DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTANBUL-KADIKÖY KARTAL METRO TÜNELİNDE KULLANILAN TÜNEL AÇMA MAKİNESİNDE (TBM) KAZI PERFORMANS ANALİZİ

Ali ÖZ

Şubat,2012
İZMİR

İSTANBUL-KADIKÖY KARTAL METRO TÜNELİNDE KULLANILAN TÜNEL AÇMA MAKİNESİNDE (TBM) KAZI PERFORMANS ANALİZİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Maden Mühendisliği Bölümü, Maden İşletme Anabilim Dalı

Ali ÖZ

Şubat,2012
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ALİ ÖZ, tarafından **DOÇ. DR. HAYATİ YENİCE** yönetiminde hazırlanan **"İSTANBUL-KADIKÖY-KARTAL METRO TÜNELİNDE KULLANILAN TÜNEL AÇMA MAKİNESİNDE (TBM) KAZI PERFORMANS ANALİZİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

DOÇ. DR. HAYATİ YENİCE

Yönetici

Y.Doç.Dr. Bayram KAHRAMAN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. M. Yakup Koca

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Mustafa SABUNCU
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum bu Yüksek Lisans tezimde bana sabır ve her daim iyi niyet gösteren danışmanım sayın Doç. Dr. Hayati YENİCE'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Aynı zamanda tezimin başlangıcından bitimine kadar bana her zaman yardımcı ve destek olan hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Bayram KAHRAMAN, Prof.Dr. Ercüment YALÇIN'a; yüksek lisans öğrenimim boyunca gelişmeme katkıda bulunan hocalarım sayın Prof. Dr. Halil KÖSE, Prof. Dr. Ahmet H. ONUR'a

Yaptığım tüm çalışmalarda beni destekleyen, bildiği her şeyi, esirgemeden karşılıksız bana sunan ve tez çalışmam boyunca bizzat teorik ve pratik bilgisiyle bana yardımcı olan, bunlarında ötesinde beni kardeşiymiş gibi koruyan ve kollayan hocam ve ağabeyim sayın Dr. Doğan KARAKUŞ'a

Ve yine beni yaptığım tüm çalışmalarda karşılıksız destekleyen, bilgisini sınırsızca paylaşan ve bunlarında ötesinde beni kardeşiymiş gibi koruyan ve kollayan hocam ve ağabeyim sayın Dr. M. Kemal ÖZFIRAT'a ,

Beni bu yaşa kadar büyüten, benden çok benim derdime düşen aileme ve de tez çalışmalarım boyunca bana her zaman katlanan ve hiçbir zaman yardımını ve sevgisini esirgemeyen sevgili eşim Ayşegül ÖZ'e ve beni her zaman güldürmeyi başarabilen canım kızım Kardelen ÖZ'e en içten sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ali ÖZ

İSTANBUL-KADIKÖY-KARTAL METRO TÜNELİNDE KULLANILAN TÜNEL AÇMA MAKİNESİNDE (TBM) KAZI PERFORMANS ANALİZİ

ÖZ

Kadıköy Kartal Metro Tüneli güzergâhında kazılan formasyonun jeoteknik etütleri ve jeolojik özellikleri incelenmiştir. İstanbul Kadıköy-Kartal metro tünel hattı kazısında kullanılan arazi basıncı dengeleme ve tam cepheli tünel açma sistemlerinin ikisinin de tek makinede uygulanabildiği iki adet EPB/TBM makinesi ile ilgi kazı çalışmaları sırasında yapılmış performans tahmin ve kazı parametreleri araştırmalarına yer verilmiştir. Tamamlanan tünel inşaatına ait nihai kazı ilerleme parametreleri kazı sırasında yapılan araştırmalarla karşılaştırılmıştır. Hat boyunca belirli aralıklarla alınan kayaç numuneleri üzerinde yapılmış tek eksenli sıkışma dayanımı ve zemin numuneleri deney sonuçlarının, makine itme kuvveti, tork, penetrasyon indeksi değerleri, ilerleme miktarı, kesici kafa dönme sayısı parametrelerine etkilerinin araştırıldığı çalışmadaki belirli bir aralık ile kazı ilerleme ve makine kayıtlarına ait nihai parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Buna ek olarak, tam boyutlu kesme deneyleri ile bazı tasarım parametrelerinin ve performans tahminlerinin yapılabilirliği incelenmiş, bu incelemelerin tamamlanan kazı ilerlemeleri ile bağlantıları araştırılmış ve yorumlanmıştır.

