kalan disk keskilere daha fazla yük almasını ve daha çabuk aşınmasını tetikler.

Güney Kore'de ø7,28 (m) çaplı bulamaç türü (*)TBM'nin kullanıldığı bir tünel projesinden elde edilen karışık kazı kesitlerindeki günlük ilerleme miktarları ve disk keski tüketimleri Çizelge 3.6'da belirtilmiştir, (Oh ve Choi, 2003).

(*)Kesici kafada merkezde 4, arında 37, dış çevrede 4 adet olmak üzere toplam 45 adet disk keski vardır (birim kesici kafa alanı başına ≈ 1.08 adet disk keski). Kafa tasarımında açıklık oranı % 29 olarak alınmıştır.

Çizelge 3.6 : Karışık kazı kesitlerinde TBM performansı (Oh ve Choi, 2003).

Kazı Kesiti (Kesit Alanı Cinsinden)	2/3 Kaya	1/2 Kaya 1/2 Zemin	1/3 Kaya 2/3 Zemin	Zemin + büyük boyutlu çakıllar
Geçiş Zonunun Uzunluğu (m)	24	16,8	38,4	212,4
Kayanın Basınç Dayanımı ^(*) (kgf/cm ²)	400 - 2400	600 - 1100	300-2000	-
Değişen Disk Sayısı (adet)	9	45	41	30
Disk Ömrü (m/disk)	2,66	0,37	0,93	7,08
İlerleme Miktarı (m/gün)	3,0	2,1	1,536	5,24

^(*) Granodiyorit + Andezit

Çizelge 3.6 'dan elde edilen pratik sonuçlar şunlardır:

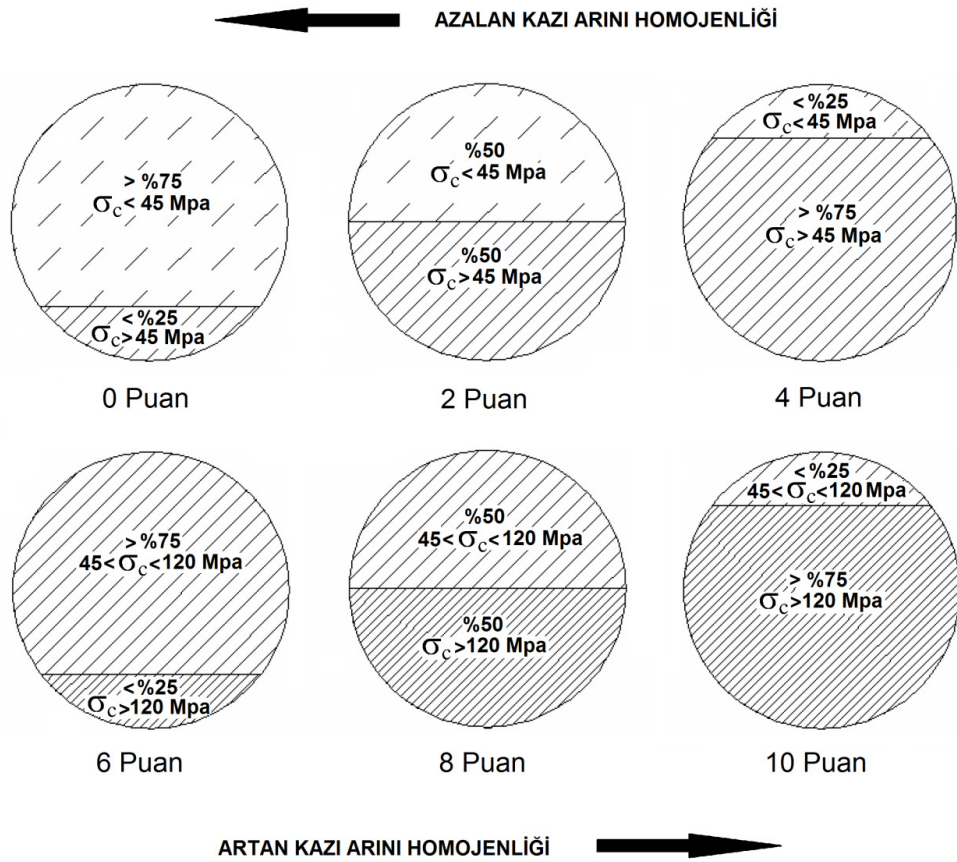
- Kazı kesitinde kaya katmanının kapladığı alan azaldıkça, daha açık deyişle kazı arını giderek heterojen olması durumunda ortalama ilerleme hızı azalmaktadır.
- Artan heterojenlik ile disk keski ömrü de belirgin ölçüde azalmakta ve disk keski değiştirme gereksinimi artmaktadır.
- En dikkat çekici unsur en çok disk değişiminin olduğu arın kesitinin %50 kaya - %50 zemin olmasına karşın en düşük ilerleme hızı arın kesitinin 1/3 kaya - 2/3 zemin olduğu durumdur.
- TBM' in bulamaç tip olmasına karşı değişen arın homojenliğine tepkisi çok açık olarak görülmektedir. Nitekim tekrar hakim arın kesitinin zemin olması durumunda ilerleme hızları anlamlı bir şekilde artmaktadır.

RME indeksinde yer alan kazı kesiti homojenliğine ilişkin puanlama üzerine ayrıntılı değerlendirme ilk defa RME₂₀₀₈ versiyonunda yapılmıştır. Kazı kesitinin homojenliğine yönelik olarak uygulanan puanlama sisteminde basınç dayanımı ve kaya katmanının arında kapladığı alanın yüzdesi baz alınmıştır (Şekil 3.9).

En düşük puan (0) basınç dayanımı $\sigma_{lab} < 45$ (MPa) olan kaya biriminin kazı arınında % 75 'den fazla, $\sigma_{lab} > 45$ (MPa) kaya biriminin de % 25 'den az bir alan kaplama durumuna karşı verilmiştir.

En yüksek puan (10) ise $\sigma_{lab} > 120$ (MPa) olan kaya biriminin kazı kesit alanında % 75 'den daha fazla alan kaplaması, $45 < \sigma_{lab} < 120$ (MPa) aralığında bulunan kaya katmanının % 25 'den daha küçük bir alan işgal etmesi durumunda verilmektedir.

Kısacası; karışık kazı arını açısından en kritik durum, zayıf dayanımlı ($\sigma_{lab} < 45$ MPa), çatlaklı kaya biriminin kazı alanında % 75'den daha büyük alan kaplamasıdır. En ideal kazı arını ise $\sigma_{lab} > 120$ (MPa) olan kaya biriminin arında % 75 'den daha fazla olan yer almasıdır, (σ_{lab} = sağlam kaya numunesinin basınç dayanımı).



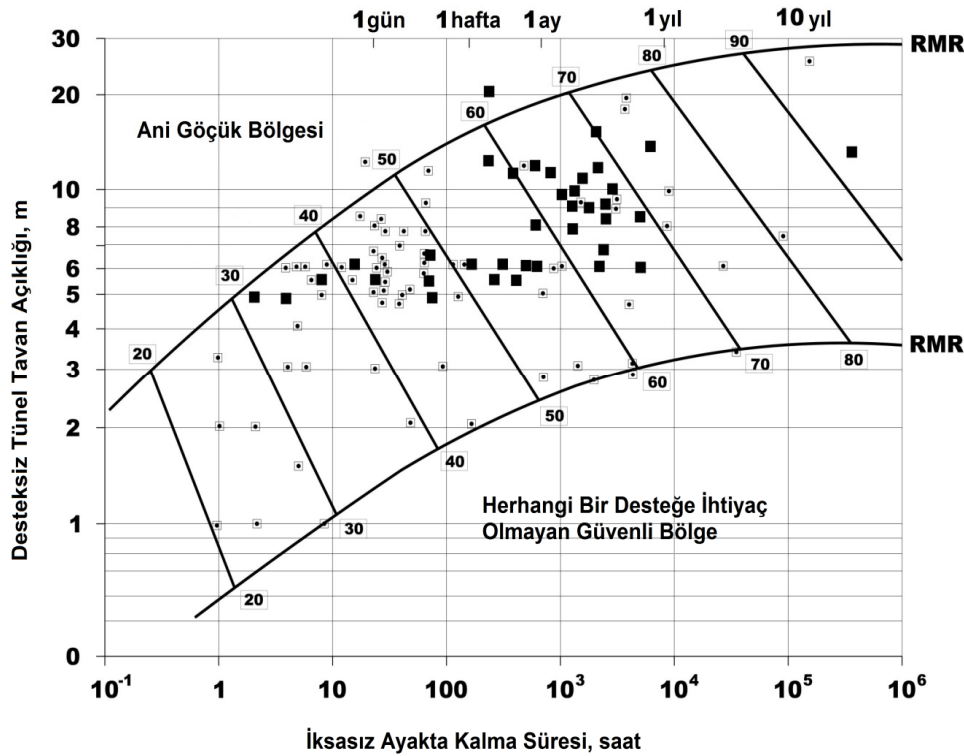
Şekil 3.9 : RME indeksinde kazı arının homojenliğine ilişkin puanlar (Bieniawski ve diğ., 2009).

3.5 İksasız Durma Süresi

Tünel arının iksasız açıklık kavramı tünel literatüründe ilk defa 1958'de Laufter tarafından önerilmiş olmakla birlikte, daha geniş ölçekte kullanımı aynı kavramın değiştirilerek 1993 yılında RMR kaya sınıflama sistemi içinde yer almasıyla sağlanabilmektedir (Ulusay ve Sönmez, 2007).

TBM ile kazıda, kazı arını ile son yapılan iksa arasındaki iksasız mesafesinin statik şekilde durma süresi büyük önem taşımaktadır. Kuşkusuz bu süre ne kadar fazla ise özellikle pabuçlu tip TBM'lerde kazı sonrası iksaya harcanan zamanın kazı işlemine harcanabilmesi ve makine yararlanma oranlarının daha büyük olması anlamını taşımaktadır. Kısacası, RME sınıflama sisteminde iksasız kalabilme süresi ne kadar büyük ise aldığı ortalama puan o denli yüksek olacak ve buna bağlı olarak da RME artacaktır (Çizelge 3.1).

RME sistemindeki iksasız durma süresi RMR 1989 versiyonunda tavan açıklığı ile RMR puanı yardımıyla kestirilebilir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 : RMR₈₉ kaya sınıflama sisteminde tavan açıklığı -RMR- iksasız kalma süresi ilişkileri (Bieniawski, 1989; Bieniawski ve diğ. 2007b).

Şekil 3.10'da belirtilen orijinal RMR değerleri delme ve patlatma yöntemiyle kazı yapılan tünel örneklerine aittir. Del patlat yönteminde patlatma sırasında oluşan şok dalgaları nedeniyle kazı bölgesi TBM kazısına nazaran daha yüksek bir deformasyona maruz kalmaktadır. Bu sebeple TBM kazılarında iksasız ayakta durma sürelerinin del patlat yöntemine göre daha uzun olması beklenmelidir. Bu bağlamda Alber (2000) çalışmasında TBM kazıları için iyileştirilmiş RMR_{TBM} kavramı ortaya konmaktadır.

Buna göre **(3.9)** regresyon bağıntısı kullanarak delme ve patlatma ile kazı yapılan tünellere ait RMR değerleri yardımıyla TBM kazısındaki kaya kütle puanı kestirilebilir.

$$RMR_{TBM} = 0,84 * RMR_{(d,p)} + 21 \quad (3.9)$$

Örneğin klasik yöntemle kazılan bir tünelde RMR değeri 40 olarak saptansın, aynı kaya kütlesi TBM ile kazı yapılma durumunda kaya kütle puanlama sisteminde;

$$RMR_{TBM} = 0,84 * 40 + 21 \approx 55$$

olarak değerlendirilecektir (kaya kütle değerinde artış oranı %30 olmaktadır). Tünel çapı $\varnothing 7$ (m) ve $RMR_{TBM} = 55$ değerlerine karşı gelen iksasız durma süresi Şekil 3.10'dan yaklaşık olarak 200 saat (≈ 8 gün) bulunmaktadır. RME puanlama sisteminde bu süre için (25) puan verilmektedir.

3.6 Su Gelirinin Etkisi

Genel olarak su gelirinin kaya kütlelerine etkisi iki şekilde gözlemlenmektedir. Birincisi, kaya kütlelerine etkiyen düşey, yatay toplam basıncı azaltarak kaya kütlelerinin nihai taşıma kapasitesini azaltması (efektif gerilme etkisi) ikincisi ise özellikle kil içeriği yüksek kıltaşı, siltaşı, marn gibi kayaları yumuşatma etkisi ile fiziksel (kuru birim hacim ağırlık, yüzey sertlik vb.) ve mekanik dayanım büyüklüklerini (basınç, çekme dayanımları, elastik modül vb.) azaltmasıdır. Kısacası; artan su içeriği ile kazı arınında etkin penetrasyonun (kesme derinliği) temini giderek zorlaşmaktadır. Ayrıca gerek su gelirinin önlenmesi için yapılan enjeksiyon işlemi gerekse de arında biriken suyun tahliye edilmesinden kaynaklanan zaman kayıplarından ötürü TBM'den beklenen yararlanma oranları da dikkat çekici ölçüde azalmaktadır. Azalan yararlanma oranlarına bağlı olarak TBM'nin ortalama günlük ilerleme miktarı da ciddi oranlarda düşebilmektedir.

Anadoluray Kadıköy - Kartal Metro projesinde S360 TBM'nin 11 Kasım 2008 tarihinde yaptığı kazı esnasında ciddi miktarlarda arından su geliri rapor edilmiştir. TBM'nin kapalı modda (EPB) kazı yapmasına karşın yüksek su gelirine bağlı olarak istenilen kıvamda pasa oluşturulamaması nedeniyle ciddi basınç kayıpları ve pasanın kesici kafadan uzaklaştırılmasında önemli sorunlar yaşanmıştır. 11.11.2008 tarihinden itibaren 22.11.2008 tarihine kadar toplamda 18,12 (m) kazı yapılabilmektedir.

Arın su gelirinin arttığı bu 12 günlük süre içinde ortalama günlük ilerleme miktarı 1,51 (m/gün) seviyelerinde kalmıştır. Kapalı modda kazı esnasında ortalama ilerleme miktarlarının 8,07 (m/gün) olduğu düşünülürse artan su gelirinin ilerleme miktarlarına etkisi bir kat daha fazla anlam taşımaktadır. Şekil 3.4 'den de takip edilebileceği üzere su geliri ile karşılaşılan dek aylık ilerleme miktarları ortalama 240 (m) seyrederken Kasım 2008 ayı için bu değer arından gelen suyun etkisiyle 102,09 (m) seviyelerinde kalmaktadır. İlerleme miktarlarının bu denli azalması sonucu su geliri altında da kazı işleminin yapılabilmesi için kesici kafaya kompresör yardımıyla basınçlı hava verilmeye başlanmıştır. Kesici kafa bölmesinin çok sık temizlenmesi sonucunda azalan yararlanma oranlarına bağlı ilerleme miktarlarındaki düşüş ve artan kimyasal sarfiyatları proje maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Su gelirinin kapalı modda çalışan bir TBM için ilerleme miktarlarında bu denli etkili olması, açık modda çalışan bir TBM üzerinde etkisinin daha iyi anlaşılmasında kolaylık sağlamaktadır.

Su geliri açısından kritik tektonik yapı olan faylar, TBM performansı bakımından çok ciddi darboğazlardır. Bieniawski ve diğ. (2009) çalışmasında çeşitli tünel projelerinde kazanılan deneyimler sonucunda oluşturulan Çizelge 3.7, incelenen konuda mühendise önemli kaynak oluşturmaktadır.

Çizelgeden ulaşılan sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Verilen bir tünel derinliğinde fay zonun kazı arınının kuru (su geliri olmama durumu) olması TBM performansı açısından uygun çalışma koşulu sağlamaktadır. Verilen TBM türü için su olması durumunda ortalama ilerleme miktarları kuru ortama kıyasla belirgin ölçüde düşmektedir.
- Aynı su geliri ve TBM türünde ise tünel derinliği TBM performansı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Şöyle ki " $> 0.1 \left(\frac{I_t}{dk.m^2} \right)$ " su gelinde kalkanlı tip bir TBM'in "<50 (m)" tünel derinliğinde günlük ilerleme miktarının aralığı 1 - 10 (m/gün) iken 200 metreden derin bir tünel projesinde ise beklenen günlük ilerleme miktarı 1 (m/gün)'ün altında kalmaktadır.
- Ayrıca su geliri altında kalkanlı TBM'lerin normal kalkansız tip (pabuçlu) TBM'lere kıyasla beklenen ilerleme miktarları göreceli olarak daha yüksektir. Bu nedenle TBM tipinin belirlenmesinde, beklenen su geliri ve basıncının TBM performansına etkisi gözlemlenmek suretiyle de ele alınması önemlidir.

Çizelge 3.7 : Kazı arındaki su gelirinin TBM'nin ilerleme hızı üzerine etkisi -Fay zonlarında- (Bieniawski ve diğ., 2009).

Tünel Derinliği (m)	< 50				50 - 200				>200 (Aşırı Sıkışma Olmama Durumu)			
Su Geliri Arında $\left(\frac{lt}{dk.m^2}\right)$	Kuru		< 0,1	> 0,1	Kuru		< 0,1	> 0,1	Kuru		< 0,1	> 0,1
Kaya Türü	Blok	Kil	Herhangi		Blok	Kil	Herhangi		Blok	Kil	Herhangi	
Kalkanlı TBM’nin ortalama ilerleme miktarı, (m/gün)	10 - 20	> 40	5 - 20	1 - 10	10 - 20	> 40	5 - 15	1 - 5	5 - 15	20 - 40	1 - 10	< 1
Pabuçlu TBM’nin ortalama ilerleme miktarı, (m/gün)	10 - 15		5 - 15	1 - 5	5 - 15		1 - 10	1 - 5	5 - 10		1 - 5	< 1

3.7 Derinlik ve Yatay Basınçların Etkileri

RME indeksinde dikkate alınmayan “derinlik basıncı” TBM kazı performansı üzerinde çeşitli şekillerde etkili olabilmektedir. Nitekim daha öncede belirtildiği üzere düşük kaya kalitelerindeki kaya birimlerinde, artan tünel derinliği ile sıkışma potansiyeli ile tünel cidarlarının TBM'e uyguladıkları basınçlara bağlı olarak itme kuvvetleri yeterli düzeyde tasarlanmamış TBM'lerde kazı işleminin gerçekleştirilmesi için gerekli normal disk kuvvetleri “penetrasyon derinliği” bakımından yeterli kalamayabilmektedir. Bu durum, TBM'nin günlük ilerleme miktarına olumsuz etki etmektedir. Özellikle fay zone gibi ciddi süreksizlik düzlemlerinin geçişlerinde ilerleme hızları artan tünel derinliğiyle birlikte çok fazla azalmaktadır (Çizelge 3.7).

Derinliğin, diğer bir etkisi de kaya kütlesinin aşınma indeksini arttırmasıdır. Alber (2008a) ile Ruehl ve Alber (2006) kaynaklarında farklı kaya numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda artan yanal (çevresel) basınç (σ) ile ^(*)Cerchar aşındırıcılık indeks (CAI) değerinin ciddi bir hızla arttığı deneysel olarak gösterilmiş ve "CAI" ile " σ " arasında anlamlı bir doğrusal ilişkinin varlığı rapor edilmiştir **(3.10)**.

$$CAI = CAI_0 + M * \sigma \quad (3.10)$$

Burada;

CAI_0 = Numuneye uygulanan yanal basıncın sıfır ($\sigma = 0$) olduğu durumunda ölçülen Cerchar aşınma indeksini, $m = (CAI = f(\sigma))$ doğrusunun eğimini ve σ = Numuneye uygulanan yanal (çevresel) basıncı (MPa) temsil etmektedir.

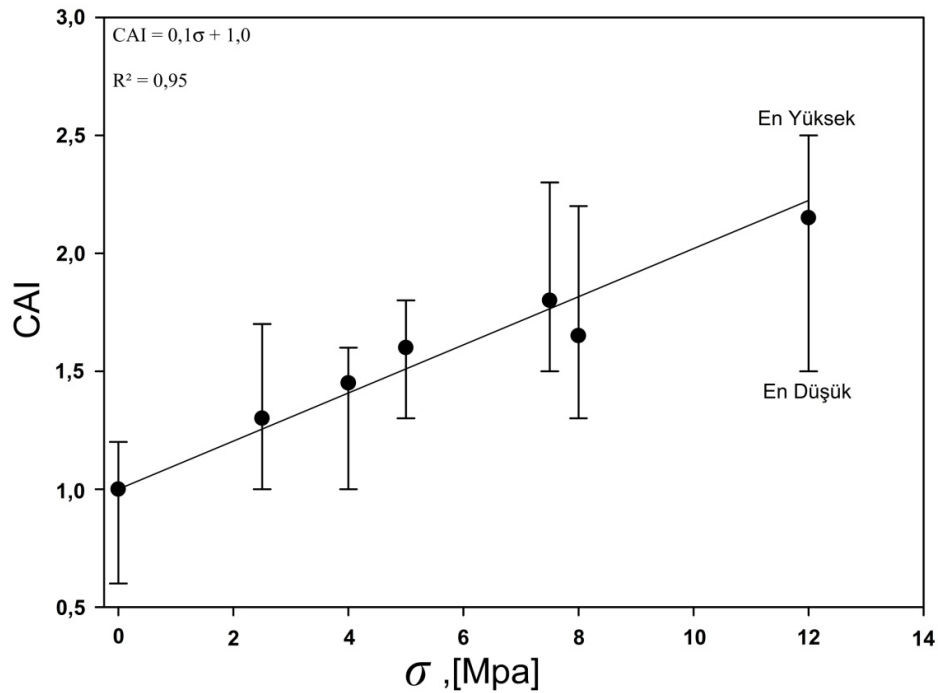
Farklı kayaç türleri ve bunlara ait aşındırıcılık değerleri ile beraber aşındırıcılık dereceleri Çizelge 3.8 'de toplu olarak gösterilmiştir.

^(*)CAI, Cerchar aşınma deneyinde 160 kg/mm² çekme dayanımı olan çelik malzemeden yapılmış tepe açılı konik bir uç 7 (kg) bastırma kuvveti ile gayrimuntazam numune üzerinde 1 (cm) çekilmekte ve uçta oluşan aşınma yüzeyi kayaç numunesinin aşındırıcılığını vermektedir, 1/10 (mm)'lik bir aşınma yüzeyi bir birim Cerchar aşınma indeksi olarak tanımlanmaktadır (Bilgin, 1989).

Çizelge 3.8 : CAI değerlerine göre aşındırıcılık sınıfları ve bunlara ait olası kaya cinsleri (Frenzel ve diğ., 2008'den kısaltılarak).

CAI	Aşındırıcılık	Kaya numuneleri
0 - 0,3	Aşındırıcı değil	Organik materyal
0,3 - 0,5	Yeterince aşındırıcı değil	Çamurtaşı, Marn
0,5 - 1,0	Çok az aşındırıcı	Kireçtaşı, Mermer
1,0 - 2,0	Aşındırıcı (orta)	Kiltaşı, Kumtaşı
2,0 - 4,0	Çok aşındırıcı	Bazalt, Kuvarsitik Kumtaşı
4,0 - 6,0	Çok yüksek aşındırıcı	Amfibolit, Kuvarsit

Tek eksenli basınç dayanımı 49,4 (MPa) olan bir kumtaşı numunesine uygulanan çeşitli yanal basınçlar (0, 2, 5, ...MPa) sonucunda numunenin değişen Cerchar aşınma indeksi Şekil 3.11'de verilmiştir (Ruehl ve Alber, 2006).



Şekil 3.11 : Kumtaşı numunesinden elde edilen $CAI = f(\sigma)$ değişimi, CAI = Cerchar aşınma indeksi, σ = Numuneye uygulanan yanal basınç (MPa), "●" ortalama Cerchar aşınma indeksi değeri (Ruehl ve Alber, 2006).

Tünel güzergahı boyunca CAI değerlerinin bilinmesi yardımıyla disk keski ömürleri ve buna bağlı olarak da değişim miktarları ile maliyetleri kestirilebilmektedir. Pratik mühendislik uygulamaları açısından disk tüketimin basit ve kestirimci bir yolla bulunması bakım ve tedarik süreleri ile stok miktarlarının belirlenmesinde büyük bir öneme sahiptir.

Bu bağlamda Gehring (1995) çalışmasında disk aşınması **(3.11)**

$$V_s = 0,74 * CAI^{1,93}, \left(\frac{mg}{m} \right) \quad (3.11)$$

ifadesiyle verilmektedir (Alber, 2008b). Burada " V_s " bir disk keskinin kesici kafada bulunduğu konumda 1 (m) yol alması sonucu toplamda kaybettiği ağırlık olmaktadır.

Aynı çalışmada sabit kesitli (CCS) 17" bir disk keskinin homojen bir aşınma sonucu izin verilen maksimum ağırlık kaybının 3500 (g) olduğu belirtilmektedir (Gehring, 1995; Alber, 2008b).

Basit bir sayısal örnek ile **(3.11)** yardımıyla disk tüketimi hesaplanacaktır. Kabuller; $CAI = 2$; $p = 15$ (mm/dev); 17" disk keski ve kesici kafadaki konumu ise $R = 3$ (m) olsun.

Yapılan kabuller için **(3.11)** çalıştırıldığında:

$$V_s = 0,74 * 2^{1,93} = 2,82 \left(\frac{mg}{m} \right)$$

disk keskinin 1 (m) kat ettiği yol için aşınma miktarı 2,82 (mg/m) olarak bulunmaktadır. Disk keskinin izin verilen aşınmaya ulaşana kadar toplam kat etmesi gereken yol ise **(3.12)** yardımıyla hesaplanabilir.

$$Yol_{disk} = \frac{3500000(mg)}{V_s \left(\frac{mg}{m} \right)}, (km) \quad (3.12)$$

$$Yol_{disk} = \frac{3500000(mg)}{2,82 \left(\frac{mg}{m} \right)} = 1241 (km)$$

Burada; Yol_{disk} = disk keskinin kesici kafada bulunduğu konumda izin verilen aşınma miktarına ulaşana kadar kat ettiği yoldur. Disk keskinin izin verilen aşınma miktarına ulaşması için 1241 (km) yol kat etmesi gerektiği görülmektedir.

Disk keskinin izin verilen aşınma miktarına ulaşana kadar TBM'in kat ettiği yol ise **(3.13a)**, **(3.13b)** ve **(3.13c)** 'nin bilinmesi yardımıyla bulunabilmektedir.

$$Yol_{1\ dev} = R * 2 * \pi, (m) \quad (3.13a)$$

$$Yol_{1\ dev} = 18,84 \left(\frac{m}{dev\ kesici\ kafa} \right)$$

$$Devir_{TBM} = \frac{Yol_{disk}}{Yol_{1\ dev}}, (devir) \quad (3.13b)$$

$$\text{Devir}_{\text{TBM}} = \frac{1241000}{18,84} = 65870 \text{ (devir)}$$

$$\text{TBM}_{\text{yol}} = \text{Devir}_{\text{TBM}} * p, \text{ (m)} \quad (3.13c)$$

$$\text{TBM}_{\text{yol}} = 65870 * 0,015 = 988 \text{ (m)}$$

Hesaplamalarda; R = disk keskinin kesici kafada bulunduğu yarıçap; Yol_{dev} = disk keskinin kafanın bir dönüşü sonucu kat ettiği yol; $\text{Devir}_{\text{TBM}}$ = TBM'nin disk keskinin ömrünü tamamlaması için gerekli toplam dönüş sayısı; p = kazı esnasında uygulanan ortalama penetrasyon; TBM_{yol} = TBM'in disk keskinin ömrünü tamamlaması için kat etmesi gereken mesafe.

Yukarıdaki hesaplamalar yardımıyla yapılan kabuller sonucu istenilen pozisyondaki disk keski tüketim miktarının 988 (m/disk) olduğu görülmektedir. Bu da her 1 (km) 'de bir adet o pozisyondaki diskin değiştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Kesici kafada farklı pozisyonlarda (R, yarıçaplarda) bulunan disk keskinin farklı tüketim değerleri olacaktır. Burada unutulmaması gereken husus disk keskinin TBM dış çapına ne kadar yakınsa TBM'nin bir dönüşü için kat edeceği yolun o denli fazla olmasıdır. Başka kelimelerle dış çapa yakın disk keskinin merkezdekilere oranla daha çok aşınmaya ve buna bağlı olarak daha az kullanım ömürlerine sahip olmaktadır. Pratik tünelcilikte de dış disk keskinin gerek izin verilen aşınma miktarlarının merkezdekilere oranla daha küçük tutulması gerekse de yukarıda belirtilen husus doğrultusunda kat ettikleri yolun daha fazla olması sebebiyle değişim sıklıkları merkezdekilere oranla daha çok olmaktadır. Ayrıca hesaplamalardan da izlenebileceği üzere uygulanan penetrasyon miktarları arttırıldığında aynı disk keski ile daha uzun mesafeler kat edilmesi teorik olarak mümkün olmaktadır. Bu da disk keskinin ömürlerinin hesaplanmasında formasyonun mekanik özellikleri kadar uygulanan penetrasyon miktarlarının da ne denli büyük bir öneme sahip olduğunu göstermektedir (Frenzel ve diğ., 2008).

Farklı litolojide kaya numunelerinin yanal basıncın olmadığı " $\sigma = 0$ " durumundaki CAI_0 'leri, yanal basınç altındaki CAI değerlerindeki artış hızları, diğer fiziksel ve mekanik büyük özellikleriyle birlikte Çizelge 3.9 'da verilmiştir (Alber, 2008a 'dan kısaltılarak).

Çizelge 3.9 : Farklı litolojide numunelerin yanal basınç altındaki Cerchar aşınma indeksleri (Alber, 2008a 'dan kısaltılarak).

	Kumtaşı	Grovak	Granit	Mikasışt
CAI _o	1,03	0,98	4,34	4,02
CAI artış hızı, Birim yanal basınç (MPa) için	0,097	0,041	0,02	0,027
σ_{lab} , (MPa)	49,4	107,9	185,5	115,8
σ_c , (MPa)	3,0	8,1	7,2	9,3
E, (GPa)	13,7	37,4	47,1	39,6
V _p , (km/sn)	2,46	4,55	3,92	4,18
Y, (t/m ³)	2,22	2,48	2,64	2,69
Q, (%)	50,4	37,2	32,6	41,2
Q _e , (%)	60,9	42,6	52,6	54,2

CAI_o, ($\sigma = 0$) 'de ölçülen Cerchar aşınma indeksi.

σ_{lab} , σ_c = Sırasıyla tek eksenli basınç ve çekme dayanımı, E = Elastisite modülü

V_p = Basınç (boyuna) dalgası yayılma hızı, Y = Birim hacim ağırlık.

Q = Kuvars içeriği, Q_e = Eşdeğer kuvars içeriği.

Çizelge 3.9 'dan yapabilecek değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir:

- Yanal basınç (σ) uygulanmasıyla ölçülen Cerchar aşınma indeks değeri (CAI), yanal basıncın olmadığı ($\sigma = 0$) durumda ölçülen değerden (CAI_o) daima büyüktür ve CAI'daki en yüksek artış hızı kumtaşında gözlenmiştir.
- CAI ile " σ " arasındaki ilişki doğrusal bir regresyon modeliyle çok güçlü bir şekilde ifade edilebilmektedir. Bu bağıntılardan yararlanılarak verilen yanal basınç ve litoloji için kaya kütlesinin aşındırıcılığı daha gerçekçi bilinebilmektedir. Özellikle derin tünel projelerinde artan yanal basınçların etkisiyle CAI değerlerinin basıncın olmadığı duruma göre 1,5 hatta 2 kat oranında arttığı görülmektedir. Bu bilgiyi göz önünde bulundurulmak suretiyle TBM tasarımı yapılmalı ve makine yararlanma oranları hesaplanmalıdır. Nitekim CAI değerlerindeki ufak artışlarda bile **(3.11)** eşitliğinin çalıştırılması durumunda disk keski tüketimlerinin CAI değerinin neredeyse karesi ile orantılı olarak arttığı görülmektedir. Daha açık bir ifade ile CAI değerinin artışı makine yararlanma oranlarını azaltmakta ve günlük ortalama ilerleme miktarlarında ciddi düşüşlere neden olabilmektedir. Disk keski değişimlerinin toplam çalışma süreleri üzerindeki etkisi (%10 ila %15 arasında) Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'dan açıkça takip edilebilmektedir.

3.8 Spesifik Enerji Büyüklüğüne Etki Eden Faktörler

Özellikle farklı makine çaplarında benzer formasyon şartlarında kazı yapan TBM'lerin birbirleri ile mukayese edilebilmeleri için spesifik enerji (SE) önemli parametrelerden biridir. Bilindiği üzere aynı formasyon şartları için TBM üreticileri birbirlerinden farklı kesici kafa tasarımları ve buna paralel olarak kurulu güç ile gelebilmektedirler. Ayrıca tünel projesinde farklı vardiyalarda farklı personelin de görev aldığı düşünüldüğünde tek bir potada TBM'lerin mukayesesini sadece günlük ilerleme miktarları üzerine kurmak hem yetersiz hem de yanlış olmaktadır. Bu nedenle spesifik enerji (SE) hem formasyonun kazılabilirliğine yönelik ön bilgi vermesi hem de yapılan kazı işleminin optimum koşullarda gerçekleştiğinin bilinmesi açısından büyük öneme sahiptir.

Bieniawski ve diğ. (2007a), 1 (m³) kaya hacminin kazılmasında tüketilen enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır. Buna göre aynı kaynakta spesifik enerji kaya kütlesi kazılabilirlik indeksi (RME) cinsinden (3.14) regresyon bağıntısıyla vermektedir.

$$SE = 3,3 * \exp(0,0335 \cdot RME), \left(\frac{MJ}{m^3}\right) \quad 15 < RME < 95, r = 0,767 \quad (3.14)$$

Burada spesifik enerji (3.15) yardımı

$$SE = \frac{F}{A} + \frac{2 \cdot \pi \cdot RPM \cdot T}{A_k \cdot ARA} = \frac{8 \cdot RPM \cdot T}{D^2 \cdot ARA} \left(\frac{MJ}{m^3}\right) \quad (3.15)$$

ile ifade edilebilir.

