



ÜSKÜDAR-ÜMRANIYE-ÇEKMEKÖY METRO TUNELİNDE KULLANILAN PASA BASINÇLI TUNEL AÇMA MAKİNESİNİN (EPB-TBM) PERFORMANS ANALİZİ

¹Deniz TUMAÇ, ²Bilal Şahin GÜMÜŞ

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, 34469 İSTANBUL

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, 34469 İSTANBUL

¹tumacde@itu.edu.tr, ²ssgumus@gmail.com

(Geliş/Received: 19.11.2014; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.02.2015)

ÖZET: İstanbul Büyük Şehir Belediyesi tarafından Doğu İnşaat firmasına ihale edilen Üsküdar-Çekmeköy Metro hattı 20 km uzunluğa sahip çift tüp şeklinde tünellerden oluşmaktadır. Karmaşık bir jeolojiye sahip olan çalışılan güzergah boyunca kumtaşı, kil taşı, şeyl, kireçtaşı, çamurtaşı, konglomera ve yer yer diyabaz dayklarına rastlanmaktadır. Tünellerin kazısı 6,57 m tam cepheli tünel açma (TBM) makineleri tarafından yapılmaktadır. Bu çalışmada, TBM'in veri depolama sistemi tarafından kayıtları edilen kazı parametreleri (itme kuvveti, tork, kesici kafa dönme hızı, ilerleme hızı, alarmlar vb.) analiz edilmiştir. Her ring kazısı için iş-zaman etüdü verileri incelenerek makineden faydalanma oranı belirlenmiştir. Makine performansını önemli ölçüde etkileyen arıza ve duraklamaların neler olduğu ve her birinin yüzdesel dağılımları belirlenmiştir. Bu çalışma, karmaşık olarak gözükten TBM verilerinin nasıl sadeleştirileceğini, performans ve arıza verilerinin pratik olarak nasıl değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Tam cepheli tünel açma makinesi, Performans analizi, Makineden faydalanma oranı, Makine arızaları

Performance Analysis of Earth Pressure Balance Machine (EPB-TBM) used in Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Tunnel

ABSTRACT: Üsküdar-Çekmeköy metro line of 20 km having twin tubes is commissioned to Doğu Construction Company by Istanbul Metropolitan Municipality authorities. During the excavation, Tunnel Boring Machines (TBMs) encountered with complex geology consisting of sandstone, siltstone, shale, limestone, conglomerate, and diabase dykes. Two TBMs having diameters of 6.57 m are used in excavation of Üsküdar-Çekmeköy metro line. In this study, performance analysis is carried out along the tunnel route between Üsküdar-Çarşı stations by analyzing TBM data (thrust, torque, speed of cutter head revolution, advance rate, alarms etc.). Machine utilization time is also determined and, the breakdowns and stoppage times are deeply analyzed to identify their effects on TBM performance. This study illustrates how to simplify and practically usage of the TBM performance and breakdown data.

Key Words: Full face tunnel boring machines, performance analysis, machine utilization time, machine breakdown

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tam cepheli tünel açma makineleri madencilik ve inşaat sektöründe geniş kullanım alanı bulmuş bir

kazı makinesidir. Madencilik sektöründe, cevhere ulaşmak için ana galerilerin açılması ve kazı maliyetlerinin azaltılabilmesi için kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe ise kara ve demiryolu tünelleri, metro, hidroelektrik, kanalizasyon, su ve diğer altyapı tünel hizmetlerinin hızlı ve emniyetli bir şekilde açılmasında kullanılmaktadır. Mekanize olarak yapılan kazılar ilk olarak yeraltı ocaklarında kömür üretimi ile başlamış ve gelişimi hız kazanmıştır.

On dokuzuncu yüzyılın başlarında, malzeme bilimi alanındaki gelişmeler, özellikle yeni darbeli delicilerin ve kömür kazı makinelerinin yapılmasına neden olmuş ve bugünkü modern kazı makinelerinin tasarım temelleri atılmıştır. İnşaat sektöründeki ilk modern gelişme; 1881 yılında, Albay Beaumont tarafından geliştirilen 2,14 m çapındaki tam cepheli bir tünel açma makinesi ile başlamıştır (Stack, 1995). On dokuzuncu yüzyılın ortalarında, kazı bilimindeki gelişmeler ile birlikte mekanize kazı yöntemleri madencilik ve inşaat sektörlerinde önemli bir yere sahip olmuştur. Tam cepheli tünel açma makinelerinin kullanımı daha çok inşaat sektöründe kendini göstermiştir. Özellikle kara ve demiryolu tünelleri, metrolar, kanalizasyon tünelleri gibi birçok alanda uygulama alanı bulmuş ve özellikle şehirleşmiş yerlerde klasik yöntem olan delme-patlatma yönteminin yerini almaya başlamıştır.

Günümüzde, gelişmekte olan ülkelerde, şehirleşmenin ve nüfus yoğunluğunun giderek arttığı ve buna bağlı olarak da altyapı gereksiniminin son derece önem kazandığı bilinmektedir. Yeraltı yapılarının inşası çevreye en az rahatsızlık ve yerüstü yapıları ile topografyaya minimum derecede hasar verecek şekilde yapılmalıdır. Bütün bu gereksinimleri karşılamak için yeraltı yapılarının inşasında tünel açma makinelerinin kullanımı giderek artmaktadır. Tünellerin açılması sırasında, çevreye ve yerüstündeki yapılara zarar vermemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi son derece önemlidir. Her ne kadar ilk yatırım maliyetleri yüksek olsa da tam cepheli tünel açma makineleri tasman gibi istenilmeyen arazi deformasyonlarını önleme kabiliyeti, daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir. Bununla beraber yeraltı formasyonlarındaki çeşitlilik, bu makinelerin prensipte aynı fakat ayrıntıda çeşitli yönlerden farklı olmasını gerektirmiştir. Sert, orta sert, yumuşak ve akıcı formasyonlar için kullanılacak kafa dizaynları ve keski tipleri, arazi basıncını dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri çeşitli yönlerden farklılıklar göstermektedir. Sonuçta açılacak yeraltı boşluğu boyunca geçilecek formasyonun önceden tespiti, kullanılacak makinenin seçiminde en önemli faktörlerden biri olmuştur.

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

TBM performansının önceden tahmin edilebilmesi için gerçekleştirilen ilk çalışmalar on dokuzuncu yüzyılın son çeyreğinde yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalarda; kayacın basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, aşındırıcılığı ve sertliği ile TBM'in penetrasyonu, itme kuvveti ve tork gereksinimi karşılaştırılarak birçok model önerilmiştir. Graham (1976), kayacın basınç dayanımını dikkate alarak Robbins marka tam cepheli tünel açma makineleri üzerinde çalışmış ve kendi adını taşıyan bir yaklaşım geliştirmiştir. McFeat-Smith ve Tarkoy (1979) iki tip tam cepheli tünel açma makinesinin ilerleme hızı tahminini standart koni delici ve nokta yük deney sonuçlarını kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Farmer ve Glossop (1980) ortalama kesme kuvveti ve bir devirdeki ilerleme miktarının tahmini için kayacın çekme ve basınç dayanımlarını dikkate alarak bir yaklaşım geliştirilmiştir. Cassinelli (1982), tam cepheli tünel açma makinelerinin ilerleme hızını, kaya tahkimat sınıflandırma sistemine bağlı olarak hesaplanmıştır. Bamford (1984) tarafından yerinde toplanan makine ve kaya özelliklerine bağlı olarak bir yaklaşım geliştirilmiştir. Net ilerleme hızı ve keski tüketimini yüksek korelasyon katsayısı ile tahmin edebilmektedir. Hughes (1986), yaklaşımında kayaçların basınç dayanımı ve makine özelliklerini dikkate almaktadır. Ayrıca tam cepheli tünel açma makinelerinin kesme gücünü makine çapına bağlı olarak tahmin etmektedir. Trondheim Üniversitesi ve Norveç Teknoloji Enstitüsü tarafından geliştirilen yaklaşımda bir keskiye gelen kuvvet tahmini için; kayaçların dayanımı, kırılgenlik, aşındırıcılık ve çatlak yapısı ile makine özellikleri (keski yapısı, keski çapı, keski arası mesafe, tork ve devir sayısını) dikkate almaktadır (Lislerud, 1988). Wijk (1992) keski ve kesme