Hali hazırda elektro mekanik ve iç kaplama işleri devam eden İstanbul Kadıköy-Kartal metro projesinin kazı performans analizi, kazı sırasında yapılmış iki farklı performans tahmin yöntemi incelenerek, tamamlanan kazı ilerleme hızları karşılaştırılmış, makine verileriyle çizilen grafikler kullanılarak kazılan kayaç ile makine ilerlemesi arasındaki ilişki ortaya konmuştur.

Anahtar sözcükler: Jeoteknik etüd, EPB/TBM (Arazi Dengeleme Makinesi), Kazı parametreleri, İtme kuvveti, Tork, Penetrasyon indeksi, Tam boyutlu kesme deneyi, Kazı performans analizi

ANALYSIS OF EXCAVATION PERFORMANCE OF THE TUNNEL BORING MACHINE (TBM) USED IN İSTANBUL-KADIKÖY-KARTAL METRO TUNNEL

ABSTRACT

Geotechnical and geological features of the formation which were excavated at Kadıköy Kartal tunnel route were examined. 2 EPB/TBM machines are used which can apply two different methods; the first one is earth pressure balance and the second one is full face tunnel boring system. During the excavation of tunnels, performance prediction and excavation parameters investigations are given. The completed tunnel excavation for construction of the progress of the final parameters were compared with research carried out during excavation. Samples taken at regular intervals along the tunnel route, rock samples were conducted on uniaxial compressive strength and soil samples test results, the machine thrust force, torque, penetration index values, the amount of progress, the number of rotation of the cutting head with a certain range of parameters investigated the effect of study and the machine records the progress of the excavation studied the relationships between the final parameters. In addition, some of the full-scale experiments examined the feasibility of the design parameters and performance predictions, inspections performed in, researched and interpreted relations with the progress of completed excavation.

Electromechanical and civil works of İstanbul Kadıköy – Kartal metro project continues. Excavation performance analysis of the project made during the excavation of two different performance prediction method is analyzed and compared with rates of progress of the excavation completed, Graphics drawn using data from the machine, The relationship between progression of the excavated material and the machine is shown.

Keywords: Geotechnical studies, EPB / CPC (Earth Balance Machine), Excavation parameters, Thrust force, Torque, Penetration index, Full-scale testing, Performance analysis of the excavation.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT v

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

BÖLÜM İKİ – GÜZERGÂH VE PROJE ÖZELLİKLERİ 3

BÖLÜM ÜÇ – JEOTEKNİK ETÜDLER VE JEOLOJİ 6

3.1 Sondajlar 6
3.2 Yüzey Jeolojisi Çalışmaları 7
3.3 Laboratuar Deneyleri 9
3.4 Genel Jeoloji 10
3.4.1 Dolgu Tabakası 11
3.4.2 Alüvyon Zemin 11
3.4.3 Kil Seviyesi 11
3.5 İstatiksel Değerlendirmeler Ve Sonuç Tablolar 12
3.6 Jeoteknik Tasarım Parametreleri ve Değerlendirmeler 13

BÖLÜM DÖRT – TAM CEPHELİ TÜNEL AÇMA MAKİNELERİ (TBM) ... 15

4.1 Giriş 15
4.2 TBM Gelişim Süreci, Özellikleri Ve Sınıflandırılması 15

4.3 TBM Tipleri 20
4.4 Arazi Dengeleme Makineleri (EPB) Ve Uygulamaları.....20
4.5 Kadıköy-Kartal Metro Tünelinde Kullanılan EPB/TBM Makineleri 27

BÖLÜM BEŞ – TBM PERFORMANS TAHMİNİ 32

5.1 Giriş.....32

BÖLÜM ALTI – EPB/TBM TÜNEL AÇMA MAKİNELERİ KAZI PARAMETRELERİ 36

6.1.Giriş.....36
6.2 İtme Kuvvetine Ait Değerlendirmeler.....34
6.3 Torka Ait Değerlendirmeler 38
6.4 İlerleme Hızının İncelenmesi 41
6.5 Penetrasyonun İncelenmesi 43

BÖLÜM YEDİ – TAM BOYUTLU KESME DENEYİ İLE EPB/TBM PERFORMANS TAHMİNİ 45

7.1 Giriş.....45
7.2 TBM Kesici Kafa Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi ve TBM Performans Tahmini 49
7.3 Performans Tahmini İle Gerçek Değerlerin Karşılaştırılması 53