RPM = Kesici kafanın devir sayısı (devir/sn); T = Uygulanan tork (kNm); A_k = Kesici kafanın kesit alanı, A_k = 0,785 x D² (m²); ARA = ortalama ilerleme miktarı (m/sn); F = Uygulanan toplam itme kuvveti (kN).

SE = f(RME) değişimi (3.14) 'den görüleceği üzere artan RME indeksiyle 1 (m³) kaya kütlelerinin kazısı için gerekli spesifik enerji tüketimi de artmaktadır. Örneğin RME = 30'da SE ≈ 9 MJ/ m³) iken RME = 90 'da SE ≈ 67 (MJ/m³) düzeyindedir. RME' deki artış oranı % 200 iken spesifik enerjide artış hızı % 645 düzeyinde olmaktadır.

Spesifik enerjiyi minimum kılan disk keski aralığının penetrasyona oranına (s/p) karşılık gelen disk kuvvetleri, kayanın basınç dayanımına (σ_{lab}) bağlı olarak (3.16a) ve (3.16b) regresyon bağıntıları ile ifade edilebilir (Snowdan ve diğ., 1982).

$$\frac{F_N}{\sigma_{lab}} = 0,15 * p - 0,21 ; 2 \text{ (mm)} < p < 10 \text{ (mm)}, n = 13, r = 0,916 \quad (3.16a)$$

$$\frac{F_R}{\sigma_{lab}} = 0,027 * p - 0,07 ; 2 \text{ (mm)} < p < 10 \text{ (mm)}, n = 13 \quad r = 0,860 \quad (3.16b)$$

Burada F_N , F_R = sırasıyla normal ve yuvarlanma kuvveti (kN), p = penetrasyon (mm), n = veri sayısı, r = korelasyon katsayısı. Verilen bağıntılar laboratuarda 4 farklı kaya türünün ($50 \text{ MPa} < \sigma_{lab} < 339 \text{ MPa}$) doğrusal kesme deneylerinden (Disk keski çapı 200 (mm) ve numune blok hacmi $1 \text{ (m}^3\text{)}$) çıkarılmıştır.

Basınç dayanımları sırasıyla $\sigma_{lab} = 50 \text{ (MPa)}$ olan kumtaşı ve $\sigma_{lab} = 175 \text{ (MPa)}$ olan granit formasyonlarda 8 (mm)'lik bir penetrasyon derinliğini sağlayacak disk kuvvetleri sırasıyla (3.16a) ve (3.16b) yardımıyla:

Kumtaşı için;

$$\left. \begin{aligned} F_N &= (0,15 \cdot 8 - 0,21) * 50 = 49,5 \quad (\text{kN}) \\ F_R &= (0,027 \cdot 8 - 0,07) * 50 = 7,3 \quad (\text{kN}) \end{aligned} \right\} \frac{F_R}{F_N} = 0,14$$

Granit için ;

$$\left. \begin{aligned} F_N &= (0,15 \cdot 8 - 0,21) * 175 = 173 \quad (\text{kN}) \\ F_R &= (0,027 \cdot 8 - 0,07) * 175 = 25,5 \quad (\text{kN}) \end{aligned} \right\} \frac{F_R}{F_N} = C_c = 0,14$$

olarak bulunur (hesaplanan disk kuvvetleri düzeyinde spesifik enerji tüketiminin minimum olduğu kabul edilmektedir). Aynı penetrasyon değerinde disk kuvvetleri kaya numunesinin tek eksenli basınç dayanımı ile artmaktadır. Kesme katsayısı, F_R / F_N , ise basınç dayanım değerinden bağımsızdır.

Aynı kaynakta disk keski kuvvetlerinin oranı (kesme katsayısı) (3.17) regresyon bağıntısı ile verilmektedir.

$$\frac{F_R}{F_N} = C_c = \frac{1}{21,71 \cdot p^{-0.656}} \quad (3.17)$$

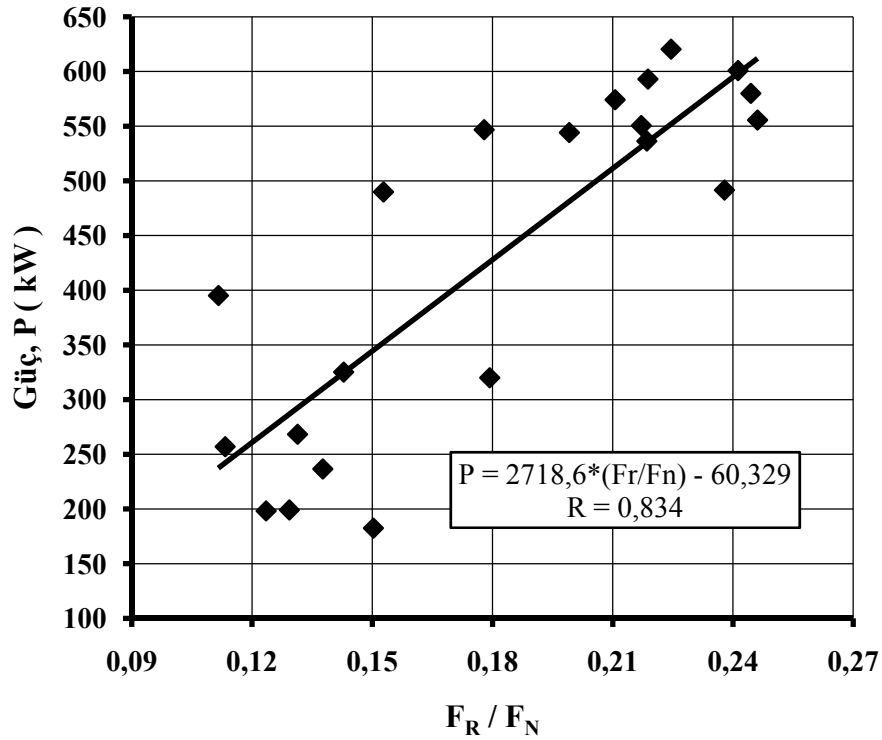
Sayısal örnekte kabul edilen penetrasyon derinliği için kesme katsayısı;

$$C_c = \frac{F_R}{F_N} = \frac{1}{21,71 \cdot 8^{-0.656}} = 0,18$$

olarak hesaplanmaktadır. Gerek ele alınan örnekten gerekse de (3.17) regresyon bağıntısından görülebileceği üzere kesme katsayısı (C_c) basınç dayanımından bağımsız bir şekilde artan penetrasyon derinliğiyle birlikte belirgin ölçüde artmaktadır.

Gertsch ve diğ. (2007) çalışmasında kesme katsayısının, bir anlamda verilen TBM kazısı için gereken tork büyüklüğünü ifade ettiğini ve bu değerin yüksek olmasının yüksek tork gereksinimi işaret ettiğini belirtmişlerdir.

Nitekim artan kesme katsayısı (F_R/F_N) değerleri için Balcı (2009) çalışmasından elde edilen veriler ışığında hazırlanan Şekil 3.12 'den de gücün doğrusal bir şekilde arttığı izlenmektedir (Çizelge 4.6).



Şekil 3.12 : Değişen kesme katsayısı (F_R / F_N) ile kazı için gerek duyulan (elektrik) güç (P) arasındaki ilişki.

Kazı mekaniği literatüründe ideal disk keski aralığının penetrasyona oranı (s/p) (3.18) yardımıyla bulunabilir (Snowdan ve diğ., 1982).

$$\frac{s}{p} = \frac{\sigma_{lab}}{c} = \frac{\sigma_{lab}}{0,5*(\sigma_{lab}*\sigma_c)^{0,5}} = 2 * \left(\frac{\sigma_{lab}}{\sigma_c} \right)^{0,5} \quad (3.18)$$

Burada açıklanmamış terimler sırasıyla; c = Kaya numunesinin kohezyon değeri (MPa) ve σ_c = kayan numunesinin çekme dayanımıdır (MPa).

Görüldüğü üzere optimum şartlar için disk keski aralığının penetrasyona oranı kaya numunesinin basınç dayanımının kohezyona oranına (σ_{lab}/c) bağlıdır.

Basınç dayanımına göre spesifik enerji (SE) tüketimini minimum kılan (s / p) oranı ise **(3.19a)**, **(3.19b)** ve **(3.19c)** 'de verilmiştir (Snowdan ve diğ., 1982).

$$\sigma_{lab} < 25 \text{ (MPa)} \quad s/p = 3 \quad (3.19a)$$

$$25 < \sigma_{lab} < 100 \text{ (MPa)} \quad s/p = 5 - 10 \quad (3.19b)$$

$$\sigma_{lab} > 100 \text{ (MPa)} \quad s/p = 10 - 15 \quad (3.19c)$$

olarak önerilmektedir (Snowdan ve diğ., 1982).

Örneğin, disk aralığı $s = 80$ (mm) için penetrasyon değerleri (p) **(3.19a)**, **(3.19b)** ve **(3.19c)** yardımıyla sırayla 26,7 (mm) , 16 - 8 (mm) ve 8 - 5,3 (mm) elde edilmektedir. Tekrar ifade edilirse artan kaya gevrekliği (σ_{lab}/σ_c) ile keski aralığının penetrasyona (s/p) oranı da artar.

3.9 Makine Kullanım Oranına Etki Eden Faktörler

Bilindiği gibi bir TBM'nin günlük ilerleme miktarı (AR) **(3.20a)** ve **(3.20b)** yardımıyla belirlenmektedir.

$$ROP \text{ (m/sa)} = 0,06 * p \text{ (mm/dev)} * RPM \text{ (dev/dk)} \quad (3.20a)$$

$$AR \left(\frac{m}{gün} \right) = ROP \left(\frac{m}{sa} \right) * n_c \left(\frac{adet}{gün} \right) * 8 \left(\frac{sa}{vardiya} \right) * U \quad (3.20b)$$

Burada ;

p = Birim devir sayısında penetrasyon miktarı, (mm/dev).

U = TBM' nin belirli bir çalışma süresi içinde fiilen kazıda çalışma oranını ifade etmektedir,

$U = T_k / T$ 'dir. Burada " T_k " TBM 'nin " T " zaman diliminde fiilen kazı işleminde çalışma süresi,

T = Günlük toplam çalışma süresi (sa).

Saatlik penetrasyon hızı (m/sa) ile ifade edildiğinde günlük ilerleme miktarı ise;

Burada RPM = Kesici kafanın bir dakikadaki devir sayısı, dev/dak, n_c = Bir gün içindeki vardiya sayısı.

Yukarıdaki bağıntılardan anlaşılacağı üzere TBM 'nin ilerleme miktarını denetleyen iki temel faktör; penetrasyon miktarı (p) ve TBM'den yararlanma oranıdır (U).

Penetrasyon miktarına etki eden faktörler daha önceki bölümde incelendiğinden burada "U" büyüklüğüne etki eden faktörler üzerinde durulacaktır.

"U" değerini etkileyen kimi faktörler aynı zamanda penetrasyon miktarını da etkilemektedir. Kazı literatüründe Bilgin ve diğ. (1999) çalışmasında önerilen makine kullanım oranını doğrudan doğruya veren puanlama sistemi (RMU), anılan oran üzerinde etkili olan doğal ve işletme faktörlerini açıklanmaktadır. RMU sisteminin ø5 (m) çaplı çift kalkanlı tip bir TBM'de ve kullanılan iksa sisteminin püskürtme beton, çelik hasır ve çelik bağın oluşturduğu bir tünel projesinde geliştirildiği burada unutulmamalıdır (Çizelge 3.10). Bununla beraber özellikle pabuçlu TBM'ler ile çift kalkanlı tip TBM'lerde yüksek kaya kütle kalitelerinde (RMR) su olmama durumu için gerek geçici iksaya gerekse de enjeksiyona ihtiyaç duyulmaması sonucu makine yararlanma oranları RMU sistemi ile hesaplanan değerlerden daha yüksek değerler alabilmektedir.

Çizelge 3.10 : TBM'den yararlanma oranını belirleyen RMU puanlama sistemi (Bilgin ve diğ., 1999).

RQD Puanlama	> 50 10	70 - 50 8	50 - 30 4	30 - 20 2	< 20 0
Çatlaklardaki kil dolgu Puanlama	Yok 4	Çok az 3	Çatlak/fisürleri Doldurmakta 2	Çok 0	Aşırı 0
Su geliri Puanlama	Yok 4	Islak 3	Damlama 2	Sızıntı 1	Yüksek debi 0
Üstlenicinin deneyim düzeyi Puanlama	Çok deneyimli 6	Çok iyi 5	İyi 4	Orta 2	Zayıf 0
Bakım ve onarım olanakları Puanlama	Üst düzeyde 6	Çok iyi 5	İyi 4	Orta 2	Zayıf 0

Değerlendirme

24 < RMU < 26

22 < RMU < 24

20 < RMU < 22

16 < RMU < 20

0 < RMU < 16

U = % 30 - 45

U = % 20 - 30

U = % 10 - 20

U = % 5 - 10

U = % 3 - 5

RQD = Kazı yapılan zonun ortalama kaya kalite göstergesi.

RMU = Toplam puan.

U = TBM'den yararlanma yüzdesi.

RMU puanlama sistemine ilişkin bir örnek vermek gerekirse Tuzla tünel projesinin 0 + 1028 (m)'deki şeyl kaya biriminde RQD = %5, çatlak sisteminde aşırı kil dolgu, ve çatlaklardan yüksek su geliri olması durumunda, üstlenicinin tünel açma deneyimi ile onarım ve bakım imkanlarının "çok iyi" olduğu kabulü altında anılan indeks değeri;

Faktörler (Çizelge 3.10):

○ RQD = %5 < %20	Puan = 0
○ Kil dolgu çok	Puan = 0
○ Yüksek su geliri	Puan = 0
○ Üstlenici deneyimi : çok iyi	Puan = 5
○ Onarım & bakım imkanı : çok iyi	Puan = 5

Toplam RMU puanı = 10

Belirlenen RMU = 10 için TBM'den yararlanma %3 - 5 alınabilir. Ortalama değer olarak U = % 4 kabul edilebilir.

Lineer kesme deneyinden hacimsel net kazı miktarı ICR = 60 (m³/sa) olarak elde edilmiş olsun TBM'nin teorik olarak penetrasyon hızı (ROP) **(3.21)** yardımıyla bulunabilir.

$$ROP = ICR \left(\frac{m^3}{sa} \right) * \frac{1}{A_k(m^2)} , \left(\frac{m}{sa} \right) \quad (3.21)$$

$$ROP = 60 * \frac{1}{0,785 * 5^2} = 3,05 \left(\frac{m}{sa} \right)$$

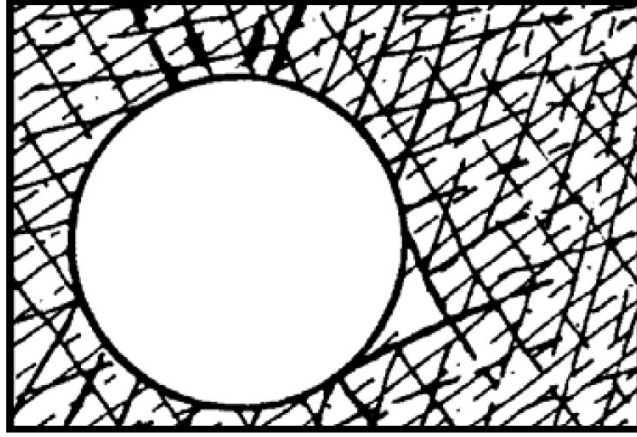
Ortalama günlük ilerleme miktarı (AR) ise **(3.20b)** yardımıyla

$$AR = 3,05 * 8 * 3 * 0,04 \approx 2,9 \left(\frac{m}{gün} \right)$$

olarak hesaplanır. Hesaplamalardan görüldüğü üzere günlük ilerleme miktarları çok düşük seviyelerde kalmaktadır.

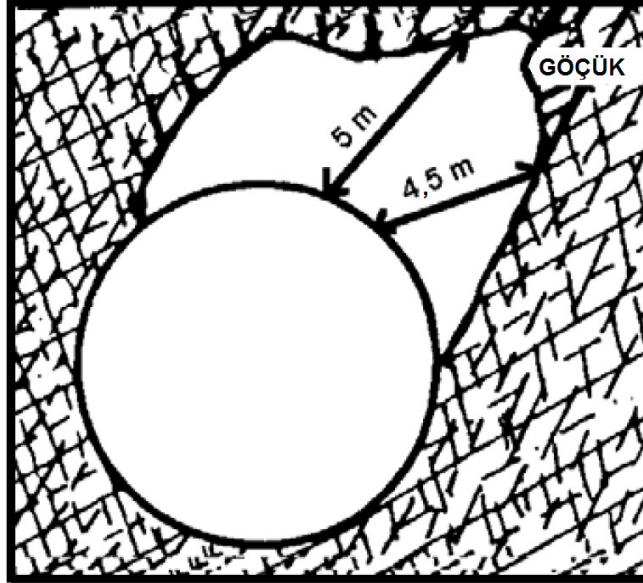
Nitekim tünel çalışma koşulların kötüleşmesinin (kaya kütle kalitelerinin düşmesi, su geliri, vb.) TBM'den yararlanma oranına ve günlük ilerleme miktarına olan etkileri Bilgin ve diğ. (1999) çalışmasında ele alınan Tuzla Tünel Projesi örneğinden de çok net bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 3.13).

Günlük İlerleme: 10,3 m



Tünel : 0 + 512 m
Arın Durumu : Şeyl, Sızıntı Şeklinde Su Geliri
RQD : % 30 - 50
RMU : 20

Günlük İlerleme: 0,5 m



Tünel : 0 + 1027 m
Arın Durumu : Çok Kırıklı - Çatlaklı Killi Formasyon,
Su Geliri Mevcut
RQD : % 0 - 5
RMU : 11

Şekil 3.13 : Farklı formasyon mekanik özelliklerine bağlı alınan RMU indeks değerleri, TBM'den yararlanma oranları ve sağlanan günlük ilerleme hızlarının değişimi (Bilgin ve diğ., 1999).

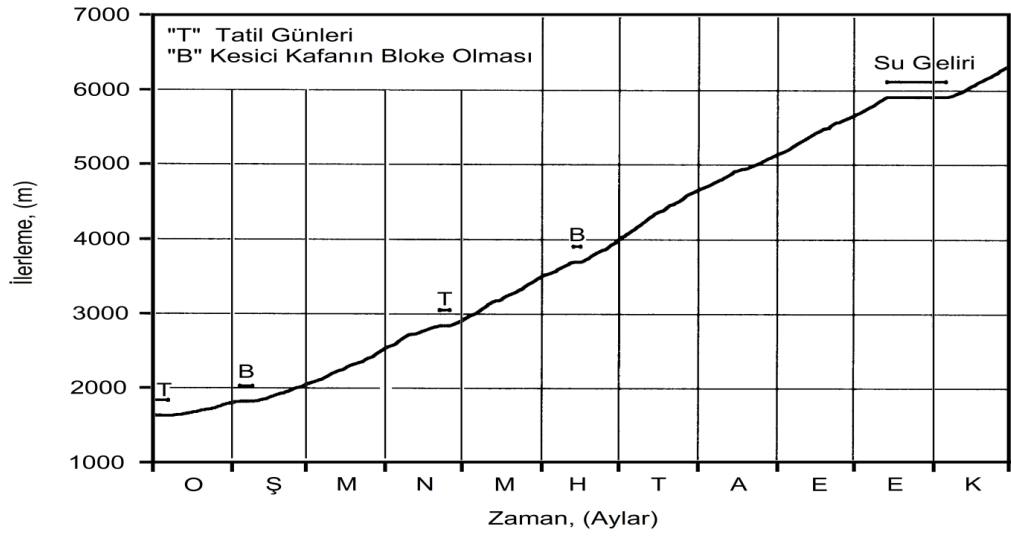
Tünel formasyon koşullarının iksa bakımından kötüleşmesi durumunda TBM'nin fiilen kazıda kalma süresi önemli ölçüde azalacağından yararlanma oranı (U) %3 - %5 gibi olağanüstü düşük seviyelerde kalmıştır. Sonuçta anılan kesimde günlük ilerleme miktarı $AR = 0,5$ (m) olmuştur (Şekil 3.13).

İlerleme miktarlarının düşüklüğünün yanı sıra çok düşük RQD'lere bağlı olarak arında denge durumunun korunamadığı da görülmektedir. Arın denge durumunun kaybolması ile makinenin açık tip (basınçsız) kazı yapması nedeniyle TBM açıklıklarından giren kontrolsüz pasa sonucu makine çapına yakın bir uzunlukta göçük olduğu görülmektedir. Göçük bölgesinin çeşitli kalıp ve enjeksiyonlarla doldurulması hem zaman hem de proje maliyetlerinin artması anlamını taşımaktadır. Bunların yanı sıra yüzeye yakın sığ tünel projelerinde oluşabilecek göçüklerin can ve mal kaybına da yol açabileceği unutulmamalıdır.

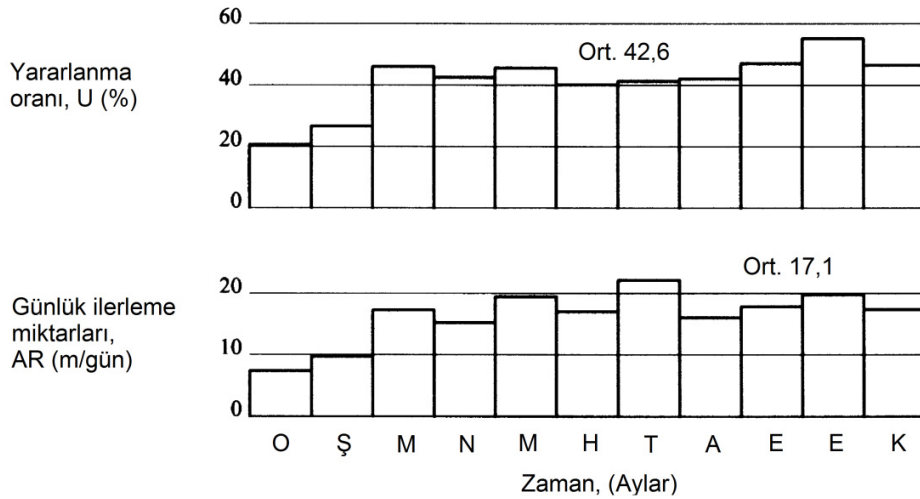
Buna karşın çalışma koşullarının göreceli olarak iyileşmesi (RQD'nin yükselmesi) durumunda ise RMU indeksi 20 'ye yükselerek ilerleme miktarı 10,3 (m/gün) olarak gerçekleşmiştir. Açıktır ki verilen üstlenici, bakım & onarım olanakları altında sadece formasyon koşullarının göreceli bir şekilde iyileşmesi sonucunda TBM'nin günlük ilerleme miktarlarındaki artış oranı olağanüstü dikkat çekicidir.

Bu çalışmada ayrıntılı bir şekilde değinilmemesine rağmen Anadoluray projesinde de benzer formasyon şartlarında arın su gelirlerinin olduğu çok düşük kaya kalitelerinde ve özellikle fay geçişlerinde yapılan tünel kazılarında hem açık hem de kapalı mod kazıları esnasında bir çok kez arın dengesi kaybolmuş ve göçükler yaşanmıştır (Bilgin ve diğ., 2009b; Koç, 2009). Tuzla tünel projesinde de olduğu gibi yaşanan bu göçükler sonucu yararlanma oranları ve buna bağlı olarak ortalama ilerleme miktarları normalin çok altında kalmıştır. Nitekim açık mod kazısı esnasında yaşanan göçüklerden en büyüğü, göçük bölgesinin temizlenmesi, kalıp yapımı ve boşluğun enjeksiyon ile doldurulması işlemlerinden dolayı tünel projesinin 15 gün durmasına neden olmuştur. Ayrıca göçük bölgesinin doldurulmasına karşın formasyonun devam eden düşük kaya kütle özellikleri nedeniyle ana göçüğü takiben bir çok küçük göçükte yaşanmıştır (Bilgin ve diğ., 2009b). Kapalı mod kazısı esnasında yaşanan diğer bir göçük ise yüzeye kadar etkili olmuş, yüzeyde geniş (tahmini <3 m) ve derin (tahmini <1 m) bir çukur açılmasına sebebiyet vermiştir (Koç, 2009).

Fikir vermek amacıyla Varzo tüneline bir TBM'nin performansına ilişkin teknik bilgiler grafik olarak Şekil 3.14'de gösterilmiştir (Ribacchi ve Fazio, 2005).



(a)



(b)

Şekil 3.14 : (a) Varzo tüneline kümülatif ilerleme grafiği. **(b)** Ay bazında TBM'den yararlanma oranları ve günlük ilerleme miktarları AR (m/gün).

Şekil 3.14 yakından incelendiğinde şu çıkarımlar yapılabilmektedir:

- İlk kazı aylarında TBM'den yararlanma oranı "U" genel ortalama değerinden (% 42,6) çok küçüktür. Aynı değerlendirme TBM ilerlemesi içinde geçerli olmaktadır. Bu bulguların ışığında, ilk üç aya karşı gelen kümülatif tünel ilerlemesi grafiğinin eğimi daha sonra ki aylara ait ilerleme miktarı değişiminin eğiminden belirgin ölçüde küçüktür. Genel ortalama "U" değerinin (% 42,6) civarında veya üzerinde olma durumu ($U \geq \% 42,6$) anılan tünel projesinde yaklaşık üç ay sonra sağlanmıştır.

Daha açık bir deyişle TBM ekibinin makineye ve yerel çalışma koşullarına uyumunu ifade eden “öğrenme süresi” 3 ay olarak kestirilmektedir.

- TBM tünel projelerinde ilerleme miktarını olumsuz şekilde etkileyen faktörlerin başında kesici kafanın sıkışması (bloke olması) ile uzun süreli ve büyük su gelirleri gelmektedir. (*)Varzo tünel projesinde Şubat ve Haziran aylarında birer defa olmak üzere toplam iki adet sıkışma meydana gelmiştir. Bu sıkışmalar sonucunda Şubatta 6 gün, Haziranda ise 4 gün süreyle kazı yapılamamış ve herhangi bir ilerleme sağlanamamıştır. Ayrıca Ekim ayının ortalarından Kasım ayının ilk haftasına kadar olan sürede aşırı miktarlarda su gelmesi sebebiyle 20 gün gibi çok uzun bir zaman diliminde kazı yapılamamıştır.
- Farklı formasyonlar ve farklı tip makineler olmasına karşı Anadoluray örneğiyle Varzo tünel projesi anlamlı benzerlikler göstermektedir. Nitekim her iki tünel projesi sırasında artan arın su geliri sonucu yararlanma oranlarına bağlı olarak ilerleme miktarlarında ciddi azalmalar yaşanmıştır.

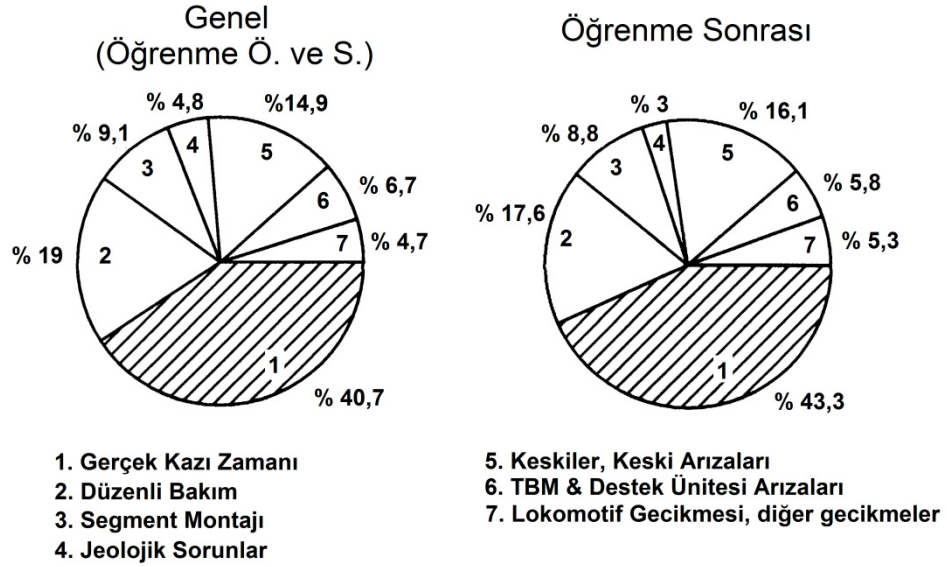
Bir TBM'nin genel çalışma çevriminde yer alan işlemler Çizelge 3.11 'de gösterilmiştir (Özdemir, 1992).

Çizelge 3.11 : TBM 'nin çalışma çevrimi (Özdemir, 1992).

Kazı / İksa	Makineye ilişkin işlemler	Makine dışı gecikmeler	
		Sistem	İşçilik
Fiilen arında kazının yapılması.	Aşınmış disk kesicilerinin değiştirilmesi.	Geçici iksada gecikme.	Vardiyada gecikmeler.
İksa yapımı.	İtme/Geri çekme.	Enjeksiyonda gecikmeler.	Ciddi iş kazalarından kaynaklanan gecikmeler.
	Beklenmeyen onarımlar(Kesici kafanın sıkışması /bloke olması, arından/tavanda büyük boyutlu göçüklerin oluşumu,vb.).	Jeodezik ölçmelerin zamanında alınmaması.	
	TBM'nin planlanan bakımı.	Su gelirinin ihraç edilememesi.	
		Destek sisteminde pasa nakilinde sorunlar.	

(*)Varzo tünellinde kullanılan TBM' e ait bir takım özellikler: 3,84 (m), disk keski çapı ve adeti 430 (mm) ; 27, bir dakikadaki devir sayısı 8,93 (d/dak), kurulu itme kuvveti 900 (kN), Torku 558 (kNm). Geçilen formasyon $\sigma_{lab} = 100 - 200$ (MPa).

Şekil 3.15'de Varzo tünel projesinde işlemlerin genel zaman dağılımları gösterilmiştir. Aynı şekilde karşılaştırmak amacıyla öğrenme süresinden sonraki döneme ait iş-zaman dağılım diyagramı verilmiştir (Ribacchi ve Fazio, 2005).



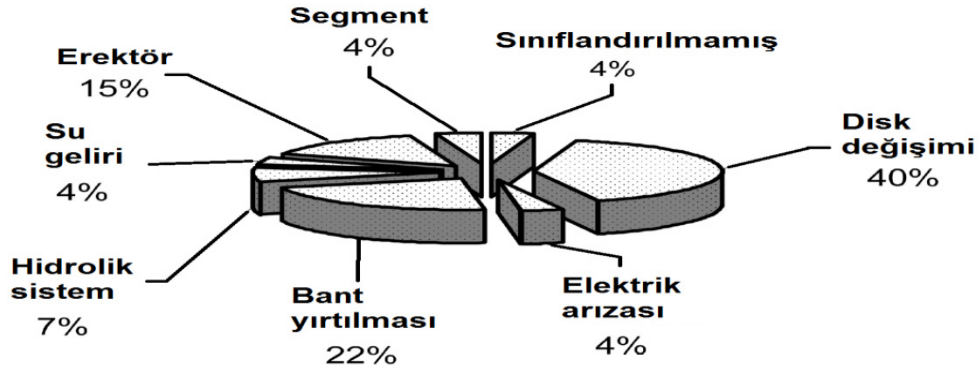
Şekil 3.15 : Varzo tünel projesinde yapılan işlemlerin genel zaman dağılımları.

Şekilden şu çıkarımlar yapılabilir;

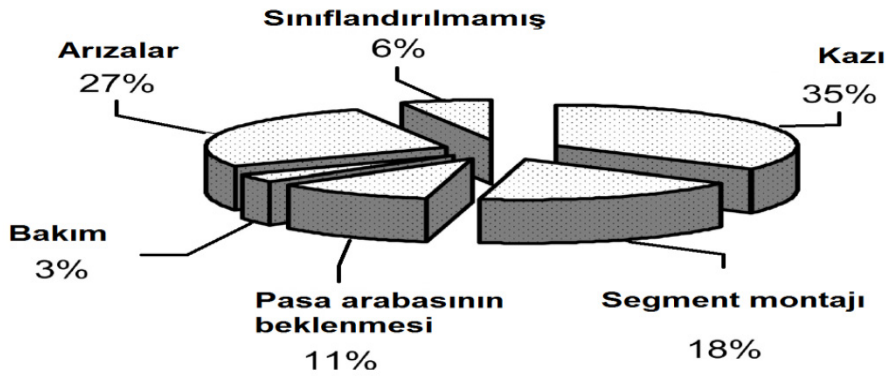
- Tüm proje süresi ile öğrenme süresinden sonraki döneme ait ortalama kazı sürelerinin payları sırasıyla % 40,7 ve % 43,3 olarak gerçekleşmiştir. Beklenildiği üzere öğrenme süresinden sonra TBM'den yararlanma oranı dikkat çekici ölçüde artmıştır.
- Öğrenme süresinden sonra düzenli onarım ve segman yerleştirilmesi, jeolojik sorunlar, TBM ve destek sisteminden kaynaklanan onarımlar için ayrılan zaman dilimlerinde de belirgin azalmalar sağlanmıştır. Bu kazanımların sonucunda hem TBM 'den yararlanma oranı hem de ay bazındaki ortalama ilerleme miktarları artmıştır (Şekil 3.14 b).

Şekil 3.16'da ise Tarabya tünel projesinde kullanılan $\varnothing$ 2,9 (m)'lik bir ^(*)TBM' nin kazı süresince değişen faaliyetleri verilmiştir. Tünel güzergahının geçtiği formasyon %65 kireçtaşı ($\sigma_{lab} = 44 - 81$ Mpa), %17 şeyl ($\sigma_{lab} = 55 - 59$ Mpa), % 12 silttaşı ve kumtaşı ($\sigma_{lab} = 59$ Mpa)' dır (Bilgin ve diğ., 2005).