parametrelerini göz önüne alarak tam cepheli tünel açma makinelerinin performans tahmini için matematiksel bir model geliştirmiştir. Peach (1994) performans tahmini için makine özellikleri (kesici kafa çapı, gücü, devir sayısı) ile kayaç özelliklerini dikkate alan bir namogram geliştirmiştir. Bu namogramda değişik koşullar göz önüne alınarak tam cepheli kazı makinelerinin performansı kestirilebilmektedir. Colorado School of Mines'da gerçek boyutlu bir keski ile kaya bloğunun kesilmesi ve gerekli spesifik enerjinin hesaplanması esasına dayanan önemli bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak net ilerleme hızına, makine kesme gücü ve optimum spesifik enerji değerlerinden ulaşılabilmektedir (Rostami ve Özdemir, 1993; Rostami ve diğ., 1994). Barton (1999) ampirik modeli; delme-patlatma yöntemi ile açılan tüneller için geliştirilen Q sınıflama sistemine kayaç ile makine özelliklerini de katarak Q_{TBM} diye anılan bir sistem geliştirmiştir, bu model tam cepheli tünel açma makinelerinin performansını kestirmek için kullanılmaktadır. Copur ve diğ. (2001) TBM net üretim hızı için kullanılan eşitliklerdeki (Rostami ve diğ., 1994) enerji transfer katsayısının 0,8 alınarak performans tahmini doğru bir şekilde yapılabileceğini göstermiştir. Bienawski ve diğ. (2006) kaya kütlesi kazılabilirliği (RME) ölçütünü ortaya koymuş ve birçok tünelde gözlemler yaparak ortalama ilerleme hızı, tork ve disk yükü arasında çeşitli ilişkiler önermişlerdir. Yagiz (2008) kaya kütle özellikleri ve makine spesifik özellikleri arasında istatistiksel çalışmalar ile bir ampirik yaklaşım elde etmiştir. Geliştirilen ampirik yaklaşım ile TBM'lerin performans tahmini yapılabilmektedir. Rostami (2008) yaklaşımı; makine kesici kafa gücü, itme kuvveti, kesme kuvveti gibi makine parametrelerinin, performans tahmini için basit simülasyon modellerinin kullanılmasıyla geliştirilmiştir. Bu modelin geliştirilmesinde tünel açma makinelerinin tasarım parametreleri detaylıca kullanılmıştır.

Bilgin ve diğ. (2008), TBM performans tahmini için tam boyutlu doğrusal kazı setinin kullanımı üzerine detaylı çalışmalar yapmış ve elde edilen verileri araziden elde edilen gerçek veriler ile karşılaştırmışlardır. Balci (2009) ise çok kırıklı formasyonlarda kullanılan TBM'lerin performansı üzerine çalışarak arazi ve laboratuardan elde edilen verilerin detaylı karşılaştırmasını yapmıştır.

Hamidi ve diğ. (2010), kaya kütlesi sınıflama sistemi (RMR) kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen eşitliklerle sert kaya formasyonlarda kazı yapan tam cepheli tünel açma makinelerinin performanslarını tahmin etmeye çalışmıştır. Hassanpour ve diğ. (2009), Farrokh ve diğ. (2012) kayaçların jeomekanik özelliklerine dayanan performans tahmin modelleri geliştirmişlerdir. Bu modeller yardımıyla; penetrasyon, itme kuvveti, döndürme momenti ve ilerleme hızı büyüklüklerinin tahmini yapılabilmektedir. Bilgin ve diğ. (2012) ise geçilen formasyonların ortalama basınç dayanımı değerinden spesifik enerji gereksinimini tahmin eden bir eşitlik elde etmişlerdir. Ayrıca yaklaşımlarında, RQD değerindeki değişim oranlarına dayanarak spesifik enerjinin oransal değişimi hakkında detaylı yorumlar yapmışlardır.

Devam etmekte olan Üsküdar-Çekmeköy Metro Projesi kapsamında hazırlanan bu çalışmada, Ümraniye-Çarşı İstasyonları arasında kalan bölgedeki jeolojik formasyonların arazi basıncı dengeleme esasına göre çalışan Tünel Açma Makinesinin (EPB-TBM) performansı üzerindeki etkileri incelenerek analizler yapılmıştır. Analizler esnasında Z360 numaralı TBM'in 109 ile 403 numaralı ringler arasındaki ilerleme miktarı, itme kuvveti, tork, kesici kafa dönüş hızı gibi makine verileri kullanılarak performans analizleri yapılmış ve daha sonra, duraklama ve arıza süreleri ve bunların sebepleri incelenerek sonuçlar ortaya konmuştur. Bu çalışma, karmaşık olarak gözüken TBM verilerinin nasıl sadeleştirileceğini, performans ve arıza verilerinin pratik olarak nasıl değerlendirilebileceğini göstermektedir.

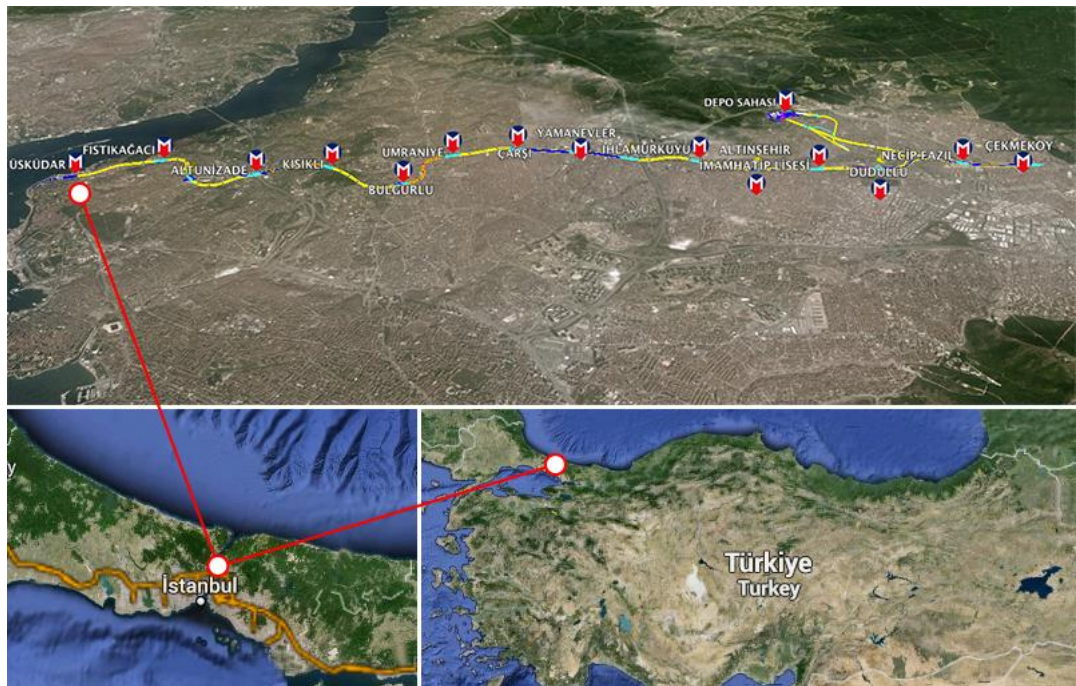
PROJENİN TANITILMASI (DESCRIPTION OF THE PROJECT)