BÖLÜM SEKİZ – GENEL DEĞERLENDİRME 58

8.1 Giriş.....58
8.2 Kazı İlerleme Hızı 58
8.3 Makine Kazı Parametre Kayıtları.....62

8.4 Kazı Performansının Değerlendirilmesi 63

BÖLÜM DOKUZ – SONUÇ 75

KAYNAKLAR 77

EKLER.....78

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte inşaat ve madencilik sektörlerinde yer altı yapılarının önemi her geçen gün artmaktadır. Özellikle büyük yerleşim yerlerinde nüfus yoğunluğuna bağlı olarak artan ihtiyaçların karşılanabilmesi için yer altı çalışmaları ayrı bir önem kazanmıştır. Açılan yer altı boşluklarının çevreye ve yer üstü yapılarına zararlarının azaltılması ise ancak doğru kazı yönteminin seçimi ile mümkündür. Tünellerde mekanik kazı yöntemleri son yıllarda hızlı bir gelişim göstermektedir. Bunun nedeni, mekanik kazı da kullanılan makinelerden biri olan tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) ile tünel açmanın ve uygun jeolojik koşullarda uzun tünellerin açılmasında en ekonomik yöntem olmasının açıkça görülmesidir.

Bu araştırmanın konusu, İstanbul Kadıköy – Kartal Metro tünel hattında kullanılan EPB/TBM makinesinin (arazi basınç dengeleme/tam cepheli tünel açma) kazı performansının analizidir. Kazı aşamasında yapılmış iki kazı performans tahmin yönteminin sonuçları incelenerek nihai kazı ilerleme ve makine verileri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sayısal veriler kullanılarak çizilen grafiklerle kazı performansının kayaç özellikleri ile ilişkisi ortaya konmuştur.

Bu çalışmada öncelikle mevcut tünel hattının genel olarak güzergâh ve proje özelliklerinden bahsedilmiştir. Tasarım aşamasında yapılmış konuya esas EPB/TBM makinesinin geçtiği/kazdığı formasyonun sondaj ve laboratuar testlerine dayanan jeoteknik ve jeolojik özellikleri verilmiştir. Genel olarak, tam cepheli tünel açma makinelerinin tarihsel gelişiminden bahsedilmiş ve uygulamada kullanılan EPB/TBM makinesinin çalışma ilkeleri ve teknik parametreleri üzerinde durulmuştur. Mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenen kaya birimlerinin, tünel kazısı sırasında belirli bir aralıkta (EPB/TBM makinesinin geçtiği/kazdığı) yapılan kazı performans tahmin ve kazı parametreleri analiz araştırmaları incelenmiştir. Kazı çalışmaları yapıldığı dönemde elde edilen teorik yaklaşımlar, uygulamadaki nihai kazı parametreleri ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Kadıköy-Kozyatağı güzergahında Acaroğlu ve Bayram (2011) tarafından yapılan çalışmada tünel kazısında kullanılan EPB tünel açma makinalarının kazı parametreleri analizi incelenmiştir. Bu çalışmada tünel hattı boyunca belirli aralıklarla kaya ve zemin numuneleri alınmıştır. Kayaç numuneleri üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılarak, bu deney sonuçlarının makinenin itme kuvveti, tork, bunların penetrasyon indeksi değerleri, ilerleme miktarı, kesici kafa dönme sayısı parametrelerine etkileri araştırılmış ve yorumlanmıştır. Makineler zeminde ve kayaçta ilerlerken tork, itme kuvveti ve ilerleme parametrelerinde genel değişimler ortaya konulmuştur.

Bilgin ve arkadaşları (2008) tarafından Kadıköy-Kartal metro tünellerinde kullanılacak tünel açma makinelerinin (TBM) tasarım parametrelerinin kesme deneyleri ile belirlenmesi ve performans tahminine yönelik yapılan çalışmada ise projede karşılaşılan kaya birimlerinin tam boyutlu kesme testleri kullanılarak tam cepheli tünel açma makinesinin (TBM) bazı tasarım parametreleri ve kazı performans tahminlerinin belirlenmesine değinilmiştir. Tamamlanan kazı çalışmalarına ait kazı ilerleme ve makine ilerleme raporları dönemsel ve kümülatif olarak ortaya konmuş, yukarıda bahsedilen iki çalışmada belirlenen kazı performans tahmin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Kazı ilerleme ve makine ilerleme raporlarından elde edilen sayısal veriler ile kayaç özellikleri arasındaki ilişki grafiklerle açıklanarak kazı performans analizi yapılmıştır.