(*) Disk keski sayısı = 20, Disk çapı = 305 (mm), Maks. devir sayısı = 16 (dev/dak), Tork = 725 (kNm), İtme kuvveti = 3750 (kN), Güç = 620 (kW).



(a)



(b)

Şekil 3.16 : (a) Arıza nedenlerinin dağılımı. (b) TBM kazısı esnasında yapılan işlerin genel dağılımları (Bilgin ve diğ., 2005).

Şekil 3.16'dan da izlenebileceği üzere kazı işleminden sonra bir vardiyadaki en çok zaman tutan işlem arızalar olmaktadır. Arızaların nedenleri arasında en çok zamanın disk değişimine harcandığı görülmektedir. Bölüm 3.7'den de hatırlanacağı üzere artan CAI değerlerinde disk tüketiminin arttığı bilinmektedir. İlgili çalışmada CAI hakkında bilgi verilmemesine karşın Çizelge 3.8' den kestirimci bir yaklaşımla CAI değeri (1-2) arasında ortalama 1,5 olarak alındığında çok aşındırıcı olmayan bir formasyonda dahi disk değişiminin toplam dağılımın %10,8 ini oluşturduğu görülmektedir. Nitekim kesici kafada kullanılan disk sayının 20 adet ve kesici kafa çapının 2,9 (m) olduğu düşünüldüğünde sabit bir CAI değeri için bile artan kesici kafa çapına bağlı olarak artacak disk keski sayılarının ve disk değişimlerinin TBM'in yararlanma oranları üzerinde ne denli etkili olabilecekleri çok açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Tekrar ifade edilmesi gerekirse disk keski tüketimlerinin bilinmesi yararlanma oranlarının tahmininde ve buna bağlı olarak da ilerleme miktarlarının kestirilmesinde çok büyük öneme sahiptir.

Hong Kong granitlerinde çalışan 3,56 (m) çaplı çift kalkanlı TBM ve 4,80 (m) çaplı pabuçlu TBM'lere ait performans büyüklüklerinin (penetrasyon hızı (ROP), günlük ilerleme miktarları (AR) ve TBM'den yararlanma oranı (U)) IMS sınıflama sistemiyle ilişkisi Çizelge 3.12'de verilmiştir (Grandori ve diğ., 1995a'dan kısaltılarak).

Çizelge 3.12 : TBM performans Değerleri – IMS sınıflama sistemi (Grandori ve diğ., 1995a)

IMS sınıfı	1	2	3	4	5	Genel
ROP (m / saat)	2,21	2,63	3,03	3,77	3,90	2,77
U (%)	41	36	35,7	24,8	13,5	34,9
AR (m / gün)	21,7	22,7	26,0	22,5	12,6	23,3

Tee TBM için kimi büyüklükler: 25 adet 17" disk keski; 11,3 (dev/dk) ;
Tork = 540 (kNm); Güç = 660 (kW)

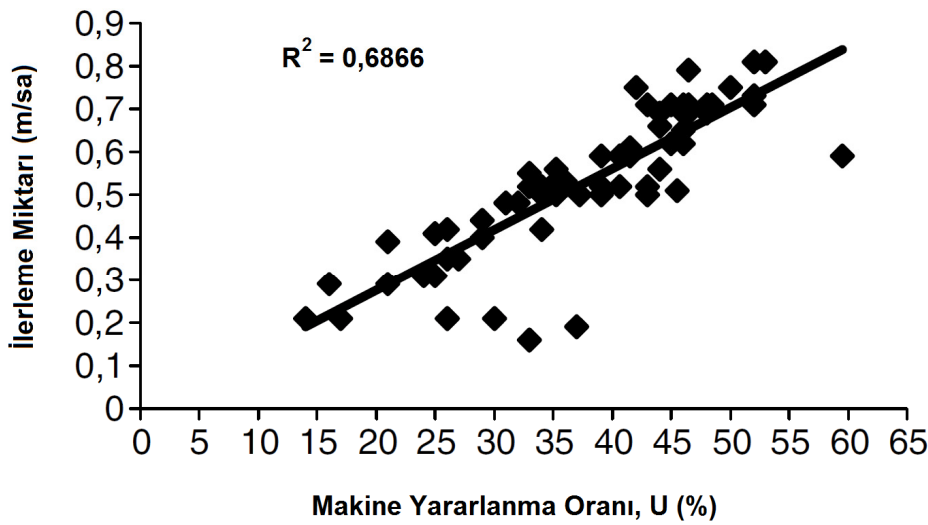
HKC TBM için kimi büyüklükler: 32 adet 19" disk keski; 11,5 (dev/dk) ;
Tork = 1400 (kNm); Güç = 2350 (kW)

Çizelgenin incelemesinden çıkartılan sonuçlar şöyle özetlenebilir;

- IMS sınıf numarası arttıkça daha açık bir anlatımla kazılan kaya kütlelerinin kalitesi azaldıkça TBM penetrasyon hızı artmaktadır. Bölüm 4' de Klein ve diğ. (1995) çalışmasında da benzer bulgular edinilmiştir. Kısaca özetlemek gerekirse sabit derinlik basıncında azalan yerinde basınç dayanımlarında arazi penetrasyon indeksi azalmaktadır (yerinde basınç dayanımı ayrışma derecesi arttıkça azalmaktadır). Arazi penetrasyon indeksinin azalması kazılabilirliğin kolaylaşması ve daha yüksek penetrasyon hızlarının elde edilmesi şeklinde yorumlanabilir. Sonuç olarak artan ayrışma derecelerinde aynı itme kuvvetlerinde daha yüksek penetrasyon değerleri elde edilmektedir.
- Bilindiği üzere azalan kaya kütle kalitelerinde gerek arın denge durumu gerek pasa ebadında yaşanan değişiklikler ve kesici kafaya kontrolsüz bir şekilde dolması gerekse de iksa sorunları nedeniyle makineden yararlanma oranları düşmektedir. Düşen yararlanma oranlarının ortalama kazı hızına etkisi dramatik bir şekilde görülmektedir.

- Kaya kütlesinin kalitesinde yaşanan azalmayla penetrasyon hızı ilk duruma göre %76'lık bir artış ile %176 olmakta iken TBM yararlanma oranının ilk duruma göre %67'lik bir azalma ile %33 seviyelerinde kalması sonucu ilerleme miktarları %42 gerileme neticesinde %58 seviyesine düşmüştür.

Bu durum azalan yararlanma oranlarının TBM ilerleme miktarlarına ne denli etkili olduğunun bir göstergesidir. Başka bir anlatımla artan yararlanma oranlarında ilerleme miktarlarının ciddi bir oranla arttığı görülmektedir. Nitekim Feridunoğlu (2001) çalışmasında da yararlanma oranlarının ilerleme miktarıyla ilişkisi çok yüksek bir korelasyon katsayısı ($r = 0,828$) ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 : Makine yararlanma oranının (U) saatlik ilerleme miktarına etkisi.

4 adet TBM'nin çalıştırıldığı 2 tünel projesindeki TBM'lere ait performans bilgileri (kümülatif ilerleme miktarları, yararlanma oranı ve ortalama günlük ilerleme hızları) topluca Şekil 3.18'da görülmektedir (Dolcini ve diğ., 1996). Çalışmada benimsenen kaya kütle sınıf numarası ^(*)RMR sınıflandırma sistemine dayandırılmıştır. Ayrıca Çizelge 3.13'de tünel projelerinde kullanılan TBM'lerin mekanik özellikleri (maks. itme kuvveti, çap, tip, kesici kafanın devir sayısı, strok uzunluğu) ile formasyon bazında yaptıkları ortalama (takvim günü esasına göre) ve en yüksek ilerleme miktarları verilmiştir.

^(*)RMR, kaya kütlesi puanlama sisteminde sınıflama "RMR" puanına göre sınıf numaraları ve tanımları şöyledir; $81 < RMR < 100$ için sınıf nu. = I (çok iyi kaya); $61 < RMR < 80$ için sınıf nu. = II (iyi kaya) ; $41 < RMR < 60$ için sınıf nu. = III (orta kaya) ; $21 < RMR < 40$ için sınıf nu. = IV (zayıf kaya); $RMR < 20$ için sınıf nu. = V (çok zayıf kaya) (alıntılıyan Ulusoy ve Sönmez, 2007).

Çizelge 3.13 : 2 adet Tünel Projesinde kullanılan 4 adet TBM’e ait teknik bilgiler ve ortalama ilerleme miktarları (Dolcini ve diğ., 1996).

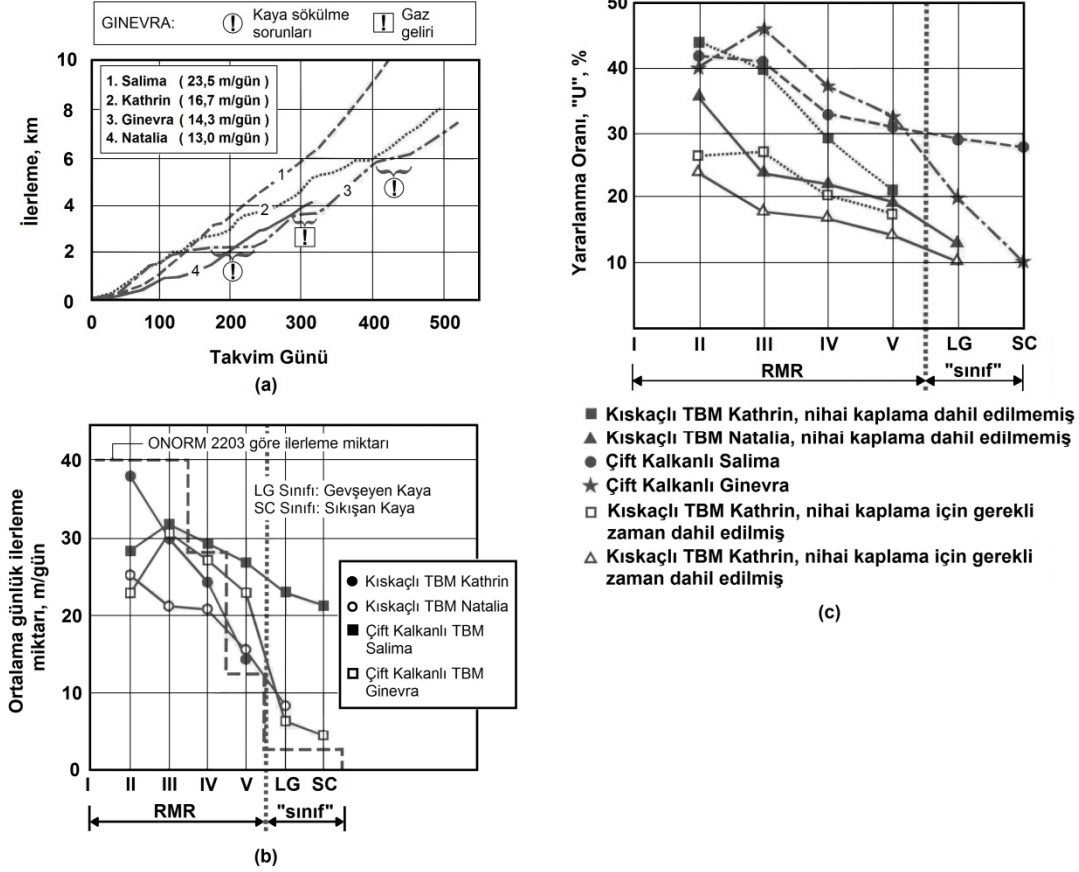
Kısım, Uzunluk (m)	A-B1 (8090 m)	B1-C (9697 m)	C-D1 (7421 m)	E1-D1 (4185 m)
TBM Türü	Açık	Çift Kalkanlı	Çift Kalkanlı	Açık
TBM Modeli	Robbins 1112-238	Robbins 118-221	Robbins 1111-234	Robbins 1212-228
TBM Adı	Kathrin	Salima	Ginevra	Natalia
Kazı Çapı, (m)	4,20	4,04	4,04	4,20
Maksimum İtme, (kN)	6387	7155	7155	6005
Maksimum Strok, (m)	1,55	2x0,625	2x0,625	1,55
Devir Sayısı, (d/dk)	11,9	9,6	11,3	10,0
En İyi İlerleme Miktarı, (m)	53 [III]	60 [V]	50 [IV]	42 [III]
*Ortalama Net Günlük İlerleme, (m/gün)	21	27	17	15
Ortalama Günlük İlerleme (sadece çalışma günleri dikkate alındığında), (m/gün)	17,8	25,5	15,3	13,7
En İyi Aylık İlerleme, (m)	743 [III]	1018 [III-IV]	849 [IV-V]	666 [III]

Not: Köşeli parantez içindeki değerler RMR sistemindeki “kaya kütlesi sınıf numarasını” belirtir.

*Ortalama net ilerleme, TBM'lerin sadece kazı yaptığı günlerdeki günlük ilerleme miktarlarının ortalamasıdır ve bu günlere tatil günleri ile kafanın sıkışması veya su geliri nedeniyle TBM'lerin kazı yapmadıkları günler dahil edilmemiştir.

Sınıf / (m/gün)	RMR II	RMR III	RMR IV	RMR V	(*)LG	(**)SC
TBM Kathrin	36,4	30,0	24,4	16,9	12,2	7,2
TBM Natalia	35,3	25,4	22,7	16,3	8,4	4,2
TBM Salima	27,2	31,1	28,6	27,3	19	18,1
TBM Ginevra	23,7	29,5	26,0	25,7	15	11,7

(*) LG = Gevşeyen (sökülen) kayaç. (**) SC = Sıkışan kayaç.



Şekil 3.18 : (a) 4 adet TBM'e ait kümülatif ilerleme miktarlarının takvim günü bazında değişim grafikleri. **(b)** TBM ortalama günlük ilerleme miktarı (sadece çalıştığı günler dikkate alındığında) ile RMR kaya kütle sınıf nu. değişimleri. **(c)** TBM'den yararlanma yüzdesi ile RMR kaya kütle sınıf numarası değişimleri.

Çizelge 3.13 ve Şekil 3.18 birlikte değerlendirildiğinde şu çıkarımlar söz konusudur;

- Kümülatif ilerleme miktarı açısından en iyi performans Salima adlı (1.) TBM'de sağlanmıştır. Jeolojik belirsizliklerin (iksa sorunları, pabuçların tünel cidarına gömülmesi, CH₄ geliri) etkisi Ginevra adlı (3.) TBM'de açıkça görülmektedir. Nitekim su gelirinin olduğu kısımlarda ilerleme hızları ortalama değerlerin çok altına düşmüş hatta durma noktasına gelmiştir.
- Kullanılan TBM türünden bağımsız olarak burada da TBM'den yararlanma oranı ve ilerleme miktarları ile kaya kütle sınıf numarası oranında negatif eğimli bir gidişat mevcuttur. Genel olarak bakıldığında TBM'den yararlanma oranı (%40 - %10) arasında bir değişim göstermektedir. Özellikle sıkışma / sökülme sorunlarının bulunduğu tünel zonlarında sözü edilen oran %10'lara kadar gerilemektedir.

Bu da bir tünel projesi için su gelirlerinin olduğu kadar sıkışma potansiyelinin de ne denli önemli olduğunu bir kez daha kanıtlamaktadır.

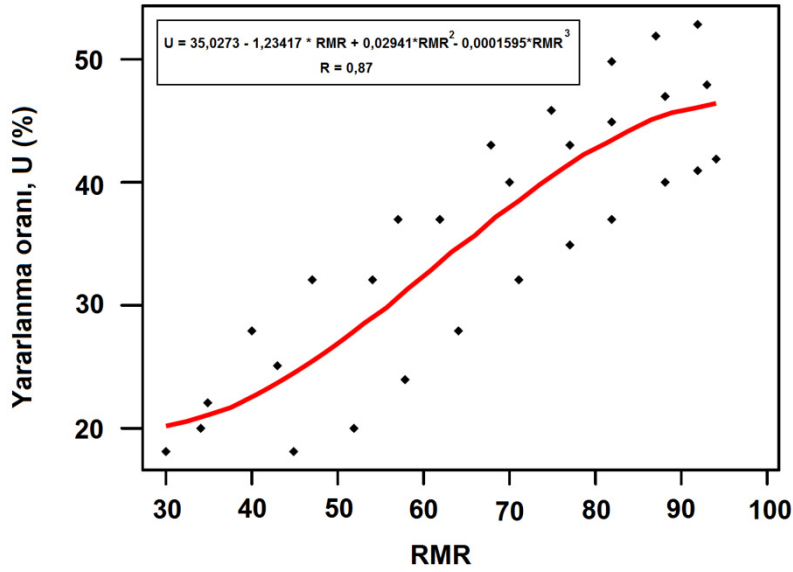
- Kaya kütle kalitesi ister RMR ister IMS sınıfı ile nitelendirilsin artan ayrışma derecelerinde veya bir başka deyişle azalan RMR değerlerinde ilerleme miktarları yararlanma oranlarının düşmesi sonucu ciddi ölçüde düşmektedir. Keza Grandori ve diğ. (1995a) alışmasından da benzer çıkarımlar elde edilmiştir (izelge 3.12).
- Verilen bir kaya sınıf numarası için çift kalkanlı tip TBM'lerde makineden yararlanma oranı açık tip TBM'lere kıyasla daha yüksektir. Bilindiği üzere pabuçlu tip TBM'lerde çalışan personelin gerek güvenliği gerekse de makinenin kazıya devam edebilmesi için tünel cidarlarından kopan kaya parçalarının kırılıp ufaltılması ve emniyetli bir şekilde kazı bölgesinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Kalkanlı tip TBM'lerde ise gerek kazı bölgesi gerekse personelin ve makine ekipmanının bulunduğu kazı arkası bölüm elik bir kalkan içinde olduğundan tünel cidarlarından kopan kayaçlardan göreceli olarak daha az etkilenmektedir.
- Burada dikkat çekici olan unsur yüksek kaya kütle kalitelerinde pabuçlu tip TBM'lerin performansları çift kalkanlı tip TBM'lere nazaran daha yüksek olmasıdır. Bir diğer husus ise azalan kaya kalitelerinde pabuçlu tip TBM'lerin daha çok etkilenererek performanslarının çift kalkanlı tip TBM'lere nazaran daha dramatik azalmasıdır.

Tim (2004) alışmasında Güney Kore'deki Milyang Tüneli, New York'daki Queens Tüneli ve Yeni Zelanda'daki Manapouri Tüneli projelerini incelemek suretiyle değişen formasyon şartlarının yararlanma oranına olan etkisini araştırmıştır. İncelenen tünel projelerinde kullanılan TBM'lere ait büyüklükler izelge 3.14'de verilmiştir.

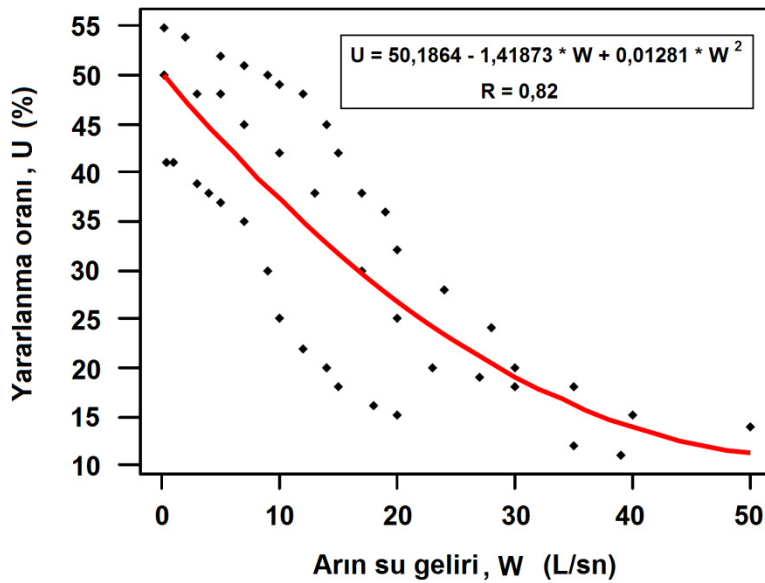
Çizelge 3.14 : Kim (2004) alışmasında ele alınan tünel projelerinde kullanılan TBM'lere ait bir takım mekanik büyüklükler.

	Milyang	Queens	Manapouri
TBM apı (m)	2,6	7,1	10
Disk Keski apı (in)	17	19	17
Devir Sayısı (dev/dk)	13	8,3	5
İtme Kuvveti (kesme işlemi) (kN)	4300	15573	18156
Kesici Kafa Gücü (kW)	435	3100	3465

Ele alınan tüneller projelerinden elde edilen veriler ışığında yararlanma oranları ile gerek kaya kütle kalitesi (RMR) gerekse de arın su gelirleri arasında kuvvetli regresyon bağıntıları ($r > 80$) ortaya çıkarılmıştır. Şekil 3.19'dan da izlenebileceği üzere artan kaya kütle kalitelerinde yararlanma oranları da anlamlı bir şekilde artmaktadır. Şekil 3.20'de ise artan su gelirleri altında makine yararlanma oranlarının değişimi verilmektedir. Şekil 3.20'den artan arın su gelirleri altında TBM'den yararlanma oranlarının ciddi bir şekilde düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.19 : Kaya kütle kalitesi ile yararlanma oranı arasındaki ilişki (Kim, 2004).



Şekil 3.20 : Arın su geliri ile yararlanma oranı arasındaki ilişki (Kim, 2004).

4. ARAZİ PENETRASYON İNDEKSİ İLE TBM'LERİN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Arazi Penetrasyon İndeksi Ve İlgili Büyüklüklerin Açılımları

Arazi penetrasyon indeksi (FPI) TBM'in kesici kafasının bir dönüşü sonucu elde edilen birim penetrasyon başına bir disk keskisine etkiyen ortalama normal kuvveti ifade eder. Bir anlamda kaya kütlesi ile TBM'nin kesici kafa tasarım parametreleri arasında var olan etkileşimi açıklayan bir indekstir. Arazi penetrasyon indeksi (FPI) değeri ne kadar küçük ise bir başka anlatımla birim penetrasyon için uygulanan normal disk keski kuvveti ne kadar küçük ise kaya kütlesinin kazılabilirliği için o oranda kolay denilebilmektedir. Ayrıca penetrasyonun normal keski kuvveti ile arasında oluşan etkileşim ve bunların bütünü FPI ile kurdukları bağ dolayısıyla da arazi penetrasyon indeksi (FPI) farklı formasyonların kazılabilirliklerine yönelik iyi bir göstergedir. TBM operatörlerinin aynı formasyon şartları altında dahi uyguladıkları penetrasyon miktarlarının farklılık gösterebilmesinden ötürü, sadece ilerleme miktarına göre yapılan kestirimlerde formasyonun kazılabilirliğine ve kaya kütle kalitesine yönelik yanlış izlenimler edinilebilmektedir. Ancak arazi penetrasyon indeksi TBM operatörlerinin aynı formasyon için doğru ya da yanlış uyguladıkları penetrasyon ve buna bağlı ilerleme miktarlarından ortaya çıkan farklılıkları normal kuvvetin penetrasyona oranı doğrultusunda ortadan kaldırmaktadır.

Bu bağlamda arazi penetrasyon indisinin tanımından yola çıkarak (4.1) verilmiştir.

$$FPI = \frac{\text{Uygulanan ortalama normal disk keski kuvveti}}{\text{Uygulanan penetrasyon miktarı}} = \frac{F_N \left(\frac{\text{kN}}{\text{disk keski}} \right)}{p \left(\frac{\text{mm}}{\text{dev}} \right)} \quad (4.1)$$

Burada; F_N = Bir disk keskiye gelen normal disk kuvveti (kN/disk keski); p = kesici kafanın penetrasyon miktarı (mm/dev)'dir.

Gerek arazi penetrasyon indeksini tanımlayan penetrasyon miktarına ve normal disk keski kuvvetine gerekse de arazi penetrasyon indeksine etki eden kimi faktörler Çizelge 4.1'de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Arazi penetrasyon indeksine etki eden belli başlı faktörler.

p ve F _N büyüklüklerine etki eden temel faktörler
• Sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç ve çekme dayanımları (σ_{lab}, σ_c). • Disk keski çapı ve uç kalınlığı. • Disk keski aralığı (s) ve spesifik enerji (SE). • Makinenin toplam itme kuvveti. • Disk keski sayısı, Kesici kafanın dış çapı. • Geçilen birimin aşındırıcılığı - Eşdeğer kuvars yüzdesi, kazı kesitinin homojenliği, vb.
FPI büyüklüğüne etki eden temel faktörler
• Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı. • Kaya kalite göstergesi (RQD). • Süreksizliklerin aralığı, devamlılığı, yönelimi, yüzey koşulları, bozunma derecesi. • Su geliri ve basıncı. • Tünelin geçtiği kaya kütlelerindeki gerilme durumu (az - çok sıkıştıran kaya basıncı).

Çizelge 4.1'de verilen faktörlerin değerlendirmesine geçmeden önce arazi penetrasyon indeksinin temel girdisi olan bir disk keskisine etkiyen ortalama normal kuvvetin hesabına ilişkin bilgiler belli bir ayrıntıda verilmiştir.

Bir TBM' de hidrolik pistonla kesici kafaya iletilen toplam itme kuvveti (4.2);

$$F_i = 100 * N_s * A_s * P_s = 100 * N_s * (0,785. d_s^2) * P_s , \text{ (kN)} \quad (4.2)$$

ile tanımlanabilir (Ramazanzadeh, 2005).

Burada; F_i = TBM tarafından sağlanan toplam itme kuvveti (kN); N_s = İtme silindirleri sayısı; A_s = Bir itme silindirinin alanı (m^2); d_s = İtme silindirinin çapı (m); P_s = Ölçülen hidrolik basınç, (bar).

Kesici kafadaki bir adet disk keskiye etkiyen ortalama normal disk kuvveti (F_N) ise hareket yönünde TBM'e etki eden dirençlerin denge koşulundan hareketle (4.3a), (4.3b) ve (4.3c) yardımıyla bulunabilir (Ramezanzadeh, 2005).

$$F_i \geq F_a + F_N \cdot N + F_s + F_b \quad (4.3a)$$

$$F_a = 100 * A_{kk} * P_a = 100 * (0,785. D^2) * P_a , \text{ (kN)} \quad (4.3b)$$

$$F_N = \frac{F_i - (F_a + F_s + F_b)}{N} = \frac{(78,5. N_s. d_s^2. P_s) - (78,5. D^2. P_a + F_s + F_b)}{N} , \left(\frac{\text{kN}}{\text{disk keski}} \right) \quad (4.3c)$$

Burada;

F_i = Toplam itme kuvveti, (kN); F_a = Arın basıncından kaynaklanan arın kuvveti, (kN); N_s = İtme silindirlerinin sayısı; d_s = İtme silindirin çapı, (m); P_s = Ölçülen hidrolik basınç, (bar); A_{kk} = Kesici kafa alanı, (m²); D = Kesici kafanın dış çapı, (m); P_a = Arın basıncı (bar); F_s , F_b = Sırasıyla kalkan ile zemin/kaya kütlesi arasındaki sürtünme kuvveti ve makinenin destek bölümünün harekete gösterdiği direnç kuvveti, (kN) ve N = Kesici kafadaki disk keski sayısıdır.

N değeri (4.4) ile hesaplanabilir:

$$N = \frac{D \cdot k}{2 \cdot S} \quad (4.4)$$

Burada; S = Disk keskilerin aralığı, (m); k = Makine çapına bağlı ampirik faktör olup büyük çaplı TBM'lerde "1,15", küçük çaplı TBM'lerde ($D < 10$ m) ise "1,3" önerilmektedir (Rostami, 2008); s = disk keskiler arası mesafe olup 0,075 - 0,125 (m) arasında değişmektedir.

Ortalama değer olarak $s = 0,10$ (m) alınırsa " $D \leq 10$ (m)" TBM'ler için disk keski sayısı kesici kafa çapı cinsinden (4.5) şeklinde yazılabilir.

$$N = 6,5 \cdot D \quad (4.5)$$

" N " değeri (4.3c) bağıntısında yerine konulursa bir disk keskisine etkiyen normal kuvvet (F_N) değeri (4.6) bağıntısından elde edilebilir.

$$F_N = \frac{(12,07 \cdot N_s \cdot P_s \cdot d_s^2) - (12,07 \cdot D^2 \cdot P_a + 0,15 \cdot F_s + 0,15 \cdot F_b)}{D} \cdot \left(\frac{\text{kN}}{\text{disk keski}} \right) \quad (4.6)$$

olarak elde edilebilir. Eğer TBM açık modda çalışıyorsa, başka bir ifade ile " $P_a = 0$ " ise yukarıdaki (4.6) bağıntısı basitleştirilerek (4.7) bağıntısı elde edilir.

$$F_N = \frac{(12,07 \cdot N_s \cdot P_s \cdot d_s^2) - (0,15 \cdot F_s + 0,15 \cdot F_b)}{D} \cdot \left(\frac{\text{kN}}{\text{disk keski}} \right) \quad (4.7)$$

Yukarıda çıkartılan bağıntılardan da açıkça görülebileceği üzere verilen bir TBM çapı için arın basıncının varlığı normal disk kuvvetini azaltmaktadır. Ayrıca sıkışan zemin / kaya kütlelerinde kalkan üzerinde oluşan sürtünme kuvveti (F_s) de normal disk keski kuvvetini (F_N) olumsuz şekilde etkilemektedir. Başka bir deyişle uygulanan sabit toplam itme kuvvetlerinde artan arın basınçlarında veya sıkışma ve sürtünme sonucu oluşan kuvvetlerin artması durumunda F_N değeri azalmaktadır. F_N değerinin azalması penetrasyonun (p) azalması demektir.

Kaya kütlesi ile TBM'nin kalkanı arasında oluşan sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü, kalkana etki eden arazi basınçlarının büyüklüğü belirler. Rossler (1995) 'de sürtünme kuvveti (F_s) **(4.8a)**, **(4.8b)**, **(4.8c)** ve **(4.8d)** ile ifade edilmektedir.

$$F_s = A_k * P_d * \mu \quad , (kN) \quad (4.8a)$$

$$A_k = \pi * D * L_k \quad (4.8b)$$

$$h_y = 1,5 * D \quad (4.8c)$$

$$F_s = 4,71 * D^2 * L_k * \mu * \gamma \quad , (kN) \quad (4.8d)$$

Burada; D = kalkan çapı, (m); L_k = kalkan uzunluğu, (m); A_k = kalkan alanı, (m^2); P_d = kalkana etkiyen düşey basınç, (kN/m^2); h_y = kalkan üzerindeki gevşemiş kaya kütlesinin yüksekliği (yük veren yükseklik), (m); γ = kayanın birim hacim ağırlığı, (kN/m^3); μ = kaya kütlesi ile çelik malzemenin sürtünme katsayısı, genellikle $\mu = 0,4$ alınır.

Yük veren yükseklik (h_y) kaya kalite göstergesi RQD cinsinden **(4.9)** ile verilen bağıntıdan kestirilebilir (Arioğlu, E. 1997'den alıntılan Arioğlu, E. ve Arioğlu, N. 2005)

$$h_y = 2,81 * [\exp(-0,0281 * RQD)] * D \quad , \quad (m) \quad (4.9)$$

Bağıntıda RQD (%) ve TBM çapı "D" ise (m) olarak yazılacaktır.

TBM tasarımında itme kuvveti projede geçilecek zayıflık/ayrışma zonlarına göre belirlenmelidir. En uç çalışma koşullarında örneğin bir fay-zayıflık- zonunun geçirilmesi durumunda kaya kalite göstergesi " $RQD \approx \%20$ " alındığında kaya kütlesinin yük veren yüksekliği " $1,6.D$ " olmaktadır. Farklı yaklaşım sonuçları arasındaki uyum dikkat çekicidir.

Yukarıda da vurgulandığı üzere TBM itme kuvvetinin verilen proje koşullarında karşılaşılabilecek fay ve ayrışma zonlarında makinenin sıkışmadan geçmesini sağlayacak düzeyde olmalıdır. Yeterli itme kuvveti ile tasarlanmamış TBM'lerde anılan zonlarda (özellikle derin, sıkışma özelliği bulunan kaya kütlelerinde) çok ciddi performans problemlerinin yaşanması kaçınılmazdır. İtme kuvvetlerinin yanı sıra kesici kafanın sıkışması durumunda kafanın tekrardan hareketinin sağlanabilmesi için çok yüksek tork değerleri gerekebilmektedir. Bu nedenle TBM tasarımlarında güç nakil ünitelerinin tasarımı çok büyük önem arz etmektedir.

Kazı mekaniği literatüründe Colorado School of Mines (CSM) olarak anılan yöntemde disk keskiye etkiyen normal (F_N) ve yuvarlanma (F_R) kuvvetleri sırasıyla (4.10), (4.11) ile verilen yarı teorik bağıntılarla tanımlanmaktadır (alıntılayan Ramezanzadeh, 2005).

$$F_N = K_1 * \phi^{\left(\frac{2}{3}\right)} * \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) = K_1 * A, \text{ (N)} \quad (4.10)$$

$$F_R = K_1 * \phi^{\left(\frac{2}{3}\right)} * \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) = K_1 * B, \text{ (N)} \quad (4.11)$$

Burada adı geçen K_1 , A ve B ifadeleri sırasıyla (4.12a), (4.12b) ve (4.12c) yardımıyla hesaplanır:

$$K_1 = C * (\sigma_{lab}^2 * \sigma_c * s)^{\left(\frac{1}{3}\right)} * (R_d * T)^{\left(\frac{5}{6}\right)} \quad (4.12a)$$

$$A = \phi^{\left(\frac{2}{3}\right)} * \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (4.12b)$$

$$B = \phi^{\left(\frac{2}{3}\right)} * \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (4.12c)$$

"A" ve "B" aynı zamanda " ϕ " ifadesinin kısaca penetrasyon ve disk çapının fonksiyonu olmasından ötürü (4.13a) ve (4.13b) ile ifade edilebilmektedir.

$$A = 0,2108 * p^{0,3217} \quad (4.13a)$$

$$B = 0,0102 * p^{0,8333} \quad (4.13b)$$

Yukarıda verilen bağıntılarda açıklanmayan terimlerin anlamları şu şekildedir; C = Sabite genel olarak $C = 2,12$ alınabilir; " ϕ " ifadesi kaya ile disk keskinin temas alanının açısı (rad.); σ_{lab} ve σ_c = Sırasıyla sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç ve çekme dayanımları, (MPa) ; s = Disk keski aralığı (mm); R_d ve T = Sırasıyla disk keski yarıçapı ve kalınlığı, (mm) ; p = Disk keski penetrasyonu (mm/dev).

