

Kayanın Jeomekanik Özelliklerinin Metro Tünellerinde Kullanılan Tünel Açma Makinelerinin Performansına Etkisi

The Effect of Geomechanical Properties of Rock on the Performance of Tunnel Boring Machines Employed in Metro Tunnels

ALİ YÜKSEL¹, Nuh BİLGİN²

¹Yapı Merkezi İnşaat ve San. A.Ş., Hacı Reşit Paşa Sok. No 4A, 34676 Üsküdar, İstanbul

²İTÜ Maden Fakültesi, Ayazağa Kampüsü, 34469 Maslak, İstanbul

Geliş (received) : 26 Aralık (December) 2013

Kabul (accepted) : 04 Mart (March) 2014

ÖZ

Kadıköy Kartal Metro Projesi'nin Kozyatağı ile Kadıköy arasındaki güzergah kesiminde çift tüp şeklinde hat tünelleri, istasyon ve makas yapıları bulunmaktadır. Bu projede, istasyon ve makas tünelleri, değişken kesitlerde olmaları nedeniyle konvansiyonel kazı yöntemi olan Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) ile açılmıştır. Toplam 12.3 km uzunluğundaki hat tünelleri ise hem açık biçim hem de kapalı-basınçlı biçimde çalışabilen özelliklere sahip TBM makineleri ile açılmıştır. Jeolojik araştırmalar sırasında proje güzergahının Kadıköy ile Kozyatağı arasında kalan kesiminde 107 adet sondaj yapılmıştır. Bu sondajlardan alınan kaya örnekleri üzerinde tünellerdeki kaya ortamın tanımlanmasına yönelik olarak indeks, dayanım ve kaya kütle parametreleri belirlenmiştir. Tünel açma makinelerinin (TBM) kullanılmaya başlamasından bu yana çeşitli araştırmacılar tarafından kazı performansı ve kaya kütlelerinin jeomekanik parametreleri arasındaki ilişkiler konusunda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada; Kadıköy Kartal Metrosu örneğinde, TBM kullanılarak yapılan tünel açma çalışmalarında kaydedilen kazı parametreleri ile yine güzergahın bu bölümünde açılmış sondajlardan elde edilen kaya dayanım parametreleri arasındaki istatistiksel ilişkiler araştırılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, kayanın jeomekanik parametreleri ile kazı performansı arasında bir, iki ve üç değişkenli regresyon analizleri yapılmış ve, istatistiksel açıdan anlamlı ilişkiler bulunmuştur. Bulunan ilişkiler yardımıyla benzer kaya koşulları içerisindeki TBM kazılarında jeomekanik büyüklükler kullanılarak kazı performansı önceden belli bir yaklaşıklıkla belirlenebilecektir. Benzeri uygulamalardan gelecek verilerin bir veri bankasında toplanması ve değerlendirilmesiyle, yapılacak kestirimlerin hassasiyetinin artacağı muhakkaktır.

Anahtar Kelimeler: EPB, kaya dayanım parametreleri, metro, TBM, tünel, kazı performansı,

ABSTRACT

Twin railway tunnels, stations and turnout structures exist in the Kozyatağı-Kadıköy section of the Kadıköy-Kartal Metro Project. Stations and switch tunnels were bored by NATM, which is a conventional excavation method, since these structures have varying cross sections. 12.3 km long track tunnels were excavated with EPB type TBMs that can operate in both open and closed-pressurized modes. During the geological investigation studies, a total of 107 boreholes were drilled between Kozyatağı and Kadıköy. The rock samples obtained from these drillings were examined by considering rock mass indices, compressive strengths and rock mass parameters in order to characterize the rock medium. From the beginning of TBM utilization in tunnel excavations, number of studies were conducted by various researchers for determining the relations between TBM excavation performance and geomechanical rock mass parameters. In this study, the statistical relationships between the recorded excavation data during tunneling and rock strength parameters obtained from drillings were investigated based on the Kadıköy-Kartal Metro

Project. Trials with one, two and three variable regression analyses were examined between the geomechanical parameters and excavation performance and statistically significant correlations were obtained. With the help of these regression models, excavation performance can be predicted within an acceptable range from the geomechanical properties for TBM excavations in similar rock conditions.

Keywords: EPBM, excavation performance, metro, tunnel, rock strength parameters, TBM

GİRİŞ

Günümüzde, özellikle büyük kentlerde metro, kanal ve karayolu gibi altyapı yatırımlarının artmasıyla birlikte, bu yapılar için açılan tünellerde TBM kullanımının giderek arttığı görülmektedir. TBM ile tünel açılması özellikle uzun tünellerde konvansiyonel (örneğin delme patlatma) yöntemlere nazaran daha ekonomik olduğu gibi, işin bitirilme süresi açısından da avantaj sağlamaktadır. Konvansiyonel yöntemlerde en fazla 5-6 m/gün'lük hızlara erişilebilirken TBM ile açılan tünellerde ortalama 10-15 m/gün düzeylerine, hatta makine kullanım oranının yüksek olarak gerçekleştiği durumlarda 25-60 m/gün gibi ilerleme hızlarına kadar ulaşılabilir. Ancak, TBM makineleri konvansiyonel tünel açma yöntemlerinde kullanılan makine ve ekipmanlara göre birkaç kat daha fazla yatırım gerektirmektedir. TBM yapım teknolojisindeki güncel gelişmeler ve güç koşullarda TBM ile tünel açma deneyiminin artmasına rağmen hala her tür jeolojik koşulda çalışabilecek olan çok özellikli bir TBM makinesi mevcut değildir. Diğer bir ifadeyle, üretilen TBM'ler jeolojik değişiklikleri belirli bir ölçüde göğüsleyebilmektedir. Bu nedenle TBM kullanılan tünel projelerindeki jeolojik araştırmaların yeteri düzeyde özenli ve ayrıntılı olarak yapılması, makine imalatının da buradan elde edilen verilerin ışığı altında gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

TBM ile açılacak tünel projelerinde TBM seçimi, diğer bir ifadeyle hangi tipte bir TBM'in kullanılacağı projenin ekonomikliği kadar başarısı açısından da önemli bir konudur. Uygun olmayan TBM seçimlerinde beklenen ilerleme hızlarına ulaşamamakta, dolayısıyla proje öngörülen sürede bitirilememektedir. Hatta, TBM'in tamamen kullanım dışı bırakılıp, kazının konvansiyonel yöntemle tamamlanmak durumunda kalındığı dramatik örnekler de bulunmaktadır (Lui ve Chang, 2005; Lin ve Yu., 2005).

TBM'in kazı performansı ile ilgili ilk çalışmalar masif kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü, sertliği ve aşındırıcılığı gibi mekanik özellikleri ile penetrasyon, itme kuvveti ve tork gibi kazı parametreleri üzerinde olmuştur. Bu konudaki araştırmaların başlıcaları arasında; Kato (1971), Saito (1971), Roxborough ve Philips (1975), Graham (1976), Özdemir (1977), Snowdown ve diğ. (1982), Nelson (1985), Sani-no (1985), Rostami ve Özdemir (1993)'ün yaptığı çalışmalar gösterilebilir (Okubo vd., 1993'den) Bu araştırmaların çoğu kuramsal ve yarı görgül çalışmalardır.

Yukarıda değinilen çalışmaların çoğu masif kaya malzemesinin mekanik özelliklerine dayanmakta olup, kaya ortamının tüm jeomekanik özelliklerini içermemektedir. Ancak kayanın yerinde davranışını, dolayısıyla kazı performansını etkileyen özellikleri arasında eklemleme, blok boyutu, eklem veya tabaka yönelimi, süreksizliklerin yüzey pürüzlülüğü ve ayrışma durumu gibi alt özellikler bulunmaktadır. 1965'li yıllarda önerilen kaya kütle sınıflandırmalarından sonra kaya kütlesi özellikleri ile TBM kazı performansı arasındaki ilişkiler de araştırılmaya başlanmıştır. Barton vd. (1974)'te önerdikleri Q sınıflama sistemine, kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı ve kuvars içeriği, yatay arazi yükü, disk yükü ve disk ömür indeksi parametrelerini de ekleyerek QTBM ölçütü geliştirmiş ve bu parametre ile ilerleme hızı arasındaki ampirik bağıntılar vermiştir (Barton, 2000). Bienawski vd. (2006) de az-çok benzeri parametrelere dayanan "Kaya Kütle Kazılabilirliği" (RME) ölçütünü ortaya koymuş ve İspanya ile Etiyopya'daki tünellerde yapılan gözlemlerinden faydalanarak ortalama ilerleme hızı, tork ve disk yükü arasındaki ilişkileri önermişlerdir. Sapigni vd. (2002) İspanya'daki tünellerde, Hassanpour vd. (2009), Farrokh vd. (2012) ve Oraee vd. (2010) İran'daki tünellerde, Bilgin vd. (1999) ise Türkiye'deki tünellerde

kayanın jeomekanik özelliklerini esas alan kazı performans tahmin modellerini geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu tahmin modelleri ile penetrasyon, itme kuvveti, döndürme momenti ve ilerleme hızı büyüklükleri için kestirim yapılabilmektedir.

Belli bir kazı dönemi için gerekli süreçler dik-kate alındığında, başlıca kazı, destekleme gibi üretim süreçleri ve TBM ile ilgili bakım, arıza, TBM dışı; jeolojik, malzeme temini, ölçme, havalandırma, koordinasyon eksikliği vb. nedenlerden kaynaklanan gecikmeler sözkonusudur. Toplam kazı süresi içerisindeki gecikmelerin bir kısmı şantiye öğrenme sürecinde gerek çalışanların deneyiminin artmasıyla, gerekse teknik sorunların giderilmesiyle büyük ölçüde azaltılabilmektedir.