BÖLÜM İKİ

GÜZERGÂH ve PROJE ÖZELLİKLERİ

İstanbul Kadıköy – Kartal metro tüneli projesi yaklaşık 21,7 km uzunluğunda olup Kadıköy Meydanı'ından başlayarak Koşuyolu mevkiinde E-5 karayoluna ulaşmakta ve bu yola paralel şekilde ilerleyerek Kartal mevkiinde sona ermektedir. Güzergâh yerleşim planı Şekil 2.1'de verilmektedir. Güzergâh, yerleşim ve iş merkezlerinin üzerinde bulunduğu özellikle Kadıköy bölgesinde çok yoğun bir yapılaşma koridoru üzerinde yer alırken diğer bölümlerde de göreli olarak yoğun trafik, kavşak yapıları ve üst geçitler, yerleşim ve ticari amaçlı yapıların yer aldığı bir hat üzerindedir.

Kazı, kaplama betonu ve ince işleri tamamlanan metroda elektromekanik işler kapsamında test sürüşleri devam etmektedir. Faaliyete geçmesinin ardından metro yukarıda değinilen yapılar ve bunlarla ilintili çok sayıda insana ulaşım kolaylığı getirecek, üzerinde yer alan 16 istasyon yapısı ile çevre banliyöleri de kapsayacak şekilde İstanbul ili Anadolu yakasındaki insanların %80'ine hizmet verecektir.

Güzergâhın KM 0+000 – KM 3+620 arasında kalan kesimi Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ile KM 3+620 ile KM 8+450 arasındaki kesimi EPB/TBM ile kazılmıştır. Geriye kalan yaklaşık 13,2 km uzunluğundaki tünel kesimi, istasyonların giriş-çıkış yapıları ve bilet holü katları aç-kapa yöntemi ile inşa edilmiştir. Farklı kesitlerde hat tünellerine göre daha kısa olan peron, merdiven ve makas tünelleri ile şaftlar, şaft yaklaşım tünelleri yapımı yine Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ile gerçekleştirilmiştir. Güzergâhın tüm kesiminde incelenen yer altı istasyonları kilometre sınırları ile birlikte Tablo 2.1'de verilmektedir (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Tünel Yapılarının Geoteknik Raporu, [İBB,TYGR], 2006).

Tablo 2.1 Kesim üzerinde yer alan istasyonlar (İBB, TYGR, 2006).

İstasyon	Başlangıç	Bitiş	Ray Üst Kotu
Kadıköy	KM 0+208	KM 0+388	-32,00
İbrahimağa	KM 1+536	KM 1+716	-19,00
Acıbadem	KM 2+958	KM 3+138	+19,48
Ünalan	KM 4+662	KM 4+842	-17,55
Göztepe	KM 5+699	KM 5+879	-15,00
Yenisahra	KM 7+336	KM 7+516	+21,95
Kozyatağı	KM: 8+660	KM:8+840	+34,40
Bostancı	KM: 9+963	KM:10+143	+24,55
Küçükyalı	KM 12+205	KM 12+385	+ 16,46
Altayçeşme	KM 13+753	KM 13+933	-10,45
Maltepe	KM 15+209	KM 15+389	+ 34,25
Gülsuyu	KM 16+162	KM 16+342	+ 35,55
Cevizli	KM 17+255	KM 17+435	+ 13,30
Hastane	KM 18+371	KM 18+551	+ 30,65
Soğanlık	KM 19+952	KM 20+132	+ 44,81
Kartal	KM 21+122	KM 21+302	+ 68,95



Şekil 2.1 Raylı sistem güzergahı yerleşim planı (İBB, TYGR, 2006).

BÖLÜM ÜÇ

JEOTEKNİK ETÜDLER VE JEOLOJİ

3.1 Sondajlar

Güzergâhın KM 0+000 ile KM 21+662[60] kesiminde 4638,15 m uzunluğunda toplam 142 adet araştırma sondaj delgisi delinmiştir. Sondaj kuyularının derinlikleri 13,5m ile 46,5m arasında değişmektedir.

Sondajlarda rotary delme yöntemi kullanılmıştır, zeminin zayıf olduğu bölgelerde ise muhafaza borusu sürülmüştür. Zemin ve kayaçlarda ilerlemek için 3 5/8" rockbit ve karotiyer uç kullanılmıştır (İBB,TYGR, 2006).