Verilen bağıntılardan görüldüğü üzere yuvarlanma kuvvetinin normal kuvvete oranı (F_R / F_N) ise " $\tan(\phi/2) = C_c$ " eşit olmaktadır. " C_c " ifadesi penetrasyon miktarı (p) cinsinden (4.14) bağıntısıyla verilebilir (Ramezanzadeh, 2005).

$$C_c = 0,0484 * p^{0,5116} \quad (4.14)$$

Yukarıda belirtilen üstel fonksiyonların 17 inç (432 mm) disk keski çapı için geçerli oldukları hatırd tutulmalıdır. Bağıntılardan görülebileceği üzere disk keskilere etki eden kuvvetler iki temel faktör grup tarafından denetlenmektedir.

Bunlardan ilki kaya biriminin basınç ve çekme dayanımını içeren doğal faktör grubu, diğeri ise disk keskinin geometrik boyutlarını (disk yarıçapı, temas açısı, disk aralığı, disk kalınlığı) içeren geometrik faktör grubudur. Verilen " σ_{lab} " ve " σ_c " dayanımlarında ve disk keski geometrilerinde artan penetrasyon (p) ile disk kuvvetleri artar.

Örneğin disk yarıçapı ve kalınlığı sırasıyla $R = D/2 = 432/2 = 216$ (mm), $T = 12,5$ (mm) olan bir disk keski ile $s = 100$ (mm) bir kesici kafa tasarımında $\sigma_{lab} = 150$ (MPa), $\sigma_c = 15$ (MPa) ve $p = 10$ (mm/dev) değerleri için normal ve yuvarlanma kuvveti aşağıda hesaplanmıştır.

Buna göre K_1 , A ve B ifadeleri **(4.12a)**, **(4.13a)** ve **(4.13b)** yardımıyla:

$$K_1 = 2,12 * (150^2 * 15 * 100)^{0,333} * (216 * 12,5)^{0,833} \approx 495 * 10^3$$

$$A = 0,2108 * 10^{0,3217} = 0,442 ; B = 0,0102 * 10^{0,8333} = 0,0694$$

sırasıyla $K_1 = 495 \times 10^3$, $A = 0,442$ ve $B = 0,0694$ hesaplanır.

- Normal kuvvet **(4.10)** yardımıyla $F_N = 219$ (kN) bulunur.
- Yuvarlanma kuvveti ise **(4.11)** yardımıyla $F_R = 34$ (kN) bulunur.

Spesifik enerji büyüklüğü (SE) TBM tasarımında önemli bir parametredir ve arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile teorik olarak ilişkilendirilebilir. Bilindiği gibi bir TBM'nin hacimsel net kazı miktarı (ICR) ideal kesme derinliği ve disk keski arası mesafe için deneysel olarak spesifik enerji (SE) cinsinden **(4.15)**

$$ICR = k * \frac{P}{SE} , \left(\frac{m^3}{sa} \right) \quad (4.15)$$

ile ifade edilmektedir (Rostami ve diğ. 1994; Balcı, 2009).

Burada; k = Kesici kafadan tünel arınına kazı için aktarılan enerjinin gerçekte kullanılabileceği oranı. Genellikle TBM'lerde 0,80 - 0,90 alınabilir; P = Optimum şartlarda kazının yapılabilmesi için tüketilen güç, (kW); SE = Optimum spesifik enerji tüketimi, (kW.sa/m³).

Kesici kafanın kazı için tükettiği güç (P) kesici kafanın tork büyüklüğü (T) cinsinden **(4.16a)** ve **(4.16b)** bağıntıları yardımıyla verilebilir (Ramezanzadeh, 2005).

$$T = 0,3 * D_k * N * F_R \quad (4.16a)$$

$$P = \frac{2 * \pi * RPM * T}{60} \quad (4.16b)$$

Bağıntılar birleştirilip ve disk sayısı yerine (4.5) ile verilen "N = 6,5.D" ifadesi "P" genel ifadesinde kullanıp sadeleştirilirse;

$$P = 0,204 * RPM * D^2 * F_R \quad , (kW) \quad (4.17)$$

(4.17) bağıntısı elde edilir.

Yukarıdaki bağıntılarda verilmeyen terimler sırasıyla; RPM = Kesici kafanın dakikadaki devir sayısı, (dev/dk); F_R = Bir disk kesgisine etkiyen yuvarlanma kuvveti, (kN/disk keski).

Hacimsel net kazı miktarı (ICR) ise penetrasyon (p) cinsinden (4.18) yardımıyla ifade edilebilir.

$$ICR = 0,06 * p * RPM * A_k = 0,0471 * p * RPM * D^2 \quad , (m^3/sa) \quad (4.18)$$

Burada p = Penetrasyon, (mm/dev); A_k = Kesici kafa alanı, (m^2) ; RPM = kesici kafanın bir dakikadaki devir sayısı, (dev/dk).

(4.15) bağıntısında "P" ifadesi yerine ise (4.17) konulursa;

$$ICR = \frac{0,85*0,204*RPM*D^2*F_R}{SE} = \frac{0,1734*RPM*D^2*F_R}{SE} \quad , \left(\frac{m^3}{sa}\right) \quad (4.19)$$

(4.19) bağıntısı elde edilmektedir.

Yukarıda belirtilen ICR bağıntıları (4.18) ve (4.19) eşitlenir ve spesifik enerji (SE) değeri yalnız bırakılırsa;

$$SE = 3,681 * \frac{F_R}{p} \quad , (kW.sa/m^3) \quad (4.20)$$

(4.20) bağıntısı elde edilir. Buradan da görülebileceği üzere disk kesi aralığı $s = 0,1$ (m) için spesifik enerji $SE = f(F_R, p)$ olmaktadır. Başka bir ifadeyle birim kazı hacmi için gerekli olan enerji miktarı yuvarlanma kuvvetinin (F_R) penetrasyona (p) oranı ile ifade edilebilir.

Kazı mekaniği literatüründe verilen kazı katsayısı (cutting coefficient) tanımı $C_c = F_R/F_N$ olarak yapılmaktadır (Ramezanzadeh, 2005). Buradan hareketle $F_R = C_c.F_N$ ifadesi (4.20) bağıntısında yerine konulursa spesifik enerji (SE)

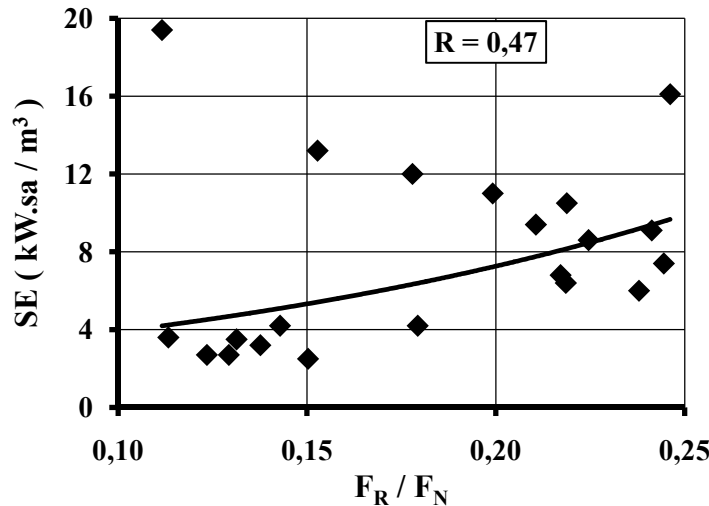
$$SE = 3,681 * C_c * \frac{F_N}{p} \quad (4.21)$$

elde edilir.

(4.21) bağıntısı penetrasyon indeksi (FPI) cinsinden yazıldığında

$$SE = A * FPI, \quad A = 3,681 * C_c \quad (4.22)$$

spesifik enerji teorik olarak $SE = f(FPI, C_c)$ olmaktadır. Kısaca, teoride arazi penetrasyon indeksiyle birim (m^3) kazıda tüketilen enerji miktarı belirtilmektedir. Bölüm 3'ten ve Ramezanzadeh (2005) çalışmasından hatırlanacağı üzere kesme katsayısı (C_c) (*)birçok araştırmacı tarafından sadece penetrasyonun fonksiyonu olarak verilmektedir, ve artan penetrasyon değeriyle artmaktadır. Bölüm 4.2 'de ele alınan nümerik örnekten ve Anadoluray Kartal-Kadıköy Projesi verileri ele alınarak hazırlanan Şekil 4.16'dan da görüldüğü üzere azalan arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile penetrasyon miktarı (p) artmaktadır. Bununla beraber yine Şekil 4.16 ve Çizelge 4.4 ile birçok araştırma açık bir şekilde göstermektedir ki azalan spesifik enerji ile penetrasyon (p) artmaktadır. Bu durumda (4.22) bağıntısı göz önüne alınırsa artan penetrasyon miktarı (p) ile kesme katsayısının (C_c) artmasına rağmen arazi penetrasyon indeksinin (FPI) azalması sonucu spesifik enerjinin (SE) de azaldığı görülmektedir. Buradan hareketle spesifik enerjinin kesme katsayısından (C_c) ziyade daha çok arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile orantılı olduğu söylenebilmektedir (Şekil 4.1, $r^2 = 0,22$). Nitekim Şekil 4.16'dan de bu trend çok yüksek bir korelasyon katsayısı, $r = 0,953$ ($r^2 = 0,91$) doğrulanmaktadır.



Şekil 4.1 : Kesme katsayısı, C_c , ile spesifik enerji arasındaki ilişki (Balcı, 2009 verileri kullanılarak hazırlanmıştır, Çizelge 4.6).

(*)Literatürde kesme katsayısı için farklı araştırmacıların önerdikleri yaklaşımlar şu şekilde sıralanabilir; Roxborough ve Phillips (1975) $C_c = [p / (2.R-p)]^{0,5}$; Snowdan ve diğ. (1992) $C_c = 21,71.p^{-0,656}$; Hughes (1986) $C_c = 0,65. (p/R)^{0,5}$; Bruland (1998) $C_c = k.(p)^{0,5}$ 19" disk keski için $k = 0,035$ (Alıntıl原因 Ramazanzadeh, 2005).

4.2 Literatür Çalışması

Literatür de yer alan çalışmalar 2000 yılı öncesi ve sonrası olmak üzere iki başlık altında toplanarak aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

4.2.1 2000 yılı öncesi çalışmalar

Literatürde arazi penetrasyon indeksinin (FPI), ilk defa kullanıldığı Nelson ve diğ. (1983) kaynağında kaya numunesinin yüzey sertlik (H_r), taber aşınma (H_A) ve toplam sertlik olarak tanımlanan ($H_T = H_r + H_A$) değerleri ile anılan indeks arasında anlamlı sayılabilecek doğrusal regresyon ifadeleri elde edilirken, ilginçtir ki tek eksenli basınç, çekme dayanımları ve nokta yük indeksi ile FPI arasında herhangi bir ilişki belirlenmemiştir. Araştırmaya konu olan TBM 'in çapı 5,8 (m) olup kazı yaptığı kaya birimlerinin (şeyl, kumtaşı, kireçtaşı) tek eksenli basınç dayanımları 80 (MPa) - 130 (MPa) aralığında değişmiştir.

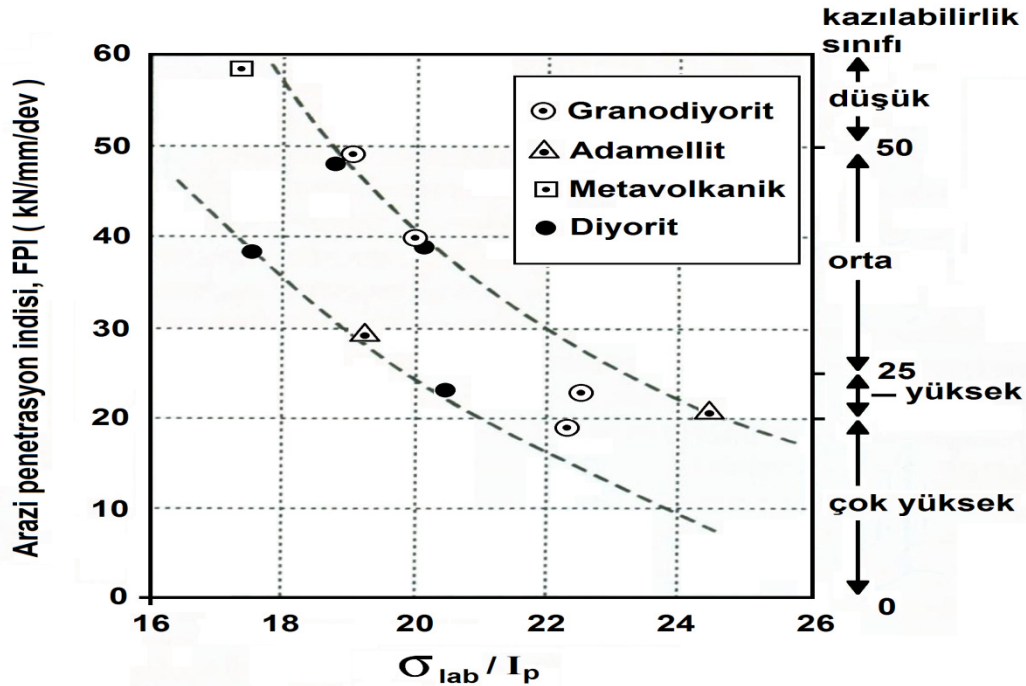
Klein ve diğ. (1995) çalışmasında arazi penetrasyon indeksine (FPI) yönelik olarak ulaşılan önemli sonuçlar şöyle özetlenebilir;

- FPI ile toplam sertlik " H_t " arasında anlamlı bir ilişki elde edilmemiştir.
- FPI ile dört adet tünel projesine ait sağlam kaya numunelerinin tek eksenli basınç dayanımları, σ_{lab} , (75 MPa - 375 MPa) arasında belirgin bir istatistiksel bağıntı çıkartılamamıştır. Buna karşın FPI ile kayanın gevreklik ölçütü olan (σ_{lab}/I_p) oranı arasında genel bir eğilim belirlenmiştir (Şekil 4.2). Şöyle ki; artan (σ_{lab}/I_p) değeri diğer ifadeyle artan gevreklik ile FPI büyüklüğü çok belirgin ölçüde azalmaktadır. Burada " I_p " nokta yük indeksidir. FPI değerinin azalması, kayanın daha kolay kazılabileceğinin göstergesidir.
- Artan derinlik basıncı/kaya kütlesi yerinde basınç dayanımı^(*) ($\sigma_z/\sigma_{y,b}$) oranı ile arazi penetrasyon indeksinin (FPI) azalma eğilimi göstermektedir (Şekil 4.3). Derinlik basıncının, kaya kütlesinin yerinde basınç dayanımına eşit olduğu durumda FPI büyüklüğü yaklaşık 10 - 20 (kN/disk/mm/dev) aralığında yer almaktadır.

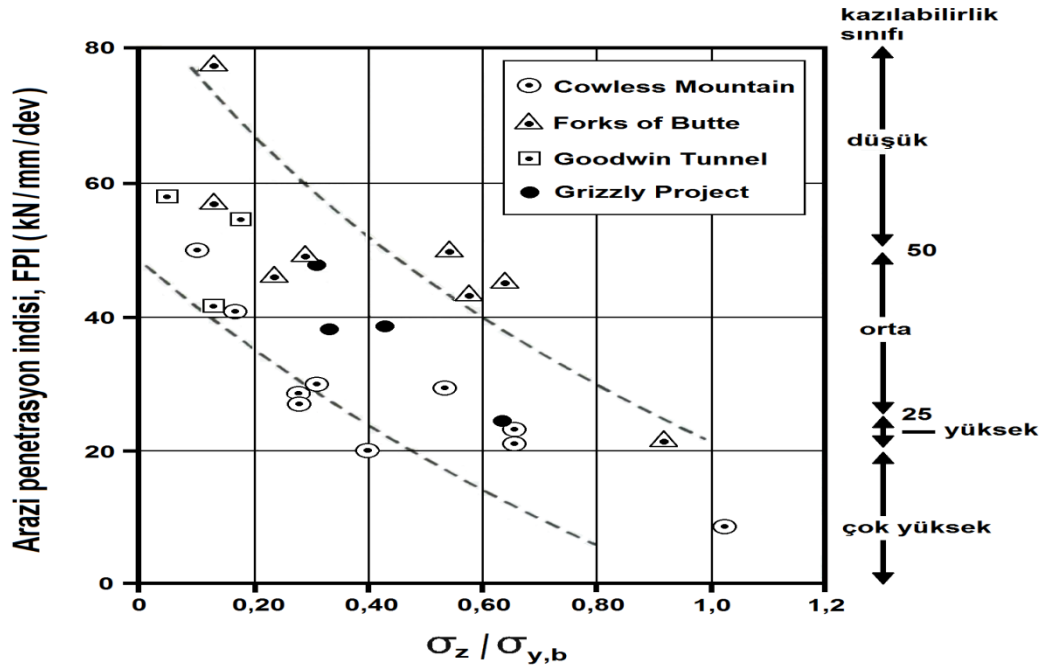
(*)Söz konusu oranda derinlik basıncı, $\sigma_z = \gamma \cdot H$ ve kaya kütlesinin basınç dayanım büyüklükleri, $\sigma_{y,b} = \sigma_{lab} \cdot s^{0,5}$, ile tanımlanmaktadır. Burada γ = Kaya biriminin birim hacim ağırlığı, H = Tünel aks derinliği, σ_{lab} = Sağlam numunenin tek eksenli basınç dayanımı, s = Çatlak aralığına bağlı ampirik faktör. Örneğin ortalama çatlak aralığı " $S > 3$ m" için " $s = 0,1$ ", " $S = 1 - 3$ m" aralığında " $s = 0,004$ ", " $S = 0,3 - 1$ m" aralığında ise " $s = 0,0001$ " değerlerini alır (Hoek ve Brown, 1980'den alıntılan Klein ve diğ., 1995).

Böyle doğal ortamda bulunan bir kaya kütesinin kazılabilirliği “çok yüksek” sınıfı ile temsil edilmektedir. Ayrıca sabit derinlik basıncında artan kaya kütesinin yerinde basınç dayanımı ile arazi penetrasyon indeksi (FPI) artmakta bir birim penetrasyon için daha yüksek itme kuvvetlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Daha açık bir anlatımla formasyonun yerinde basınç dayanımının artması kazılabilirlikle beraber ilerleme hızlarını da düşürecektir.

- Azalan çatlak aralığı değerlerinde kaya kütesinin yerinde basınç dayanımı yüksek bir oranla azalmakta ve buna paralel olarak kazılabilirlik artmaktadır. Ancak unutmamalıdır ki azalan çatlak aralıklarıyla beraber kaya kütesinin yerinde basınç dayanımı yanında kütle kalitesi de (RMR) azalmakta ve tünel derinliğine bağlı olarak belli değerlerin altına düşmesi hem sıkışma riski hem de arın denge durumu açısından olumsuzluklar doğurabilecektir. Gerek sıkışma potansiyelinin artması gerekse de arın denge durumunun korunamaması tünelcilikte istenmeyen durum olup makine yararlanma oranını (U) ciddi şekilde düşürebilmektedir. Nitekim Dolcini ve diğ. (1996) ve Grandori ve diğ. (1995b) (şekil 3.18) bu durum açıkça görülmektedir.



Şekil 4.2 : California'daki 4 TBM Projesinde arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile σ_b/I_p arasındaki ilişkiler (σ_b = Sağlam numunenin tek eksenli basınç dayanımı, I_p = Nokta yük indeksi), (Klein ve diğ., 1995).



Şekil 4.3 : California'daki 4 TBM Projesinde arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile $(\sigma_z/\sigma_{y,b})$ oranı arasındaki ilişkiler. (σ_z = Derinlik basıncı, $\sigma_{y,b}$ = Kaya kütleinin tek eksenli basınç dayanımı-Hoek-Brown 1980'e göre kestirilmiş, (Klein ve diğ., 1995).

Klein ve diğ. (1995) çalışmasının pratik mühendislik açısından bir değerlendirilmesi sayısal örnek olarak aşağıda verilmiştir:

Sayısal örnek:

Grizzly tünel projesinde çalıştırılan TBM çapı 3,35 (m), dakikadaki devir sayısı 12,5 (dev/dk), disk kesici sayısı ve çapı 26 ve 432 (mm)'dir. Kazılan kaya birimi ayrılmamış diyorit olup ortalama tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yük indeksi sırasıyla 165 (MPa) ; 8,5 (MPa) 'dır. TBM'nin kazı performansına ait büyüklükler kestirilecektir.

Çözüm:

$$I_p = 8,5 \text{ (MPa)} , \quad \sigma_{lab} / 8,5 = 19,41$$

- Arazi penetrasyon indeksinin kestirilmesi

Şekil 4.2 'den hareketle $(\sigma_{lab} / I_p = 19,4)$ oranına karşı gelen arazi penetrasyon indeksinin alt ve üst değerleri sırasıyla 28 ve 46 (kN/disk/mm/dev) olarak belirlenir. Ortalama değer ise 37 (kN/disk/mm/dev) alınabilir.

- Saatlik penetrasyon ve ilerleme miktarının hesaplanması:

Kabul edilen normal disk kuvvet düzeyi $F_N = 220$ (kN) için FPI değeri alt ve üst değerlerine sırasıyla karşılık gelen penetrasyonlar, $p = 7,9$ (mm/dev) ve $p = 4,8$ (mm/dev) olarak bulunur. Penetrasyon hızı ise **(3.20a)** yardımıyla sırasıyla

$$ROP_1 = 0,06 * 7,9 * 12,5 = 5,9 \text{ (m/sa)}$$

$$ROP_2 = 0,06 * 4,8 * 12,5 = 3,6 \text{ (m/sa)}$$

5,9 (m/sa) ve 3,6 (m/sa) olarak hesaplanır. Ortalama penetrasyon hızı, $ROP = 4,75$ (m/sa) olmaktadır.

Tünelin günlük ilerleme miktarı (AR) ise **(3.20b)** yardımıyla -günlük 20 saat kabul-

$$^{(*)}AR = ROP \text{ (m/sa)} * U = 4,75 * 20 * 0,40 = 38 \text{ , (m/gün)}$$

38 (m/gün) olmaktadır (U = TBM 'den yararlanma oranı olup %40 öngörülmüştür).

- Normal disk kuvvetinin tahkik edilmesi:

Dollinger ve Finnsson (1993)'e göre disk başına normal kuvvet (F_N);

$$F_N = d^{0,5} * p^{1,5} * [1,333. \sigma_{lab} + 2. c. (s/p - 2)] \text{ , (kN/disk keski)} \quad (4.23)$$

(4.23) ile verilmektedir (Rossler, 1995). Burada d = Disk kesici çapı (m); c = Kaya numunenin kohezyon değeri (kPa); σ_{lab} = kaya numunesinin tek eksenli basınç dayanımı (kPa) ile tanımlanmaktadır.

d = 0,432 (m) ve s = diskler arası mesafe 0,075 (m) kabul edilmiştir.

$$c = \frac{1}{2} * (\sigma_{lab} . \sigma_c)^{0,5} \text{ , (MPa)} \quad (\text{Arıoğlu ve diğ. , 2007}) \quad (4.24)$$

Yukarıdaki bağıntıda σ_{lab} ve σ_c 'nin birimleri (MPa) olarak girilecektir. Çekme dayanımı, $\sigma_c = 10$ (MPa) kabul edildiğinde kayacın kohezyon değeri **(4.24)** yardımı ile 20,31 (Mpa) olarak hesaplanabilir.

$$c = \frac{1}{2} * (165 . 10)^{0,5} = 20,31 \text{ MPa} = 20310 \text{ (kPa)}$$

(*)Klein ve diğ. (1995) kaynağında anılan tünelin günlük ortalama ve en iyi ilerleme miktarı sırasıyla 31,7 (m/gün) ve 58 (m/gün) olarak rapor edilmektedir. Günlük vardiya sayısı, çalışma süresi ve kullanım oranına ilişkin bir bilgi verilmemiştir. Bu nedenle analiz sonuçları karşılaştırılamamaktadır.

Ortalama penetrasyon miktarı $p_{ort} = 6,35 \text{ (mm/dev)} = 0,00635 \text{ (m/sa)}$ **(4.23)**
bağıntısında yerine konduğunda yapılan kabuller için bir disk keskiye gelen

$$F_N = 0,432^{0,5} * 0,00635^{1,5} * \left[1,333.165000 + 2.20310. \left(\frac{0,075}{0,00635} - 2 \right) \right] , \left(\frac{\text{kN}}{\text{disk keski}} \right)$$

normal kuvvet, $(^*)F_N \approx 205 \text{ (kN / disk keski)}$ olarak elde edilir ki kabul edilen normal kuvvet, $F_N = 220 \text{ (kN/disk keski)}$ ile uyumu çok iyidir.

Norveç Teknoloji Enstitüsü, NTH, tarafından geliştirilen TBM performans yöntemi burada arazi penetrasyon indeksi açısından belli bir ayrıntı içinde değerlendirilmiştir (Bruland ve diğ., 1995 ve Palmström, 1995).

Yöntemin temel parametreleri aşağıda tanımlanmıştır:

- Eşdeğer normal disk kuvveti:

$$F_{eş} = F_N * k_{dç} * k_{da} , \left(\frac{\text{kN}}{\text{disk keski}} \right) \quad (4.25)$$

F_N = Bir disk keskiye uygulanan normal kuvvet, (kN/disk keski); $k_{dç}$ ve k_{da} sırasıyla disk çapı ve aralık düzeltme faktörleri **(4.26a)** ve **(4.26b)** ampirik yardımıyla hesaplanabilir.

$$k_{dç} = 2,35 - 0,0028 * d_d , \quad 300 \text{ (mm)} < d_d < 500 \text{ (mm)} \quad (4.26a)$$

$$k_{da} = 1,35 - 0,005 * s , \quad 60 \text{ (mm)} < s < 90 \text{ (mm)} \quad (4.26b)$$

Burada; d_d ve s = Sırasıyla disk keski çapı (mm) ve disk keski aralığıdır (mm).

- Eşdeğer kaya kütlesi çatlak faktörü:

Çatlak faktörü çatlak sistemi ile tünel aksı arasındaki açı (α) ve hakim çatlak sınıfı (NTH) bilindiği takdirde delinebilirlik indeksi, $DRI = 49$ değeri için çatlak faktörü ($k_{çatlak}$) Şekil 4.4 'den bulunabilir. Yine Şekil 4.4' den çatlak aralık değerleri (S) için formasyonun çatlak sınıfı (NTH) bulunabilir. Farklı delinebilirlik indeksleri için çatlak faktörünün ($k_{çatlak}$) yeniden uyarlanması gerekmektedir. Farklı delinebilirlik indeksleri için eşdeğer çatlak faktörü ($k_{eş}$) **(4.27)** yardımıyla bulunabilir.

$$k_{eş} = k_{çatlak} * k_{DRI} \quad (4.27)$$

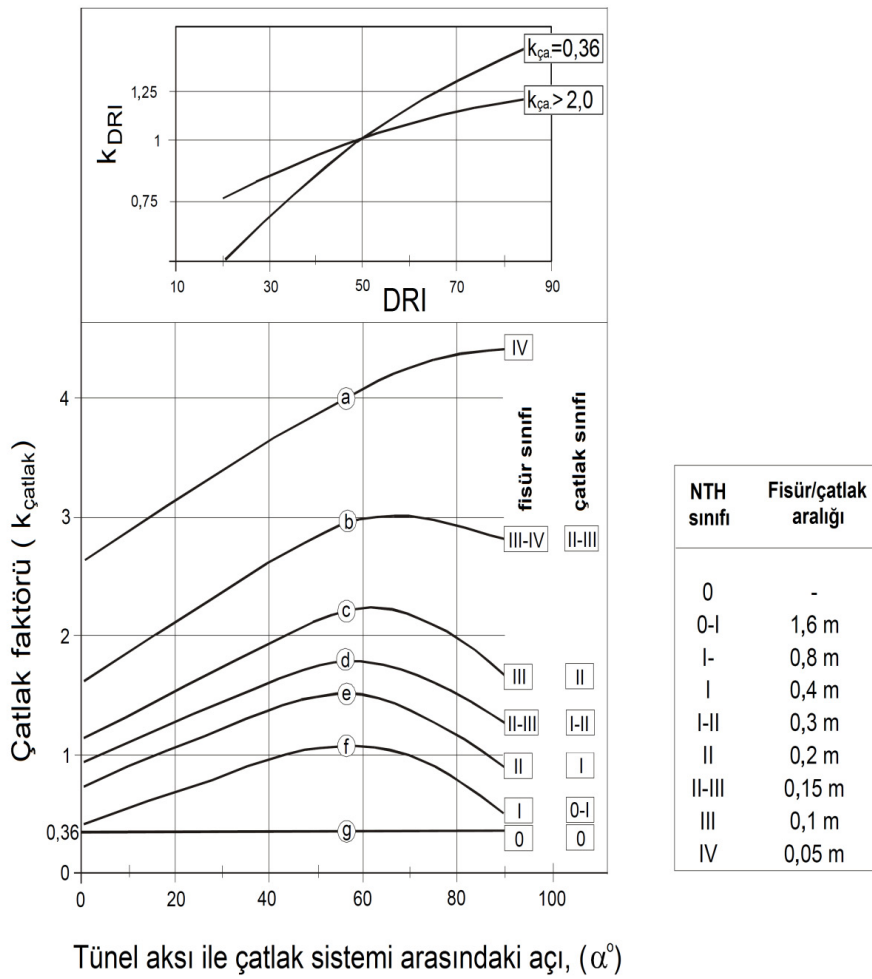
(*) F_N değeri Rostami ve diğ. (1996)'e göre hesaplandığında $p = 6,35 \text{ (mm/dev)}$ için $F_N = 160 \text{ (kN/disk)}$ olmaktadır. $F_N = 200 \text{ (kN/disk)}$ seviyeleri için formül tekrardan çalıştırıldığında, $p = 13 \text{ (mm/dev)}$ gibi çok yüksek penetrasyon ve buna bağlı olarak gene çok yüksek ilerleme miktarı, $AR = 3,41 \text{ (m/sa)}$ değerlerine ulaşılmaktadır.

(4.27) bağıntısındaki k_{DRI} düzeltme faktörü blok hacmine göre (4.28a) veya (4.28b) yardımıyla hesaplanabilir.

$$k_{DRI} = 0,14 \times DRI^{0,5} \quad V_b < 10 \text{ (m}^3\text{)} \quad (4.28a)$$

$$k_{DRI} = 0,06 \times DRI^{0,72} \quad V_b \geq 10 \text{ (m}^3\text{)} \quad (4.28b)$$

bulunur. Burada; k_{DRI} = delinebilirlik indeksinin 49'dan farklı olduğu durumlar için aldığı çarpan olup formül yoluyla veya Şekil 4.4 yardımıyla kestirilebilir, V_b = blok hacmidir ve Çizelge 4.2 yardımıyla bulunabilir (Palmström, 1995). Eş değer çatlak faktörü ($k_{eş}$) TBM penetrasyon miktarının bilinmesi için gerekli olan ve çatlak sisteminin bütünü yansıtan bir değerlendirme faktörüdür. Bu faktör ne kadar büyük olursa TBM kazısı için ideal şartların o denli yüksek olduğu anlamını taşımaktadır. Daha basit bir anlatımla sabit bir keski yükü altında artan eş değer çatlak faktörü ile penetrasyon miktarlarının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.4 : NTH çatlak sınıfı, tünel aksı ile çatlak sistemi arasındaki açının (α°) TBM penetrasyon faktörüne etkisi (Palmström, 1995).

Çizelge 4.2'den de takip edilebileceği üzere ortalama çatlak aralığı (S) küçüldükçe NTH çatlak sınıf numarası artmakta ve çatlağın tanımladığı blok hacmi (V_b) de beklenildiği gibi büyük ölçüde azalmaktadır. Bir başka deyişle artan blok hacmiyle kaya kütlelerinin masifleştiği yani kaya kütle kalite puanının arttığı söylenebilir.

NTH çatlak numarası genellikle sondaj logları veya tünel kazı arınında gerçekleştirilecek çatlak ölçüm çalışmaları sonucunda belirlenebilir.

Çizelge 4.2 : NTH çatlak sınıfı ile eşdeğer blok hacmi ve şekil faktörü (Palmström, 1995).

NTH Çatlak sınıfı	0-I	I	I-II	II	II-III	III	III-IV	IV
Çatlak aralığı, S, (m)	1,6	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1	0,075	0,05
Eşdeğer blok hacmi, (m^3)	200	10	4	1.5	0,6	0,2	-	-
Blok şekil faktörü, $\beta=f(S)$	50	150	150	175	175	175	200	200

Eğer laboratuvar ölçüm sonuçları yoksa DRI değeri aşağıda verilen (4.29a), (4.29b) ve (4.29c) regresyon bağıntılarından elde edilebilir (Palmström 1995).

Sert kayalar için;

$$DRI = 1000 * \sigma_{lab}^{-0,6} , 40 \text{ (MPa)} < \sigma_{lab} \quad (4.29a)$$

Başkalaşım kaya türleri için;

$$DRI = 750 * \sigma_{lab}^{-0,6} , 30 \text{ (MPa)} < \sigma_{lab} < 150 \text{ (MPa)} \quad (4.29b)$$

Killi kaya türleri için;

$$DRI = 500 * \sigma_{lab}^{-0,6} , 10 \text{ (MPa)} < \sigma_{lab} < 100 \text{ (MPa)} \quad (4.29c)$$

Burada; σ_{lab} = Sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç dayanımıdır (MPa).