Üsküdar-Çekmeköy Metrosu, İstanbul'un Anadolu yakasında, ilk durağı Üsküdar son durağı ise Çekmeköy-Sancaktepe olan metro projesidir (Şekil 1). 6 Haziran 2012'de temeli atılan proje başlangıçta hafif raylı metro (LRT) olarak düşünülse de daha sonra metro olarak projelendirilmiştir. Uzun süre gündeme gelen projenin 15 Eylül 2011 tarihindeki ihalesi Doğu Grubu'nun verdiği teklif ile kazanılmış ve 7 Mart 2012 tarihinde sözleşme imzalanarak neticelenmiştir. Sözleşmeye göre proje 4 Mayıs 2015 tarihinde tamamlanacaktır. Toplamda 20 km uzunluğunda ve 16 istasyon içeren projede, tüm inşaat ve elektromekanik işler tek elden yürütülecektir. Depo sahası ve depoya bağlanan 2.750 metre bağlantı

tünellerini de kapsayan metro tamamlandıktan sonra Üsküdar ile Çekmeköy-Sancaktepe arası seyahatin 24 dakikaya ineceği öngörülmektedir. Proje hakkındaki teknik bilgiler, Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Üsküdar-Çekmeköy metro projesine ait teknik bilgiler (Technical information of Üsküdar-Çekmeköy metro project) (Doğuş İnş, 2012)

Özellikler	Değerler
Kesit Tipi	TBM - Dairesel NATM - Atnalı
Kazı Çapı	TBM - 6,56 m
Tek Hat Uzunluğu	50.286 m
Uzunluk	26.402 m EPB-TBM 13.366 m NATM 689 m Aç/Kapa
Toprak İşleri	3.857.836 m ³ Kazı 1.047.552 m ³ NATM Kazısı 300.000 m ³ Dolgu
Beton	600.160 m ³
İstasyon Sayısı	16 Adet (2 Adet Aç/Kapa)
Depo Sahası	1 Adet
Segment	96.000 Adet
Diyafram Duvar	14.000 m ²
Beton Enjeksiyonu	8.700 ton
Fore Kazık	170.000 m
Ankraj	200.000 m



Şekil 1. Üsküdar-Çekmeköy metro projesi yer bulduru haritası (Location of Üsküdar-Çekmeköy metro project)

TÜNEL GÜZERGAHININ JEOLJİSİ (TUNNEL ROUTE GEOLOGY)

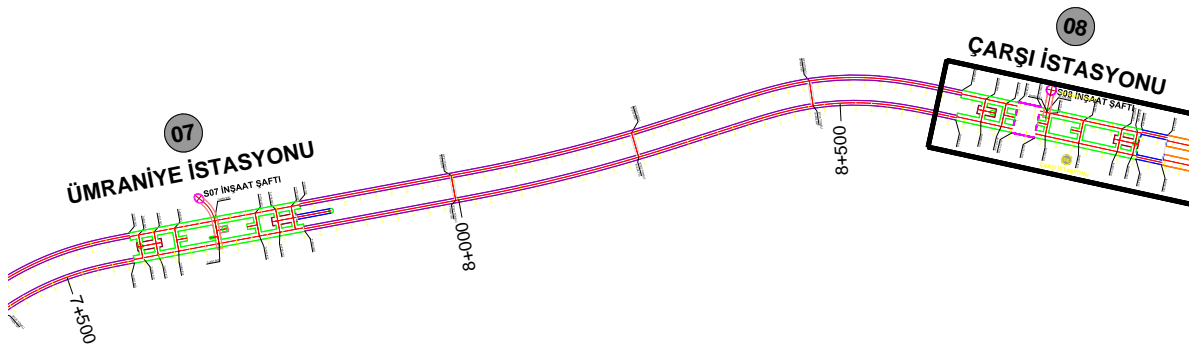
Üsküdar Çekmeköy Metro Projesi kapsamındaki güzergah boyunca ele alınan çalışma alanında İstanbul Paleozoyik istifini oluşturan başlıca formasyonlar olarak, alüvyon ve suni dolgular ile birlikte andezit sokulumları gözlenmektedir.

Üsküdar Çekmeköy Metro Projesi güzergahının Çarşı İstasyonu alanında, "İstanbul Grubu" Paleozoyik yaşlı istiflenme içinde yer alan Gözdağ Formasyonu'nun litolojik seviyeleri bulunmaktadır. Formasyonun temsilci litolojileri ise kiltası-silttaşı ve çamurtaşıdır. Formasyon içinde bu kesimdeki hakim litolojiyi oluşturan kiltası seviyeleri yeşilimsi gri-siyahımsı gri renkli, az-orta-çok ayrıışmıştır. Üst kesimlerde ise tamamen ayrıışmış olup sarımsı kahverengi kil olarak gözlenir. Genellikle ince katmanlı, yer yer laminalıdır. Alta doğru renk siyahımsı griye doğru değişir. Genellikle sık veya çok sık eklemlidir. Eklem yüzeyleri düzlemsel-düz ve 1-2 mm kil dolguludur. Ayrıışmamış seviyelerinde süreksizlik yüzeyleri boyunca dolgu gözlenmez. Alta doğru karbonatlı kiltasına geçmektedir. Zayıf-çok zayıf dayanımlıdır. 21,50 metreden itibaren bölgede yaygın olduğu düşünülen volkanik aktivite ürünü andezitik seviyeler, Gözdağ Formasyonu'nun kiltası seviyeleri ile girift olarak gözlenmiştir. 26,20 metreden itibaren kuyu sonu olan 34,00 metreye kadar gözlenen andezit seviyeleri açık gri, mavimsi gri, yeşilimsi-pembemsi gri renkli az ayrıışmış-ayrıışmamıştır. Orta derecede-seyrek eklemlidir. Eklem çatlak gibi süreksizlik yüzeyleri düzlemsel-pürüzlü olup genellikle dolgu gözlenmez. Ancak yer yer kalsit çatlak ve damar dolguları izlenmiştir. Orta-düşük dayanımlıdır (Doğuş İnş, 2012).