Bu çalışma ilk yazarın doktora tez çalışmasının bir kısmını oluşturmakta olup, çalışmada Kadıköy Kartal Metro Projesi'nde güzergahın bir kısmını oluşturan Kadıköy-Kozyatağı arasındaki hat tünellerinde kullanılan EPB-TBM'lerin kazı kayıtları ve sondaj çalışmalardan elde edilen verileri kullanarak TBM kazı performans parametreleri ile jeomekanik büyüklükler arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

KADIKÖY KARTAL METRO PROJESİ

Kadıköy-Kartal Metrosu Kadıköy'de deniz ulaşımı ile bütünleşik olarak şehrin doğu eksenine doğru toplu ulaşımı sağlayacak raylı ulaşım sistemi olarak planlanmıştır. 21.6 km uzunluğundaki güzergah boyunca 16 istasyon yer almaktadır. Proje, Kadıköy meydanında bulunan istasyon ve buna bağlı kuyruk tünelleri ile başlamakta ve Yeldeğirmeni semtinin altından ilerleyerek İbrahimağa İstasyonu'na ulaşmaktadır. Metro hattı bu istasyonda İstanbul'un Avrupa yakasını Anadolu yakasına bağlayan Marmaray projesi ile kesişmektedir. İbrahimağa İstasyonu'ndan sonra E-5 karayolu izdüşümüne gelen hat Acıbadem Köprüsü'nden itibaren güzergah sonuna kadar bu karayoluna yaklaşık paralel olarak ilerlemektedir. Metro hattı üzerindeki istasyonlar, sistemin dikine yolcu transferlerinin kolayca yapılabilmesine olanak sağlayacak şekilde E-5 karayolunu kesen kavşak noktalarında veya yakınında planlanmıştır (Şekil1). Tünellerde örtü kalınlığı 8-60 m arasında değişmekte olup

ortalama kalınlık 30 m civarındadır. Tünel derinliği, topoğrafyaya bağlı olmakla beraber, bir yandan metro sisteminin en yüksek tırmanma eğimine, diğer yandan da istasyon derinliğine bağlı olarak değişmektedir.

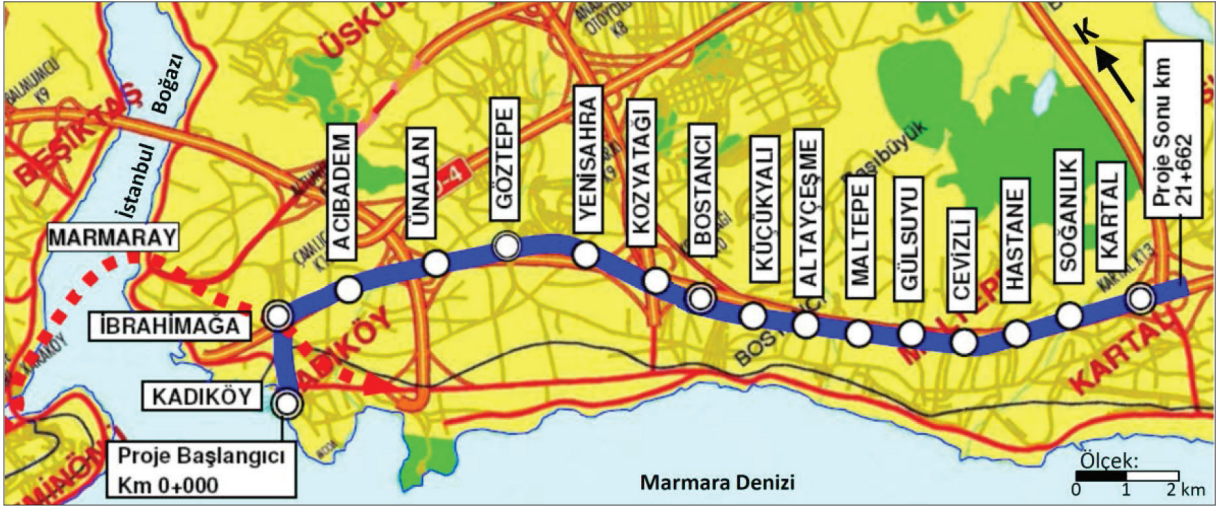
TBM İLE TÜNEL AÇMA ÇALIŞMALARI

Tünel kazısı sırasındaki yeraltısuyu seviyesi değişkenliklerinin ve yüzeyde oturma meydana getiren zemin kayıplarının minimum düzeyde kalmasını sağlaması, açılan tünelin ön döküm kaplamalar ile hemen desteklenmesine olanak vermesi dolayısıyla hat tünellerinin açılmasında, "Pasa Basıncı Dengelemeli Kazı Makinesi (EPB-TBM) kullanılması öngörülmüştür. Ancak kesit boyutları hat tünellerinden farklı olan makas ve istasyon tünelleri NATM yöntemi ile açılmıştır.

Kadıköy ile Kozyatağı İstasyonları arasındaki hat tünellerinin kazısına, daha uygun işletme koşullarına sahip olması dolayısıyla Kozyatağı İstasyonu'ndan başlanmış ve Kadıköy yönüne doğru ilerlenmiştir. TBM'lerden ilki Haziran 2007'de sahaya gelmiş ve montajı yapılarak sol hatta 14 Ağustos 2007'de, değeri ise sağ hatta 18 Ekim 2007'de de kazıya başlamıştır. Çizelge 1'de açılan tünel uzunlukları ve tünel çalışmalarının kronolojik gelişimi özetlenmiştir.

Tünellerin TBM ile yaklaşık yarı mesafeye kadar açılmasından sonra makinelerin destek sistemleri Ünalın İstasyonu'nun hemen yakınındaki karayolu kavşak kolu içerisindeki alanda açılmış olan S5A ve S5B kuyularına aktarılmıştır. Böylece nakliye süresi kısaldığı gibi taşıma ekipmanları ve diğer destek sistemlerinden de tasarruf etme yoluna gidilmiştir. Sağ hatta TBM ile 6075.8 m tünel kazılarak toplam 4084 adet öndöküm beton destek halkası yerleştirilmiş, sol hatta ise 6305.0 m tünel kazılarak toplam 4223 adet destek halkası yerleştirilmiştir. Kazı işleri TBM'lerin Kadıköy İstasyonu'nun ilerisindeki M1 makasına gelmesiyle, sağ hatta 11.06.2010'da, sol hatta ise 09.07.2010'da tamamlanmıştır.

Her iki hattaki tünelde de birbirinin benzeri EPB tipi TBM kullanılmıştır (Çizelge 2). Bu makineler hem "açık biçim", hem "kapalı biçim" hem de "basıncılı biçim"de kazı yapabilecek şekilde üretilmiştir. Açık biçimde, kazılan malzeme kazı odasının merkezinde bulunan bantlı konveyörle



Şekil 1. Kadıköy – Kartal Metrosu güzergahının yerleşimi ve istasyonlar (Yüksel vd., 2006)
Figure 1. Kadıköy – Kartal Metro alignment and layout of stations (Yüksel et al., 2006)

Çizelge 1. Kozyatağı–Kadıköy arasında TBM ile tünel açma çalışmaları (Yüksel, 2013)

Table 1. Tunneling works with TBM between Kadıköy and Kartal Stations (Yüksel, 2013)

Açıklama	Sağ Hat (Hat 1)	Sol Hat (Hat 2)
Güzergah uzunluğu (m)	8072.4	7978.4
Toplam TBM tünel uzunluğu (m)	6075.7	6266
Öndöküm kaplama halkası adedi	4084	4223
Kazı başlangıç tarihi	18.10.2007	14.08.2007
Kazı bitim tarihi	09.07.2010	11.06.2010
Fili kazı süresi (gün)	795	875
Toplam süre (gün)	995	1032
Ortalama kazı hızı (m/gün)	10.0	9.3

alınmaktadır. Kapalı biçim ve basınçlı biçimde ise kazılan malzeme, kazı odasından burgulu konveyör ile alınmaktadır.

Tünelin desteklenmesinde iç çapı 5.70 m, kalınlığı 30 cm ve genişliği 1.50 m olan 5+1 segment dizilimine sahip üniversal tipte ön döküm betonarme halka kullanılmıştır.

METRO GÜZERGAHININ JEOLJİSİ VE KAZILAN FORMASYONLARIN JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİ

TBM kazıları sırasında kazı sırasına göre başlıca Kartal, Baltalimanı, Tuzla ve Trakya formasyonlarından geçilmektedir (Şekil 2).

Kartal Formasyonu, sarımsı kahverengi, laminalı, seyrek olarak silttaşı ve kumtaşı ara tabakalı, fosilli şeyl ve kireçtaşı seviyelerinden oluşmaktadır. Şeyl tabakalarının bulunduğu kısımlar zayıf dayanımlı, çatlaklı-çok sık çatlaklı olmasına karşın, kireçtaşı tabakalarının ağırlıkta olduğu kısımları ise daha az çatlaklı ve görel olarak daha yüksek dayanımlıdır (Ketin, 1992; Seymen, 1995).

Kartal Formasyonu güzergahta Hasanpaşa Köprüsü (km 3+800) civarından başlamakta, Bostancı deresinde (~km 11+000) yerini arkozlardan oluşan Kurtköy formasyonuna bırakmaktadır.