Mühendislik jeolojisi çalışmaları sonucunda kaya blok hacmi (V_b) ve çatlak sisteminin tünel aksı ile yapmış olduğu açı (α) belirlenmiş ise Şekil 4.4 yerine çatlak faktörü " $k_{çatlak}$ " (4.30a) ve (4.30b) yardımıyla da hesaplanabilir.

$$\text{Çatlaklı kaya kütlesi için; } k_{çatlak} = 1,6 * c_o * V_b^{-0,33} \quad (4.30a)$$

$$\text{Fissürlü kaya kütlesi için; } k_{çatlak} = 0,9 * c_o * V_b^{-0,26} \quad (4.30b)$$

Burada açıklanmayan " c_o " ifadesi çatlak sistemiyle ilgili faktör olup Çizelge 4.3 yardımıyla bulunabilir. Formüllerden de görüldüğü üzere artan blok hacminde bir başka deyişle azalan çatlak aralığı değerlerinde " $k_{\text{çatlak}}$ " faktörü azalmaktadır. Bu da formasyonun kazılabilirliğini ve buna paralel penetrasyon değerlerini düşürmektedir. Daha açık bir ifade ile artan çatlak aralıkları sonucu formasyon masifleştikçe penetrasyon değerleri ve ilerleme miktarları azalmaktadır.

Çizelge 4.3 : Değişen " α " açısı ile " c_o " arasındaki ilişki (Palmström, 1995).

Tünel aksı ile çatlak sistemi arasındaki açı, α	0-15°	15-30°	30-45°	45-75°	75-90°
Ortalama c_o değeri	1	1,25	1,5	1,75	1,5 $V_b < 0,1 \text{ m}^3$ için $c_o = 1,75$

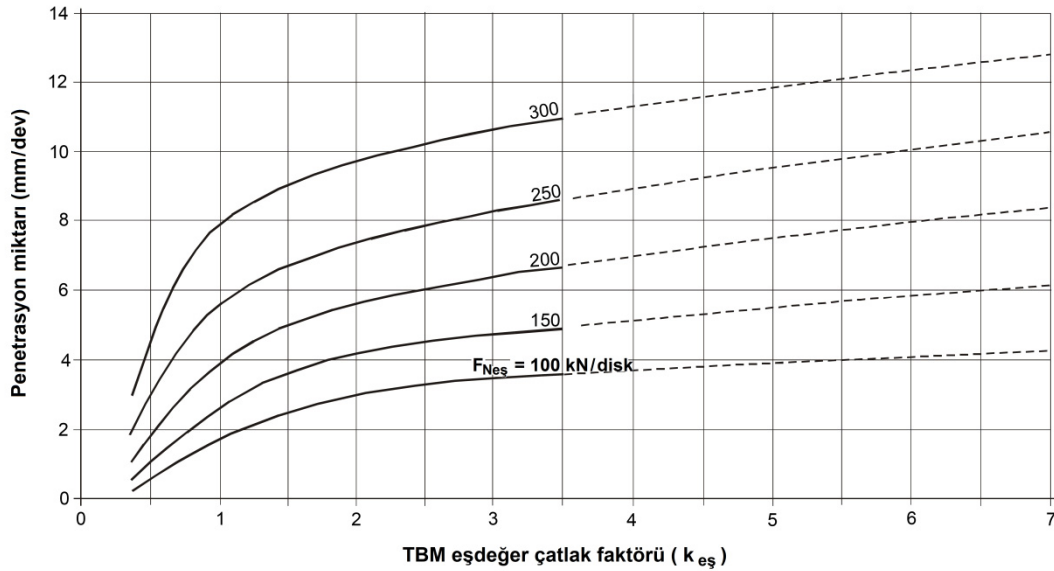
Şekil 4.2'de Klein ve diğ. (1995) çalışmasından hatırlanacağı üzere yerinde basınç dayanımının artması arazi penetrasyon değerlerinin artmasına ve aynı düşey derinlik basıncı için kazılabilirliğin düşmesine neden olmakta idi. Bir diğer dikkat çekici unsur " c_o " çarpan değerinin hakim çatlak sisteminin tünel aksı ile yaptığı açının değişmesiyle değişmesidir. Bölüm 3.4'de Gong ve diğ. (2005) çalışmasında gerek nümerik gerekse de gözlemsel bilgiler ışığında en iyi penetrasyon değerlerinin $\alpha = 60^\circ$ civarında alındığı belirtilmiştir (Şekil 3.7). Gong ve diğ. (2005) çalışmasında $\alpha = 60^\circ$ da kaydedilen penetrasyon miktarları $\alpha = 0^\circ$ için kaydedilen penetrasyon miktarlarının 2-2,5 katı arasında olmaktadır. Bu sonuçlar Palmström (1995) çalışmasını doğrular niteliktedir. Nitekim " c_o " çarpanı en yüksek 1,75 değerini $\alpha = 45-75^\circ$ arasında almaktadır. Bir diğer dikkat çekici unsur aynı çatlak aralığında veya başka bir anlatımla aynı blok hacimlerinde fisürlü formasyonlarda çatlaklı formasyonlara nazaran daha düşük çatlak faktörü değerlerine ulaşılmasıdır. Daha açık bir ifade ile fisürlü formasyonların çatlaklı formasyonlara nazaran daha zor kazılabilir olduğu görülmektedir.

- Penetrasyon Miktarının Belirlenmesi:

Penetrasyon, p , (mm/dev) değeri , $p = f(k_e, F_{eş})$ fonksiyonlarından bulunur (Şekil 4.5) (Bruland ve diğ., 1995; Palmström, 1995).

Değişim yakından incelendiğinde şu pratik sonuçlar ön plana çıkmaktadır:

- Verilen bir eşdeğer normal disk kuvvetinde ($F_{eş}$) artan eşdeğer çatlak faktörü ($k_{eş}$) ile penetrasyon miktarı (p) artmaktadır.
- Verilen bir kaya kütleğinde ise TBM'nin ilerleme hızı diğer anlatımla penetrasyon miktarı disk keskiye uygulanan normal kuvvetin disk keskinin yatak taşıma kapasitesine kadar artırılabilir (artan normal disk kuvvetlerinde çok yüksek tek eksenli basınç dayanımlarına sahip kayalarda disk aşınmasının veya disk hasarlarının artabileceği, bu nedenle disk çapı, toplam yatay itki (thrust) ve aşınma parametreleri seçiminde özenli bir optimizasyonun yapılması gerekmektedir).



Şekil 4.5 : Penetrasyon miktarının eşdeğer çatlak faktörü ($k_{eş}$) ve eşdeğer disk normal kuvveti ($F_{eş}$) ile değişimleri (Palmström, 1995).

Yukarıda kısaca açıklanan NTH yönteminin arazi penetrasyon indeksi (FPI), cinsinden değerlendirilmesi sayısal olarak aşağıda verilmektedir.

Sayısal Örnek:

Kabuller; Kaya türü: Granit olup tek eksenli basınç dayanımı, $\sigma_{lab} = 170$ (MPa), ortalama çatlak aralığı, $S = 0,40$ (m) ve $S = 0,10$ (m) ve çatlak düzlemi ile tünel aksı arasındaki açı, $\alpha = 60^\circ$ dir. Tünel çapı, $D = 5,0$ (m) ve maksimum normal disk kuvveti, $F_N = 270$ (kN)' dur. Disk çapı, $d_d = 432$ (mm) (17 inç.) ; Disk keski aralığı, $s = 80$ (mm), kesici kafa devir sayısı, RPM = 10 (dev/dak) olarak kabul edilmiştir.

Verilen çatlak aralıkları için arazi penetrasyon indeksinin ve penetrasyon hızının NTH yöntemi kullanılarak hesaplanması:

Delinebilirlik indeksi **(4.29a)** yardımıyla;

$$DRI = 1000 * \sigma^{-0,6} = 1000 * 170^{-0,6} \approx 46$$

Eşdeğer normal disk kuvveti **(4.26a)** , **(4.26b)** ve **(4.25)** yardımıyla;

$$F_{eş} = 270 * (2,35 - 0,0028 * 432) * (1,35 - 0,005 * 80) \approx 292 \text{ (kN/disk)}$$

NTH sınıf numarası Şekil 4.4 veya Çizelge 4.2 yardımıyla $S = 0,4$ (m) ve $S = 0,10$ (m) çatlak aralıkları için çatlak sınıf numarası sırasıyla (I) ve (III) bulunur.

Eşdeğer çatlak faktörünün kestirilmesi; $S = 0,4$ (m) için Şekil 4.4 'den verilen $\alpha = 60^\circ$ ve belirlenen çatlak sınıfı (I) 'e karşı gelen çatlak faktörü, $k_{çatlak} = 1,1$ bulunur. Hesaplanan $DRI = 46$ değeri için aynı şekilden $k_{DRI} \approx 0,95$ kestirilir.

Ayrıca hesap yoluyla da, k_{DRI} $S = 0,1$ (m) ve $S = 0,4$ (m) değerleri sırasıyla;

$$V_b < 10 \text{ (m}^3\text{)}, \quad k_{DRI} = 0,14 * \sqrt{DRI} = 0,14 * \sqrt{46} = 0,9495, \quad k_{DRI} \approx 0,95$$

$$V_b \geq 10 \text{ (m}^3\text{)}, \quad k_{DRI} = 0,06 * DRI^{0,72} = 0,06 * 46^{0,72} = 0,9448, \quad k_{DRI} \approx 0,95$$

(4.28a) ve **(4.28b)** yardımıyla aynı sonuca ulaşılabilir. " k_{DRI} " değerinin bilinmesiyle eşdeğer çatlak faktörü ($k_{eş}$) **(4.27)** yardımıyla;

$$S = 0,4 \text{ (m) için } k_{eş} \approx 1,05$$

hesaplanır. Aynı şekilde $S = 0,1$ (m) çatlak aralığı için Şekil 4.4 yardımıyla $\alpha = 60^\circ$ çatlak faktörü, $k_{çatlak} = 2,3$ ve eşdeğer çatlak faktörü ($k_{eş}$) ise **(4.27)** yardımıyla

$$S = 0,1 \text{ (m) için } k_{eş, S=0,1} \approx 2,19$$

hesaplanır.

Çatlak aralıklarına, $S = 0,40$ (m) ve $S = 0,10$ (m), karşılık gelen penetrasyon miktarları hesaplanan $F_{eş} = 292$ (kN/disk keski) ve eşdeğer çatlak faktörleri ($k_{eş}$) yardımıyla Şekil 4.5'den " $k_{eş} = 1,05$ ve $k_{eş} = 2,19$ " değerleri için sırasıyla $p = 8$ (mm/dev) ve $p = 9,6$ (mm/dev) bulunur.

Penetrasyon hızı (ROP) $S = 0,4$ (m) ve $S = 0,1$ (m) değerleri için **(3.20a)** yardımıyla

$$ROP_{S=0,4 \text{ m}} = 0,06 * 8 * 10 = 4,8 \left(\frac{\text{m}}{\text{sa}} \right) \text{ ve } ROP_{S=0,1 \text{ m}} = 0,06 * 9,6 * 10 = 5,76 \left(\frac{\text{m}}{\text{sa}} \right)$$

sırasıyla 4,8 (m/sa) ve 5,76 (m/sa) hesaplanmaktadır.

Teorik yaklaşımın sonuçlarına göre ortalama çatlak aralığının, $S = 0,40$ (m)'den $S = 0,10$ (m)'ye azalması durumunda diğer faktörlerin değişmemesi koşulunda, net ilerleme miktarı %20 düzeyinde artmaktadır.

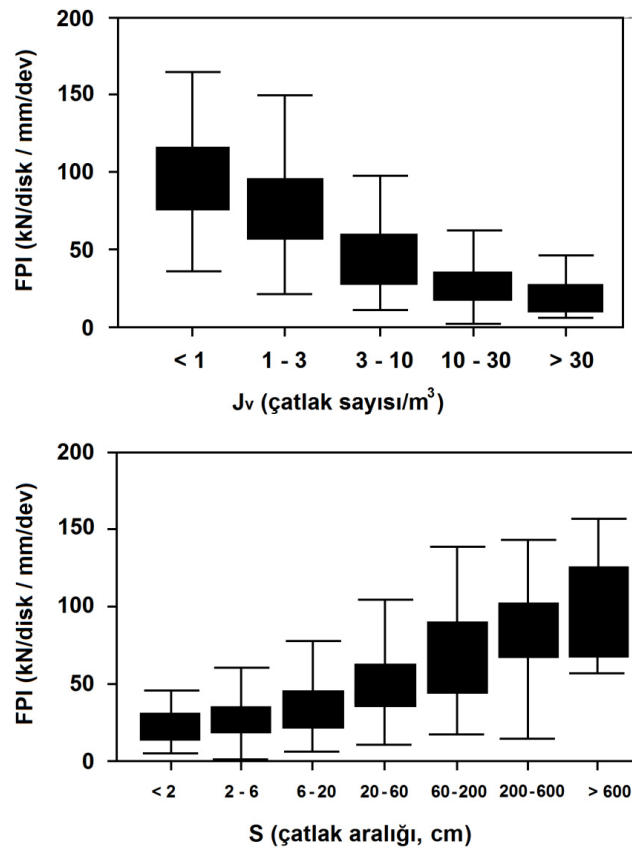
Arazi penetrasyon indeksinin tahkiki;

$S = 0,40$ (m) ve $S = 0,1$ (m) için (4.1) bağıntısı yardımıyla;

$$FPI_{S=0,4m} = 270/8 = 33,7 \quad ; \quad FPI_{S=0,1m} = 270/9,6 = 28,1 \quad (\text{kN/disk/mm/dev})$$

sırasıyla 33,7 (kN/disk/mm/dev) ve 28,1 (kN/disk/mm/dev) olarak hesaplanır. Arazi penetrasyon indeksinin azalması kaya kütlelerinin kazılabilme kolaylığının artması anlamını taşımaktadır.

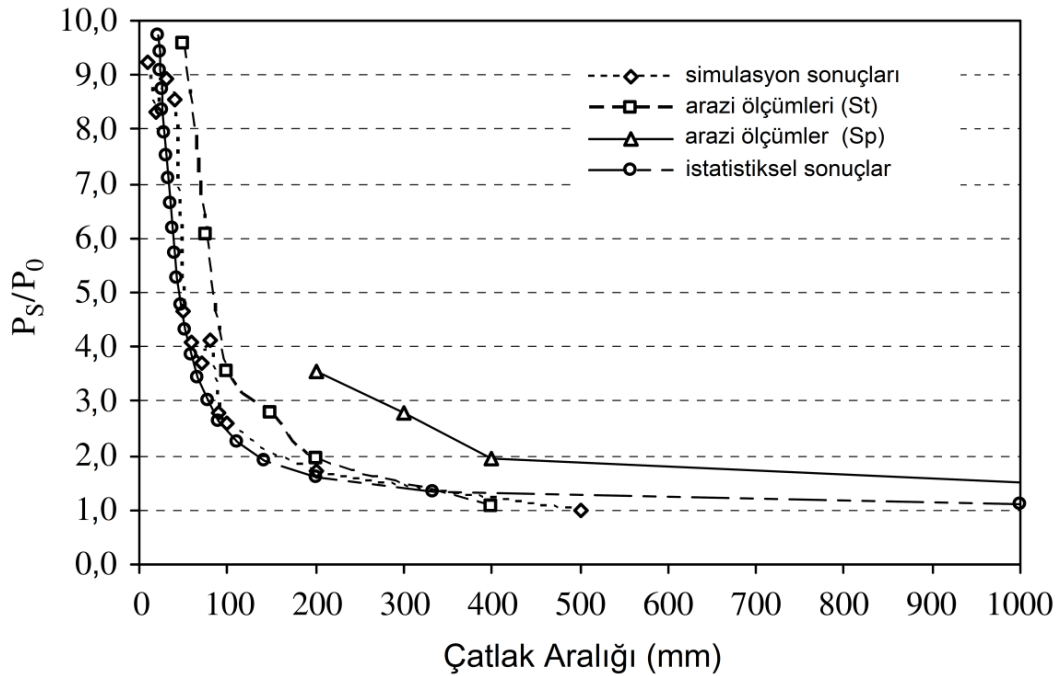
Örnekten de görüldüğü üzere artan çatlak aralıklarına bağlı olarak azalan penetrasyon değerleri sonucu arazi penetrasyon indeksi (FPI) artmaktadır. FPI değerindeki artış Sundaram ve diğ. (1998) arazi sonuçlarından elde ettikleri verilerle de çok uyumludur (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile hacimsel çatlak sayısı ve çatlak aralığı ilişkisi (Sundaram ve diğ., 1998).

Gong ve diğ. (2006) çalışmasında belirtilen sayısal simülasyon sonuçlarına göre çatlak aralığı azaldıkça sağlam homojen bir birimde kesinti (kırıntı) gerilmesi önemli ölçüde azalmaktadır. Başka bir anlatımla azalan çatlak aralığıyla kazı kolaylaşmaktadır. Örneğin; 50 (cm) çatlak aralığında kırıntı gerilme düzeyi 150 (MPa) iken 9 (cm) çatlak aralığında anılan gerilme 72 (MPa)'ya düşmektedir. Penetrasyon hızı açısından bakıldığında ($P_ç/P_{50}$) oranı 2,78 olmaktadır. ($P_ç$, P_{50} sırasıyla verilen çatlak aralığı ve baz alınan 50 (cm) çatlak aralığına karşı gelen penetrasyon değerleri).

Gong ve diğ. (2009) çalışmasında ise değişen çatlak aralığı (S) değeri için gerek benzetim sonuçları gerekse de arazideki ölçüm sonuçları incelenmiş ve toplu olarak aynı diyagramda verilmiştir (Şekil 4.7). Yukarıda ele alınan örnekten elde edilen penetrasyon miktarlarının birbirine oranı ($P_{0,1}/P_{0,4} = 1,2$) gerek simülasyon gerekse de arazi ölçüm sonucu elde edilen değerlere kıyasla düşük kalmasına rağmen değişen çatlak aralığında oluşan gidişatı görmek açısından uyumludur. Şekil 4.6'dan da takip edilebileceği üzere arazi ölçümleri sonucu elde edilen bilgiler ışığında çatlak aralığının penetrasyona etkisi simülasyon sonuçlarına nazaran daha az olmaktadır.



Şekil 4.7 : Arazi ölçümleri ve benzetim sonucu elde edilen çatlak aralığı ile değişen penetrasyon oranları. P_s istenilen çatlak aralığı, P_0 500 (mm) çatlak aralığı için elde edilen penetrasyon. S_t ve S_p sırasıyla Fisür ve Çatlak sınıfı (Gong ve diğ., 2009).

Burada bir diğerk dikkat çekici unsur aynı çatlak aralığı veya bir başka deyişle aynı blok hacmi için fisürlü formasyonda elde edilen penetrasyon oranının çatlaklı formasyonda elde edilene nazaran daha düşük olmasıdır.

Bu kavram basit bir örnekle şu şekilde açıklanabilir; $S = 500$ (mm) (baz alınan noktamızda) fisürlü formasyonda ve çatlaklı formasyonda sırasıyla penetrasyon miktarlarımız, $p = 5$ (mm/dev) ve $p = 6$ (mm/dev) olsun. $S = 200$ (mm) için fisürlü formasyonda ve çatlaklı formasyonda elde edilen penetrasyonlar sırasıyla 10 (mm/dev) ve 21 (mm/dev) olacak şekilde artmaktadır. Bu da azalan çatlak aralığıyla fisürlü formasyonun çatlaklı formasyona nazaran kazılabilirlik açısından daha az avantaj sağladığı veyahut daha az etkilendiğı şeklinde yorumlanabilir.

Nitekim Palmström (1995) çalışmasında verilen **(4.30a)** ve **(4.30b)** çatlak faktörü bağıntıları çalıştırıldığında azalan çatlak aralıklarına paralel artan blok hacimlerinde çatlak faktörünün fisürlü formasyonlar için çatlaklı formasyonlara nazaran artış hızının daha düşük olduğu görülmektedir.

Sundaram ve diğ. (1998) çalışmasında arazi penetrasyon indeksinin TBM performansının değerlendirmesinde anlamlı bir parametre olabileceğı belirtilmiştir. Araştırmaya konu olan tünel, orta-iri daneli granit içinde açılmış olup tek eksenli basınç dayanımının değışim aralığı 130 - 246 (MPa), ortalama değeri 182 (MPa) ve Q faktörünün değışim aralığı ise $< 0,01$ ila > 400 olarak rapor edilmiştir. Makine parametreleri (arazi penetrasyon indeksi (FPI), penetrasyon hızı (ROP), spesifik enerji (SE), tork (T) ve makine kullanım oranı (U)) ile çeşitli kaya özellikleri (yüzey sertlik, çatlak pürüzlüğü yönelimi, kaya kalite göstergesi (RQD), birim hacim kaya kütlesi içindeki çatlak sayısı (J_v), RQD/çatlak sayısı, kaya tünelticilik kalite faktörü (Q)) arasında korelasyon analizlerinin yapıldığı çalışmada ön plana çıkan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- FPI ile Q arasında korelasyon katsayısı ($r = 0,63$) olarak elde edilmiş, ve artan Q değerleri bir diğerk deyişle artan kaya kütle kalitelerinde arazi penetrasyon indeksi değerleri artmıştır. Bir başka anlatımla formasyonun kazılabilirliği azalmıştır.
- Artan çatlak aralıklarında arazi penetrasyon indeksinin anlamlı bir şekilde arttığı Şekil 4.6 'dan net bir şekilde görülebilmektedir. Bir diğerk deyişle kaya kütlesinin kalitesi yükseldikçe (masifleştikçe) formasyonun kazılabilirliğinin düştüğü bu çalışmada da görülmektedir.

- Makinenin temel parametrelerinden biri olan tork ve spesifik enerji ile kaya özellikleri arasında anlamlı sayılabilecek herhangi bir korelasyon belirlenememiştir.
- En yüksek korelasyon katsayısı $r = 0,76$, FPI (kN/disk/mm/dev) ile $^{(*)}J_v$ (çatlak sayısı/m³) arasında elde edilmiştir. Bu çıkarıma göre 1 (m³) kaya kütleinde artan çatlak sayısı ile arazi penetrasyon indeksi azalmıştır (Şekil 4.6).
- Ribacchi ve Fazio (2005) çalışmasında belirtilen farklı ayrışma derecelerine sahip gnays formasyon (ort. $\sigma_{lab} = 150$ (MPa)) ağırlıklı Varzo tünel projesinde 6 (cm) - 20 (cm) çatlak aralıkları için az ayrışma derecesine sahip kesimlerden (IMS = 3) elde edilen spesifik penetrasyon değerleri 25 (mm/dev/MN/disk) seviyelerindedir (Şekil 4.13). Diğer bir anlatımla spesifik penetrasyon (SP) tanımından yola çıkarak arazi penetrasyon indisi, FPI = 40 (kN/disk/mm/dev) olmaktadır.

Şekil 4.6'dan da görülebileceği üzere 6 (cm) - 20 (cm) aralığında benzer basınç dayanımlarına sahip granitten elde edilen değerler FPI = 28 (kN/disk/mm/dev) ile FPI = 48 (kN/disk/mm/dev) aralığında değişmektedir. Böylelikle arazi penetrasyon indeksinin verilen bir basınç dayanımı ve çatlak aralığında kısaca formasyonun kaya kütle özelliklerinde farklı çap ve tasarıma sahip TBM'lerde dahi ne denli benzer sonuçlar alabildiği görülmektedir.

(*) Birbirine dik yönlü L_x, L_y, L_z uzunluğundaki üç ölçüm hattı boyunca belirlenen çatlakların sayısı N_x, N_y, N_z olması durumunda birim hacim kaya kütleinde çatlak sayısı (4.31a) ve (4.31b)

$$J_v = \left(\frac{N_x}{L_x} \right) * \left(\frac{N_y}{L_y} \right) * \left(\frac{N_z}{L_z} \right) , \left(\frac{\text{çatlak}}{m^3} \right) \quad (4.31a)$$

$$J_v = \left(\frac{1}{S_x} \right) * \left(\frac{1}{S_y} \right) * \left(\frac{1}{S_z} \right) , \left(\frac{\text{çatlak}}{m^3} \right) \quad (4.31b)$$

ile tanımlanabilir. Burada S_x, S_y, S_z anılan ölçü hattındaki ortalama çatlak aralığını ifade eder. Kaya mekaniği disiplini $J_v < 1$ (çatlak/m³) ile > 60 çatlak/m³ aralığında verilmiştir. Artan J_v büyüklüğü çatlak sistemleriyle sınırlanmış “kaya blok boyutu”nun küçülmesi demektir. Örneğin J_v 1 ile 3 adet/m³ olması kaya kütleinin “büyük boyutlu” olduğunu gösterir (Ulusay ve Sönmez, 2007). Ayrıca, J_v ile RQD arasında; $RQD = 110 - 2,5 * J_v$ (Palmström, 2005) ve $RQD = 115 - 3,3 J_v$ ilişkileri vardır (Palmström, 1995).

4.2.2 2000 yılı sonrası çalışmalar

Alber (2000 ve 2008) çalışmalarında TBM performansının belirlenmesi için spesifik penetrasyon (SP) kavramını kullanmıştır. Bu büyüklük ise arazi penetrasyon indeksinin (FPI) tersi olmaktadır (4.32).

$$SP = \frac{1}{FPI} = \frac{p \left(\frac{\text{cm}}{\text{dev/dk}} \right)}{F_N \left(\frac{MN}{\text{disk keski}} \right)}, \left(\frac{\text{cm} \cdot \text{disk keski}}{MN \cdot \frac{\text{dev}}{\text{dk}}} \right) \quad (4.32)$$

Spesifik penetrasyon büyüklüğünün beş farklı tünel için değişimleri kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı ($\sigma_{y,b}$) cinsinden Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.9 ise TBM'den yararlanma oranı (U) ile tünel tavanının güvenlik katsayısını (GK) arasındaki değişimleri göstermektedir. Şekil 4.8'de kullanılan kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı ($\sigma_{y,b}$) Hoek-Brown gerilme ölçütünden hareketle kaya kütle puanı RMR cinsinden ifade edilmiştir.

Hoek-Brown gerilme ölçütlerine göre kayanın yerinde tek eksenli basınç dayanımı (4.33) bağıntısı kullanılarak kestirilebilir.

$$\sigma_{y,b} = \sigma_{lab} * s^{0,5} \quad (4.33)$$

Burada; σ_{lab} = sağlam numunenin tek eksenli basınç dayanımı, s = çatlak faktörü olup (4.34) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$s = \exp \left(\frac{RMR_{TBM} - 100}{9} \right) \quad (4.34)$$

Yukarıdaki bağıntıda verilen " RMR_{TBM} " TBM ile açılmış bir tünel projesinde kaya kütle kalite değeri olup (3.9) ile hesaplanmaktadır. (4.33) ve (4.34) bağıntıları birbirleri ile ilişkilendirildiğinde (4.35) bağıntısı elde edilmektedir. Buna göre kaya kütlelerinin tek eksenli dayanımı;

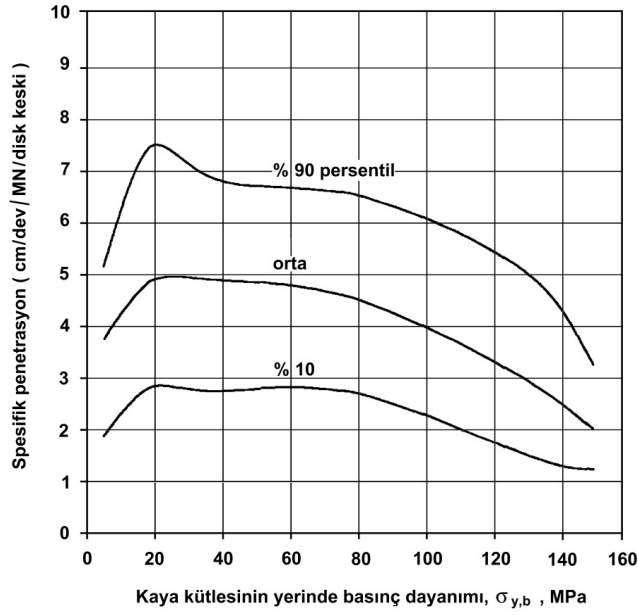
$$\sigma_{y,b} = \sigma_{lab} * \left[\exp \left(\frac{0,84 \cdot RMR - 79}{9} \right) \right]^{0,5} \quad (4.35)$$

şekilde yazılabilir. Alber (2000) ve (2008) çalışmalarında tünel tavanının stabilitesi için güvenlik katsayısını (GK) (4.36) bağıntısı ile verilmektedir.

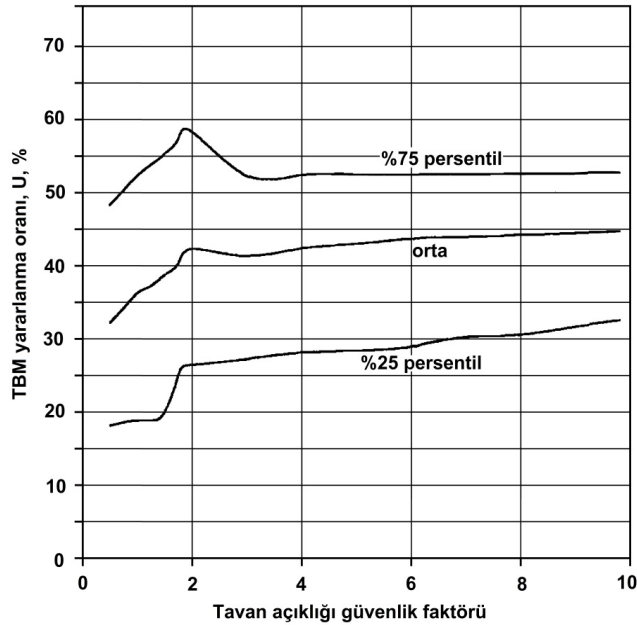
$$GK = \frac{\sigma_{y,b}}{\sigma_t} = \frac{\sigma_{lab} * s^{0,5}}{(3 \cdot K - 1) * \sigma_z} = \frac{\sigma_{lab} * s^{0,5}}{(3 \cdot K - 1) * H * \gamma} \geq 1 \quad (4.36)$$

Burada " σ_t " verilen gerilme koşulunda tünel tavanında teğetsel gerilme, " $K = \sigma_y / \sigma_z$ " olup, " σ_y ; σ_z ", sırasıyla yatay ve düşey (derinlik) basınç, " γ " kayanın birim hacim ağırlığı (t/m^3) ve H = Tünel aks derinliği (m)'dir.

"GK < 1" durumunda tünelde stabilite sorununun olduğunu işaret eder. Şekil 4.9 'dan dikkat edileceği üzere GK'nin 0,5'den 2'ye yükselmesi durumunda TBM'nin kullanım oranı yaklaşık %30'dan %42 'ye ulaşmaktadır. Kısacası, tünel stabilite koşullarının iyileşmesi TBM'nin saatlik/günlük ilerleme miktarı üzerinde olumlu şekilde yansıyacaktır.



Şekil 4.8 : Kaya kütlesinin yerinde basınç dayanımı ile spesifik penetrasyon arasındaki ilişki (Alber, 2000).



Şekil 4.9 : Tavan açıklığı güvenlik faktörü ile TBM yararlanma oranı (U) arasındaki ilişki (Alber, 2000).

Alber (2000) yaklaşımıyla TBM performansının nasıl hesaplanacağı bir sayısal örnek kapsamında aşağıda verilmektedir.

Sayısal Örnek:

432 (mm) çapında 32 disk keski ile donatılan 5 (m) dış çaplı bir TBM 300 (m) derinlikteki bir tünelde çalıştıracaktır. Kazının yapılacağı tünelde hakim kaya birimi kumtaşı olup tek eksenli basınç dayanımı $\sigma_{lab} = 50$ (MPa) ve kaya kütle puanı $RMR \approx 52$ olarak saptanmıştır. Ortalama normal disk keski kuvveti 200 (kN/disk keski), kesici kafanın devir sayısı dakikada 9 (dev/dk), günlük çalışma saati 24 (sa) ve tünel gerilme koşulu hidrostatik kabul edilerek TBM'nin ortalama penetrasyon ve ilerleme miktarı kestirilecektir.

Çözüm:

- TBM kaya kütle puanının belirlenmesi **(3.9)**;

$$RMR_{TBM} = 0,84 * RMR + 21 = 0,84 * 52 + 21 \approx 65$$

- Kaya kütle puanının basınç dayanımı **(4.34)** ve **(4.35)**;

$$\exp\left(\frac{65 - 100}{9}\right) = s \approx 0,02 \quad ; \quad \sigma_{y,b} = 50 * 0,02047^{0,5} \approx 7,07 \text{ (MPa)}$$

- Tünel tavanının güvenlik katsayısı hidrostatik durum için $K = 1$ olmaktadır;

$$GK = \frac{\sigma_{y,b}}{\sigma_t} = \frac{\sigma_{y,b}}{(3 \cdot K - 1) * \sigma_z} = \frac{\sigma_{y,b}}{2 * \sigma_z}$$

Derinlik Basıncı ve GK **(4.36)** yardımıyla;

$$\sigma_z = H * \gamma = 2,65 \left(\frac{t}{m^3}\right) * 300(m) = 795 \left(\frac{t}{m^2}\right) = 7,95 \text{ (MPa)}$$

$$GK = \frac{7,07}{2 * 7,95} \approx 0,45$$

- Spesifik Penetrasyon değeri;

Şekil 4.8'den $\sigma_{y,b} = 7,1$ (MPa) değerine karşı gelen orta spesifik penetrasyon

$SP = 3,8$ (cm/dev/MN/disk keski) olarak belirlenir.

Arazi penetrasyon indeksi $FPI = 1/SP = 0,263$ (MN/disk/cm/dev) olmaktadır. FPI birim düzeltilmesi sonucu $FPI = 26,3$ (kN/disk keski/mm/dev) olmaktadır.