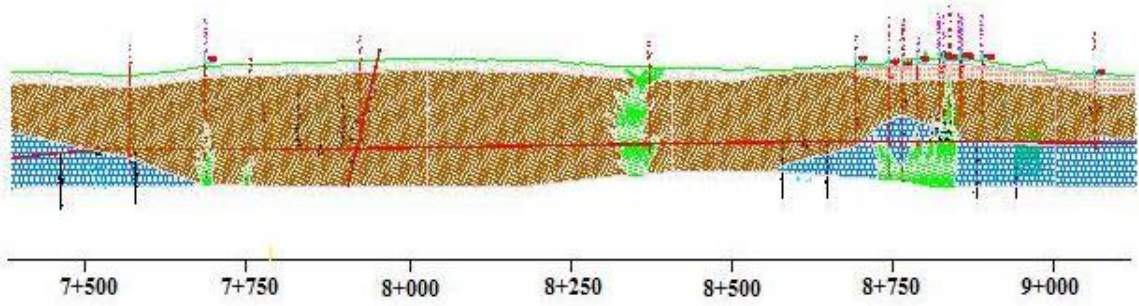
Ümraniye Çarşı İstasyonları Arasında Kalan Bölgenin Jeolojisi (Regional Geology Between Ümraniye-Çarşı Stations)

Ümraniye İstasyonu alanında açılmış sondajlardan SK-ÜMR-1 numaralı sondaj kuyusunda 0,00 - 4,50 m arasında sarımsı kahverengi, katı kıvamlı kumlu kil seviyesini takiben 28,80 m'ye kadar Gözdağ Formasyonu'nun ince taneli kumtaşı-kireçtaşı seviyeleri içinden ilerlenmiştir. 28,80 - 40,00 m'ler arasında ise yer yer altere olmuş, zayıf dayanımlı andezit seviyesi geçilmiştir. 40,00 m derinliğinde açılmış olan SK-ÜMR-2 numaralı kuyuda 0,00 - 5,05 arasında sarımsı kahverengi, katı kıvamlı kumlu kil seviyesi içinden ilerlenmiştir. 5,05 - 33,00 m arasında Gözdağ Formasyonu'nun kiltası ve kireçtaşı seviyeleri geçilmiştir. 33,00 - 40,00 m arasında ise bölgede yaygın olduğu düşünülen volkanik aktivite ürünü andezitik seviyeler Gözdağ Formasyonu'nun kireçtaşı seviyeleri ile girift olarak gözlenmiştir. Andezit seviyeleri yeşilimsi gri renkli, orta derecede ayrıışmış, zayıf yer yer orta sağlam ve sık-çok sık eklemlidir (Doğuş İnş, 2012).

Ümraniye ile Çarşı İstasyonları arasında kalan ve S7-S8 Şaftı olarak adlandırılan bölgenin tünel ve istasyon güzergahı Şekil 2'de gösterilmiştir. Bölgenin jeolojik kesiti ve yapılan sondajların verileri ise sırasıyla Şekil 3 ve Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. S7-S8 şaftı, Ümraniye-Çarşı istasyonları arası (S7-S8 shaft between Ümraniye and Çarşı stations)



Şekil 3. Ümraniye-Çarşı istasyonları arasında kalan bölgenin jeolojik kesiti (Geological profile of the area between Ümraniye and Çarşı stations)

Tablo 2. Ümraniye-Çarşı istasyonları arasında yapılan sondajların verileri (Drilling data values between Ümraniye and Çarşı stations) (Ayson Geoteknik, 2013)

Sondaj No	RQD (%)	GSI	RMR	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (MPa)	UCS (MPa)	Poisson oranı	Permeabilite (m/s)	PLT (Is50) (MPa)	Porozite (%)
S23	27-75	30-40	32-53	2,66	3047	30,7	0,35	9,42-E7	2,22	5,05
S-ÇAR-01	-	-	-	-	-	11,75	-	-	-	-
SÇÜ-1	0-25	35-40	29-45	2,59-2,63	5167	22	-	8,67-E7	-	4,32-6,32
SÇÜ-2	0-44	35-40	27-48	2,50-2,65	4300	34	0,26	5,25-E7	-	4,09-9,65
S25	-	35-40	27-48	2,60-2,66	3625	14,05	0,29	5,09-E7	3,62	1,52-4,66
SK-ÜMR-1	-	-	-	2,65	-	-	-	-	2,42	-
SK-ÜMR-2	-	-	-	-	330	1,8	0,2	-	0,89	-
S26	8-45	35-40	25-46	2,71-2,72	-	-	-	-	3,5	0,31-0,39
SÜÇ-1	0-97	35-40	25-58	2,33-2,61	-	-	-	3,58-E6	-	3,45-14,50

S23, S-ÇAR-01, SÇÜ-1 Çamurtaşı-Kiltaşı (Gözdağ Formasyonu); SÇÜ-2 Çamurtaşı-Kiltaşı ve Diyabaz (Gözdağ Formasyonu); S25 Çamurtaşı-Kiltaşı ve Şeyl (Gözdağ Formasyonu); SK-ÜMR-1, SK-ÜMR-2, S26 Kireçtaşı (Dolayoba Formasyonu); SÜÇ-1 Kireçtaşı ve Çamurtaşı-Kiltaşı (Gözdağ Formasyonu)

PROJEDE KULLANILAN TÜNEL AÇMA MAKİNELERİNİN TANITIMI (DESCRIPTION OF THE TUNNEL BORING MACHINE USED IN THE PROJECT)

Projede, Kadıköy-Kartal metrosunda kullanılan Alman menşeli Herrenknecht marka EPB-TBM'ler kullanılmaktadır (Şekil 4.) Bu TBM'ler çalışma esnasında yer altı sularının yarattığı basınç durumuna göre kazılan noktalara hava ve zemin basıncı vererek hem içeriye su gelmemesini sağlayan, hem de boşalan toprağın yerine su dolmasıyla zeminde muhtemel çökme olaylarına fırsat vermemek için tasarlanmış hidrolik mekanizmalar ile çalışan bir makineler grubudur.

Sistemin içine delme, kazı toprağının atılması, tünel iç kaplamasının montajı, enjeksiyon ve yönlendirme gibi tünel yapım işlemleri için gerekli ekipmanlar entegre edilmiştir. TBM'ler üç ana bölümden oluşmaktadır bunlar; ön kısım ve kesme kafası, kumanda odası ve segment montaj bölümü (orta kısım), kuyruk bölümü ve gantri (arka kısım).

Asıl delme işlemi kalkan ve kesme kafasının bulunduğu ön kısımda gerçekleşir. Kesme kafası dönerek hareket eder ve üzerindeki kesicilerle iri parçalar halinde zemini kazarak tüneli açar. Basınç durumuna göre hava verilir ve zeminin olası çökmesi önlenir. Kazı malzemesi helozonik konveyör ile arka taraftaki taşıma bandına aktarılır ve buradan da kazı vagonlarına yüklenerek tünel dışına alınır. Operatörün kullanacağı kumandalar ve monitör sistemi TBM'in orta kısmında yer alır. Operatör, makine kesme kafasında bulunan deliklerden içeriye akan kazı malzemesini direkt olarak görür ve bir segment

genişliği kadar kazı işlemi yapıldıktan sonra segment ring montajını tamamlar. Kazıcı bölümün arkasında çeşitli ilave sistemler mevcuttur. Bunlar; segment erektör ve segment indirme vinci, gerekli sistemlerin monte edildiği şasi (gantri), delme bölümü ile tünel konveyörü arasında görev yapan ve TBM'i takip eden taşıma bantları, delme bölümü ile tünel dışındaki muhtelif malzemenin stok sahası ile pasa döküm sahası arasında görev yapan ve segment, kazı malzemesi, enjeksiyon harcı ile dizel lokomotiften meydana gelen katar, ana güç kaynağı olarak bir trafo ve tünel havalandırma sistemleri olarak sıralanabilir. Tünel girişinde ise konveyör bant sistemi, enjeksiyon karışım santrali, enjeksiyon ara karıştıracısı, havalandırma fanları, kule vinç ve segment stokları bulunmaktadır.