Tuzla Formasyonu başlıca yumru kireçtaşlarından oluşmakta ve bunlar çok ince tabakalı-

Çizelge 2. Kullanılan EPB-TBM'lerin teknik özellikleri (Yüksel, 2013)

Table 2. Specifications of the EPB-TBMs employed in tunnel excavations (Yüksel, 2013)

Teknik özellik	Büyükük
Kazı çapı	6.57 m
Kalkan çapı	6.54 m
Kalkan boyu	8.23 m
TBM gövde ağırlığı	350 ton
Toplam kurulu güç	2100 kW
Kesici kafa gücü	1260 kW
Kesici kafa torku	5200 kNm @ 3.1 rpm 2912 kNm @ 5.5 rpm
Toplam itme kuvveti	42575 kN @ 350 bar
İtme silindiri sayısı ve stroku	32 adet, 2.2 m
Disk keski sayısı	38 adet (6 adet çiftli)
Disk keski çapı ve en büyük yükü	17 inch, 267 kN
Diskler arası mesafe	90 mm
Tırnak keski sayısı	62 adet
Burgulu konveyör uzunluğu / çapı	12 m / 0.7m

laminalı çamurtaşları ile aralanmalı olarak bulunmaktadır.

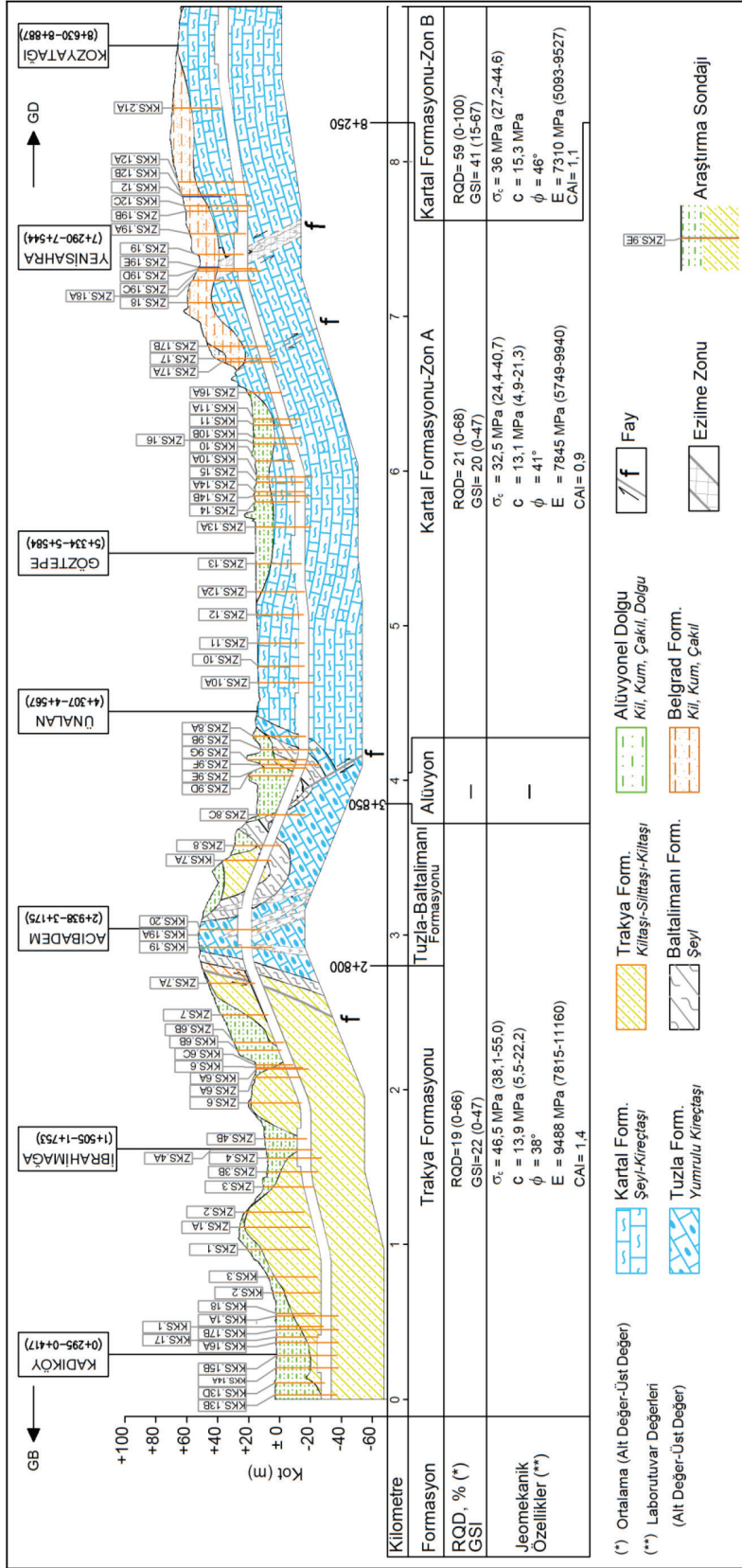
Baltalimanı Formasyonu olarak adlandırılan formasyon ise fosfat yumrulu ve çörtlü şeyllerden oluşmaktadır. Bu formasyon, çok ince tabakalı yapıya sahip olması nedeniyle çok kıvrımlı karakteristik bir yapı gösterir (Ketin, 1991; Seymen, 1995). Tuzla ve Baltalimanı Formasyonu güzergahta sadece Acıbadem İstasyonu çevresinde (km 2+800 – km 3+300) bulunmaktadır.

Trakya Formasyonu, yeşilimsi-gri, yer yer çakıltaşı ve daha çok kumtaşı-silttaşı-kilttaşı aralanması şeklinde gözlenmektedir. Orta-sağlam kaya özelliğindeki Trakya Formasyonu, çoğunlukla üç veya daha fazla eklem takımını içermektedir. Eklem yüzeylerinin arası kil, kalsit ve yer yer kuvars dolguludur (Ketin, 1991; Seymen, 1995). Trakya Formasyonu, proje başlangıcı olan km 0+000 ile km 2+800 arasında yer almaktadır.

Güzergahtaki alüvyon dolgular, yüzey topografyasının daha düşük kota sahip olduğu vadelerde akan derelerin taşıdığı malzemelerden

oluşmuştur. Alüvyon dolgularıyla sadece km 3+850 ile km 4+100 arasında karşılaşılmaktadır. Güzergahta geçilen formasyonların jeomekanik özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge 3'ten anlaşılacağı üzere Trakya Formasyonu ile Kartal Formasyonu-Zon A'da karşılaşılan kaya türlerinin kaliteleri az çok birbirine benzer nitelikte olup, "zayıf" kaya sınıfında yer almaktadırlar. Buna karşın Kartal Formasyonu-Zon B "orta-iyi" kaya kütle kalitesine sahip bir kayadır.

Güzergah boyunca rastlanılan kayalarda, tektonik hareketlerin yönlerine bağlı olarak genellikle üç veya daha fazla eklem takımını geliştirmiştir. Bunun yanısıra, formasyonlarda, tektonik hareketler sonucu oluşan aşırı deformasyonların kıvrımlanma olayı ile karşılanmadığı zonlarda büyük kırık, fay ve ezilme zonları meydana gelmektedir (Kodamanoğlu, 1977). Genellikle volkanik sokulumlarla birlikte gözlenen bu tür yapılarla güzergah boyunca oldukça sık karşılaşılmaktadır.



Şekil 2. Kadıköy Kartal Metrosu güzergahı Kadıköy-Kozyatağı arasının jeolojik profili ve formasyonların jeomekanik büyüklükleri (Yüksel, 2013, Yüksel vd., 2006)
Figure 2 Geological profile between Kadıköy-Kozyatağı of Kadıköy-Kartal Metro Alignment and geomechanical parameters of formations (Yüksel 2013, Yüksel et al., 2006)

Çizelge 3. Jeolojik formasyonların jeomekanik özellikleri (Yüksel, 2013)
Table 3. Geomechanical properties of the geological formations (Yüksel, 2013)

Jeomekanik Özellik (Birim)	Trakya Formasyonu (*)			Kartal Formasyonu Zon A			Kartal Formasyonu Zon B		
	N	X	DA	N	X	DA	N	X	DA
Kaya kalite göstergesi, RQD (%)	740	19.2	(0-100)	328	21	(0-100)	158	58	(0-100)
Jeolojik dayanım indeksi, GSI (-)	740	22.3	(0-100)	328	20	(0-70)	158	41	(0-100)
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)	101	26.5	(20.6-27.6)	42	26.1	(22.2-27.5)	55	26.9	(23.5-28.5)
Gözeneklilik, n (%)	37	4.85	(0.37-27.5)	19	4.24	(0.95-10.5)	19	1.01	(0.25-3.23)
Tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_c (MPa)	72	46.6	(1.9-155.3)	39	32.6	(1.1-94.5)	51	52.7	(7.7-158.3)
Çekme dayanımı, σ_t (MPa)	32	6.4	(1.1 -14.0)	20	4.8	(1.8 -9.1)	35	7.7	(0.22 -17.9)
Elastisite modülü, E (x1000) (MPa)	44	9.49	(0.67-20.3)	28	7.8	(1.2-25.1)	24	10.8	(4.5-18.8)
Poisson oranı, ν (-)	31	0.27	(0.18-0.42)	23	0.30	(0.18-0.38)	23	0.30	(0.21-0.38)
Kohezyon, c (MPa)	8	13.8	(4.0-32.5)	5	13.1	(4.3-19.8)	6	15.1	(5.4-28.0)
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	8	38	(27 -51)	5	40.5	(32 -45)	6	45	(40 -54)
Cherchar aşındırıcılık indeksi, CAI (-)	18	1.37	(0.5 -2.5)	13	0.94	(0.5 -2.3)	26	1.79	(0.5 -3.5)