- Verilen normal kuvvet ($F_N = 200\text{kN}$) için penetrasyon miktarı **(4.1)**;

$$p = \frac{200}{26,3} = 7,6 \left(\frac{\text{mm}}{\text{dev}} \right)$$

Penetrasyon hızı ise **(3.20a)** yardımıyla:

$$\text{ROP} = 0,06 * 7,6 * 9 = 4,10 \text{ (m/sa)}$$

- TBM' nin günlük ilerleme miktarı (AR) **(3.20b)** yardımıyla;

Şekil 4.9 yardımıyla hesaplanan güvenlik katsayısı $GK = 0,45$ 'e karşı gelen TBM yararlanma oranının orta değeri $U \approx \%32$ elde edilir.

$$\text{AR} = 4,1 * 0,32 * 24 \approx 31,5 \text{ (m/gün)}$$

Buna göre TBM' nin günlük ilerleme miktarı 31,5 (m/gün)'dür.

Yukarıda ayrıntılı biçimde ele alınan sayısal örnek ve Şekil 4.8 yakından incelendiğinde şu pratik çıkarımlar söz konusudur:

- Kaya kütlelerinin çok düşük yerinde basınç dayanımlarına ($\sigma_{y,b} < 20 \text{ MPa}$) sahip olması durumunda belli bir aralık değeri için artan yerinde basınç dayanımlarında spesifik penetrasyonun arttığı görülmektedir. Bilindiği üzere kaya kütlelerinin yerinde basınç dayanımı sağlam kaya numunesinin laboratuvar basınç dayanımı ile formasyonun kaya kütle kalitesine başka bir deyimle RMR puanına bağlıdır. Sabit bir laboratuvar basınç dayanımında artan ayrışma sonucu düşen kaya kalite puanına bağlı olarak yerinde basınç dayanımı da azalacaktır. Çok düşük kaya kalite puanlarında ve buna bağlı çok düşük yerinde basınç dayanımlarında artan kaya kütle kalitesi belli bir aralık değeri için spesifik penetrasyonun artmasına yani arazi penetrasyon indeksinin azalmasına neden olmaktadır. Bilindiği üzere arazi penetrasyon indeksinin (FPI) azalması formasyonun kazılabilirliğinin artması anlamını taşımaktadır.
- Genel gidişat kaya kütlelerinin yerinde basınç dayanımı artıkça spesifik penetrasyon (SP) değerinin düştüğünü, diğer bir deyişle arazi penetrasyon indeksinin (FPI) arttığını işaret etmektedir. Verilen bir disk keski kuvveti için de artan kaya kütleleri yerinde basınç dayanımlarında penetrasyon miktarları doğal olarak azalacaktır. Bu da kaya kütlelerinin artan yerinde basınç dayanımları için formasyonun kazılabilirliğinin azalacağının göstergesidir.

Bruland (2000) 'de rapor edilen, normal disk kuvvetinin spesifik enerji üzerindeki etkisini ortaya koyan deneysel çalışmanın sonuçları arazi penetrasyon indeksi (FPI) açısından incelenmiş, ve Bruland 2000 'e ait deneysel sonuçlar Leitner ve Schneider (2003)'den değiştirilerek Çizelge 4.4 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.4 : Arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile spesifik enerji (SE) değişimi (Leitner ve Schneider, 2003'ten değiştirilerek).

Normal Disk Keski Kuvveti, (kN/disk keski)	Penetrasyon p (mm/dev)	Arazi Penetrasyon İndeksi (kN/disk/mm/dev)	Spesifik Enerji (MJ/m ³)
225,6	1,02	221	195,3
255,1	1,79	142,5	145
284,5	2,79	102	120
304,1	3,86	78,8	101,9

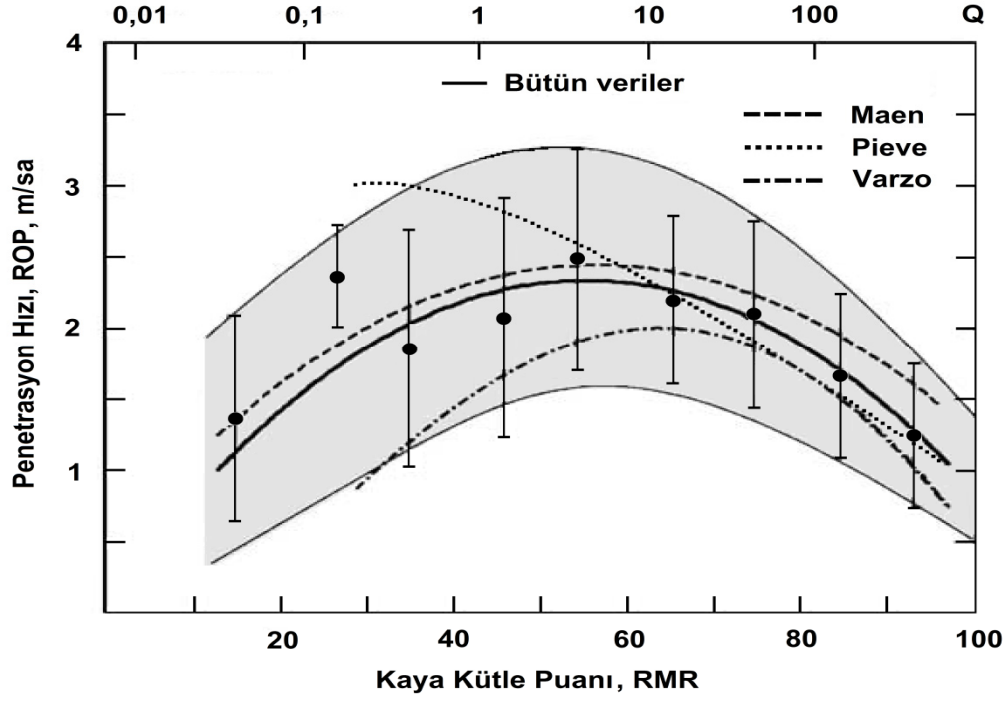
TBM çapı, D = 3,5 (m), RPM = 13,4 (dev/dk)
Disk Keski çapı d_d = 483 (mm) , Disk keski adeti = 25

Çizelge yakından incelendiğinde ulaşılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

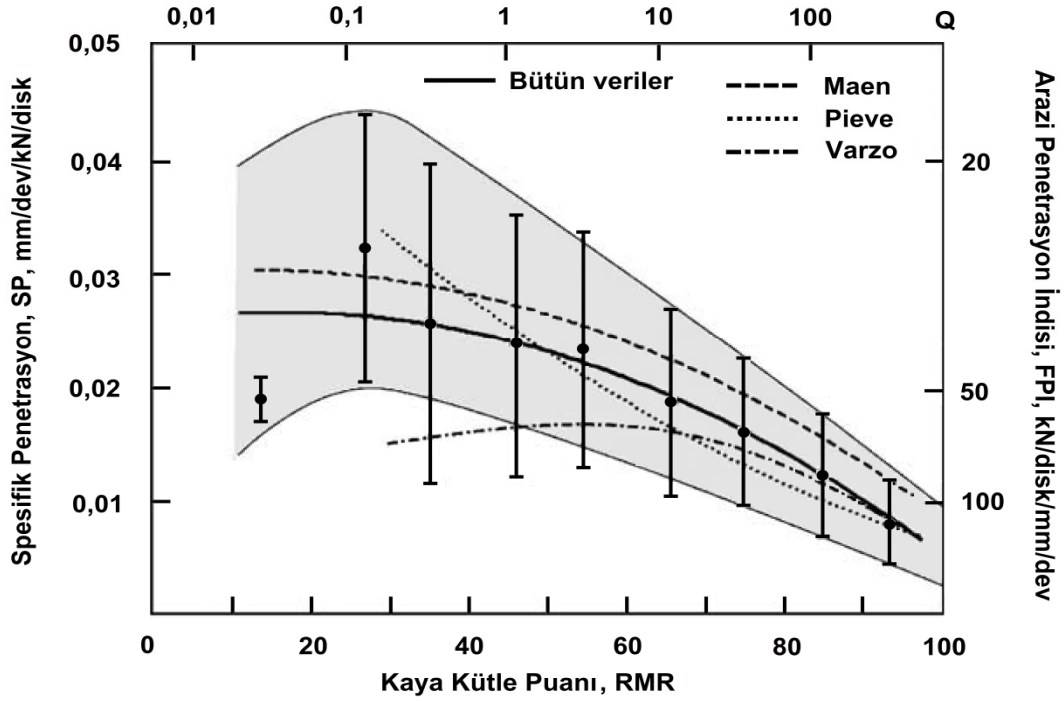
- Değişmeyen kaya türü ve makine parametreleri altında disk keski ile tünel kazı arınına aktarılan normal kuvvet arttıkça penetrasyon da artmaktadır. Bununla beraber artan penetrasyon ile birim kazı hacmine karşı gelen enerji miktarı belirgin ölçüde azalmaktadır. Başka anlatımla spesifik enerji değeri ne kadar küçükse tünel makinesinin ilerleme performansı o kadar büyüktür (Balcı ve Bilgin, 2005). Nitekim Anadoluray Kadıköy - Kartal Metro Projesinden elde edilen veriler ışığında hazırlanmış Şekil 4.17 de bu bulguyu desteklemektedir.

- Arazi penetrasyon indeksi (FPI) açısından bakıldığında azalan FPI ile spesifik enerji (SE) büyüklüğü azalmakta penetrasyon miktarı ise artmaktadır. Gerek FPI gerekse de SE'nin tanımları düşünüldüğünde artan veya azalan değerlerine karşılık birbirleri ile olan ilişkilerinin kazılabilirlik kavramı göz önüne alındığında doğru orantılı olması gerektiği kaçınılmazdır. Keza yapılan bu çalışma sonucu da bu ilişki doğrulanmaktadır.

Dört farklı TBM tünel projesinde (yaklaşık 14 km uzunluk) gerçekleştirilen yerinde ölçme ve değerlendirmeler sonucunda kaya kütle puanı (RMR) ile spesifik penetrasyon (SP) ve penetrasyon hızı (ROP) arasında Şekil 4.10 ve 4.11 da gösterilen ilişkiler ortaya çıkmıştır (Sapigni ve diğ., 2002).



Şekil 4.10 : Kaya kütle puanı, RMR, ile penetrasyon hızı, ROP, ilişkisi (Sapigni ve diğ., 2002).



Şekil 4.11 : Kaya kütle puanı (RMR) ile spesifik penetrasyon ilişkisi (Sapigni ve diğ., 2002).

Şekil 4.10 ve 4.11 yakından incelendiğinde elde edilen sonuçlar şöyle sıralanabilir:

- Spesifik penetrasyon değerini en fazla yapan bir kaya kütlesi puanı söz konusudur. 4 tünelin belirlediği alt ve üst sınır değerler dikkate alındığında yaklaşık $RMR = 30$ 'da ($Q = 0,1$) spesifik penetrasyon büyüklüğü maksimuma ulaşmaktadır. $30 < RMR < 95$ aralığında is sözü edilen büyüklük belirgin ölçüde azalmaktadır. Sabit laboratuvar basınç dayanıma sahip bir kaya kütlesinde artan ayrışma derecelerine bağlı olarak formasyonun düşen kaya kütle puanı neticesinde yerinde basınç dayanımı ciddi ölçüde azalmaktadır. Hatırlanacağı üzere Alber (2000) ve (2008) çalışmalarında belli bir kaya kütle yerinde basınç dayanımı aralığı için spesifik penetrasyon önce artmakta ardından tekrar azalmaktadır. Nitekim laboratuvar basıncı sabit kabul edildiğinde sözü edilen kavramda kaya kütle yerinde basınç dayanımı yerine kaya kütle puanı alacaktır. Sonuç olarak her iki çalışma da birbirini doğrular niteliktedir.

- Diğer bir dikkat çekici unsur penetrasyon hızının (ROP) artan kaya kütle puanı için spesifik penetrasyon, SP, azalırken artmasıdır. Ele alınan çalışmada penetrasyon hızı bakımından kaya kütle puanının en iyi aralık değeri $40 < RMR < 65$ aralığıdır (Şekil 4.10). Bu aralıkta TBM 'ler en yüksek penetrasyon hızlarına ulaşmışlardır. İlginçtir ki Grandori ve diğ. (1995b) çalışmasında ele alınan Salima ve Ginevra adlı iki adet çift kalkanlı TBM de benzer bir aralık değeri için en yüksek ortalama ilerleme miktarına ulaşmıştır. Grandori ve diğ. (1995b) çalışmasında çift kalkanlı TBM'ler için en yüksek ortalama ilerleme miktarlarına RMR III sınıfında yani $41 < RMR < 60$ aralığında ulaşılmıştır (Şekil 3.18).

Asıl dikkat çekici unsur aynı çalışmaya konu olan çift kalkanlı TBM'lerin RMR III sınıfı dışında kalan yani hem $RMR > 61$ ve hem de $RMR < 40$ durumları için ortalama ilerleme miktarlarının RMR III sınıfında elde edilen değerlerin altında kalmış olmasıdır. Kısaca her iki çalışmadan da hemen hemen aynı kaya kütle puanı aralıkları için daha yüksek penetrasyon hızları ve bunlara bağlı olarak ilerleme miktarları elde edilmiştir.

- $10 < RMR < 30$ aralığında spesifik penetrasyon değerlerindeki istatistiksel sapmaların büyüklüğü kaya kütlesinin kalitesi arttıkça ($RMR > 30$) belirgin bir şekilde azalmaktadır.

Fukui ve Okubo (2006) bağıntıları arazi penetrasyon indeksi cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

TBM'nin temel büyüklükleri olan itme ve tork değerlerini penetrasyon (p) ve tek eksenli basınç dayanımı (σ_{lab}) cinsinden;

$$\sum F_N = c_1 * \sigma_{lab} * p \quad (4.37a)$$

$$\sum T = c_2 * \sigma_{lab} * p^{1,5} \quad (4.37b)$$

(4.37a) ve (4.37b) bağıntılarıyla tanımlanmaktadır (Fukui ve Okubo, 2006).

Burada; $\sum F_N$ = Kesici kafadaki N adet disk keski vasıtasıyla arına aktarılan toplam itme kuvveti (kN) ; T = Kesici kafanın tork değeri, (kNm); p = Bir devirdeki kesme derinliği (mm/dev); σ_{lab} = Tek eksenli basınç dayanımı (MPa) ; c_1 ve c_2 = sırasıyla itme ve torka ait sabiteler.

Aşağıdaki regresyon ifadelerinden sabite değerleri hesaplanır.

$$c_1 = N * (4,37. d_d - 1,43) , 0,35 (m) < d_d < 0,475 (m) \quad (4.38a)$$

$$c_2 = N * (2,19 - 0,1. D) * (4,37. d - 1,43) , 2 (m) < D < 8,5 (m) \quad (4.38b)$$

Burada; N = Toplam disk keski sayısı; d_d ve D = Sırasıyla disk keski çapı ve tünel kazı çapı, (m).

Torkun itme kuvvetine oranı TBM'nin karakteristik büyüklüğü olup (4.39) yardımı

$$\frac{T}{\sum F_N} = \frac{c_2}{c_1} * p^{0,5} = (2,19 - 0,1. D) * p^{0,5} , (m) \quad (4.39)$$

ile yazılabilir ve birimi (m)'dir (Fukui ve Okubo, 2006). Görüldüğü üzere oran sadece TBM çapı ve penetrasyon değerlerine bağlıdır.

Exadaktylos ve diğ. (2008) çalışmasında yukarıda verilen oran iki farklı TBM tünel projesinde incelenmiş ve sırasıyla (4.40a) ve (4.40b) olarak ifade edilmiştir.

Hong Kong ø 8,75 (m) KCRC Batı Demiryolu Projesinde (sert granodiorit / granit):

$$\frac{T}{\sum F_N} = 0,06 * p^{0,5} ; 4 (mm/dev) < p < 18 (mm/dev) \quad (4.40a)$$

Barcelona Metro Projesinde ø11,95 (m) (genellikle granodiorit):

$$\frac{T}{\sum F_N} = 0,0541 * p^{0,662} ; 2,5 (mm/dev) < p < 17 (mm/dev) \quad (4.40b)$$

Yukarıdaki ifadeler “açık mod” (ayna basınçsız) olarak çalışan TBM'lere ait kazı çalışmaları sırasında elde edilmiş verilerden çıkartılmıştır.

Fukui ve Okubo (2006) ifadeleri aşağıdaki işlemler sonucunda arazi penetrasyon indeksi (FPI) cinsinden yazılabilir :

$$F_N = \frac{\sum F_N}{N} = (4,37 \cdot d_d - 1,43) * \sigma_{lab} * p, \left(\frac{kN}{\text{disk keski}} \right) \quad (4.41a)$$

$$FPI = \frac{F_N}{p} \approx 0,46 * \sigma_{lab}, \text{ (kN/disk keski/mm/dev) } \quad (4.41b)$$

Yukarıdaki ifadeler $d_d = 0,432$ (m) (17" keski çapı) için çıkartılmıştır.

Buradan arazi penetrasyon indeksinin sadece kazı yapılan kaya biriminin basınç dayanımına bağlı olduğu görülmektedir. Nitekim Hassanpour ve diğ. (2009) çalışmasında;

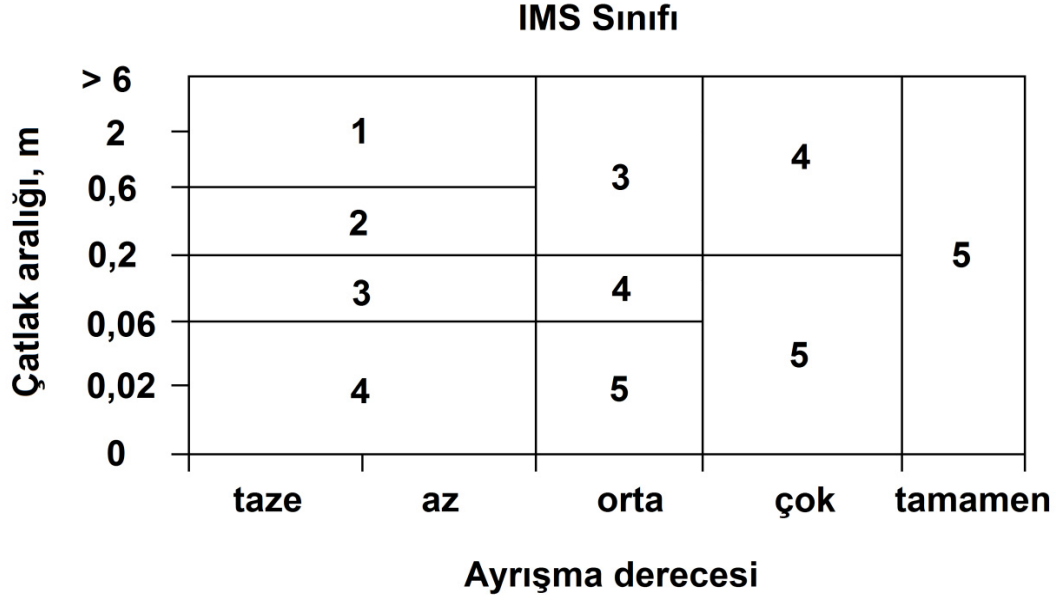
$$FPI = 11,990 * \sigma_{y,b}^{0,118}, \text{ (r = 0,70)} \quad (4.42)$$

çıkartılan (4.42) regresyon ifadesi yukarıda verilen (4.41b) çıkarımını desteklemektedir. İncelenen konunun önemi göz önüne alındığında farklı tünel projelerinden elde edilecek bilgiler ışığında gerçekleştirilecek kapsamlı yerinde çalışmalarla $FPI = f(p, \sigma_{lab})$ ifadesi daha net ortaya konabilir.

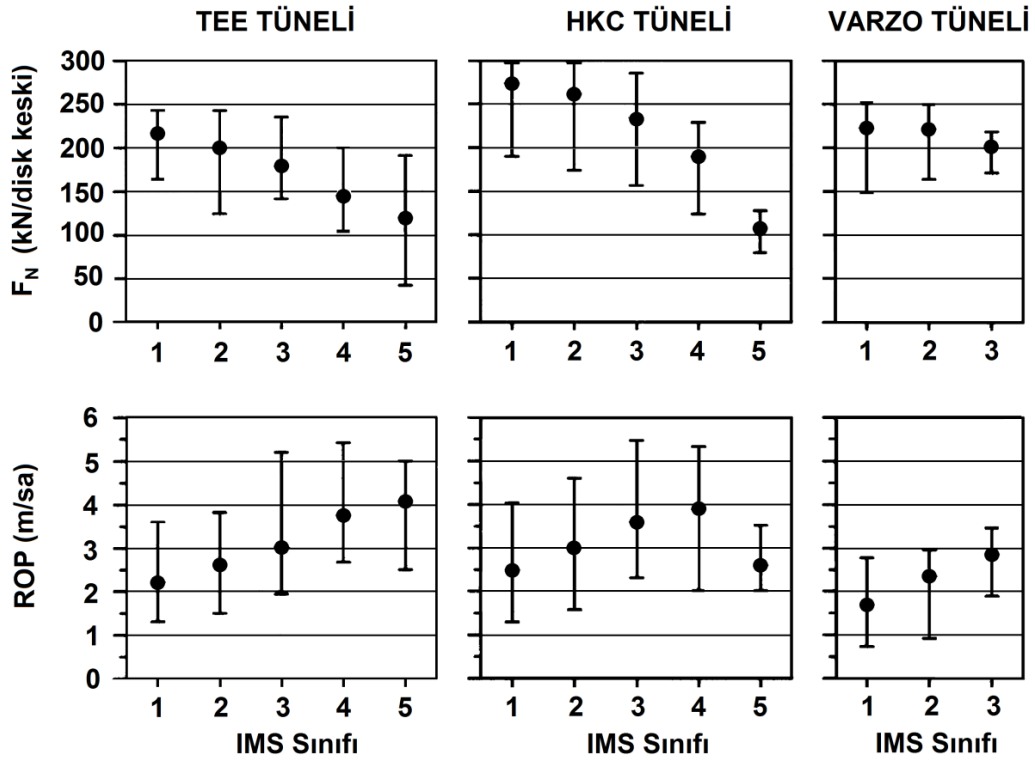
Ribacchi ve Fazio (2005) çalışmasında hem Varzo tüneline kullanılan TBM'e hem de Hong Kong'da granit kaya kütlelerinde kullanılan 2 adet TBM'e olmak üzere toplamda 3 adet TBM'e ait normal disk kuvvetinin ve penetrasyon miktarlarının IMS sınıflama sistemiyle değişimleri araştırılmıştır. Elde edilen değişim grafiklerinin karşılaştırması Şekil 4.12b'de verilmiştir. Şekil 4.12a'da ise adı geçen IMS sınıflama sisteminin çatlak aralığı ve ayrışma derecesine göre değişimi verilmektedir.

Şekil 4.12b'nin incelenmesinden çıkan pratik sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Kaya kütlelerinin IMS sınıflama sisteminde 1'den 5'e doğru değerler alması başka bir deyişle azalan kaya kütle kalitelerinde bir diske etkiyen normal kuvvetin (F_N) büyüklüğü azalmaktadır.
- Penetrasyon hızı (ROP) açısından incelendiğinde, artan IMS sınıf numarası ile TBM'nin penetrasyon hızı da artmaktadır (HKC kodu ile belirtilen tünelde bu artış 4'e kadar devam etmekte, 5.sınıfta ise azalmaktadır).
- Azalan kaya kütle kalitelerinde gerek penetrasyon miktarlarının artması gerekse de uygulanan normal disk kuvvetlerinin azalması sonucu FPI değerleri yüksek bir oranla azalmaktadır. Bir başka deyişle kaya kütlelerinin kazılabilirliği artmaktadır.



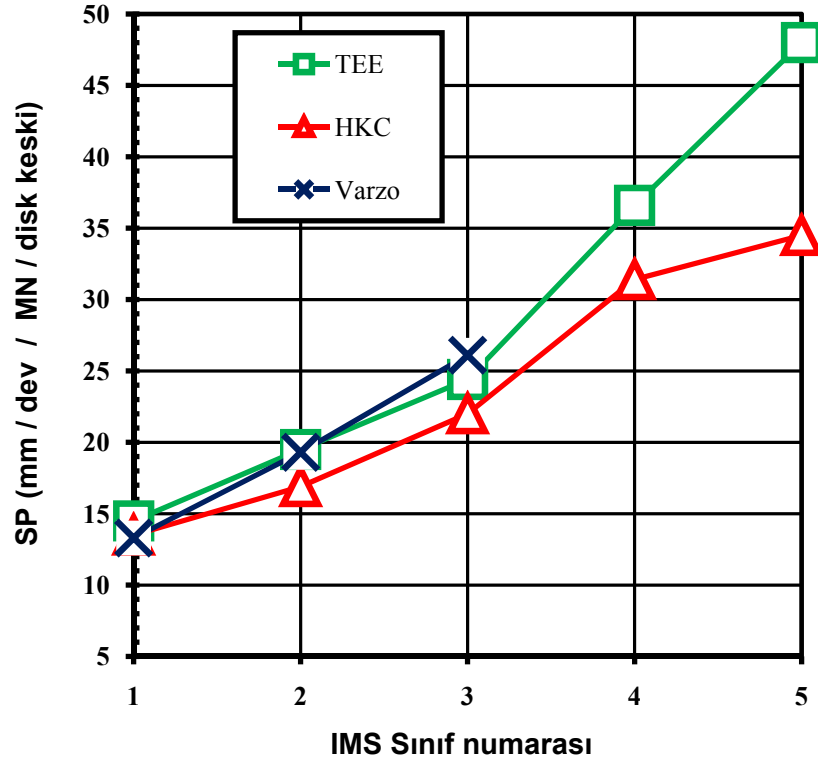
(a)



(b)

Şekil 4.12 : (a) IMS sınıflama sistemi. (b) IMS sınıflama sistemi ile itme kuvveti ve penetrasyon hızı ilişkisi (Ribacchi ve Fazio, 2005).

Şekil 4.12b yardımıyla normal disk keski kuvvetinin (F_N) ve penetrasyon hızının (ROP) orta değerleri alınarak adı geçen tüneller bazında spesifik penetrasyon indeksi (SP) ile IMS sınıf numarası değişimleri çizilmiştir (Şekil 4.13). Değişimlerin çiziminde kullanılan ilgili büyüklükler topluca Çizelge 4.5’de belirtilmiştir.



Şekil 4.13 : IMS sınıf numarası ile spesifik penetrasyon (SP) ilişkisi.

Şekilden izlenebileceği gibi artan ^(*)IMS ile spesifik penetrasyon artmakta, başka ifade ile arazi penetrasyon indeksi azalmaktadır. TEE ve Varzo tünellerinin farklı kaya birimlerinde açılmasına karşın $SP = f(IMS)$ değişimleri çakışmaktadır. HKC kodu ile belirtilen tünelde ise TBM’nin $SP = f(IMS)$ eğrisi diğer değişimlerin biraz altında yer almaktadır. Bu bulgu anılan tünelde çalışan TBM’nin disk çapının 482 (mm) olması, dolayısıyla aynı penetrasyon değerleri için daha yüksek normal disk kuvvetine maruz kalması ile ilintilidir.

^(*)IMS (Birleşik Kütle Sistemi) sınıflama sisteminde kaya kütlesi iki temel jeolojik parametre açısından değerlendirilir: çatlakların ortalama aralığı ve ayrışma-bozulma-derecesi. Eğer ortalama çatlak aralığı $> 0,6$ (m) ve hiç ayrışma yoksa ,bu kaya kütlesi 1 sınıfı ile ifade edilir. Azalan çatlak aralığı ve artan ayrışma derecesiyle kaya kütlesi bu sistemde 1’den büyük değerler alır.

Çizelge 4.5 : Farklı kaya birimlerinde çalıştırılan TBM’lerde spesifik penetrasyon derecesi (Ribacchi ve Fazio, 2005).

Tünel	Ortalama Normal Kuvvet (MN/disk kesici) IMS sınıfı					Penetrasyon Hızı, ROP (m/sa) IMS sınıfı					Ortalama Penetrasyon, p (mm/dev) IMS sınıfı					Ortalama SP (mm/dev/MN/disk keski) IMS sınıfı				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
TEE	0,220	0,20	0,180	0,150	0,125	2,2	2,65	3	3,8	4,1	3,2	3,9	4,4	5,5	6,0	14,5	19,5	24,4	36,6	48,0
HKC	0,275	0,26	0,24	0,185	0,110	2,5	3,0	3,6	4,0	2,6	3,7	4,4	5,3	5,8	3,8	13,5	16,9	22	31,4	34,5
VARZO	0,226	0,223	0,203	-	-	1,6	2,3	2,85	-	-	3,0	4,3	5,3	-	-	13,3	19,3	26,1	-	-

Kabuller : Ortalama devir sayıları ile ilgili herhangi bir bilgi verilmediğinden TBM'lerin fabrikasyon değerleri baz alınmıştır. Bu bağlamda TEE ve HKC devir sayıları sırasıyla 11,3 ve 11,5 (dev/dk) olduğundan bu iki tünel projesi için tek değer olarak 11,4 (dev/dk) alınmıştır. Varzo için fabrikasyon değeri 8,9 (dev/dk) aynen kullanılmıştır.

Queens^(*) ve KCRC^(**) tünel vakalarının birlikte kullanıldığı çoklu regresyon analizinin sonucunda arazi penetrasyon indeksi (FPI) ve spesifik enerji (SE) kestirimi için (4.43) ve (4.44) ifadeleri belirlenmiştir (Ramazanzadeh, 2005).

$$FPI = \exp[0,0034 * S + 0,00602 * \alpha + 0,259 * \sigma_{\text{ç}} + 0,9] , \left(\frac{\text{kN/disk keski}}{\text{mm/dev}} \right) \quad (4.43)$$

Veri sayısı, n = 310 ; korelasyon katsayısı, r = 0,806.

$$SE = \exp[0,00205 * S + 0,00297 * \alpha + 0,068 * \sigma_{\text{ç}} + 2,975] , (\text{MJ/m}^3) \quad (4.44)$$

Veri sayısı, n = 310 ; korelasyon katsayısı, r = 0,663

Burada; S = çatlak aralığı , (cm); α = çatlak düzleminin tünel eksenine yaptığı açı , (derece) ; $\sigma_{\text{ç}}$ = sağlam kaya numunesinin çekme dayanımı , (MPa) 'dır. Yukarıdaki ifadelerin " $\alpha < 45^\circ$ " durumu için verilmiş olduğu unutulmamalıdır.

Verilen ampirik bağıntıların pratik mühendislik açısından bir sayısal uygulaması aşağıda yapılacaktır.

Sayısal uygulama :

Ortalama basınç dayanımı, $\sigma_{\text{lab}} = 160$ (MPa) olan granitte 7 (m) çaplı TBM kullanılacaktır. Normal kuvvet 240 (kN/disk keski) mertebesinde beklenmektedir. 40 (cm) çatlak aralığı ve 25° açı için TBM'nin penetrasyon hızı, ROP, ve ilerleme miktarını kestiriniz (kesici kafanın dakikadaki devir sayısı 6 ve yararlanma oranı (U) % 40 ve çalışma saati 24 (sa) olarak kabul edilecektir.

Çözüm:

- Çekme dayanımının kestirilmesi (3.4) yardımıyla :

$$\sigma_{\text{ç}} = 0,435 * p_a * \left(\frac{\sigma_{\text{lab}}}{p_a} \right)^{0,74} = 0,435 * 0,1 * \left(\frac{160}{0,1} \right)^{0,74} = 10,22 \text{ (MPa)}$$

(*) TBM çapı 7,05 (m) , disk keski sayısı N = 50 , disk çapı d = 483 (mm) (19") , maksimum normal kuvvet $F_N = 300$ (kN), maksimum kesici kafa itme kuvveti 1600 (t) , genel kaya cinsi granit, diyorit, gnays olup ortalama tek eksenli basınç dayanımı $\sigma_{\text{lab}} = 150$ (MPa) , değişkenlik katsayısı % 14.6 'dır.

(**) TBM çapı 8,75 (m) , disk kesici sayısı N = 61 , disk çapı 483 (mm) (19") , itme kuvveti 6600 (t), genel kaya birimi granodiorit, granit, ayrılmış granit ve karışık zonlar olup tek eksenli basınç dayanımının, σ_{lab} , değişim aralığı (60 MPa – 180 MPa) 'dır. Çatlak aralığı ve açısının değişim aralığı sırasıyla (20 - 180 cm) ve (5° - 65°)'dir. Kaya kütle puanının değişim aralığı ise $40 < \text{RMR} < 90$ olarak belirlenmiştir.

- Arazi penetrasyon indeksinin hesaplanması **(4.43)** yardımıyla :

$$FPI = \exp[0,0034 * 40 + 0,00602 * 25 + 0,259 * 10,22 + 0,9] = 46,22 \left(\frac{\text{kN/disk}}{\text{mm/dev}} \right)$$

- Kesici kafanın penetrasyon miktarı (p) **(4.1)** yardımıyla :

Genel tanımdan hareketle;

$$p = \frac{F_N}{FPI} = \frac{240}{46,22} \approx 5,2 \text{ (mm/dev)}$$

- Penetrasyon hızı (ROP) **(3.20a)** yardımıyla :

$$ROP = p * RPM * 0,06 = 0,06 * 5,2 * 6 = 1,87 \text{ (m/sa)}$$

- Günlük ilerleme miktarı (AR) **(3.20b)** yardımıyla:

$$AR = ROP * U = 1,87 * 0,4 * 24 \approx 18 \text{ (m/gün)}$$

Ramazanzadeh (2005) çalışmasındaki formüllerin farklı girdi değerleri için çalıştırıldığında elde edilen izlenimler şu şekilde sıralanabilir:

- " α " açısıyla arazi penetrasyon indeksi beklenen değişimi sergileyememektedir. Bunun olası sebebi denklemin literatürde benimsenen en ideal koşulların ($45^\circ < \alpha < 60^\circ$) dışında kalan " $\alpha < 45^\circ$ " şartı için türetilmiş olmasıdır.
- Arazi penetrasyon indeksinin değişen çatlak aralıklarına karşı aldığı değişimler de " α " açısında olduğu gibi pek tatmin edici değildir. Nitekim ele alınan örnekte verilen çatlak aralığı değeri dörtte bir oranına düşürülmesine karşın ($S = 10 \text{ cm}$) arazi penetrasyon indeksi (FPI) sadece %10'luk bir azalma eğilimi göstermiştir.
- Yapılan çalışmada FPI üzerinde en etkili değişkenin kayanın çekme dayanımı olduğu izlenmektedir, ve değişen çekme dayanımlarına FPI'nin tepkisi çok yüksek orandadır. Şöyle ki verilen örnekte diğer değişkenler sabit kalmak şartıyla çekme dayanımı %30 azaltmak suretiyle ($\sigma_c = 7,15 \text{ MPa}$) arazi penetrasyon indeksinde sağlanan azalma % 55 ($FPI = 20,9 \text{ kN/disk/mm/dev}$) seviyelerinde olmaktadır.