Şekil 4. Projede kullanılan EPB-TBM (EPB-TBM used in the project)

TBM KAZI PERFORMANS ANALİZİ (CUTTING PERFORMANCE ANALYSIS of TBM)

Kazı esnasında bilgisayar tarafından TBM'in her ayrı bölümünde çeşitli ölçümler kayıt altına alınmaktadır. Proje kapsamında 109 ve 403 numaralı ringler için tutulan kayıtlardan alınan veriler analiz edilmiştir.

TBM İşletim Parametrelerinin Analizi (The Analysis of TBM Operational Parameters)

TBM işletim parametrelerinin analizinde ilk olarak 1 m³'lük kazı için harcanan enerji miktarını belirten spesifik enerji (SE) değerleri hesaplanmıştır. Proje kapsamında 109 ve 403 numaralı ilerlemeler arasında TBM'in harcadığı spesifik enerjinin hesaplanması sırasında, sırasıyla Eşitlik 1-3 kullanılmıştır.

$$P = \frac{2\pi \cdot RPM \cdot T}{60} \quad (1)$$

Burada; P kesici kafa gücü (kW), RPM kesici kafa dönüş sayısı (devir/h), T tork (kNm).

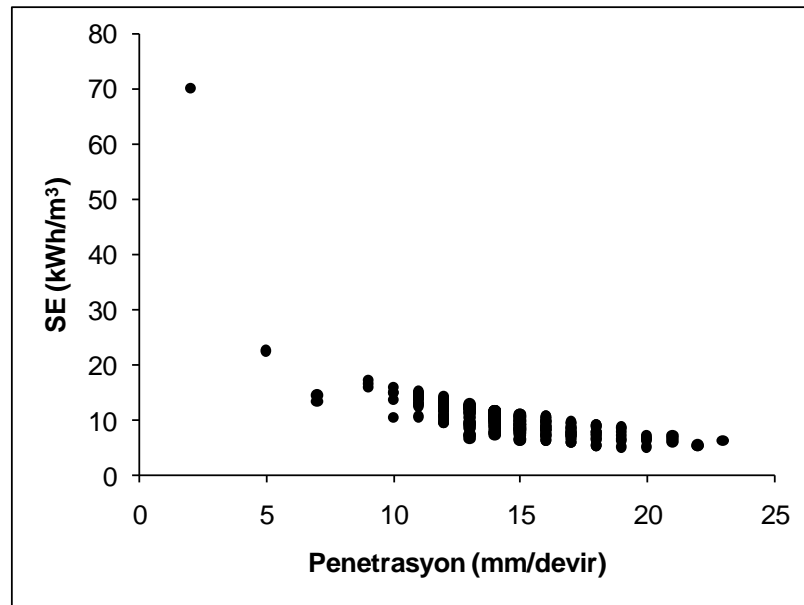
$$ICR = p \cdot RPM \cdot A \quad (2)$$

Burada; ICR anlık kazı oranı (m³/h), p ilerleme (m/devir), RPM kesici kafa dönüş sayısı (devir/h), A tünel kesit alanı (m²).

$$SE = \frac{P}{ICR} \quad (3)$$

Burada; SE spesifik enerji (kWh/m³), P kesici kafa gücü (kW), ICR anlık kazı oranı (m³/h).

Spesifik enerji yukarıdaki eşitlikler kullanılarak her ring için hesaplanmıştır. Kesici kafanın her bir tur dönüşünde elde edilen ilerleme miktarı (mm) ile spesifik enerji arasında bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır. Şekil 5'ten anlaşılacağı üzere, kesici kafanın bir tur dönüşünde elde edilen ilerleme miktarı (penetrasyon) değeri üzerindeki spesifik enerji değerleri üst üste geldiğinden anlaşılır bir dağılım elde edilememiştir.

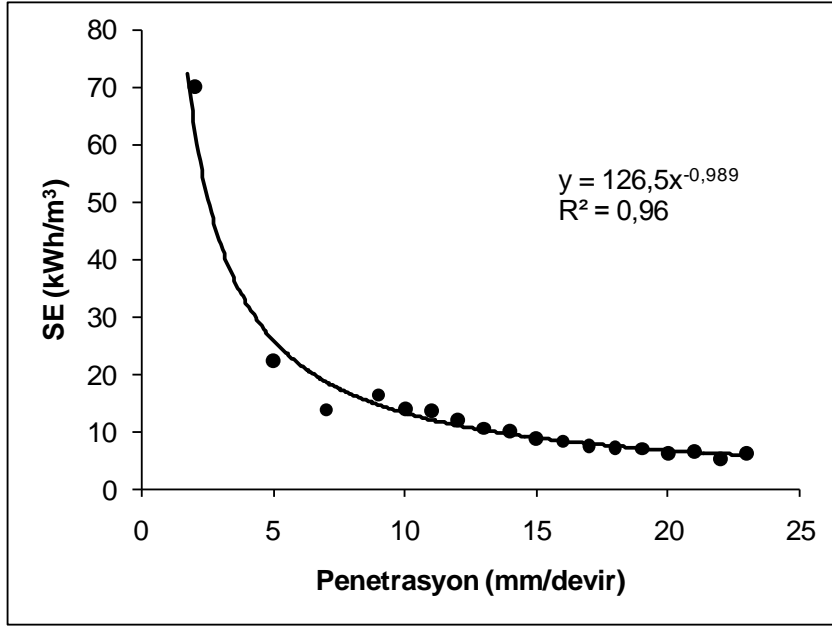


Şekil 5. Spesifik enerjinin penetrasyona bağlı değişimi (Changes in specific energy upon penetration)

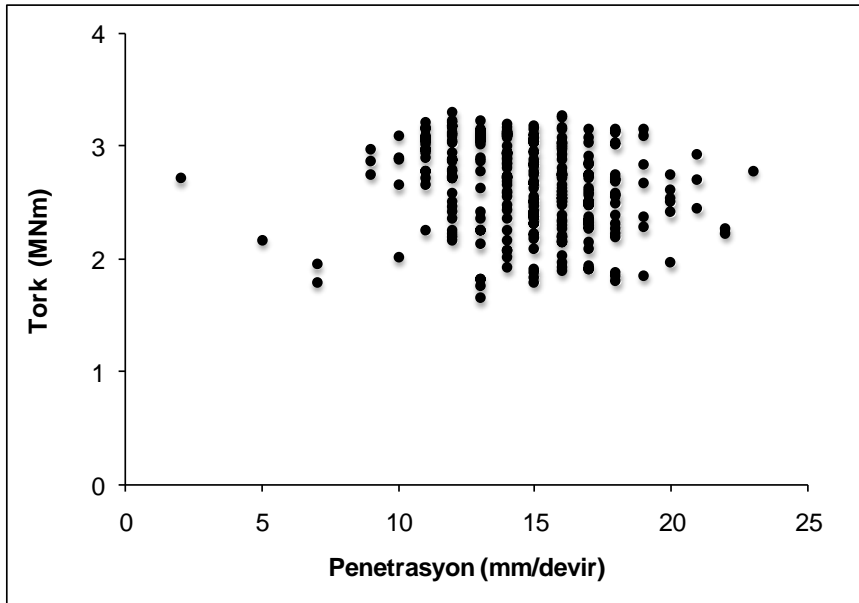
Grafikteki karmaşanın giderilebilmesi ve grafiğin anlaşılır olabilmesi için veri düzenleme yoluna gidilmiştir. Her bir penetrasyon değerine karşılık gelen spesifik enerji değerlerinin ortalaması alınmıştır. Her bir penetrasyon değeri için elde edilen spesifik enerji değerlerin yeni grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'dan anlaşılacağı üzere kesici kafadaki bir tur ilerleme miktarı (penetrasyon) arttıkça spesifik enerji miktarı da üstel olarak azalmaktadır. Penetrasyon ile spesifik enerji arasında 0,96'lık bir doğruluk katsayısı (R²) elde edilmiştir. Bu arazi koşulu, tam boyutlu laboratuvar kesme deneyleri için de aynı mantığı gözler önüne sermektedir; artan kesme derinliklerine (d) karşılık azalan SE değerleri laboratuvar ortamında da elde edilmektedir (Balci 2009).