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından hazırlanan jeoteknik raporda sondajlarla ilgili yapılan çalışmalar şu şekildedir:

Sondajlar sırasında zemin tabakalarında her 1,5m' de bir Standard Penetrasyon Testi (SPT) yapılmıştır. SPT-N_{30} darbe sayılarından hareketle zeminlerin çeşitli dayanım parametreleri tahmin edilmiştir. Ayrıca SPT sırasında alınan örselenmiş örnekler üzerinde zemin sınıflandırmasına yönelik deneyler yapılmıştır. Arazi SPT-N_{30} değerleri düzeltilmemiştir. Araştırma sondajlarının delgisi sırasında sondaj kuyularının içinde zemin tabakalarının sıkılık ve kıvamlarının belirlenmesi amacıyla standart penetrasyon deneyi, kaya ortamların su geçirimliliğinin belirlenmesi amacıyla basınçlı su deneyleri, zemin ve kaya tabakaların deformasyon özelliklerinin belirlenmesi amacıyla da presyometre deneyleri yapılmıştır. Kaya ortamlardan alınan karot örnekler için toplam karot yüzdesi (%TCR), sağlam karot verimi (%SCR) ve kaya kalite değeri (%RQD) sondajlar sırasında belirlenerek loglarda belirtilmiştir.

Jeoteknik etüt kapsamında güzergâhın KM 3+500 ile KM 8+000 arasında kalan (EPB/TBM ile geçilen/kazılan) kesimindeki 30 adet sondajın delgi çalışmaları, Mart - Aralık 2005 tarihleri arasında GEOS Jeoteknik ve Sondajcılık Ltd., AYSON Sondaj Araştırma ve İnşaat A.Ş. ve Zemin Mühendisliği ve İnşaat Sanayi A.Ş. tarafından yapılmıştır. Bu kesimde yer alan sondajların koordinatları, kotları, derinlikleri ile sondajlarda ölçülen yeraltı suyu kotları ve derinlikleri, artan kilometre sırasıyla Tablo 3.1'de verilmiştir (İBB,TYGR, 2006).

3.2 Yüzey Jeolojisi Çalışmaları

Müteahhit ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi işbirliğince yapılan yüzey çalışmalarında güzergâh koridoru üzerinde yoğun yapılaşma ve arazinin geniş ölçüde doğal özelliğini kaybettiği gözlenmiştir. Bu nedenle litolojilere ait ipucu verecek mostralar genellikle varlıklarını yitirmişlerdir (İBB,TYGR, 2006). Bununla beraber, arazide göreli olarak uzun süreler harcayarak mevcut inşaat çukurları ve E-5 karayolu üzerindeki şev yüzeylerinde yüzey jeolojisi çalışmaları yapmışlar, faylar belirlenmiş, süreksizlik ölçümleri, formasyon ve litoloji adlandırma ve tanımlamaları yapılarak bunların plan ve profil paftaları üzerinde işlenip değerlendirilmesiyle zemin ve kaya yapılarının mühendislik özelliklerinin ayırtlanması sağlamışlardır. İstanbul Anadolu Yakası jeolojisi (Seymen, 1995) ve güzergâh jeolojik profili Ek 1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Sondajların koordinat ve kotları (İBB, TYGR, 2006).