(*): Tuzla ve Baltalimanı Formasyonlarına ait veriler az sayıda olduğundan Trakya Formasyonu ile birlikte değerlendirilmiştir.
N: Veri Sayısı, X: Ortalama, DA: Değişim aralığı

TBM KAZI PARAMETRELERİ İLE FORMASYONLARIN JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Sondaj Verisi

Kadıköy-Kartal Metrosu güzergahıyla ilgili jeolojik araştırmalar kapsamında Kozyatağı ile Kadıköy İstasyonları arasında kalan kısımda değişik aşamalarda olmak üzere, toplam 3.525 m uzunluğunda, 107 adet araştırma sondajı yapılmıştır (Yüksel vd., 2005, Yüksel vd., 2006). Bu araştırmaların ilk aşamasında yapılan sondajlara ait detaylı jeomekanik veriler yapılan laboratuvar deneyleriyle belirlenmiştir. Daha sonraki aşamalarda yapılan sondajlar daha çok jeolojik yapının ayrıntılandırılması ve kesinleştirilmesi amacıyla yönelik olup bütçe ve zamanla ilgili ekonomik gerekçeler nedeniyle bu sondajlardan alınan örnekler üzerinde çoğu jeomekanik deney yapılmamıştır. Diğer taraftan, bazı sondajlar NATM ile açılan istasyon ve makas tünellerine isabet

etmekte, bazı sondajlar ise güzergahtan uzakta bulunmaktadır. Bu nedenle bu kısımlara isabet eden sondajlar, bu değerlendirmenin dışında tutulmuştur. TBM güzergahına isabet eden 28 sondaja ait kaya kütlesi parametreleri ve kaya dayanım özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir. Bu çizelgede, kaya kalite göstergesi (RQD) ve jeolojik dayanım indeksi (GSI) (Sönmez ve Ulusay, 2002) gibi kayanın süreksizlik özellikleri ve kaya kütle kalitesini temsil eden parametrelerinin yanı sıra, dayanım parametreleri olan, tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, ve aşındırıcılık indeksi gibi indeks özelliklerinin ortalamaları da belirtilmiştir.

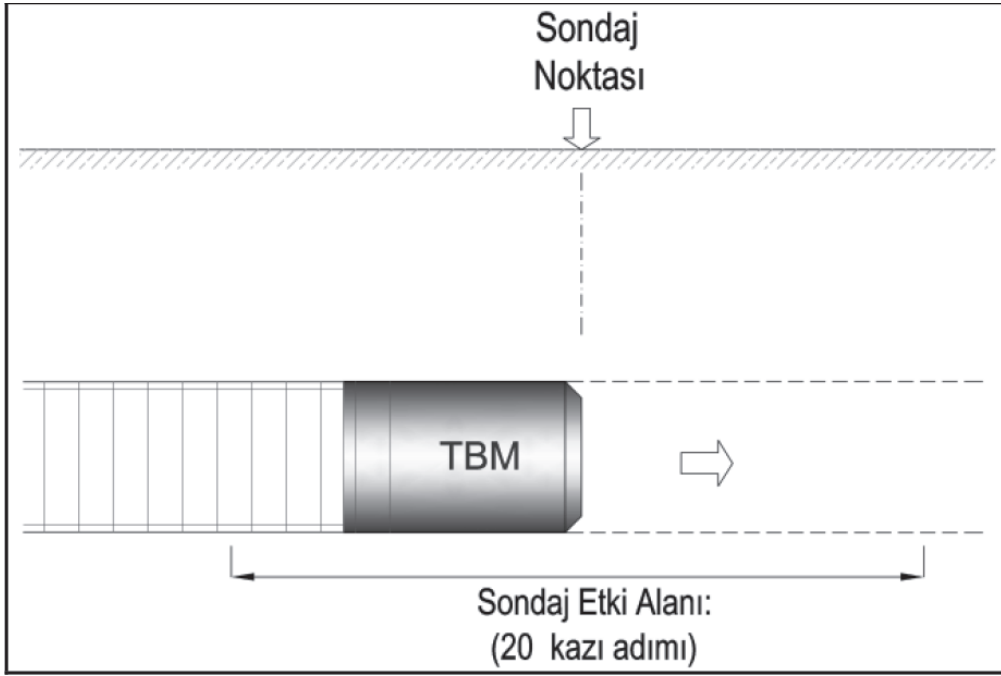
TBM Kayıtları ve Değerlendirme Yöntemi

TBM kazısı sırasında kaydedilen kazı parametrelerinin değerlendirilmesinde, sondaj noktasının tüneldeki izdüşümüne karşı gelen yerin yaklaşık 10 kazı adımı öncesi ve sonrasına ait (~30 m) TBM kazı kayıtları dikkate alınmıştır (Şekil 3).

Çizelge 4. Kozyatağı-Kadıköy arasında yapılan sondajlar ve bu sondajlara ilişkin jeomekanik veriler.(Yüksel, 2013)

Table 4. Site investigation boreholes drilled between Kozyatağı - Kadıköy alignment and obtained geomechanical data associated with these boreholes (Yüksel 2013)

Sondaj No	km	Derinlik (m)	RQD (%)	GSI	Tek eksenli sıkışma dayanımı σ_c (MPa)	Çekme dayanımı, σ_t (MPa)	Elastisite modülü, E, (MPa)	Aşındırıcılık indeksi, CAI
ZKS.21A	8+347	31.0	44.2	32.7	49.15	6.3	11250	2.3
KKS.12A	7+867	45.0	8.6	13.5	1.38	-	-	-
KKS.12	7+772	25.0	0.0	10.0	-	-	-	-
ZKS.19B	7+679	39.7	10.1	30.0	9.40	-	-	-
ZKS.18	7+087	34.0	27.4	19.9	20.93	5.70	5625	0.7
ZKS.17	6+725	37.7	5.0	7.5	36.90	8.40	8200	-
ZKS.16A	6+506	22.0	17.4	21.4	37.90	5.00	-	-
ZKS.15	5+927	29.7	44.4	31.4	54.05	-	20900	2.3
ZKS.14	5+800	29.0	1.6	10.0	12.10	-	-	-
ZKS.12	5+071	30.0	1.8	15.2	38.95	5.30	11250	1.0
ZKS.11	4+887	30.0	1.8	28.0	20.50	-	-	0.5
ZKS.10	4+738	30.0	36.0	37.2	22.63	4.75	5835	1.0
ZKS.10A	4+632	36.0	32.5	27.7	42.90	5.60	6400	-
ZKS.8	3+578	30.0	0.0	15.0	-	-	-	-
KKS.7A	3+484	30.0	19.1	33.2	14.20	4.45	2950	1.1
KKS.19	2+921	46.5	1.0	11.0	21.90	-	-	-
ZKS.7A	2+690	30.0	15.8	22.3	62.80	4.85	7600	-
ZKS.7	2+484	34.0	1.7	15.1	-	-	-	2.0
ZKS.6B	2+306	32.0	0.0	10.9	-	-	-	-
KKS.6	2+144	15.1	-	-	-	-	-	1.1
ZKS.6A	2+081	30.0	5.6	18.9	25.20	9.90	6100	-
ZKS.6	1+915	34.0	13.7	27.3	-	-	-	2.1
ZKS.3	1+372	32.0	1.6	15.0	57.30	-	8270	-
ZKS.2	1+210	38.0	1.0	7.0	17.87	1.10	2700	0.5
ZKS.1A	1+111	45.5	2.4	6.7	-	4.20	-	-
ZKS.1	0+968	40.0	14.3	26.0	45.83	4.00	6023	2.1
KKS.3	0+791	32.0	54.7	37.8	19.80	3.20	-	1.0
KKS.2	0+687	30.0	8.7	30.0	28.30	1.20	8070	1.2



Şekil 3. Sondaj noktasına göre TBM parametrelerinin değerlendirme aralığı
 Figure 3. Excavation range of TBM parameters respect to boring location

- Toplam itme kuvveti/penetrasyon oranı, $kN/ \frac{TF}{p}$ (mm/rev) (1)
- Tork/Penetrasyon oranı, $(kN.m)/(mm/rev)$ $\frac{T}{p}$ (2)
- Kesme katsayısı, $CC = \frac{FR}{FN}$ (3)
- Delinebilirlik indeksi, $(kN/disk)/(mm/dev)$ $BI = \frac{TF}{N_c \cdot fl \cdot p}$ (4)
- Güç tüketimi, kW $P = 2\pi \frac{rpm}{60} \cdot T$ (5)
- Yerinde spesifik enerji, kWh/m^3 $SE = k \frac{P}{ICR}$ (6)
- Anlık kazı hızı, m^3/h $ICR = 0,06 \cdot p \cdot rpm \cdot A$ (7)

Bu kayıtlara ait kazı performansı parametreleri yukarıda verilen eşitliklerden hesaplanmış ve ilgili sondaj noktası için tek değer ile temsil edilmesi için 20 adetlik kazı verisinin ortalaması alınmıştır.