Tünel Açma Makinası (TBM) kayıtları incelenerek, tork ve penetrasyon arasında bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır (Şekil 7). Analizde 109 ve 403 numaralı ringler arasında her bir penetrasyon değerine karşılık gelen tork değerleri gösterilmiştir. Ancak birçok tork değeri üst üste geldiğinden anlaşılır bir grafik elde edilememiştir. Bu sorunun önüne geçmek amacıyla, aynı penetrasyon değerine karşılık gelen tork değerlerinin ortalaması alınmıştır. Her bir penetrasyon değeri için elde edilen değerlerin yeni grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü gibi, penetrasyonun 10 ile 20 mm/rev olduğu bölgede birbirine yakın tork değerleri gözlenmiş olsa da bu bölgenin dışında kalan penetrasyon değerlerinde keskin artış ve yükselişler göze çarpmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen; artan

penetrasyona karşılık TBM için gerekli olan tork miktarındaki artış daha önceki çalışmalarda da hemen hemen benzer eğilimler göstermiştir (Balci 2009).



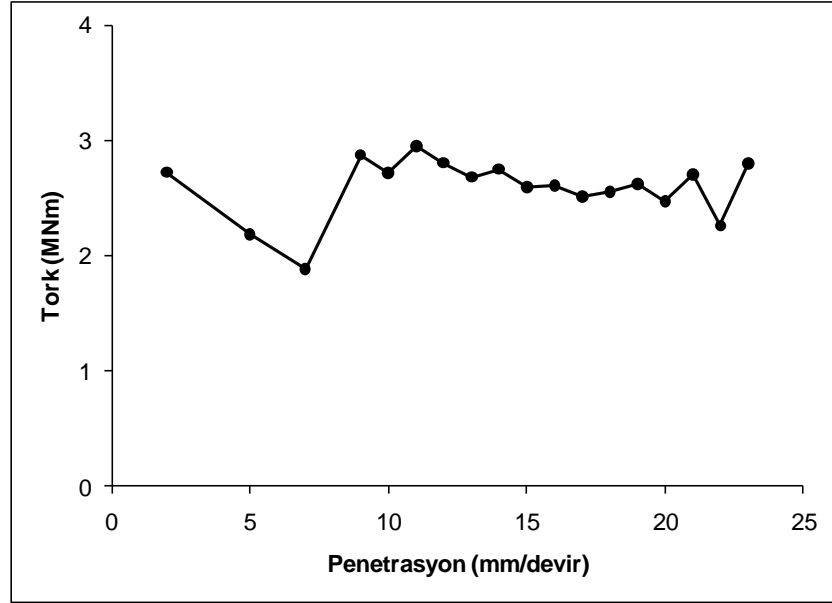
Şekil 6. Spesifik enerjinin penetrasyona bağlı değişimi (düzenlenmiş) (Changes in specific energy upon penetration - edited)



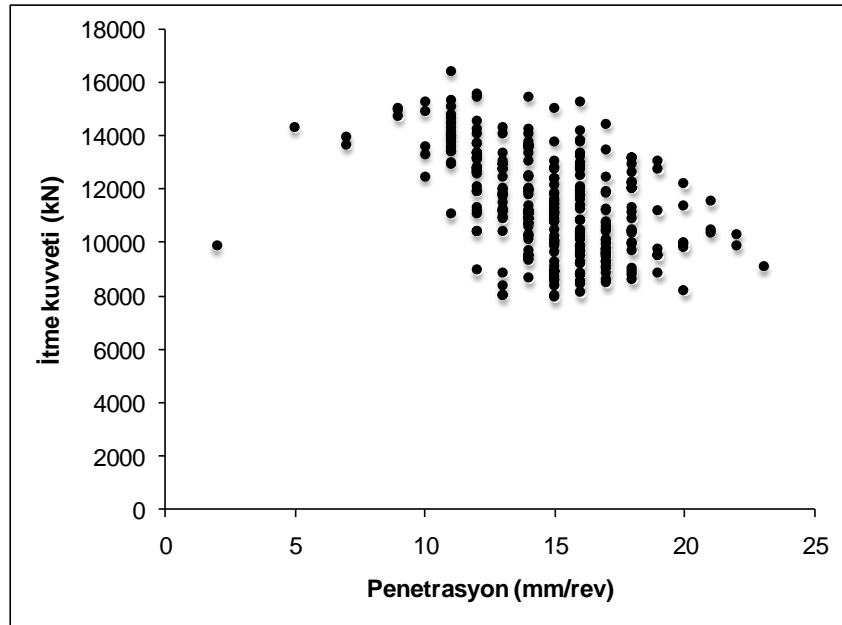
Şekil 7. Torkun penetrasyona bağlı değişimi (Changes in torque upon penetration)

Proje kapsamında, 109 ve 403 nolu ringler arasındaki TBM kayıtlarında penetrasyon ve itme kuvveti (thrust) arasındaki ilişki incelenmiştir. Her bir penetrasyona karşılık gelen itme kuvveti değerleri belirlenerek Şekil 9'da gösterilmiştir. Ancak birçok itme kuvveti değeri üst üste geldiği için anlaşılır bir sonuç gözlemlenememiştir. Bu sorunun önüne geçmek amacıyla her bir penetrasyon değerine karşılık gelen itme kuvveti değerlerinin ortalaması alınmıştır. Oluşturulan yeni grafik Şekil 10'da gösterilmiştir. Genel olarak çalışılan bölgenin RQD değerinin % 0-45 arasında yer yer ise % 75 ile % 97 arasında; kayaların tek eksenli basınç dayanımı (UCS) değerlerinin ise 1,8 MPa ile 30,7 MPa arasında değiştiği