	Kuyu Adı	Y	X	Kot	Derinlik	YERALTI SU SEVİYESİ				
						İLK ÖLÇÜM			2. ÖLÇÜM	
						Derinlik	Kot	Tarih	Derinlik	Kot
				(m)	(m)	(m)	(m)	(Ay / Yıl)	(m)	(m)
1	ZKS-8	420145,959	4541325,304	30,07	30,0	15,0	15,1	7/2005	_	_
2	ZKS-8/A	420392,930	4541246,284	13,76	30,0	3,4	10,4	12/2005	2,5	11,2
3	ZKS-9	420436,062	4541191,510	14,57	33,0	5,1	9,5	7/2005	4,1	10,5
4	ZKS-9/A	420596,053	4541112,025	12,10	32,5	10,0	2,1	11/2005	2,7	9,4
5	KKS-8/A	420784,328	4541026,720	12,54	34,0	6,0	6,5	10/2005	_	_
6	KKS-8	420768,560	4540969,530	11,21	30,0	3,8	7,4	6/2005	_	_
7	ZKS-10/A	421093,072	4540866,999	13,71	36,0	3,0	10,7	11/2005	1,0	12,7
8	KKS-9	421129,883	4540773,783	13,16	30,0	3,8	9,4	6/2005	2,6	10,5
9	ZKS-10	421185,315	4540812,201	13,84	30,0	2,5	11,3	7/2005	0,6	13,2
10	ZKS-11	421326,916	4540763,464	18,80	30,0	7,1	11,7	7/2005	_	_
11	ZKS-12	421486,917	4540673,704	16,94	30,0	2,8	14,1	7/2005	1,4	15,5
12	ZKS-12/A	421619,093	4542060,366	17,11	31,0	2,0	15,1	11/2005	_	_
13	ZKS-13	421787,153	4540540,434	16,03	29,0	6,5	9,5	7/2005	0,9	15,1
14	ZKS-13/A	422006,446	4540443,951	20,93	36,0	8,3	12,6	12/2005	_	_
15	ZKS-14	422150,616	4540369,331	21,90	29,0	6,5	15,5	8/2005	_	_
16	ZKS-15	422263,120	4540296,091	15,98	29,7	3,5	12,5	8/2005	_	
17	KKS-10	422342,450	4540169,070	17,39	25,0	4,2	13,2	3/2005	_	_
18	ZKS-16	422481,415	4540201,005	16,71	29,0	4,5	12,2	7/2005	2,1	14,6
19	KKS-11	422549,480	4540066,440	22,22	25,0	3,9	18,3	3/2005	_	_
20	ZKS-16/A	422769,156	4540033,622	21,97	22,0	11,8	10,2	9/2005	_	_
21	ZKS-17	422953,448	4539913,005	41,97	37,7	13,0	29,0	7/2005	4,6	37,4
22	ZKS-18	423237,583	4539680,345	59,11	34,0	9,5	49,6	7/2005	_	_
23	ZKS-19/C	423396,360	4539548,600	53,70	41,0	11,2	42,5	9/2005	_	
24	ZKS-19/D	423406,542	4539537,841	52,41	37,5	7,0	45,4	11/2005	_	_
25	ZKS-19/E	423408,957	4539529,125	52,29	13,5	_	_	10/2005	_	
26	ZKS-19	423474,045	4539477,057	52,10	30,0	16,7	35,4	7/2005	3,2	48,9
27	ZKS-19/A	423567,753	4539397,881	57,48	36,0	_	_	9/2005	_	_
28	ZKS-19/B	423717,332	4539340,882	61,00	39,7	8,5	52,5	9/2005	_	_
29	KKS-12	423732,190	4539205,590	64,97	25,0	1,7	63,3	4/2005	_	_
30	KKS-12/A	423839,021	4539182,831	66,21	45,0	10,5	55,7	9/2005	_	_

3.3 Laboratuar Deneyleri

Güzergâh boyunca tüm raylı sistem yapılarının içinde ve üzerinde yer alacak tabakaların mekanik özellikleri, projelendirme çalışmalarında esas alınacak tabakaları temsil edecek jeoteknik parametrelerin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla sondajlar sırasında, zemin ve kaya tabakalarından alınan örnekler üzerinde, ZEMAR Zemin Araştırma ve Test Laboratuvarı, I.Ü. Mühendislik Fakültesi ve İTÜ Maden Fakültesi laboratuvarlarında zemin ve kaya mekaniği deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler aşağıda özetlenmiştir.

Örselenmiş ve örselenmemiş zemin örnekleri üzerinde çoğunlukla;

- Elek Analizi,
- Atterberg Limitleri,
- Su İçeriği,
- Serbest basınç

deneyleri yapılmıştır (İBB,TYGR, 2006).

Kaya ortamlardan alınan karotlar üzerinde yapılan deneyler;

- Su İçeriği,
- Porozite,
- Birim Ağırlık,
- Özgül Ağırlık,
- Nokta Yükleme,
- Tek Eksenli Basınç Dayanımı,
- Elastisite Modülü ve Poisson Oranı,
- Üç Eksenli Basınç Dayanımı,
- Direkt Kesme,
- Aşınma İndeksi (Cherchar),
- Petrografik Analiz

olarak sıralanabilir (İBB,TYGR, 2006).

Yeraltı suyu kimyasal özelliklerini belirlenebilmesi için güzergâhın seçilen karakteristik bölgelerindeki sondajlardan ve açılmış olan şaftlardan örnekler alınarak kimyasal analizler yapılmıştır. Deney sonuçları ilgili standartlara göre değerlendirildiğinde (BS 5328: Part 1: 1997), yeraltı suyunun yapı ünitelerine zarar verecek nitelikte olmadığı belirlenmiştir. Bu konudaki detaylı çalışmalar Kalite Kontrol Bölümü tarafından yürütülmüştür (İBB,TYGR, 2006).