Burada FR disk başına yuvarlanma kuvveti ($kN/disk$), FN disk başına normal kuvvet ($kN/disk$) N_c disk sayısı, fl sürtünme kaybı katsayısı; yaklaşık olarak $fl=1.2$ değeri

alınmaktadır. rpm kesici kafanın dakikadaki dönüş sayısı, k diskten kayaya aktarılan kesme enerjisi transferi oranı; $k=0.8\sim 0.9$ olarak verilmektedir, A tünel kesit alanıdır (m^2).

Sondaj yerlerindeki jeomekanik özellikler ve yaklaşık 30 m'lik kazı aralığına karşılık gelen TBM kazı parametrelerinin ortalama değerleri Çizelge 5 ve 6'da verilmiştir.

Kazı Performansı için Regresyon Modelleri

Yapılan regresyon analizlerinde bağımlı değişken (y) olarak; "toplam itme kuvveti / penetrasyon" oranı (TF/p), "tork / penetrasyon" oranı (T/p), penetrasyon (p), güç tüketimi (P), spesifik enerji (SE), anlık kazı hızı (ICR) büyüklükleri ele alınmıştır. Bağımsız değişkenler ise tek, iki ve üç değişken olarak regresyon modellerinde aşağıda tartışılan ve Çizelge 7 ve 8'de gösterilen kombinasyonlarda kullanılmıştır.

İstatistiksel Değerlendirme

Kazılan tünel ortamının jeomekanik özellikleri ile TBM kazı parametreleri arasındaki regresyon eşitliklerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için korelasyon katsayılarına bakılmakla birlikte, sadece korelasyon katsayısı bunun için yeterli olmamaktadır. Değişimlerin istatistiksel açıdan anlamlı olup olmadığı "kararını" oluşturabilmek için "F testi" yapmak gerekmektedir. İncelenen bir regresyon ifadesi için test istatistiği katsayısı olan F_{test} sayısı, korelasyon katsayısı ve serbestlik derecelerine bağlı olarak;

$$F_{test} = \frac{r^2}{\frac{k-1}{n-k}} \quad (8)$$

ifadesinden belirlenmektedir.

Burada; r tekli ve çoklu regresyonda elde edilen korelasyon katsayısı, k bağımlı değişken (y) ve serbest değişkenlerin (x_1, x_2, \dots, x_n) toplam sayısı ve n regresyon analizinde bulunan veri takımı (gözlem hacmi) sayısıdır.

F_{test} değeri, belirli bir anlamlılık düzeyi (α) ve serbestlik dereceleri için F tablosundan bulunan

F_{crit} kritik değerinden daha büyük çıkarsa söz konusu basit (tek değişkenli) veya çok değişkenli regresyon ifadesindeki serbest (y) ve bağımlı değişkenler (x_1, x_2, \dots, x_n) arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki (korelasyon) bulunduğu şeklinde karar verilmektedir. F_{crit} değerinin belirlenmesi için anlamlılık düzeyi $\alpha=0.05$ seçilmiş olup, serbestlik derecesi ise $v_1=k-1$, $v_2=n-k$ ile belirlenmektedir.

Korelasyonların F_{test} değerleri Microsoft Office Excel programı kullanılarak elde edilmiştir. Tek değişkenli, iki ve üç değişkenli regresyonlar için "kabul" veya "ret" kararına ilişkin sonuçları aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir (Çizelge 9-11).

Tek değişkenli regresyonlar arasında TBM kazı parametreleri ile fazla sayıda anlamlı ilişkiyi elastisite modülü (E), Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (CAI), "tek eksenli sıkışma dayanımı \times Cerchar Aşındırıcılık İndeksi" [$\sigma_c \cdot CAI$] ve kaya kütlesi kesilebilirlik indeksi ($RMCI$) özelliklerinin sağladığı belirlenmiştir. Buna karşın, ortamın kaya kütle kalitesini ifade eden (GSI) ve çekme dayanımı (σ_c) gibi bağımsız değişkenler anlamlı ilişkiler vermemiştir. Diğer taraftan, bağımlı değişken olarak spesifik enerji (SE) ve anlık kazı oranı (ICR) en fazla sayıda anlamlı ilişki veren özellikler olmuştur. Yine penetrasyon (p) ve güç tüketimi (P) ile jeomekanik özellikler arasında anlamlı ilişki bulunamamıştır.

Regresyon ilişkileri arasında istatistiksel açıdan anlamlı olarak; iki bağımsız değişkenli olan 25 ve üç bağımsız değişkenli olan 10 adet eşitlik belirlenmiştir. Kazı parametreleri ile jeomekanik özellikler arasındaki iki bağımsız değişkenli korelasyonlarda en fazla anlamlı ilişkiyi yine elastisite modülü sağlamakta, bunu kaya kütlesi kesilebilirlik indeksi izlemektedir. Üç bağımsız değişkenli regresyon ifadelerinde de yine benzer bir durum sözkonusudur.

Daha önce de belirtildiği gibi Kadıköy-Kozyatağı arasında 107 adet sondaj yapılmış olmasına karşın, bunlardan sadece 28'i TBM kullanılarak açılan tünel güzergahına isabet etmektedir. Diğer taraftan tünel güzergahı üzerinde bulunan sondajlarda ise sınırlı sayıda laboratuvar deneyi yapılabilmektedir. Dolayısıyla sınırlı sayıdaki bu deneylerin kazı ortamını temsil etmekte kısmen yetersiz kalabileceği gözardı edilmemelidir. Diğer

Cizelge 5.Hat 1 (Sağ hat) kazısına isabet eden sondaj noktaları civarındaki TBM kazı parametrelerinin ortalama değerleri (Yüksel, 2013)
 Table 5. Average values of TBM excavation parameter around nearest boring at Drive 1 (Righth Track) (Yüksel, 2013)

Sondaj No	Hat 1 Ayna km'si	Hat.1 Ring No	RQD (%)	GSI	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (MPa)	CAI	TF (kN)	T (MN.m)	P (mm/rev)	TF/p [kN/(mm/rev)]	T/p [kN.m/(mm/rev)]	CC	P (kW)	SE (kWh/m ³)	ICR (m ² /h)
ZKS.21A	8+347	82	44.2	32.7	49.15	6.3	11250	2.3	5068	1.634	8.4	601.0	194.2	0.20	487.1	10.0	48.9
KKS.12	7+772	463	0.0	10.0	-	-	-	-	9770	2.137	11.7	929.3	182.7	0.14	647.4	9.4	71.0
ZKS.18	7+087	745	27.4	19.9	20.93	5.7	5625	0.7	7791	2.103	13.9	606.1	151.2	0.11	615.4	7.8	85.0
ZKS.12	5+071	1801	1.8	15.2	38.95	5.3	11250	1.0	4432	2.055	15.6	286.3	132.0	0.29	645.2	6.8	95.0
ZKS.11	4+887	1923	1.8	28.0	20.5	-	-	0.5	6963	2.277	12.9	541.7	175.9	0.20	691.2	9.1	78.7
ZKS.10	4+738	2022	36	37.2	22.63	4.75	5835	1.0	7808	2.35	16.7	469.4	141.0	0.19	736.8	7.3	101.7
ZKS.10A	4+632	2093	32.5	27.7	42.9	5.6	6400	-	8473	2.771	12.6	861.5	220.6	0.23	846.8	11.4	76.1
KKS.19	2+921	2831	1.0	11.0	21.9	-	-	-	7656	2.537	11	747.5	231.1	0.19	742.8	11.9	66.7
ZKS.7	2+484	3039	1.7	15.1	-	-	-	2.0	5742	2.52	12.2	487.7	206.5	0.26	762.1	10.6	74.4
ZKS.6B	2+306	3157	0.0	10.9	-	-	-	-	6332	2.325	13.2	487.2	176.4	0.22	717.5	9.1	80.7
KKS.6	2+144	3265	-	-	-	-	-	1.1	6337	2.359	13.0	499.4	181.0	0.22	704	9.3	79.3
ZKS.6A	2+081	3306	5.6	18.9	25.2	9.9	6100	-	6960	2.086	13.6	515.5	153.6	0.18	653.5	7.9	82.9
ZKS.6	1+915	3418	13.7	27.3	-	-	-	2.1	6142	2.045	13.2	467.4	155.4	0.21	642.4	8	80.3
ZKS.3	1+372	3549	1.6	15	57.3	-	8270	-	6635	2.336	12.8	524.3	182.4	0.22	727.6	9.4	78.1
ZKS.2	1+210	3657	1.0	7.0	17.87	1.1	2700	0.5	7178	2.087	13.7	525.5	152.5	0.18	657	7.9	83.8
KKS.3	0+791	3935	54.7	37.8	19.8	3.2	-	1.0	6215	1.846	12.2	520.7	151.7	0.19	579.3	7.8	74.6
KKS.2	0+687	4004	8.7	30.0	28.3	7.1	8070	1.2	4724	1.746	12.1	390.9	144.3	0.24	550.2	7.4	74.3

Çizelge 6.Hat 2 (Sol hat) kazısına isabet eden sondaj noktaları civarındaki TBM kazı parametrelerinin ortalama değerleri (Yüksel 2013)
 Table 6. Average values of TBM excavation parameter around nearest boring at Drive 2 (Left Track) (Yüksel 2013)