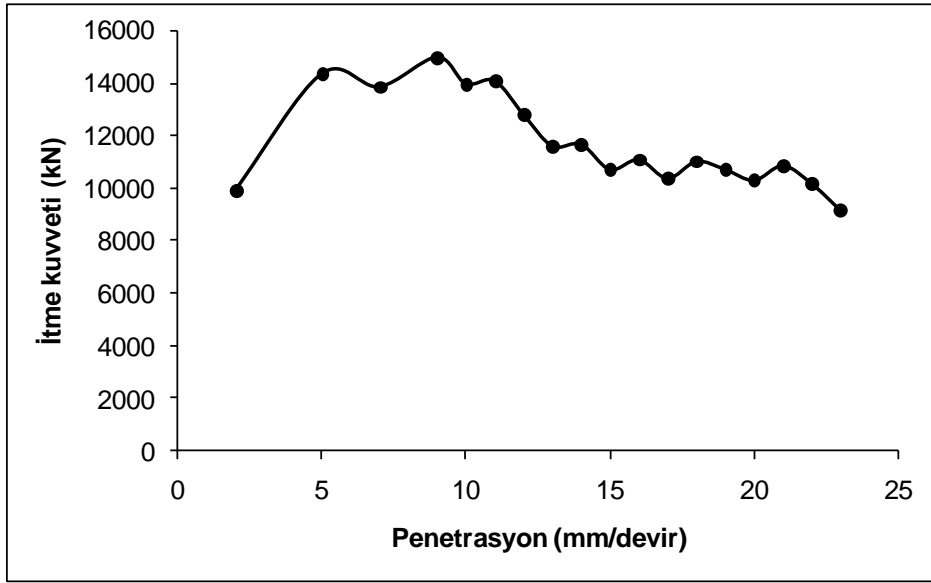
görülmüştür. Şekil 10'da, artan penetrasyon değerlerinde itme kuvveti değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu da geçilen bölgede UCS ve RQD değerlerinin düşük olduğunda yüksek penetrasyonlara ulaşıldığını göstermektedir. Genel olarak sert kaya formasyonlarda penetrasyon arttıkça TBM'in itme kuvveti ihtiyacının artması düşünülebilir (Balci 2009), fakat bu çalışmada, itme kuvveti gereksiniminin artan penetrasyon ile düştüğü gözlemlenmektedir. Bunun en önemli sebebi, TBM'in RQD değeri düşük kırıklı çatlaklı formasyon koşullarında çalışıyor olması gösterilebilir.



Şekil 8. Torkun penetrasyona bağlı değişimi (düzenlenmiş) (Changes in torque upon penetration-edited)



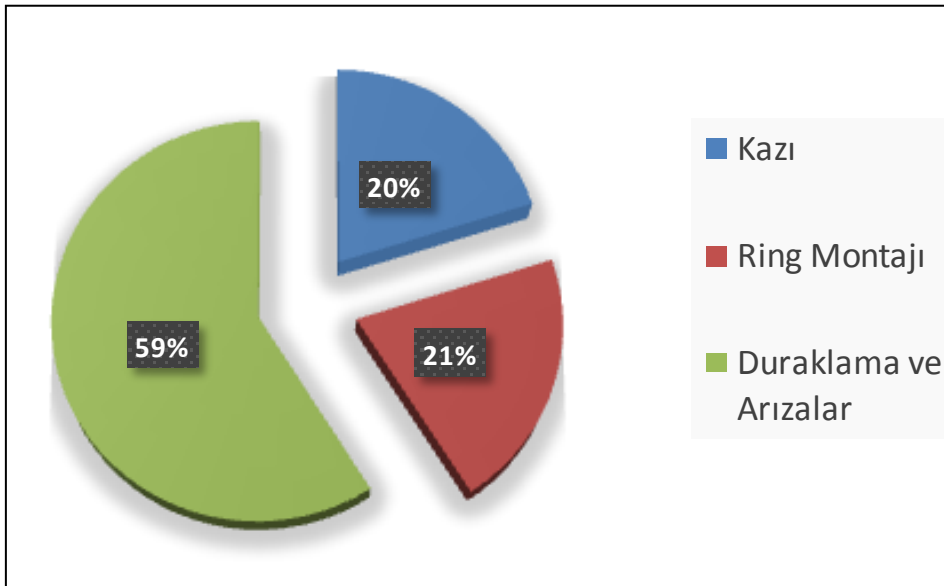
Şekil 9. İtme kuvvetinin penetrasyona bağlı değişimi (Changes in thrust upon penetration)



Şekil 10. İtme kuvvetinin penetrasyona bağlı değişimi (düzenlenmiş) (Changes in thrust upon penetration - edited)

Makineden Faydalanma Oranının Belirlenmesi (The Analysis of TBM Filed Utilization)

Proje kapsamında incelenen 109 ile 403 numaralı ringler arasında toplam geçen süre 973 saat 23 dakika 15 saniye olarak raporlanmıştır. Bu sürenin; 196 saat 14 dakika 22 saniyesi kazı, 202 saat 29 dakika 42 saniyesi ring montajı ve 574 saat 39 dakika 11 saniyesi durma süresi olarak kayıtlara geçmiştir. Bu süreler ile oluşturulan dairesel grafik Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekil 11'den anlaşılacağı üzere makina faydalanma oranı kazı yüzdesi olan % 20 olarak belirlenmiştir. Ring montajı için harcanan süre ise toplam sürenin % 21'dir. Toplam sürenin % 59'unda çalışma çeşitli sebeplerden ötürü yapılamamıştır.



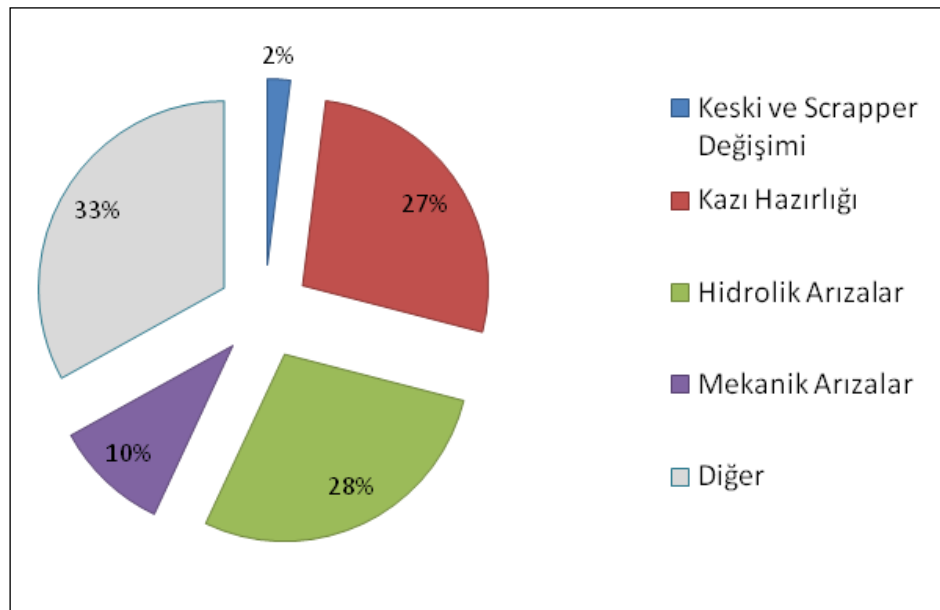
Şekil 11. TBM kullanımının dağılımı (TBM machine utilization)

TBM arızalarının değerlendirilmesi yetkili kişiler tarafından tutulmuş vardiya kayıtlarının yanı sıra TBM kayıtlarında bulunan kazı esnasında alınan alarmlardan da faydalanılmıştır. Bu alarmlar arasından kazı çalışmalarının devamlılığını etkilemeyen alarm tipleri proje mühendisleri ile birlikte belirlenmiş ve değerlendirmeye alınmamıştır. Çalışma esnasında en önemli durma sebeplerinin kazı hazırlığı ve keski değişimi olduğu görülmüştür. İncelenen 109 ve 403 numaralı ringler arasında, 166 (1 adet), 226 (2 adet), 322 (1 adet), 403 (1 adet) numaralı ringlerde toplamda 5 keski değişmiştir. Keski değişim süresi 25-35 dakika arasında değişmektedir. Kazı hazırlığı ise TBM'in konumuna göre 30-35 dakika arasında tamamlanabilmektedir. Ayrıca toplamda 10 ringde çeşitli adetlerde küreyici (scraper) değişimi yapılmıştır. Çalışılan bölge boyunca TBM kayıtlarında 50 farklı alarm tipinde toplamda 14.362 alarm alınmıştır. Bunlardan 24 tanesi çalışmayı durdurmamakta olup, değerlendirmeye katılmamıştır. Geri kalan 26 alarm ise kendi aralarında mekanik ve hidrolik arızalara yönelik olarak gruplandırılmıştır.