Zemin ve kaya laboratuar deneylerinin toplu sonuçları Ek 2'de sunulmuştur.

3.4 Genel Jeoloji

Ana formasyonların kilometrelere göre dağılımı aşağıdaki verilmiştir:

- KM 0+000 - KM 3+500 Trakya Formasyonu,
- KM 3+500 - KM 11+000 Kartal Formasyonu,
- KM 3+500 - KM 8+000 Kartal Formasyonu - Zon A
- KM 8+000 - KM 11 +000 Kartal Formasyonu - Zon B
- KM 11 +000 - KM 18+000 Kurtköy Formasyonu,
- KM 18+000 - KM 21+663 Dolayoba Formasyonu

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından hazırlanan jeoteknik rapor sonuçlarına göre, KM 3+500 - KM 8+000 aralığı içinde kaya formasyonu, sarımsı kahve-gri renkli, iyi yapraklanmalı, seyrek kiltaşı ve kumtaşı aratabakalı şeyllerden ve kireçtaşı birimlerinden oluşan Kartal Formasyonu'dur. Tektonik etkiler sonucu kıvrımlı - kırıklı bir yapı kazanmış olan bu birim, tektonik deformasyonların yarattığı süreksizliklerin de etkisiyle yüzeyde ortalama 1m derinliğe kadar ayrışmıştır. Dalga tabanı altındaki düşük enerjili ve açık-derin denizel koşullarında çökelmiş olan formasyon, Kartal bölgesinde 750m kalınlığa ulaşmaktadır (İBB, TYGR, 2006).

Kartal Formasyonu, Acıbadem İstasyonu'ndan sonra alüvyonların altından başlar ve Bostancı İstasyonu'ndan sonra Çamaşırcı Deresi Vadisi'ne kadar devam eder. Yaklaşık KM 4+300 - KM 10+800 arasında, zaman zaman Belgrad Formasyonu altında izlenen birim, doğu sınırında faylıdır. Acıbadem İstasyonu'ndan sonra KM 3+500 - KM 4+300 arasında Trakya, Tuzla ve Baltalimanı formasyonları ile geçişler göstermektedir (İBB,TYGR, 2006).

Karbonatlı şeyl - şeyl birimlerinden oluşan Kartal Formasyonu'nda 50-200mm sıklıkla bulunan çatlaklar genellikle kil ve kalsit dolguludur. Karbonatça zengin seviyelerinde çatlak sıklığı kimi zonlarda 200-500mm ye kadar çıkarken fay zonlarında 50mm'nin altına düşebilmektedir. Kırık ve ezik kesimlerde birim kolay kazınır niteliktedir (İBB,TYGR, 2006).

Formasyonun belirgin jeomekanik farklılıklar göstermesi nedeniyle, jeoteknik profillerde sunulduğu şekilde proje güzergahının KM 3+500 - KM 8+000 aralığında, Hasanpaşa Kavşağı'ndan başlayarak Yenisahra ve Kozyatağı İstasyonları arasında sona eren kesimi "Kartal Formasyonu Zon A" olarak adlandırılmıştır (İBB,TYGR, 2006).

3.4.1 Dolgu Tabakası

Sondajların hemen hemen tamamında tespit edilmiş dolgu tabakasının kalınlığı değişkenlik göstermektedir. Dolgu zeminler KM 3+800 - KM 4+340 ve KM 5+400 - KM 6+780 arasında belirginleşmektedir. KM 4+000 civarında kavşak köprüsü dolguları ile birleşerek 20m kalınlığa kadar çıkmaktadır. Bu dolgu tabakasının, kavşak köprüsü dolgusu altında yumrulu kireçtaşlarından oluştuğu belirlenmiştir (İBB, TYGR, 2006).

Dolgu zemin sondajların rengi genellikle siyah ve kahverengi olarak belirlenmiştir. Tabaka, çok değişik zemin türleri içerdiğinden çok değişken indeks ve dayanım değerleri göstermektedir. Bazı yörelerde iri taşlar içerdiği bilinmekle birlikte genel olarak %30 kil, %20 silt ve %50 kum dane dağılımındadır (İBB,TYGR, 2006).