Sondaj No	Hat 1 Ayna km'si	Hat.2 Ring No	RQD (%)	GSI	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (MPa)	CAI	TF (kN)	T (MN.m)	P (mm/rev)	TF/p [kN/(mm/rev)]	T/p [kN.m/(mm/rev)]	CC	P (kW)	SE (kWh/m ³)	ICR (m ³ /h)
KKS.12A	7+867	434	8.6	13.5	1.38	-	-	-	5068	2.1	11	477.8	193	0.26	636	9.9	65.2
ZKS.19B	7+679	562	10.1	30	9.4	-	-	-	5433	2.59	15	368.4	173	0.3	791	8.9	89.9
ZKS.17	6+725	1028	5	7.5	36.9	8.4	8200	-	4913	2.63	13	402.3	208	0.34	784	11.0	73.6
ZKS.16A	6+506	1173	17.4	21.4	37.9	5	-	-	4674	2.57	12	386.8	212	0.34	787	11.0	72.1
ZKS.15	5+927	1556	44.4	31.4	54.05	-	20900	2,3	9683	3.29	8,3	1198.70	395	0.21	961	20.0	49.6
ZKS.14	5+800	1640	1.6	10	12.1	-	-	-	6048	2.64	15	398.3	171	0.26	812	8.8	94.1
ZKS.8	3+578	2621	0	15	-	-	-	-	6700	3.62	10	791.5	350	0.28	896	18.0	63.1
KKS.7A	3+484	2683	19.1	33.2	14.2	4.5	2950	1,1	4839	2.35	14	369.4	168	0.28	689	8.7	85.8
ZKS.7A	2+690	3044	15.8	22.3	62.8	4.9	7600	-	3991	2.52	12	367.6	214	0.4	746	11.0	71.9
ZKS.1A	1+111	3872	2.4	6.7	-	4.2	-	-	7653	2.62	11	818.5	248	0.19	723	13.0	64.7
ZKS.1	0+968	3962	14.3	26	45.83	4	6023	2,1	5633	2.49	11	533.5	220	0.29	717	11.0	69.0

Çizelge 7. İki bağımsız değişkenli regresyon analizlerinde incelenen bağımsız değişken kombinasyonları
 Table 7. Combination of two independent variables investigated in regression analyses

Bağımsız değişkenler (x)	RQD	GSI	UCS	E	σ_c / σ_t	CAI	$\sigma_c^2 / 2E$	$\sigma_c \cdot CAI$	$\sigma_c \cdot (RQD/100)^{2/3}$	$(\sigma_c / \sigma_t) (RQD/100)^{2/3}$
1	x ₁		x ₂							
2		x ₁	x ₂							
3	x ₁				x ₂					
4				x ₁	x ₂					
5	x ₁			x ₂						
6		x ₁		x ₂						
7	x ₁						x ₂			
8		x ₁					x ₂			
9	x ₁					x ₂				
10				x ₁				x ₂		
11				x ₁					x ₂	
12				x ₁						x ₂
13						x ₁			x ₂	
14						x ₁				x ₂

taftan bu sondajlardan bazıları da tünel güzergahı civarında, ancak hat ekseninden değişik mesafelerde olmak üzere 15-20 m'den daha uzakta bulunmaktadır. TBM kazı parametreleri ile bazı jeomekanik özellikler arasında istatistiksel olarak anlamlı ilişki elde edilememesinin nedeni başlıca bu hususlar ile açıklanabilir.

TBM KAZI PARAMETRELERİ İLE JEOMEKANİK BÜYÜKLER ARASINDAKİ TEK VE ÇOK DEĞİŞKENLİ KORELASYONLAR

İncelenen tek değişkenli 60 regresyon eşitliği arasında 21'i anlamlı ilişkiler olarak değerlendirilmiştir. Anlamlı bulunan ilişkilerden yüksek korelasyonlara sahip olan ilk 10'u Şekil 4-13'de gösterilmiştir (Yüksel 2013).

Bu çalışma kapsamında, farklı kombinasyonlarda oluşturulan 84'er adet regresyon ifadesi içerisinde ise iki değişkenli 25 adet, üç değişkenli 10 adet regresyon ifadesi istatistiksel olarak anlamlı

bulunmuştur (Yüksel, 2013) Makaledeki sayfa sınırlaması gözönünde bulundurularak bu ifadelerden sadece istatistiksel olarak anlamlı bulunan ve korelasyon katsayıları en yüksek olan 10'ar tanesi aşağıda verilmiştir (Çizelge 12-13).

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, Kadıköy Kartal Metrosu kazısı örneğinde TBM performans parametreleri ile sondajlardan alınan karot örnekleri kullanılarak tayin edilen jeomekanik özellikler arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Jeolojik araştırma çalışmaları sırasında yapılan 28 adet sondaja ilişkin RQD, GSI gibi parametreler ile yine bu sondajlardan alınmış örnekler üzerinde laboratuvarında yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve aşındırıcılık indeksi gibi özellikler değerlendirmeye alınmıştır.

İstatistiksel korelasyon modellerinde toplam itme kuvveti, tork, penetrasyon gibi TBM kazı

Çizelge 8. Üç bağımsız değişkenli regresyon analizlerinde incelenen bağımsız değişken kombinasyonları
 Table 8 Combination of three independent variables investigated in regression analyses

Bağımsız değişkenler (x_i)	RQD	GSI	UCS	E	σ_c/σ_t	CAI	$\sigma_c^2/2E$	$\sigma_c \cdot CAI$	$\sigma_c \cdot (RQD/100)^{(2/3)}$	$(\sigma_c/\sigma_t) (RQD/100)^{(2/3)}$
1	x_1		x_2	x_3						
2		x_1	x_2	x_3						
3	x_1			x_2		x_3				
4		x_1		x_2		x_3				
5	x_1					x_2	x_3			
6		x_1				x_2	x_3			
7				x_1		x_2			x_3	
8				x_1		x_2				x_3
9	x_1			x_2				x_3		
10		x_1		x_2				x_3		
11	x_1			x_2	x_3					
12		x_1		x_2	x_3					
13	x_1				x_2	x_3				
14		x_1			x_2	x_3				

Çizelge 9. Tek bağımsız değişkenli regresyon eşitliklerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunan bağımlı ve bağımsız değişkenler
 Table 9. Statistically significant dependent and independent variables in the regression equations with single independent variable

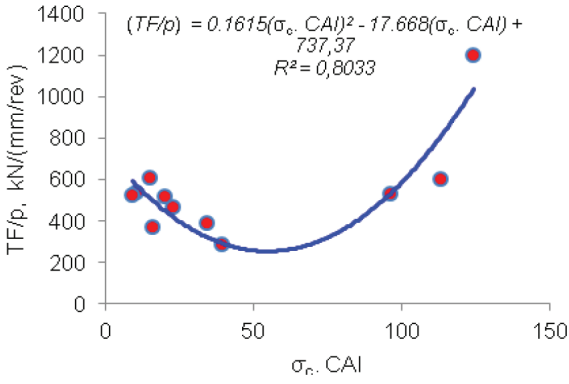
x ↓	$y \rightarrow$	TF/p	T/p	p	P	SE	ICR	Toplam
RQD								-
GSI								-
σ_c			√			√	√	3
E		√	√			√	√	4
$\sigma_c^2/2E$						√		1
CAI		√	√			√	√	4
$\sigma_c \cdot CAI$		√	√			√	√	4
RMCI		√	√			√	√	4
RMCI/ σ_t							√	1
Toplam		4	5	-	-	6	6	21

Çizelge 10. İki bağımsız değişkenli regresyon eşitliklerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunan bağımlı ve bağımsız değişkenler
Table 10. Statistically significant dependent and independent variables in the regression equations with two independent variable

x_1, x_2 ↓	$y \rightarrow$	TF/p	T/p	p	P	SE	ICR	Toplam
RQD		2	1	-		1	1	6
GSI		-	1			1	-	2
σ_c		-		1			1	2
E		2	4	2		4	2	15
$\sigma_c^2/2E$		1						1
CAI		1	2	2		2	3	9
$\sigma_c \cdot CAI$			1	1		1	1	4
RMCI		2	2	2		2	2	10
$RMCI/\sigma_t$			1			1	1	2
Değişken sayısı		8	12	9	-	12	10	51
Anlamlı İfade Sayısı		4	6	4	-	6	5	25

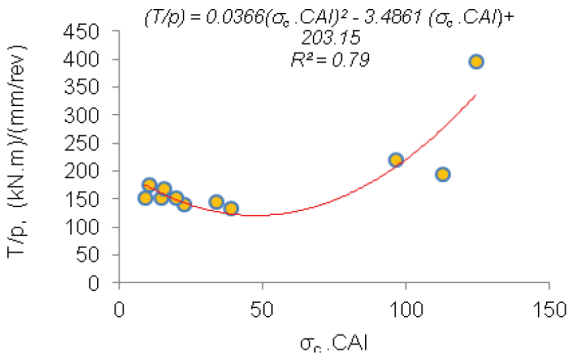
Çizelge 11. Üç bağımsız değişkenli regresyon eşitliklerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunan bağımlı ve bağımsız değişkenler
Table 11. Statistically significant dependent and independent variables in the regression equations with three independent variable

x_1, x_2, x_3 ↓	$y \rightarrow$	TF/p	T/p	p	P	SE	ICR	Toplam
RQD		1	1	-	-	1	1	4
GSI		-	1	1	-	-	2	4
σ_c		-	-	-	-	1	2	3
E		1	3	-	-	2	2	8
$\sigma_c^2/2E$		-	-	1	-	-	1	2
CAI		-	1	1	-	1	1	4
$\sigma_c \cdot CAI$		-	-	-	-	-	-	-
σ_c/σ_t		-	-	-	-	-	-	1
RMCI		-	-	-	-	1	-	-
$RMCI/\sigma_t$		-	1	-	-	-	-	1
Değişken sayısı		2	7	3	-	6	9	27
Anlamlı İfade Sayısı		1	3	7	-	3	8	10



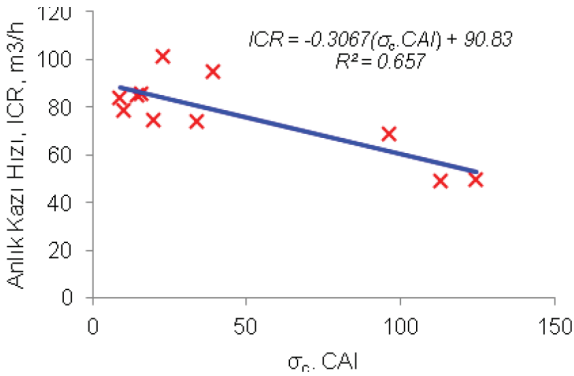
Şekil 4. "Toplam itme kuvveti/penetrasyon" oranı ile $[\sigma_c \cdot CAI]$ büyüklüğü arasındaki ilişki.