Hassanpour ve diğ. (2009) çalışmasında disk keski çapı 432 (mm), keski aralığı 90 (mm) ve toplam disk keski sayısı 31 olan $\varnothing 4,65 \text{ (m)}$ kalkanlı TBM'nin kazı yaptığı baraj suyu temin tüneline gerçekleştirilen yerinde çalışmalar sonucunda arazi penetrasyon indeksi ile kaya kütle parametreleri içerisinde pratik mühendislik kestirimleri bakımından anlamlı regresyon bağıntıları çıkarılmıştır.

Tünelde geçilen kaya birimleri tuf, kumtaşı ve şeyl, siltaşı olup tek eksenli basınç ve çekme dayanımları sırasıyla (30 - 160 MPa) ve (5 - 12 MPa) aralığında kalmıştır. Kaya kalite göstergesi, RQD; çatlak aralığı, S ve jeolojik dayanım indeksi, GSI(değişim) aralıkları ise sırasıyla (< % 25 - 100) , (< 0,1 - 0,8 m) ve (<20 - 85) olmuştur (Hassanpour ve diğ. 2009).

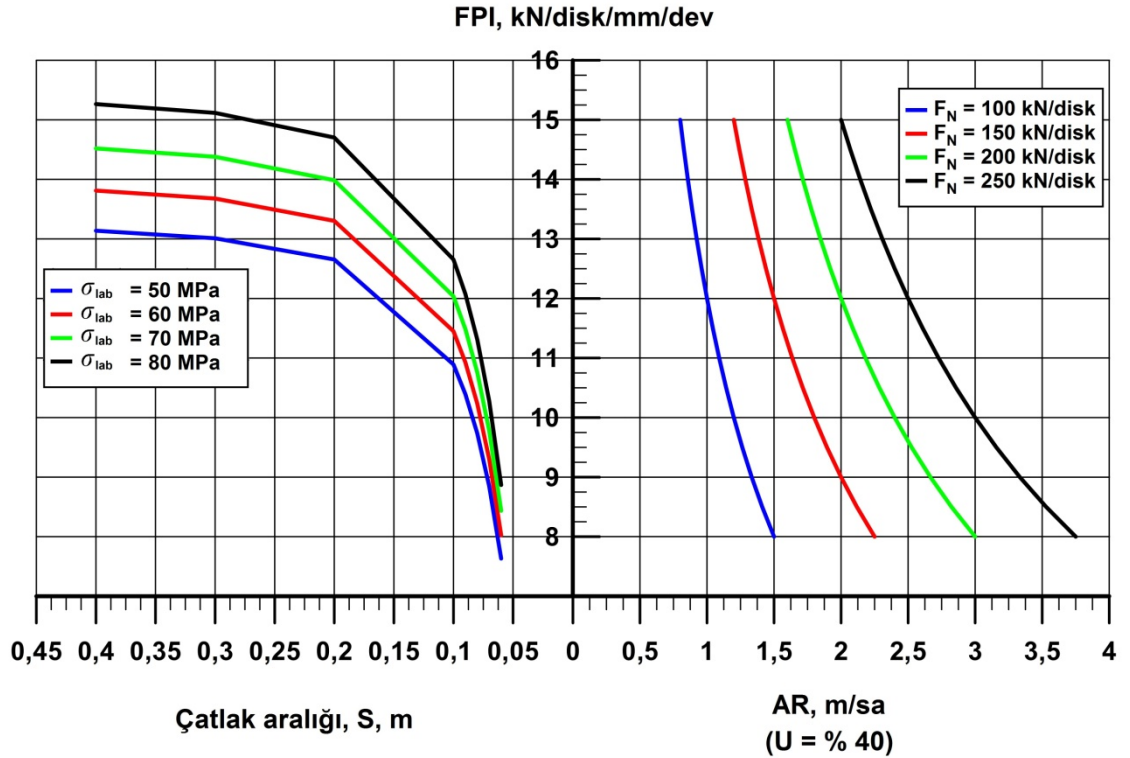
Anılan çalışma kapsamında çıkartılan regresyon bağıntısı (4.45) 'de belirtilmiştir:

$$FPI = \exp[0,005 * \sigma_{lab} - 0,002 * S^{-2} + 2,338] , r = 0,764 \quad (4.45)$$

Burada;

FP I= Arazi penetrasyon indeksi, (kN/ disk keski/mm/dev); σ_{lab} = Sağlam numunenin tek eksenli basınç dayanımı, (MPa); S = ortalama çatlak aralığı, (m); r = Korelasyon katsayısıdır.

Verilen devir sayısı (RPM = 5 devir/dk) ve yararlanma oranı, U = 40 için çeşitli değişkenler altında ilerleme miktarının değişimi Hassanpour ve diğ. (2009) çalışmasında verilen arazi penetrasyon indeksi yaklaşımı kullanılarak Şekil 4.14'de çizilmiştir.



Şekil 4.14 : Çatlak aralığı (S) ile arazi penetrasyon indeksi (FPI) ve buna bağlı olarak ilerleme miktarının kestirilmesi.

Şekil 4.14'den izlenebileceği üzere değişmeyen normal disk kuvvetinde arazi penetrasyon indeksi arttıkça TBM'nin ilerleme miktarı azalmaktadır. Başka bir anlatımla formasyonun kazılabilirliği zorlaştıkça TBM performansı azalmaktadır. Sabit FPI değerinde ise diğer kelimelerle verilen bir kaya kütlesi koşulunda artan normal disk kuvvet ile TBM'nin ilerleme miktarı da artmaktadır.

Anadoluray Kadıköy-Kartal Metro projesi formasyon verileri kullanıldığında kabul edilen çatlak aralığının $S = 10 - 20$ (cm) olması durumunda ($\sigma_{lab} = 65,6$ MPa) arazi penetrasyon indeksinin, $FPI = 11,5 - 13,5$ arasında ortalama $12,5$ (kN/disk/mm/dev) olması çok dikkat çekicidir. Nitekim çok geniş bir veri girdisine sahip olan Balcı (2009) çalışmasında da arazi penetrasyon değerinin $12,7$ (kN/disk/mm/dev) olduğu verilmiştir (Çizelge 4.6). Burada hesap yoluyla elde edilen değer ölçülen değerle tam anlamıyla örtüştüğü gözlenmektedir.

Aynı değerlendirmenin saatlik ilerleme miktarları ile yapılması durumunda ise Anadoluray Kadıköy Kartal Metro projesinde yararlanma oranı, $U = \%40$ gibi yüksek bir değer kabul edildiğinde ölçülen saatlik ilerleme miktarı, $AR_{sa} = 0,86$ (m/sa) olmaktadır ($p = 15,5$ (mm/dev); $RPM = 2,3$ (dev/dk); Çizelge 4.6). Ancak Şekil 4.14'den $F_N \approx 150$ (kN) için saatlik ilerleme miktarları hesap edildiğinde $S = 10$ (cm) ve $S = 20$ (cm) çatlak aralıklarına karşılık gelen AR_{sa} değerlerinin sırasıyla $1,5$ (m/sa) - $1,3$ (m/sa) arasında değiştiği görülmektedir. İlerleme miktarları üzerinden yapılan bu yaklaşımda hesap edilen AR_{sa} 'nın ölçülen AR_{sa} 'ye oranı $1,6$ gibi çok yüksek bir değer almaktadır.

Keza penetrasyon miktarlarından yapılacak yaklaşımla da benzer yüksek oranda bir sapma değeri elde edilmektedir ($p_{hesap} = 11,5$ mm/dev ; $p_{ölçülen} = 15,5$ mm/dev). Gerek penetrasyon miktarları gerekse de direkt saatlik ilerleme miktarları üzerinden yapılacak yaklaşımların kullanılması ortalama günlük ilerleme miktarlarının hesaplanmasında çok büyük hatalar elde edilmesine neden olabilmektedir.

Buradan da bir kez daha performans tahmin yöntemlerinde arazi penetrasyon indeksinin kullanılması ile çok daha anlamlı ve doğru yaklaşımların elde edildiği görülmektedir.

Aynı çalışma kapsamında arazi penetrasyon indeksi (FPI) Bilgin ve diğ. (1997) çalışmasında geliştirilen kaya kütle kazılabilirlik indeksi RMCI cinsinden de ifade edilmiştir (Hassanpour ve diğ. 2009).

FPI ve RMCI kavramlarının birlikte kullanılarak bir TBM'nin ilerleme miktarının nasıl hesaplanacağı (4.46a), (4.46b) ve (4.46c) yardımıyla verilmektedir.

$$FPI = 0,080 * RMCI + 10,412 \quad , r = 0,748 \quad (4.46a)$$

$$RMCI = \sigma_{lab} * \left(\frac{RQD}{100} \right)^{2/3} \approx 0,046 * RQD^{0,667} \quad (4.46b)$$

$$FPI = 3,84 * 10^{-3} * \sigma_{lab} * RQD^{0,667} + 10,412, \quad \left(\frac{kN/disk}{mm/dev} \right) \quad (4.46c)$$

Penetrasyon miktarı (4.47) :

$$p = \frac{F_N}{FPI} = \frac{F_N}{3,84 * 10^{-3} * \sigma_{lab} * RQD^{0,667} + 10,412} \quad , \quad (mm/dev) \quad (4.47)$$

Penetrasyon hızı (4.48) :

$$ROP = 0,06 * \frac{F_N * RPM}{3,84 * 10^{-3} * \sigma_{lab} * RQD^{0,667} + 10,412} \quad , \quad (m/sa) \quad (4.48)$$

Burada açıklanmamış terimlerin anlamları şunlardır:

σ_{lab} = Sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç dayanımı, (MPa); RQD = Kaya kalite göstergesi, (%) , RPM = kafanın bir dakikadaki dönüşü (dev/dk). U = Verilen bir zaman diliminde TBM'nin fiilen kazıda bulunma oranı.

Hassanpour (2009) çalışmasında (*)Ribacchi ve Fazio (2005) 'de önerilen (Spesifik penetrasyon indeksi (SP) kaya kütlelerinin tek eksenli dayanımı ($\sigma_{y,b}$) bağıntısına benzer bir regresyon modeli çıkarılmıştır:

$$SP = \frac{1}{FPI} = 83,40 * \sigma_{y,b}^{-0,118} \quad , \quad (mm/dev/MN/disk \text{ keski}) \quad (4.49)$$

$r = 0,703$, r = Korelasyon katsayısı , $\sigma_{y,b}$ = yerinde basınç dayanımı (MPa)

(*) Gnays içinde açılmış Varzo tünelinin (ø3,84 m) TBM performansının konu edildiği Ribacchi ve Fazio (2005) kaynağında spesifik penetrasyon (SP) ile kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı ($\sigma_{y,b}$) arasında;

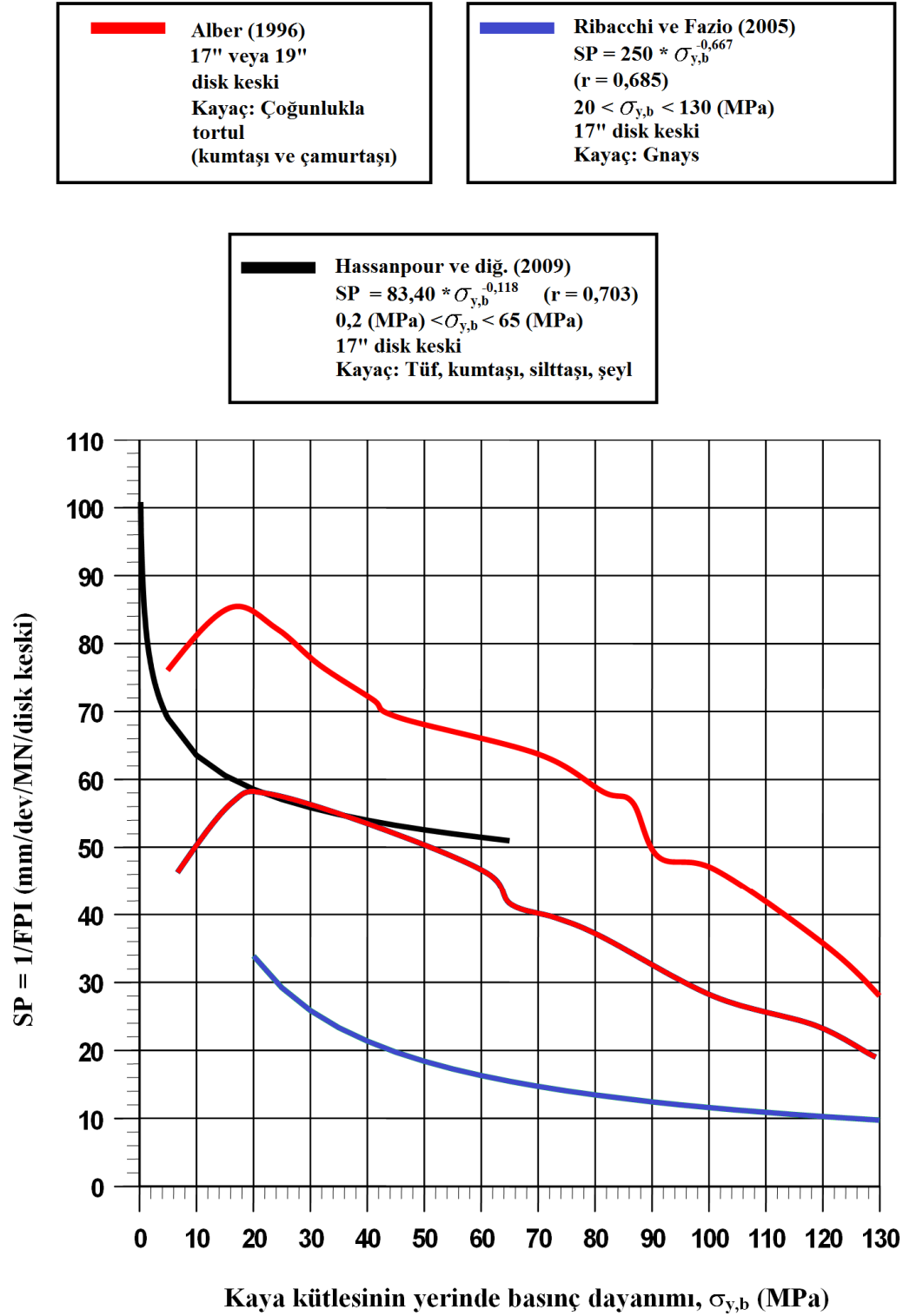
$$SP = 250 * \sigma_{y,b}^{-0,667} \quad , \quad (20 \text{ MPa} < \sigma_{y,b} < 130 \text{ MPa}) \quad (4.50)$$

(4.50) regresyon bağıntısı çıkarılmıştır (korelasyon katsayısı $r = 0,685$). Aynı ifade

$$SP = \frac{1}{FPI} \quad \text{tanımına göre,} \quad FPI = 4 * 10^{-3} * \sigma_{y,b}^{0,667} \quad (4.51)$$

(4.51) olarak yazılabilir. Açıktır ki TBM'nin performansını belirleyen arazi penetrasyon indeksi (FPI) kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının üstel bir fonksiyonudur.

Farklı araştırmacılar tarafından verilen $SP = f(\sigma_{y,b})$ değişimlerini karşılaştırmak amacıyla Şekil 4.15 çizilmiştir.



Şekil 4.15 : Farklı çalışmalardan derlenen kaya kütesinin yerinde basınç dayanımı ile SP arasındaki ilinti (Ribacchi ve Fazio, 2005'ten değiştirilerek).

Şekil 4.15 yakından incelendiğinde ulaşılan sonuçlar şunlardır:

- Spesifik penetrasyon indeksi (arazi penetrasyon indeksinin tersi) ile kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı arasında

$$SP = A * \sigma_{y,b}^B$$

türünde anlamlı bir istatistiksel ilişki vardır. Regresyon B sabitesi < 0 'dır (negatif).

- İlginçtir ki Hassanpour ve diğ. (2009) ifadesi $20 \text{ (MPa)} < \sigma_{y,b} < 55 \text{ (MPa)}$ aralığında Alber'in orta eğrisiyle dikkat çekici bir uyum sergilemektedir. Ayrıca; Alber (1996), (2008) $SP = f(\sigma_{y,b})$ eğrilerinde gözlenen belirgin bir maksimum nokta Hassanpour ve diğ. (2009) modelinde tanımlanmıştır.

- Bir diğer dikkat çekici unsur gnaysda açılan tünelden elde edilen spesifik penetrasyonun kıltaşı ve çamurtaşında açılan tünel projesinden elde edilen spesifik penetrasyona oranla hayli düşük olmasıdır. Bir başka deyişle sabit bir normal kuvvet altında gnaysda elde edilebilecek penetrasyon miktarları kıltaşı ve çamurtaşından elde edilebilecek penetrasyon miktarlarına nazaran daha az kalmaktadır. Bu da verilen yaklaşımların doğrulunu ispatlar niteliktedir. Nitekim hatırlanacağı üzere Rostami ve diğ. (1996) ve diğer birçok araştırmacının çalışmalarında kayanın artan laboratuvar basınçlarında penetrasyonun sabit kalabilmesi için normal kuvvetin artırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Diğer bir anlatımla uygulanan sabit bir normal kuvvet altında artan laboratuvar basınçları sonucu penetrasyon miktarları azalmaktadır.

- (*)Balcı (2009) çalışması göz önüne alındığında değişen arazi penetrasyon indekslerinin hangi formasyon şartları altında hangi değerleri aldığı net bir şekilde bilinmemektedir. Ancak kestirimci bir yaklaşımla $RMR = 40 - 60$ aralığı için

$$RMR_{TBM} = 0,84 * RMR + 21; RMR_{TBM} = 54,6 - 71,4$$

$$\sigma_{y,b} = \sigma_{lab} * s^{0,5} ; s = \exp\left(\frac{RMR_{TBM} - 100}{9}\right) ; \sigma_{lab} = 65,6 \text{ (MPa)}$$

(4.34) ve **(4.35)** bağıntıları çalıştırıldığında kaya kütlelerinin yerinde basınç dayanımı, $\sigma_{y,b} = 5,4 - 13,4 \text{ (MPa)}$ ortalama $\sigma_{y,b} = 9,4 \text{ (MPa)}$ elde edilir.

(*)Balcı (2009) çalışmasında ele alınan TBM verileri açık mod (pasa basıncının uygulanmadığı) tünel kazıları esnasında alınmış olup geçilen formasyona ait ortalama jeolojik dayanım indeksi, $GSI = 41$ elde edilmiştir (Yüksel, 2005'ten alıntılan Balcı ve diğ., 2009). Geçilen formasyona ait ortalama kaya kütle puanı ise ($GSI + 5 = RMR$), $RMR = 46$ değerini almaktadır.

Tortul bir formasyon olması ve hemen hemen benzer laboratuvar basınç dayanımlarına sahip olması nedeniyle Alber (1996) eğrileri kullanıldığında $SP = 50 - 80$ (mm/dev/MN/disk) ortalama ise $SP = 66$ (mm/dev/MN/disk) kestirilebilir.

Keza Hassanpour ve diğ. (2009) çalışmasında da ele alınan formasyonun tortul kayalar ağırlıklı olması nedeniyle spesifik penetrasyonun kestirilmesinde kullanılması durumunda $SP = 64$ (mm/dev/MN/disk) değeri elde edilmektedir. Her iki yaklaşımdan da görülebileceği üzere hemen hemen aynı spesifik penetrasyon değerine ulaşılmış olup, ortalama $SP = 65$ (mm/dev/MN/disk) elde edilmektedir. Balcı (2009) çalışmasında spesifik penetrasyon hakkında bilgi verilmese de SP'nin tanımından yola çıkarak ($SP = 1/FPI$) arazi penetrasyon indeksi, $FPI = 12,7$ (kN/disk/mm/dev) yardımıyla $SP = 78,7$ (mm/dev/MN/disk) bulunabilir (Çizelge 4.6).

Buradan hareketle sapma miktarı (hata payı);

$$\Delta = \left| \frac{SP_{\text{hesap}} - SP_{\text{ölçülen}}}{SP_{\text{ölçülen}}} \right| * 100 = \%17,4$$

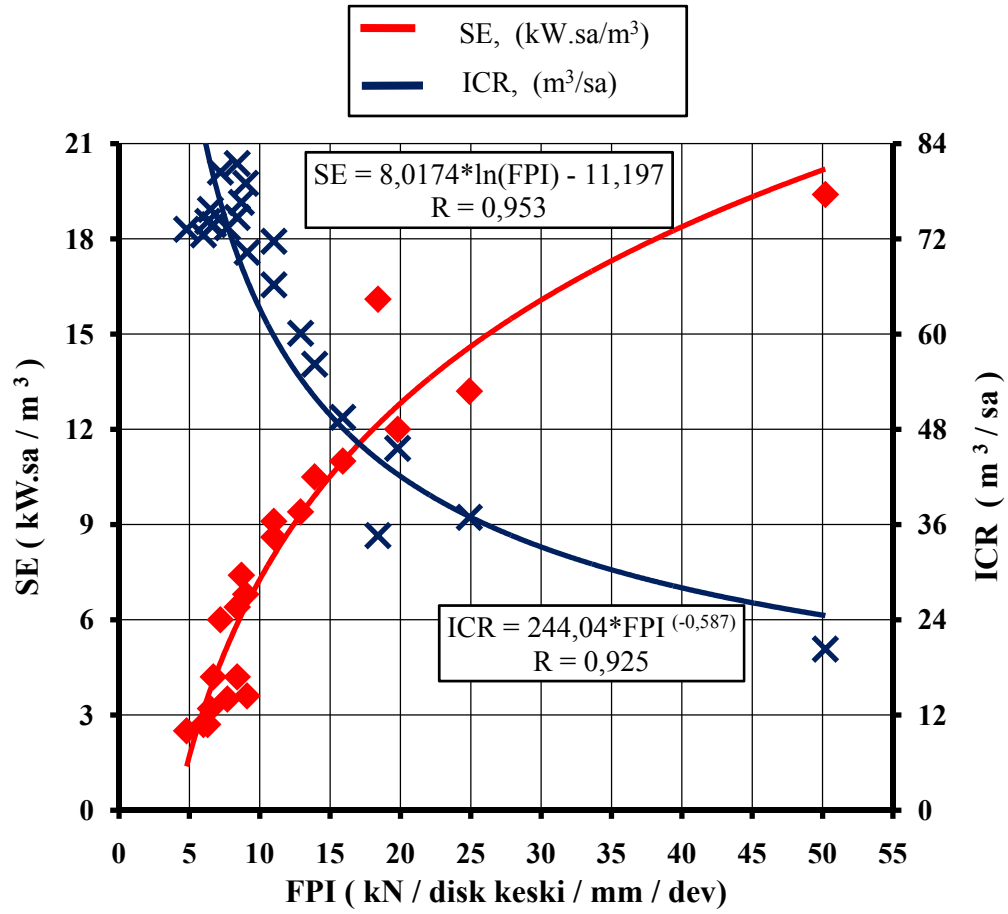
%17 seviyesindedir. Bu miktarda bir sapma bu tip çok değişken bir formasyon ve ele alınan çalışmada çok geniş bir veri girdisi kullanılması ile makinenin kazı esnasında kesici kafa tasarımının değişmesi nedenleriyle kabul edilebilir bir değerdir.

Ayrıca formasyonun belli kısımlarında birçok göçük yaşandığı diğer bir anlatımla formasyonun arın denge durumunu kaybettiği ve yer yer diyabaz daykları geçildiği unutulmamalıdır (Bilgin ve diğ. 2009b). Bu tip süreksizliklerde gerek penetrasyon değerlerinde gerekse de itme kuvvetlerinde yaşanan ters ilişkiler nedeniyle arazi penetrasyon değerleri de yanıltıcı olabilmektedir. Nitekim Bilgin ve diğ. (2009b) çalışmasında TBM kazısı esnasında göçükle sonuçlanan benzer bir süreksizliğin penetrasyon değerlerinin azalmasına ve ters orantılı bir şekilde itme kuvvetlerinin artmasına neden olduğu belirtilmiştir.

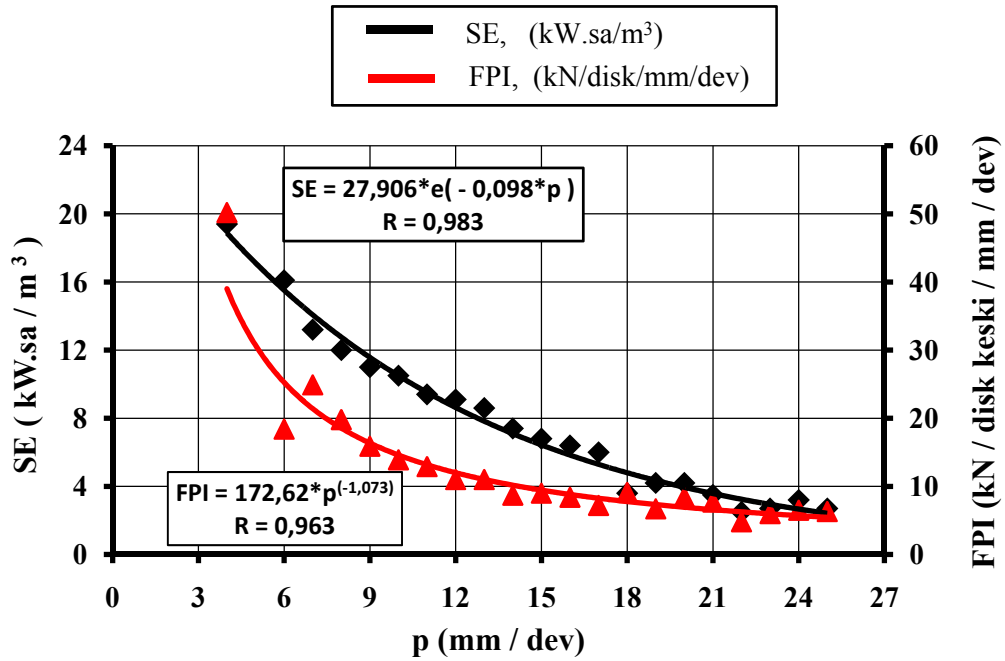
Balcı (2009) çalışmasında incelenen Kadıköy Kartal Metro tüneline açık modda çalışan (ayna basınçsız) TBM'e ait verilerden (Çizelge 4.6) yararlanılarak değişen arazi penetrasyon indeksi (FPI) değerleri için hacimsel net kazı hacminin (ICR) ve spesifik enerjinin (SE) değişim grafikleri Şekil 4.16 'da verilmiştir. Şekil 4.17 'de ise penetrasyon miktarına bağlı olarak arazi penetrasyon indeksinin ve spesifik enerjinin etkileşim grafiği çizilmiştir.

Çizelge 4.6 : Kozyatağı - Kadıköy Metro Tünelinde TBM açık mod kazı verileri (Balcı, 2009'dan değiştirilerek).

p (mm / dev)	Devir (dev / dk)	F _N (kN / disk)	F _R (kN / disk)	F _R / F _N (C _c)	FPI (kN/disk/mm/dev)	ICR (m ³ / sa)	SE (kw.sa / m ³)	SP (mm/dev/MN/disk)	
4	2,5	200,7	22,4	0,11	50,2	20,3	19,4	19,92	
6	2,9	110,1	27,1	0,25	18,3	34,6	16,1	54,64	
7	2,6	174,1	26,6	0,15	24,9	36,9	13,2	40,16	
8	2,7	158,5	28,2	0,18	19,8	45,6	12,0	50,51	
9	2,7	143,1	28,5	0,20	15,9	49,5	11,0	62,89	
10	2,7	139,4	30,5	0,22	13,9	56,2	10,5	71,94	
11	2,7	141,5	29,8	0,21	12,9	60,1	9,4	77,52	
12	2,7	131,8	31,8	0,24	11,0	66,2	9,1	90,91	
13	2,7	142,5	32,0	0,22	11,0	71,7	8,6	90,91	
14	2,7	122,3	29,9	0,24	8,7	76,6	7,4	114,94	
15	2,6	135,4	29,4	0,22	9,0	79,0	6,8	111,11	
16	2,5	135,0	29,5	0,22	8,4	81,5	6,4	119,05	
17	2,3	121,9	29,0	0,24	7,2	80,4	6,0	138,89	
18	1,9	163,3	18,5	0,11	9,1	70,3	3,6	109,89	
19	1,9	126,6	22,7	0,18	6,7	73,8	4,2	149,25	
20	1,9	167,3	23,9	0,14	8,4	74,7	4,2	119,05	
21	1,7	161,4	21,2	0,13	7,7	73,4	3,5	129,87	
22	1,6	105,8	15,9	0,15	4,8	73,2	2,5	208,33	
23	1,6	136,9	17,7	0,13	6,0	72,5	2,7	166,67	
24	1,6	156,2	21,5	0,14	6,5	75,7	3,2	153,85	
25	1,5	157,1	19,4	0,12	6,3	74,2	2,7	158,73	
Ort.	15,5	2,3	144,3	25,5	0,21	12,7	64,1	7,7	78,74



Şekil 4.16 : Arazi penetrasyon indeksi (FPI) ile spesifik enerji (SE) ve hacimsel net kazı miktarı (ICR) değişimleri grafiği.



Şekil 4.17 : Penetrasyon (p) ile spesifik enerji (SE) ve arazi penetrasyon indeksi (FPI) değişimleri grafiği.

Şekil 4.16 ve 4.17'den çıkartılan ana sonuçlar şöyledir:

- ICR ile arazi penetrasyon indeksi (FPI) arasında korelasyon katsayısı ($r = 0,925$) çok yüksek regresyon bağıntısı elde edilmiştir. Artan FPI ile TBM'nin hacimsel net kazı performansı belirgin ölçüde azalmalıdır.
- Spesifik enerji (SE) ile FPI arasında yüksek korelasyon katsayısıyla ($r = 0,953$) sonuçlanan gidişattan da izlenebileceği üzere artan FPI değerleri için birim kazı hacmi başına kesici kafanın tükettiği (elektrik) enerji artmıştır.
- Arazi penetrasyon indeksi azaldıkça penetrasyon miktarının arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Başka bir anlatımlı formasyonun kazılabilirliği arttıkça ilerleme hızlarının arttığı söylenebilmektedir.
- Formasyonun kazılabilirliğine yönelik bir diğer parametre de bilindiği üzere spesifik enerjidir. Bu çalışma sonucunda da azalan spesifik enerji değerleri için penetrasyon miktarının arttığı çok yüksek bir korelasyon katsayısı ($r = 0,983$) ile bir kez daha doğrulanmaktadır.

Kadıköy Kartal Metro Projesi'nde kullanılan TBM'e ait temel teknik büyüklükler ile birlikte geçilen kaya birimine ait kimi laboratuvar verileri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Kadıköy Kartal Metro Projesi tüneline çalışan TBM'e ve kullanıldığı formasyona ait kimi mekanik büyüklükler (Balcı, 2009'dan değiştirilerek)

Makine dış çapı	6,57 (m)
Disk keski sayısı	38 adet
Birim kazı alanı (m ²) başına disk sayısı	1,12 adet
Kesici kafanın dakikada devir sayısı	0 - 5,5 (dev/dk)
Kesici kafa torku	5200 (kNm) - 1,6 (dev/dak) 1515 (kNm) - 5,5 (dev/dak)
Maksimum normal disk kuvveti	267 (kN)
Formasyon	Kartal (kireç taşı/ şeyl)
Tek eksenli basınç ve Çekme dayanımları,	Kireçtaşı; $\sigma_{lab} = 65,6 \pm 6,7$ (MPa) $\sigma_c = 7,4 \pm 2$ (MPa)
CAI	Kireçtaşı $1,5 \pm 0,3$ Şeyl $1,4 \pm 0,5$

Hassanpour ve diğ. (2009) çalışmasında tortul kayaçlar için rapor edilen arazi penetrasyon indisine ilişkin (4.45) ve (4.46a) regresyon bağıntılarının pratik uygulamaları Kadıköy Kartal Metro Projesi tüneline çalışan TBM'nin performans değerlendirilmesinde kullanmıştır. Balcı (2009) çalışmasına göre TBM'nin açık modda (ayna basınçsız) çalışma konumundaki ortalama devir sayısı $RPM = 2,3$ (dev/dk), penetrasyon miktarı $p = 15,5$ (mm/dev), normal disk kuvveti $F_N = 144,3$ (kN/disk), yuvarlanma disk kuvveti $F_R = 25,5$ (kN/disk) ve saatlik hacimsel net kazı miktarı $ICR = 64,1$ (m³/sa) olarak belirlenmiştir. Arazi penetrasyon indeksine göre hacimsel net kazı miktarının ayrıntılı karşılaştırılması aşağıda yapılmıştır. Analizde ortalama çatlak sayısı $S = 0,15$ (m) ve $RQD = \% 50$ alınmıştır.