İncelemeler sonucunda durma sebepleri keski ve küreyici değişimi, kazı hazırlığı, mekanik arızalar, hidrolik arızalar ve diğer sebepler olmak üzere beş ana başlık altında toplanmıştır. Yaklaşık 198 saat olarak hesaplanan diğer sebepler başlığı; vardiya değişiminde geçen süreler, yemek paydosları, kontroller sebebiyle yapılan beklemeleri içermektedir. Her bir başlık için süre ve yüzdeleri Tablo 3'te, dairesel grafik gösterimi Şekil 12'de sunulmuştur.

Tablo 3. Duraklama ve arıza sebeplerinin süreleri (Durations of stoppage and breakdown)

Sebebe	Süre
Keski ve Scrapper Değişimi	5:34:30
Kazı Hazırlığı	153:50:00
Hidrolik Arızalar	162:08:07
Mekanik Arızalar	55:00:28
Diğer	198:06:06
TOPLAM	574:39:11



Şekil 12. Arıza ve duraklamaların analizi (Analysis of stoppage and breakdowns)

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Tam cepheli tünel açma makinelerinin performanslarının önceden belirlenmesi proje iş-zaman etütlerinde önem arz etmektedir. Bu çalışma, karmaşık olarak gözüken TBM verilerinin nasıl sadeleştirileceğini, performans ve arıza verilerinin nasıl değerlendirilebileceğini göstermektedir. Kazısı yapılan basınç dayanımı 110-130 MPa olan kireçtaşı ve diyabaz dayklarında artan penetrasyola makine itme kuvvetlerinin de önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Daha sonrasında ise daha düşük RQD ve basınç dayanımına sahip formasyonların kazısında itme kuvvetlerinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Makineden faydalanma oranını kısıtlayan en önemli parametre ise TBM’de meydana gelen arıza ve duraklamalardır. TBM çalışması esnasında alınan alarmlar iyi değerlendirilmelidir. Böylelikle daha sonra oluşabilecek arızaların önüne geçerek beklemeler azaltılabilir ve makineden faydalanma oranı artırılabilir. Bu çalışma farklı tünellerin kazısı için kullanılan TBM’lerin veri sistemlerinin detaylıca analiz edilmesi ile geliştirilebilir. Bu amaç için TBM ile geçilen formasyonların UCS ve RQD sınıflamasının iyi yapılmasına dikkat edilmelidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Maden Mühendisi Bilal Şahin GÜMÜŞ’ün lisans bitirme ödevinden faydalanılarak hazırlanmıştır. Saha çalışmaları ve veri toplanmasında desteğini esirgemeyen Üsküdar-Çekmeköy Metro Projesi Tasarım Şefi Barış ÖZCAN’a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ayson Geoteknik ve Deniz İnşaat A.Ş., 2013, “Üsküdar-Ümraniye-Sancaktepe Metro Projesi Zemin Araştırma Sondajları ve Laboratuvar Deneyleri Geoteknik Veri Raporu”, İstanbul, s.14.
- Balci, C., 2009. “Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: A case study in Kozyatagi-Kadikoy Metro Tunnel, Turkey”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Cilt 24, ss.423-435.
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Tumac, D., Akgul, M., Yuksel, A., 2008. “The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in Istanbul Kozyatagi-Kadikoy Metro Tunnels”, In *World Tunnel Congress*, Akra, India, ss. 1509-1517.
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Tumac, D., Avunduk, E., 2012. “Rock mechanics aspects related to cutting efficiency of mechanical excavators, 25 years of experience in Istanbul”, *Eurock 2012*, Stockholm.
- Barton, N., 1999, “TBM Performance estimation in rock using QTBM”, *Tunnels and Tunnelling International*, Eylül, ss. 30-34.
- Bamford, W. E., 1984, “Rock test indices are being succesfully correlated with tunnel boring machines performance”, *Fifth Australian Tunnelling Conference*, Sydney, ss. 218-221.
- Bieniawski, Z., T., Celada, B., Galera J., Alvarez, M., 2006, “Rock mass excavability (RME) indicator: new way to selecting the optimum tunnel construction method”, *Proceedings of the ITA-AITES World Tunneling Congress*, Seoul, Korea, ss. 15-23.
- Cassinelli, F., 1982, “Power consumption and metal wearing tunnel boring machines: Analysis of tunnel boring operation in hard rock”, *Tunnelling’82*, IMM, London, ss. 73-81.
- Copur, H., Tuncdemir, H., Bilgin, N., Dincer, T., 2001. “Specific energy as a criterion for use of rapid excavation systems in Turkish mines”, *Trans Inst Min Metal. Section A*, Cilt 110:A, ss. 149-157.
- Doğuş İnşaat ve Ticaret A.Ş., 2012, “Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesi Geoteknik Veri Raporları”.
- Farrokh, E., Rostami, J., Laughton, C., 2012, “Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Cilt 30, ss. 110-123.

- Farmer, I. W., Glossop, N. H., 1980, "Mechanics of disc cutter penetration", *Tunnels and Tunneling*, Cilt 12, ss. 22-25.
- Graham, P. C., 1976, "Rock exploration for machine manufacturers", *Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, South Africa*, Kasım, ss. 173-180.
- Hamidi, J. K., Shahriar, K., Rezai, B., Rostami, J., 2010, "Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Cilt 25, Sayı 4, ss. 333-345.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Kamehchiyan, M., Bruland, A., Tavakoli, H.R., 2009, "TBM performance analysis karaj water conveyance tunnel". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Cilt 43, Sayı 4, ss. 427-445.
- Hughes, H.M., 1986, "The relative cuttability of coal-measures stone", *Mining Science and Technology*, Cilt 3, Sayı 2, ss. 95-109.
- Lislerud, A., 1988, "Hard rock tunnel boring: prognosis and costs", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Cilt 3, Sayı 1, ss. 9-17.
- Mc-Feat, I., Tarkoy, P. J., 1979, "Assessment of tunnel boring machine performance", *Tunnels and Tunnelling*, ss. 33-37.
- Peach, T., 1994, "TBM optimisation", *World Tunnelling*, Nisan, ss. 120-123.
- Rostami, J., Ozdemir, L., 1993, "A new model for performance prediction of hard rock TBM's", *Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*, Boston MA, 13-17 Haziran, ss. 793-809.
- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D. M., 1994, "Performance prediction: a key issue in mechanical hard rock mining", *Mining Engineering*, Kasım, ss. 1263-1267.
- Rostami, J., 2008, "Hard rock TBM cutterhead modeling for design and performance prediction", *Geomechanik und Tunnelbau*, Cilt 1, ss. 18-28.
- Stack, B., 1995, "Encyclopedia of tunnelling mining and drilling equipment", *Mining Hobart Muden Publishing Company*, Hobart, Australia, s. 1911.
- Wijk, G., 1992, "A model of tunnel boring machine performance", *Geotechnical and Geological Engineering*, Cilt 10, ss. 19-40.
- Yagiz, S., 2008, "Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Cilt 23, Sayı 3, ss. 326-339.