Figure 4 Relationship between "total thrust force/penetration" ratio and compressive strength x abrasiveness index



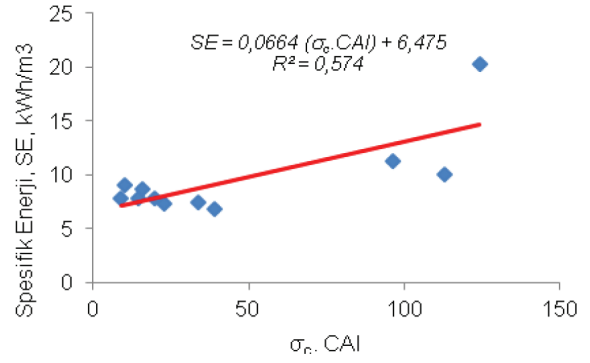
Şekil 5 "Tork/penetrasyon" oranı ile $[\sigma_c \cdot CAI]$ büyüklüğü arasındaki ilişki.

Figure 5 Relationship between "torque/penetration" ratio and $[\sigma_c \cdot CAI]$



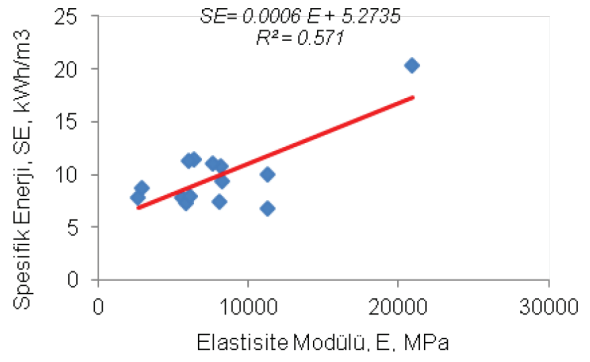
Şekil 6. Anlık kazı hızı ile $[\sigma_c \cdot CAI]$ büyüklüğü arasındaki ilişki.

Figure 6 Relationship between instantaneous cutting rate and $[\sigma_c \cdot CAI]$



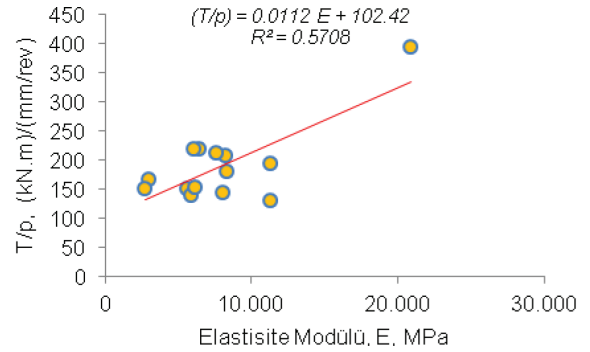
Şekil 7. Spesifik enerji ile $[\sigma_c \cdot CAI]$ büyüklüğü arasındaki ilişki.

Figure 7 Relationship between specific energy and $[\sigma_c \cdot CAI]$



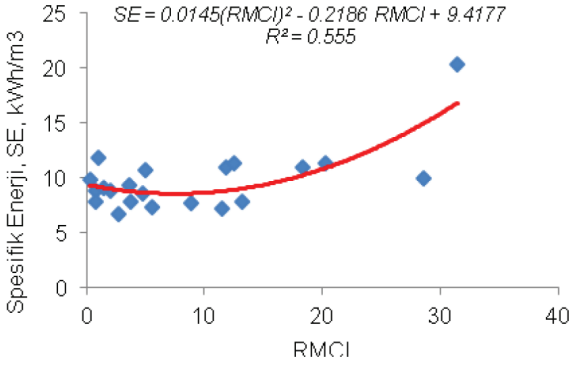
Şekil 8. Spesifik enerji ile elastisite modülü arasındaki ilişki.

Figure 8 Relationship between specific energy and elasticity modulus



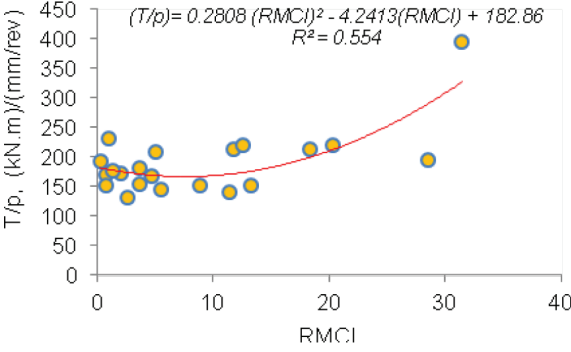
Şekil 9. "Tork/penetrasyon" oranı ile elastisite modülü arasındaki ilişki.

Figure 9 Relationship between "torque/penetration" ratio and elasticity modulus



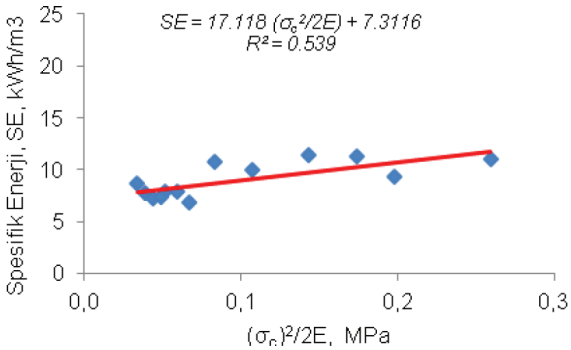
Şekil 10. Spesifik enerji ile kaya kütlesi kesilebilirlik indeksi arasındaki ilişki.

Figure 10 Relationship between specific energy and rock mass cuttability index



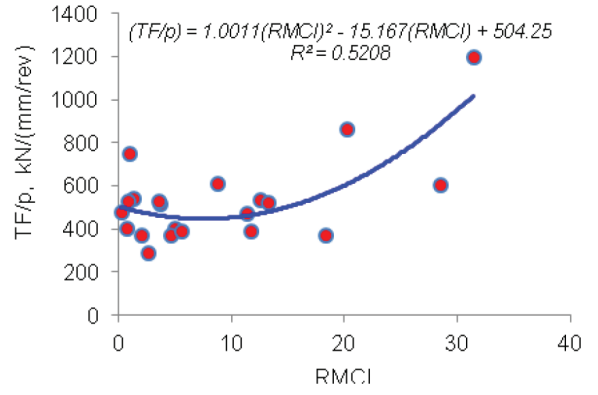
Şekil 11. “Tork/penetrasyon” oranı ile kaya kütlesi kesilebilirlik indeksi arasındaki ilişki.

Figure 11 Relationship between “torque/penetration” ratio and rock mass cuttability index



Şekil 12 Spesifik enerji ile $[(\sigma_c)^2/2E]$ oranı arasındaki ilişki.

Figure 12 Relationship between specific energy and $[(\sigma_c)^2/2E]$ ratio



Şekil 13. “Toplam itme kuvveti/penetrasyon” oranı ile kaya kütlesi kesilebilirlik indeksi arasındaki ilişki.

Figure 13 Relationship between “total thrust force/penetration” ratio and rock mass cuttability index

kayıtları ve bunlardan hesaplanarak türetilen, “toplam itme kuvveti / penetrasyon” oranı, “tork / penetrasyon” oranı, kesme katsayısı, delinebilirlik indeksi, güç tüketimi ve spesifik enerji gibi kazı performans büyüklükleri “bağımlı değişken”, jeomekanik özellikler ise “bağımsız değişken” olarak alınmıştır (Çizelge 7, Çizelge 8). Elde edilen ilişkilerin istatistiksel olarak belirli güvenilirlik sınırları içerisinde anlamlı olup olmadığı F testleri ile (anlam düzeyi $\alpha = 0.05$) değerlendirilmiştir.

“Tek bağımsız değişkenli” 60 regresyon ifadesi içerisinde 21 adedi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Çizelge 9). Analizler sonucunda, istatistiksel olarak anlamlı en fazla sayıda ilişkiyi spesifik enerji ve anlık kazı hızı büyüklükleri sağlamaktadır. Diğer taraftan jeomekanik özellikler arasında anlamlı olarak en fazla sayıda regresyonu elastisite modülü Cerchar aşındırıcılık indeksi, $(\sigma_c \cdot CA)$ büyüklüğü ve kaya kütlesi kesilebilirlik indeksi sağlamaktadır. Jeolojik dayanım indeksi ile TBM kazı parametreleri arasındaki ilişkiler ise anlamlı bulunmamıştır.