- Arazi penetrasyon indeksi (4.45) yardımıyla :

$$FPI = \exp[0,005 * 65,6 - 0,002 * 0,15^{-2} + 2,338] = 13,16 \text{ (kN/disk/mm/dev)}$$

- Penetrasyon hızı (3.20a) :

$$ROP = 0,06 * \frac{144,3 * 2,3}{13,16} = 1,51 \text{ (m/sa)}$$

- Hacimsel net kazı miktarı (3.21) yardımıyla :

$$ICR_h = A(m^2) * ROP \left(\frac{m}{sa} \right) = 0,785 * D^2 * ROP = 0,785 * 6,57^2 * 1,51 \approx 51,2 \left(\frac{m^3}{sa} \right)$$

- Değerlendirme :

Yapılan hesaplamalar sonucunda $ICR_h = 51,2$ (m³/sa) olarak bulunmuştur. Ölçme sonuçlarına göre hacimsel net kazı miktarı ise $(ICR)_\delta = 64,1$ m³/sa olarak verilmektedir. Buna göre incelenen yöntemin mutlak sapma miktarı ise

$$\Delta = \left| \frac{ICR_h - ICR_\delta}{ICR_\delta} \right| * 100 = \left| \frac{51,2 - 64,1}{64,1} \right| * 100 = \%20$$

mertebesindedir.

Kaya kütle kazılabilirlik indeksi RMCI Bilgin ve diğ. (1997) kavramından hareketle yukarıdaki hesaplamalar aşağıdaki şekilde yapılabilir:

- Kaya kütle kazılabilirlik indeksi (4.46b) yardımıyla :

$$RMCI = 65,6 * \left(\frac{50}{100} \right)^{0,667} = 41,32 \text{ (MPa)}$$

- Arazi penetrasyon indeksi **(4.46a)** yardımıyla :

$$FPI = 0,080 * 41,32 + 10,412 \approx 13,72 \left(\frac{\text{kN/disk keski}}{\text{mm/dev}} \right)$$

- Penetrasyon hızı **(3.20a)** ve **(4.1)** yardımıyla :

$$ROP = 0,06 * \frac{F_N * RPM}{FPI} = 0,06 * \frac{144,3 * 2,3}{13,72} = 1,45 \text{ (m/sa)}$$

- Hacimsel net kazı miktarı **(3.21)** :

$$ICR_h = A(m^2) * ROP \left(\frac{m}{sa} \right) = 0,785 * D^2 * ROP = 0,785 * 6,57^2 * 1,45 \approx 49 \left(\frac{m^3}{sa} \right)$$

- Değerlendirme :

Ölçme sonuçlarına göre hacimsel net kazı miktarı $(ICR)_{\text{ö}} = 64,1 \text{ (m}^3/\text{sa)}$ belirlenmiştir. RMCİ kavramına dayandırılan arazi penetrasyon indeksinden kestirilen hacimsel net kazı miktarı $ICR = 49 \text{ (m}^3/\text{sa)}$ olduğuna göre rölatif sapma miktarı, $\Delta = \% 23,5$ düzeyindedir. Formasyonun çok değişken çatlak sistemi düşünüldüğünde gerek **(4.45)** gerekse de **(4.46a)** bağıntılarıyla elde edilen sapma miktarlarının kabul edilebilir düzeyde olduğu söylenebilmektedir.

Singapur'da granit içinde açılmış TBM tünellerinde gerçekleştirilen yerinde deneysel çalışmaların sonucunda arazi penetrasyon indeksi **(4.52a)** ve **(4.52b)** regresyon bağıntıları ile tanımlanmaktadır (Gong ve Zhao, 2009);

$$FPI = (FPI)_1 * p^{-0,75}, 130 < (FPI)_1 < 230 \text{ (kN/disk keski/mm/dev)} \quad \textbf{(4.52a)}$$

$$(FPI)_1 = A * \sigma_{lab}^B * (GI)^C * [D * \exp(E \cdot J_v) + \exp(I \cdot \sin(\alpha + 30))] \quad \textbf{(4.52b)}$$

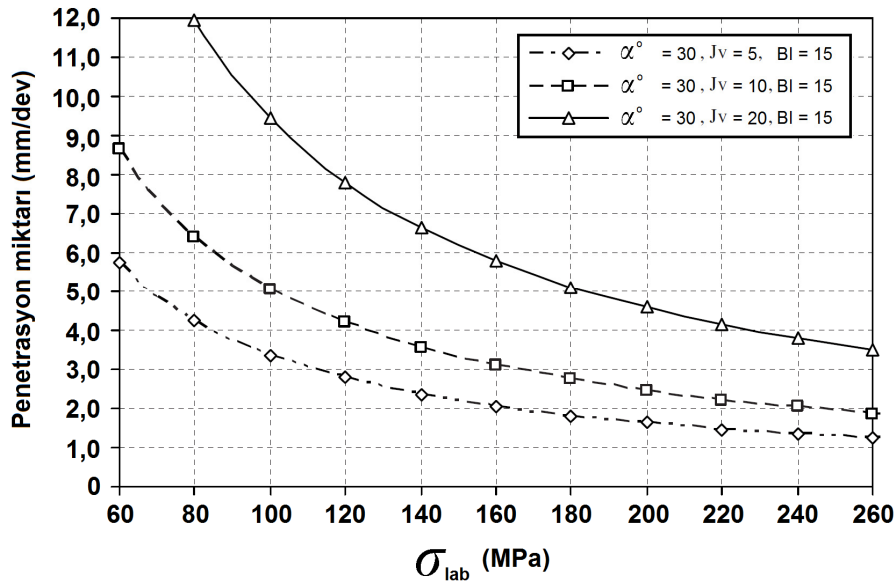
Burada; FPI = Temel arazi penetrasyon indeksi, (kN/disk/mm/dev) ; p = penetrasyon, (mm/dev); $(*) (FPI)_1$ = Spesifik arazi penetrasyon indeksi, (kN/disk/mm/dev); σ_{lab} = sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç dayanımı, (MPa) ve $100 \text{ (MPa)} < \sigma_{lab} < 260 \text{ (MPa)}$; $GI = f(\sigma_{lab} / \sigma_c)$, Gevreklik indeksi ve $8 < GI < 22$; $J_v = 1 \text{ m}^3$ kaya kütleindeki çatlak sayısı, (adet/m³) ve $0 < J_v < 30$; α = Çatlak yönelim açısı-tünel yatay aksına göre , $10^\circ < \alpha < 80^\circ$ ile belirtilmektedir.

(*)Orijinal çalışmada “spesifik kaya kütle delinebilme indeksi” olarak “ $BI_{(1)}$ ” şeklinde tanımlanmaktadır. “ BI ” sembolü ile gösterilen bu kavram ise arazi penetrasyon indeksine eşdeğeridir. Bu nedenle terim karmaşasının önüne geçmek için “ BI ” indeksi “ FPI ” olarak gösterilmektedir. “ $BI_{(1)}$ ” ise $(FPI)_1$ indeksiyle gösterilmiştir.

Açıklanmayan A, B, C, D, E, I = Çoklu regresyon ifadesinin sabiteleridir, ve A = 37,06 ; B = 0,26 ; C = -0,10 ; D = 0,84 ; E = -0,05 ; I = -0,09 değerlerini almaktadır.

Gong ve Zhao (2009) çalışmasından, 200 (kN/disk)'e normalize edilmiş normal disk kuvveti bazında , elde edilen esas çıkarımlar kısaca aşağıda özetlenmiştir:

- Değişmeyen çatlak açısı (α) ve gevreklik indeksinde (GI) penetrasyon miktarı $p = f(\sigma_{lab}, J_v)$ olup verilen hacimsel çatlak sayısı (J_v) için kaya numunesinin artan basınç dayanımıyla penetrasyon miktarı (p) belirgin ölçüde azalmaktadır. Yaklaşık $\sigma_{lab} \geq 200$ (MPa)'da penetrasyondaki azalım hızı pratik olarak önemsiz olmaktadır. Kaya numunesinin değişmeyen laboratuvar basınç dayanımında (σ_{lab}) ise artan hacimsel çatlak sayısı (J_v) ile "p" de artmaktadır. Daha küçük basınç dayanım düzeylerinde penetrasyon miktarındaki artım hızı daha anlamlı olmaktadır (Şekil 4.18).
- Değişmeyen çatlak açısı ve J_v durumunda $p = f(\sigma_{lab}, GI)$ olup sabit (σ_{lab}) değerinde penetrasyon (p) gevreklik indeksiyle (GI) artmaktadır.
- σ_{lab} ve GI değişkenlerinin sabit tutulması durumunda, verilen bir J_v büyüklüğünde $p = f(\alpha, J_v)$ değişiminde çatlak açısının (α) penetrasyon üzerindeki etkisi $\sigma_{lab} \geq 200$ (MPa) durumunda pratik olarak ihmal edilebilir düzeydedir.



Şekil 4.18 : Farklı hacimsel çatlak sayılarında değişen kaya numunesinin laboratuvar basıncı ile penetrasyon miktarı arasındaki ilişki (Gong ve Zhao, 2009).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında incelenen konulardan çıkarılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Kazı mekaniği literatüründe 1980’li yılların sonunda kullanılmaya başlanılan arazi penetrasyon indeksi $FPI = F_N / p$, hem TBM’nin temel tasarım parametrelerini hem de kaya biriminin yerinde mekanik/yapısal özelliklerini içermesi bakımından önemlidir. Bununla beraber FPI sayesinde farklı TBM tasarımları ve farklı operatör kullanımları altında dahi formasyonun kazılabilirliği hakkında ilerleme miktarlarına nazaran çok daha net bilgiler verilebilmektedir.

- Spesifik penetrasyon indeksi ($SP = 1 / FPI$) birleşik kütle sistemi (IMS) ile ilişkilendirilebilir. Artan IMS, başka anlatımla azalan çatlak aralığı ve artan ayrışma derecesiyle temsil edilen kaya kütlelerinde spesifik penetrasyon indeksi de artma eğilimindedir (Şekil 4.13).

- Arazi penetrasyon indeksine dayalı olarak geliştirilen güncel modeller;

$$FPI = \exp(A * S + B * \alpha + C * \sigma_{\phi} + D)$$

$$FPI = \exp(A * \sigma_{lab} + B * S^{-2} + C)$$

şeklindedir (S = Ortalama çatlak aralığı , α = Hakim çatlak setinin tünel yatay aksı ile yaptığı açı, σ_{lab} , σ_{ϕ} = Sırasıyla sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç ve çekme dayanımı, A,B,C,D = Çoklu regresyon katsayıları).

- Arazi penetrasyon indeksi kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı ($\sigma_{y,b}$) veya kaya kütle kazılabilirlik indeksi RMCI cinsinden de ifade edilmektedir.

$$SP = \frac{1}{FPI} = A * \sigma_{y,b}^B$$

$$FPI = A * RMCI + B = A * \left[\sigma_{lab} * \left(\frac{RQD}{100} \right)^{0,667} \right] + B$$

Burada; SP = Spesifik penetrasyon indeksi, RQD = Kaya kalite göstergesi, A,B = Regresyon analizinden bulunan sabiteler).

Artan kaya kütlesi basınç dayanımı ile arazi penetrasyon indeksi de artmaktadır. Aynı sonuç $FPI = f(RMCI)$ için de geçerlidir.

- Geçilecek kaya kütlelerinin mekanik-yapısal özellikleri bilindiğinde arazi penetrasyon indeksi (FPI) yukarıdaki bağıntılar yardımıyla kestirilebilir. Verilen veya hesaplanan normal disk keski kuvveti, F_N , için TBM'nin penetrasyon hızı (ROP) ve kabul edilen yararlanma oranı (U) için TBM'nin performansı belirlenebilir. Pratik mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere TBM'nin ilerleme miktarını doğrudan veren şekiller hazırlanmıştır (Şekil 4.14 ve 4.15).

- Sürekli şekilde ölçülecek ortalama normal disk kuvveti, yuvarlanma kuvveti ve penetrasyon ile tünel kazı arınındaki kaya kütlelerinin yerinde basınç dayanımı kabul edilebilir bir yakınsaklıkla kestirilebilir. Farklı formasyonlardan elde edilecek bilgiler ışığında kaya kütlesinin kalite puanı (RMR) da göz önünde bulundurularak TBM verileri yardımıyla formasyonun yerinde mekanik özellikleri de daha yüksek doğrulukla belirlenebilir. Tünel kazı mühendisliği literatüründe buna benzer yaklaşım ilk defa Fukui ve Okubo (2003, 2006) çalışmasında kullanılmıştır.

- Kaya mekaniği literatüründe gevreklik ölçütü (σ_{lab} / σ_c) oranı ile açıklanmaktadır. Bu ölçüt aynı zamanda TBM'nin arazi penetrasyon indeksi büyüklüğü ile ilişkilendirilebilir. Buna göre aynı kayaç cinsinden elde edilen büyük (σ_{lab} / σ_c) oranlarında başka ifadeyle artan gevreklik ile arazi penetrasyon indeksi belirgin ölçüde azalmakta, kazı mekaniği açısından daha kolay kazı yapılabilir. Farklı kayaç türleri ve laboratuvar basınçlarında ve bunlara ait gevreklik değerleri ile arazi penetrasyon indeksinin ilintilendirilmesi daha doğru yaklaşımlar verebilecektir. Nitekim elde edilecek veriler ışığında aynı şekil üzerinde farklı kayaç türleri için $FPI = f(GI, \sigma_{lab})$ şeklinde denklemler oluşturulabilir. Unutulmamalıdır ki burada kullanılan dayanımlar sağlam numunelerden elde edilen basınç ve çekme dayanımlarıdır. Bloklu ,çatlaklı kaya kütleleri için anılan oran yerinde dayanımlar cinsinden ifade edildiğinde çıkartılacak sonuçların kırıntılar/kesintilerin geometrik boyutu, başka ifadeyle optimum spesifik enerji tüketimi açısından sağlayacağı açılımlar daha anlamlı olacaktır.

- Yapılan bu çalışmada sağlam kaya formasyonlar için geliştirilen ve literatürde yer bulan performans yaklaşımları arazi penetrasyon indeksi cinsinden ele alınarak farklı senaryolar için performans tahminleri kestirilmeye çalışılmıştır. Ülkemizde en yaygın olarak TBM kullanımının İstanbul' da olduğu bilinmektedir. İstanbul için hakim formasyonun çok kırıklı çatlaklı olduğu göz önüne alındığında arazi penetrasyon indeksi gerek makine tipinin farklı olması (kazının genel olarak kapalı mod yapılması) gerekse de yerinde basınç dayanımlarına bağlı olarak çok düşük değerler alması sebebiyle (itme kuvvetlerin çok düşük penetrasyonların çok yüksek olması) gerçekçi penetrasyon hızları veremediğinden performansa yönelik net yaklaşımlarda kullanılması mümkün değildir.
- Bilindiği üzere sağlam kaya formasyonlarda makinenin yuvarlanma kuvvetinden çok itme kuvvetine çalışması nedeniyle arazi penetrasyon indeksi sağlam kayalarda açılacak olan tünel projelerinin performanslarının belirlenmesinde normal kuvvetin penetrasyona oranı yani " F_N/p " şeklinde kullanılmaktadır. Ancak çok kırıklı çatlaklı kaya formasyonlarda ve zemin formasyonların kazılarında arazi basınçları dolayısıyla oluşacak kuvvetler ihmal edildiğinde kazı için gerekli itme kuvvetleri çok düşük seviyelerde kalmaktadır. Bunun yanında kesici kafanın dönmesi için gerekli olan tork değerlerinin gerek kazı yöntemi gerekse de yüksek penetrasyon miktarlarının uygulanması sebebiyle yüksek değerler alması, itme kuvvetlerine oranla performans tahmini için daha anlamlı ilişkilerin oluşturulmasında kullanılabilir. Keza arazi penetrasyon indeksi (FPI) bu parametreye göre tekrar elden geçirilirse F_N/p yerine F_R/p olarak düzenlenebilir. Literatürde zemin veya çok kırıklı çatlaklı formasyonlarda kullanılacak olan TBM'lerin performanslarına yönelik benimsenen ve yaygın olarak uygulanan bir yöntem olmaması dolayısıyla değiştirilmiş arazi penetrasyon indeksi (F_R/p), FPI_R , yardımıyla hem yenilikçi hem de kestirimci yaklaşımlarda bulunulabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Alan, E. ve Koç, E.**, 2010. Kişisel görüşme.
- Alber, M.**, 1996. Prediction Of Penetration and Utilization For Hard Rock TBMs, *Eurock '96*, Balkema, Rotterdam, 721–725.
- Alber, M.**, 2000. Advance Rates of Hard Rock TBMs And Their Effects On Project Economics, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **15** (1), 55 - 64.
- Alber, M.**, 2008a. Stress Dependency Of The Cerchar Abrasivity Index (CAI) And Its Effects On Wear Of Selected Rock Cutting Tools, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23** (4), 351-359.
- Alber, M.**, 2008b. An Integrated Approach to Penetration, Advance Rates and Disc Cutter Wear for Hard Rock TBM Drives, *Geomechanik und Tunnelbau*, **1**, Heft 1, 29-37.
- Arioğlu, E. ve Arioğlu, N.**, 2005. *Üst ve Alt Yapılarda Beton Karot Deneyleri ve Değerlendirilmesi*, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- Arioğlu, E., Yılmaz, A. O. ve Tunçdemir, H.**, 2007. *Kayaya Gömülü Fore Kazıklar*, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- Askilrud, G. O.**, 1998. Development Of TBM Technology For Hard Rock Conditions. *Norwegian TBM Tunneling Publication No:11*, 35-41.
- Balcı, C.**, 2009. Correlation of Rock Cutting Tests with Performance of a TBM In a Highly Fractured Rock Formation: A Case Study in Kozyatağı Metro Tunel, Turkey, *Tunelling and Underground Space Technology*, **24** (4), 423-435.
- Balcı, C. ve Bilgin, N.**, 2005. Mekanize Kazı Makinelerinin Seçiminde Küçük ve Tam Boyutlu Kazı Deneylerinin Karşılaştırılması, *İTÜ Dergisi/d*, Cilt 4,Sayı 3, 76-86.
- 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 Bildiriler Kitabı*, TMMOB MMO, Kızılay, ANKARA.
- Balcı, C., Bilgin, N., Çopur, H., ve Tumaç, D.**, 2009. Tam Cephe Tünel Açma Makineleri (TBM) Performans Tahmini ve Optimizasyonu, TÜBİTAK Araştırma Projesi Nihai Raporu, Proje No: 106M298.
- Barton, N.**, 2000. *TBM Tunelling in Jointed and Faulted Rock*, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Bieniawski, Z. T.**, 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York.
- Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J. M. and Álvarez, M.**, 2006. Rock Mass Excavability (RME) Index, *ITA-AITES World Tunnelling Congress*, Seoul, Korea.

- Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J. M. and Tardáguila, I.,** 2008. New Applications Of The Excavability Index For Selection Of TBM Types And Predicting Their Performance, *ITA-AITES World Tunnelling Congress*, Agra, India, 1618-1629.
- Bieniawski, Z. T., Celada, B., and Galera, J. M.,** 2007a. TBM Excavability: Prediction and Machine-Rock Interaction, *RETC*, Toronto.
- Bieniawski, Z. T., Celada, B., and Galera, J. M.,** 2007b. Predicting TBM excavability, *Tunnels & Tunnelling International*. September, p. 25.
- Bieniawski, Z. T., Tamames, B. C., Galera, J. M. and Tardaguiler, I.,** 2009. Prediction of Cutter Wear Using RME, *ITA-AITES World Tunnel Congress*, Budapest.
- Bilgin, N.,** 1989. *İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Bilgin, N., Balcı, C., Tunçdemir, H., Eskikaya, Ş., Akgül, M. and Algan, M.,** 1999. The Performance Prediction of a TBM in Difficult Ground Condition, AFTES, *Journées d'Etudes Internationales de Paris*, October.
- Bilgin, N., Çopur, H. ve Balcı, C.,** 2009a. İstanbul'da Mekanize Tünel Kazısına Bir Bakış ve Bunların Maden Mühendisliği ile Olan İlişkileri. Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi TUMKS' 09, Antalya, Mayıs 2009.
- Bilgin, N., Feridunoglu, C., Tumac, D., Cınar, M., Palakci, Y., Gunduz, O. and Ozyol, L.,** 2005. The Performance Of A Full Face Tunnel Boring Machine (TBM) In Tarabya (Istanbul), *ITA-AITES World Tunnel Congress*, Istanbul, Turkey, 821-826.
- Bilgin, N., Kuzu, C. and Eskikaya, Ş.,** 1997. Cutting performance of Jack Hammers and Road Headers In İstanbul Metro Drivages, *ITA-AITES World Tunnel Congress*, Viena, Balkema, Rotterdam, 445 - 460.
- Bilgin, N., Özbayır, T., Sozak, N. and Eyigun, Y.,** 2009b. Factors Affecting The Economy And The Efficiency of Metro Tunnel Drivage With Two TBM' s In Istanbul In Very Fractured Rock, *ITA-AITES World Tunnel Congress*, Budapest, HUNGARY.
- Bruland, A.,** 1998. Hard Rock Tunnel Boring, Vol 10 of 10 Dr. Ing Thesis, Dept. Of Building and Construction Engineering, NTNU, Trondheim, Norway, 1998:81.
- Bruland, A., Dahlo, T. S. and Nilsen, B.,** 1995. Tunnelling Performance Estimation Based on Drillability Testing, *Proc.8th.ISRM Congress on Rock Mechanics*, Vol. 1, Tokyo, 123-126
- Copur, H., Rostami, J., Ozdemir, L. and Bilgin, N.,** 1997. Studies on Performance Prediction of Roadheaders Based on Field Data in Mining and Tunneling Projects. *4th Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation*, Queensland, Australia, 1-7.
- Cornejo, L.,** 2001. Tunnel Mechanical Excavation in Soft Ground Its Historical Evolution, *ITA-AITES World Tunnel Congress*, Geoconsult, Madrid, Spain.
- Çınar, M. ve Feridunoğlu, O. C.,** 2002. Tünel Açma Makineleri (TBM), *Ulaşımında Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu Genişletilmiş Baskı*, TMMOB.

- Dolcini, G., Fuoco, S. and Ribacchi, R.,** 1996. Performance of TBMs in complex masses. *Int. North American Tunnelling'96* (Ed. L.Özdemir), A.A. Balkema, Rotterdam, 145-154.
- Erguner, U.,** 2008. Marmaray Project and Performance of A Slurry TBM., Master Thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, İstanbul, January.
- Exadaktylos, G., Stavropoulou, M., Xiroudakis, G., Broissia, M. and Schwarz, H.,** 2008. A Spatial Estimation Model For Continuous Rock Mass Characterization From The Specific Energy Of a TBM, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **41**, 797 - 834.
- Feridunoğlu, O., C.,** 2001. Tarabya Atıksu Tünelinde Kullanılan Tam cepheli Tünel Açma Makinesinin S13-S10 Şaftları Arasındaki Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2001, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- Frenzel, Ch., Käsling, H. and Thuro, K.,** 2008. Factors Influencing Disc Cutter Wear, *Geomechanik und Tunnelbau*, **1**, Heft-1, 55-60.
- Fukui, K. and Okubo, S.,** 2006. Some Attempts for Estimating Rock Strength and Rock Mass Classification from Cutting Force and Investigation of Optimum Operation of Tunnel Boring Machines, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. **39**, No: 1, 25-44.
- Gehring, K.,** 1995. Prognosis of advance rates and wear for underground Mechanized Excavations (In German), *Felsbau*, **13**, 439-448.
- Gertsch, R., Gertsch, L. and Rostami, J.,** 2007. Disc Cutting Tests in Colorado Red Granite : Implications for TBM Performance Prediction, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **44**, 238 -246.
- Gong, Q. M. and Zhao, J.,** 2009. Development of a Rock Mass Characteristic Model for TBM Rate Prediction, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **46**, 2009, 8-18.
- Gong, Q. M., Zhao, J. and Jiao., Y. Y.,** 2005. Numerical Modelling of the Effects of Joint Orientation on Rock Fragmentation by TBM Cutters, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **20**, (2), 183-191.
- Gong, Q.M., Jiao, Y.Y. and Zhao, J.,** 2006. Numerical Simulation Of Influence Of Joint Spacing On Rock Fragmentation By TBM Cutters. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. **21**, (1), 46–55.
- Grandori, R., Fazio, A. L., Ribacchi, R. and Sem, M.,** 1995a. Tunnelling by Double Shield TBM In The Hong Kong Granite. *8th.ISRM Congress*, Tokyo, A.A. Balkema, Rotterdam, 569-574.
- Grandori, R., Jaeger, M., Antonini, F. and Vigl, L.,** 1995b. Evinos-Mornos Tunnel-Greece. Construction Of a 30 km Long Hydraulic Tunnel In Less Than Three Years Under The Most Adverse Geological Conditions. *RETC*, San Francisco, 747-767.
- Güçlücan, Z., Meriç, S., Gürsoy, C., Algan, M., Bilgin, N., Balcı, C. ve Tumaç, D.,** 2007. Zor zemin şartlarında Beykoz- Kavacık Atıksu Tünellerinde TBM Uygulaması, *Ulaşımda Yer altı Kazıları 2. Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayın No: 138, 2007, 83-91.

- Kırbaç, T.**, 1995. Tünel Açma İşlemleri, Karşılaşılan Sorunlar ve Uygulanan Çözüm Yolları. Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- Kim, T.**, 2004. Development Of A Fuzzy Logic Based Utilization Predictor Model For Hard Rock Tunnel Boring Machines. PhD Thesis.Mining/Earth System Engineering. Colorado School Of Mines.
- King, J.**, 2000. Our Century of Tunnelling and Where We Go Now, British Tunnel Society, *The 2000 Harding Lecture*, Tunnels And Tunnelling International.
- Klein, S., Schmoll, M., and Avery, T.**, 1995. TBM Performance at Four Hard Rock Tunnels in California, *RETC*, San Francisco.
- Koç, E.**, 2009. Kişisel görüşme.
- Kolymbas, D.**, 2005. *Tunnelling and Tunnel Mechanics; A Rational Approach To Tunnelling*. Springer-Verlag, Berlin.
- Lade, P. V.**, 1993. Rock Strength Criteria: The Theories and The Evidence. *Comprehensive Rock Engineering - Principle, Practice & Projects*. Ed: J. A. Hudson, Pergamon, Oxford, UK, 255-284.
- Leitner, W. and Schneider, E.**, 2003. Penetration Prediction Models for Hard Rock Tunnel Boring Machines, *Felsbau*, **21**, No:6, pp. 8-13.
- Maidl, B., Schmid, L. and Ritz, W., Herrenknecht, M.**, 2008. *Hard Rock Tunnel Boring Machines*, Ernst & Sohn, Berlin.
- Nelson, P.**, 1993. TBM Performance Analysis With Reference To Rock Properties. *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. 4, Excavation, Support and Monitoring, Ed. J. A. Hudson, Pergamon Press, 261-291.
- Nelson, P., O'Rourke, T. D. and Kulhawy, F. H.**, 1983. Factors Affecting TBM Penetration Rates in Sedimentary Rocks, *24th U.S. Semposium on Rock Mechanics*, June 1983, 227-238.
- Oh, B. and Choi, K.**, 2003. Busan Subway Tunnel Under the Sooyoung River Excavated by Shield TBM, *2003 Tunnelling In Korea Past Present Future*, Korean Tunnelling Association, Seoul, 70-77.
- Özdemir, L.**, 1992. Mechanical Excavation Techniques In Underground Construction , Short Course Notebook Vol. **2**, İstanbul Technical University , Mining Engineering Dept, November.
- Palmström, A.**, 1995. RMI-A Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purpose, PhD Thesis, Department Geology,University of Oslo.
- Palmström, A.**, 2005. Measurements of and Correlations Between Block Size and Rock Quality Designation (RQD), *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. **20**, (4), 362-377.
- Ramamurthy, T. and Arora, V. K.**, 1994. Strength Predictions For Jointed Rocks In Confined and Unconfined States, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. **31**, No: 1, 9-22.
- Ramezanzadeh, A.**, 2005. Performance Analysis and Development of New Models for Performance Prediction on Hard Rock TBMs In Rock Mass, Le Grande Docteur Thesis, N° d'ordre 2005 ISAL 0049,Institute National des Sciences Appliquees de Lyon,Anne e.

- Ribacchi, R. and Fazio, A. L.,** 2005. Influence of Rock Mass Parameters On The Performance Of a TBM In a Gneissic Formation (Varzo Tunnel), *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. **28**, No: 2, 105-127.
- Rossler, K.,** 1995. Geotechnical Aspects of Mechanized Tunnelling Rock , Ph.D. thesis , Dept. Civ. Eng. , University of Alberta, Canada.
- Rostami, J.,** 2008. Hard Rock TBM Cutter Head Modelling for Desing and Performance Prediction. *Geomechanik und Tunnelbau*, **1**,Heft-1, 18-28.
- Rostami, J., Gertsch, R. and Gertsch. L.,** 2002. Rock Fragmentation by Disc Cutter A Critical Review and an Update. *Proceedings North American Rock Mechanics Symposium (NARMS)* Toronto.
- Rostami, J. and Ozdemir. L.,** 1993. A New Model For Performance Prediction Of Hard Rock TBMs, *RETC*, Boston, 13-17.
- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D.M.,** 1994. Performance Prediction: A Key Issue In Mechanical Hard Rock Mining. *Mining Engineer*, **11**, 1263–1267.
- Rostami, J., Ozdemir. L. and Nilsen, B.,** 1996. Comparison between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models. *Proceedings of the Annual Conference of the Institution of Shaft Drilling Technology*, Las Vegas, p. 11.
- Ruehl, S. and Alber, M.,** 2006. Initial stres couditions influencing the Cerchar abrasiveness index, IAEG Paper no = 436, The Geological Society of London.
- Ruehl, S. and Alber, M.,** 2006. Initial stress condition influencing the Cerchar Abrasivity Index. In: Proc. IAEG 2006, Paper No. 436. The Geological Society of London.
- Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillio, A. and Cardone, G.,** 2002. TBM Performance Estimation Using Rock Mass Classification, *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. **39**, 771 -788.
- Sato, K., Gong, F. M. and Itakura, K.,** 1991. Prediction of Disc Cutter Performance Using Circular Rock Cutting Ring, *Proceedings 1.International Mine Mechanization and Automation Symposium*, CSM, Golden Colorado, 1-4.
- Schubert, W.,** 2000. TBM Excavation of Tunnels in Squeezing Rock. *Lo scavo meccanizzato di gallerie*, MIR 2000, Torino, pp. 355-364.
- Singh, B. and Goel, R. K.,** 1999. *Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering*, Elsevier, Amsterdam.
- Snowdan, R. A., Ryley, M. and Temporal, J.,** 1982. A Study of Disc Cutting In Selected British Rocks, *Int . J. Rock Mech . Min .Sci & Geomech . Abstr .* Vol **19**, No: 3, 107 – 121.
- Sundaram, N. M. and Rafek, A. G.,** 1998. The influence of rock mass properties in the assessment of TBM performance, *Proc.8th IAEG Congress*. Vancouver, Rotterdam, Balkema, 3553-3559.
- Tarda'guila, U., Celada, B. and Galera, J. M.,** 2007. Geotechnical Control During the Excavation of the Tunnel of Guadarrama, *ITA-AITES World Tunnel Congress*, Prague, Czech Republic.
- Ulusay, R. ve Sönmez, H.,** 2007. *Kaya kütlelerinin Mühendislik Özellikleri Genişletilmiş İkinci Baskı*, TMMOB Jeoloji mühendisleri odası yayınları, Ankara.

Yarah, O. ve Soyer, E., 2007. Tünel Açma Makinelerinin Performans Analizinde Kullanılan Delme Oranı İndeksinin (DRI) Tahmini, *Ulaşım da Yer altı Kazıları 2. Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını No:138, 169-179.

Zhang, L., 2005. *Engineering Properties of Rocks*, Elsevier, Amsterdam.

Url-1 <<http://fhapgood.fastmail.fm./TBM01.html>>, alındığı tarih 20.04.2009

Url-2 <http://en.wikipedia.org/wiki/Germain_Sommeiller>, alındığı tarih 14.02.2009

Url-3<http://www.herrenknecht.com/projects/projektsuche-detailansicht.html?tx_dbnhkprojects_pi1%5BresType%5D=gallery&tx_dbnhkprojects_pi1%5Buid%5D=623&tx_dbnhkprojects_pi1%5Bpic%5D=5m>, alındığı tarih 10.05.2009

Url-4 <http://www.herrenknecht.com/projects/projektsuche-detailansicht.html?tx_dbnhkprojects_pi1%5BresType%5D=gallery&tx_dbnhkprojects_pi1%5Buid%5D=535&tx_dbnhkprojects_pi1%5Bpic%5D=1> alındığı tarih 10.05.2009

Url-5 <http://en.wikipedia.org/wiki/Thames_Tunnel>, alındığı tarih 14.02.2009

Url-6 <<http://www.robbinstbm.com/news/records.shtml>>, alındığı tarih 01.04.2010

Url-7<<http://www.herrenknecht.com/process-technology/machine-technology/mixshield.html>>, alındığı tarih 06.03.2009

Url-8 <http://hcm.vo.llnwd.net/e1/global/pdf/brochure/current/tunnel/B_Tunnel.pdf> alındığı tarih 08.04.2009

Url-9 <<http://www.herrenknecht.com/process-technology/machine-technology/epb-shield.html>> , alındığı tarih 04.04.2010

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyadı: Sami Enis ARIOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1984

Lisans Üniversitesi: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 2006

Sami Enis ARIOĞLU, 1984 İstanbul doğumludur. İlköğrenimi Reşat Nuri Güntekin İlköğretim okulunda (1995), orta öğrenimi Özel Moda Kolejinde (1999) ve lise öğrenimini de Hüseyin Avni Sözen Anadolu Lisesi'nde (2002) tamamlamıştır. 2002 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü kazanmış ve 2006 yılında aynı bölümden Makine Mühendisi unvanını hak ederek mezun olmuştur. 2006 - 2007 yıllarında Şişli Plaza projesinde kontrol mühendisi olarak, 2007-2008 arasında da kısa süreli (3 ay) Anadoluray Kadıköy Kartal Metro Projesinde makine mühendisi olarak görev almıştır.