“İki bağımsız değişkenli” 84 adet çoklu doğrusal regresyon modelleri arasında 25 adet regresyon ifadesi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Çizelge 10, Çizelge 12) Kazı Performans parametreleri içerisinde, spesifik enerji, tork / penetrasyon oranı ve anlık kazı hızı büyüklükleri istatistiksel olarak en fazla sayıda anlamlı

Çizelge 12. İki bağımsız değişkenli regresyon ifadeleri
Table 12. Equations of two independent variables

Eşitlik	Korelasyon katsayısı	Eşitlik No
$ICR = (19.53 \cdot 10^{-3})E - 0.367 (\sigma_c \cdot CAI)$	r=0.866	(9)
$p = (345 \cdot 10^{-3})E - 0.576 (\sigma_c CAI)$	r=0.858	(10)
$\frac{T}{p} = 0.0069 E + 0.741 (\sigma_c CAI)$	r=0.831	(11)
$SE = (35.6 \cdot 10^{-3})E - 0.0381 (\sigma_c CAI)$	r=0.831	(12)
$\frac{T}{p} = 0.0007 E + 2.917 RMCI$	r=0.823	(13)
$SE = (36.1 \cdot 10^{-3}) E - 0.150 RMCI$	r=0.823	(14)
$SE = 1.904 CAI + 0.049 \left(\frac{RMCI}{\sigma_t} \right)$	r=0.820	(15)
$ICR = -14.968 CAI - 2.673 \left(\frac{RMCI}{\sigma_t} \right)$	r=0.820	(16)
$\frac{T}{p} = 36.962 CAI + 0.947 \left(\frac{RMCI}{\sigma_t} \right)$	r=0.819	(17)
$p = -1.539 CAI - 0.109 RMCI$	r=0.803	(18)

ilişkiye sahiptir. Diğer taraftan, anlamlı regresyon modelleri içerisinde jeomekanik büyüklükler açısından sıralama elastisite modülü, kaya kütlesi kesilebilirlik indeksi, Cerchar aşındırıcılık indeksi ve *RQD* şeklindedir.

“Üç bağımsız değişkenli” 84 adet çoklu doğrusal regresyon modeli arasında ise sadece 10 ilişki istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Çizelge 11, Çizelge 13). Üç değişkenli çoklu regresyon ifadelerinde, TBM kazı parametreleri içerisinde anlık kazı hızı ve spesifik enerji en fazla sayıda anlamlı ilişkiye sahiptir. Jeomekanik özellikler açısından sıralama, iki değişkenli modellerden biraz farklı olarak, elastisite modülü, Cerchar aşındırıcılık indeksi *RQD* ve *GSI* şeklindedir.

Elde edilen bu istatistiksel ilişkilerin pratik faydası, benzer jeolojik formasyonlarda ve jeomekanik özelliklere sahip kaya ortamlarda TBM ile açılacak tünellerde, tüneller açılmadan önce yapılacak sondaj çalışmalarından elde edilecek jeomekanik parametreler kullanılarak TBM kazı

performansının belirli bir yaklaşıklık içerisinde tahmin edilmesi olacaktır. Bu kestirimler kazı makinesi seçimine ışık tutacağı gibi, projenin kazı planlamasında yararlı olacaktır. TBM kazı uygulamalarından elde edilecek verilerin toplanması ve değerlendirilmesi ile sondajlardan elde edilecek jeomekanik veriler kullanılarak yapılacak performans tahminleri daha gerçekçi olacaktır.

KATKI BELİRTME

Yazarlar bu çalışmadaki teşvik ve değerli akademik katkılarından dolayı Prof. Dr. Ergin Arıoğlu (Yapı Merkezi Holding A.Ş.)'na ve Prof Dr. Reşat Ulusay'a teşekkürlerini sunarlar. Çalışmada yer verilen görüş ve değerlendirmeler yazarlarına ait olup herhangi bir kurum ve kuruluşu bağlamaz.

Çizelge 13. Üç bağımsız değişkenli regresyon ifadeleri
Table 13. Equations of three independent variables

Eşitlik	Korelasyon katsayısı	Eşitlik No
$SE = (26.4 \cdot 10^{-3}) E - 2.632 CAI - 0.016 \left(\frac{RMCI}{\sigma_t} \right)$	r=0,951	(19)
$\frac{T}{p} = -(5.128 \cdot 10^{-3}) E + 51.11 CAI + 0.309 \left(\frac{RMCI}{\sigma_t} \right)$	r=0,950	(20)
$ICR = 0.896 GSI - 37.416 CAI + 189.804 \left(\frac{\sigma_c^2}{2E} \right)$	r=0,917	(21)
$p = 0.141 GSI - 5.842 CAI + 29.373 \left(\frac{\sigma_c^2}{2E} \right)$	r=0,910	(22)
$\frac{T}{p} = 1.020 RQD + 0.943 \sigma_c + (7.68 \cdot 10^{-3}) E$	r=0,801	(23)
$SE = 0.053 RQD + 0.049 \sigma_c + (39.6 \cdot 10^{-3}) E$	r=0,801	(24)
$SE = 0.033 GSI + 0.044 \sigma_c + (47.0 \cdot 10^{-3}) E$	r=0,801	(25)
$\frac{T}{p} = 0.640 GSI + 0.858 \sigma_c + (9.123 \cdot 10^{-3}) E$	r=0,776	(26)
$\frac{TF}{p} = 6.946 RQD - 0.463 \sigma_c + 0.0224 E$	r=0,746	(27)
$ICR = -0.241 RQD - 0.379 \sigma_c - (88.3 \cdot 10^{-3}) E$	r=0,726	(28)

KAYNAKLAR

- Barton, N.R.; Lien, R.; Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6 (4): 189-236.
- Barton, N. 2000. TBM tunneling in jointed and faulted rock. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Bieniawski, Z., T., Celada, B., Galera J., M. ve 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, pp. 15-23.
- 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, Journees d'Etudes Internationales de Paris*, October, pp.115-121.
- Farrokh, E., Rostami, J. and Loughton, C. 2012. Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 110-123.
- Graham, P. C. 1976. Rock exploration for machine manufacturers. *Proceeding of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*, 173-180.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Kamehchiyan, M., Bruland, A. and Tavakoli, H.R. 2009. TBM performance analysis karaj water conveyance tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43 (4), 427-445.
- Kato, M. 1971. *Construction machinery*. Gihodo, Tokyo, 348-349.

- Ketin, İ. 1992. İstanbul ve dolayının jeoloji haritası. İSKİ (Yayınlanmamış çalışma) İstanbul.
- Kodamanoğlu, T. 1977. İstanbul-Beykoz civarının jeolojik incelenmesi: MTA Dergisi, Sayı 88, s. 32-43, Ankara.
- Lin, C., C. and Yu C., W. 2005. Discussion and solution of the TBM trapped in the westbound hseuehshan tunnel. Proceeding of the World Long Tunnels 2005 Congress, Taipei, Taiwan, pp. 383-394.
- Lui, H., S. and Chang, L., C. 2005. Examination of the TBM selection and its effect in the hsuehshan tunnel. Proceeding of the World Long Tunnels 2005 Congress, Taipei, Taiwan, pp. 23-33.
- Nelson, P. P., Ingraffea, A. R., O'Rourke, T. D. 1985. TBM performance prediction using rock fracture parameters, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 22, 189-192
- Okubo, S., Fukuki, K. ve Chen W. 2003. Expert system for applicability of tunnel boring machines in Japan. Rock Mechanics and Rock Engineering, 36 (4), 305-322.
- Oraee, K., Salhi, B. and Sarkissian, A., 2010 TBM performance prediction in Iran. Tunnel & Tunneling International, May 2010 51-54.
- Özdemir, L. 1977. Development of theoretical equations for predicting tunnel borability. Ph. D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden.Co.
- Rostami, J. and Ozdemir, L. 1993. A new model for performance prediction of hard rock TBMs. Proceeding of the RETC, 793-809
- Roxborough, F. F. and Phillips, H. R. 1975. Rock excavation by disc cutter. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 12, 361-366.
- Saito, T., Shimada, T., Yoshikawa, K. and Tukioka, A. 1971. Mechanized tunnel excavation. Sankaido, Tokyo, 36-81.
- Sanio, H. P. 1985. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 22, 153-161.
- Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A. and Cardore, G. 2002. TBM performance estimation using rock mass classification. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, 771-788.
- Seymen, İ. 1995. İzmit Körfezi ve çevresinin jeolojisi, İzmit Körfezi Kuvarterner İstifi. (Edt. Meriç, E), Kocaeli Valliği Çevre Koruma Vakfı, Kocaeli
- Snowdon, R. A., Ryley, M. D., Temporal, J. 1982. A study of disc cutting in selected British rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 19, 107-121.
- Sönmez, H., Ulusay, R., 2002. A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. Yerbilimleri, 26, 77-99.
- Yüksel, A., Sözak, N. ve Gülle, G. 2005. Kadıköy Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Mühendislik Jeolojisi Raporu, Rapor No: KK-GE-TR-GN-004, Yapı Merkezi – Yüksel – Doğuş – Yenigün İnşaat Ortak Girişimi, İstanbul
- Yüksel, A., Yeşilçimen, Ö., Arıoğlu, E. 2006: Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesinde Jeolojik ve Jeoteknik Araştırma Çalışmaları, Rocmec'2006, VIII Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, İstanbul, s. 157-170.
- Yüksel, A., 2013. TBM Makinelerinde Kayaç Özellikleri ve Makro Süreksizliklerin Kazı Performansına Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Programı, İstanbul.