3.4.2 Alüvyon Zemin

Alüvyon dolgu tabakası, KM 3+800 - KM 4+260 ve KM 5+120 - KM 6+520 arasında kontrolsüz dolgu altında yer almaktadır. KM 3+840 - KM 4+140 arasında ise tünel aynasında ve tabanında belirlenmiştir (İBB,TYGR, 2006).

3.4.3 Kil Seviyesi

Kil seviyesi sondajlarda belirlenen kil tabakası, dolgu tabakaları ve alüvüyal çökeller altında yer almaktadır. Killer, altında yer alan kaya formasyonunun yerinde ayrışması ile meydana gelmiş rezidüel zeminlerdir. KM 5+100 - KM 6+520

aralığında alüvyon dolgular altında, KM 6+580 ila rapor sonu KM 8+000 arasında ise Belgrad Formasyonu (çakıllı kum kil tabakası) altında göreli olarak ince kalınlıklarda yer almaktadır (İBB,TYGR, 2006).

KM 6+570 ile yaklaşık EPB/TBM makinesinin geçtiği formasyon, kilometre sonu olan KM 8+000 arasında, yapay dolgu tabakası altında görülen zemin niteliğindeki bu formasyon, çakıllar içermekte, kum boyutundan kil boyutuna dek değişik dane boyu dağılım özellikleri sergilemektedir (İBB,TYGR, 2006).

3.5 İstatiksel Değerlendirmeler Ve Sonuç Tablolar

Kaya sınıfları için dayanım ve deformasyon parametreleri, veri sayısına bağlı olarak Eurocode-7'de önerildiği şekilde çoğunlukla %95 güvenlikle alt ve üst değerleri hesaplanan "güven aralıkları" ile temsil edilmiş, grafiksel olarak da sunulmuştur (TS EN 1997-1 2005, National Research Council 1995).

Grafiksel değerlendirmelerde, veri sayısının azlığı ve değişkenliği göz önünde bulundurularak direkt kesme deney sonuçları ve presiyometre elastisite modülleri %85 güven aralığında hesaplanarak sunulmuştur (İBB, TYGR, 2006).

x_{ort} Aritmetik ortalama, S Standart sapma, t denek sayısı ve n veri sayısı olmak üzere;

Ortalamanın güven aralığı için alt değer (İBB, TYGR, 2006);

$$x_{min} = x_{ort} - t\frac{s}{\sqrt{n-1}}$$

Ortalamanın güven aralığı için üst değer (İBB, TYGR, 2006);

$$x_{min} = x_{ort}t + \frac{s}{\sqrt{n-1}}$$

bağıntıları ile hesaplanmıştır (İBB, TYGR, 2006).

Sonuç tablolarında Ek 3'te sunulan veriler ve hesaplanan parametreler için ikinci kolonda kullanılan indisler;

1. Sondaj bulguları,
2. Laboratuvar deney bulguları,

3. Uygulama parametreleri,
4. Hesaplanan kaya kütle özelliklerini

göstermektedir (İBB,TYGR, 2006).

Kartal Formasyonu – Zon-A "Kaya Sınıfı I" ve "Kaya Sınıfı II" için elastisite modülü, kohezyon ve içsel sürtünme açısı güven aralıklarını veren grafikler Ek 4'te verilmiştir (İBB, TYGR, 2006).

3.6 Jeoteknik Tasarım Parametreleri Ve Değerlendirmeler

İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nce proje öncesi hazırlık sürecinde tamamlanan jeoteknik değerlendirmeler sonucunda incelenen KM 3+500 - KM 8+000 aralığındaki zemin ve kaya tabakalarına ait jeoteknik tasarım parametreleri Tablo 3.2'de özetlenmektedir. Tabloda verilen dayanım ve deformasyon değerleri efektif parametrelerdir (İBB, TYGR, 2006).

Tablo 3.2 KM 3+500 – KM 8+000 Aralığı için jeoteknik tasarım parametreleri (İBB, TYGR, 2006).

TABAKA/FORMASYON ÖZELLİKLERİ			JEOTEKNİK TASARIM PARAMETRELERİ				
Zemin Sınıfı Litoloji	Tabaka / Formasyon		*Birim Hacim Ağırlığı*	*Dayanım Parametreleri*		*Deformasyon Parametreleri*	
				Kohezyon	*İçsel Sürtünme*	*Elastisite Modülü*	*Poisson Oranı*
			$\gamma, (kN/m^3)$	$C', (kPa)$	$\varphi', (°)$	$E'_m, (Mpa)$	$\nu, (-)$
Dolgu	Yapay Dolgu		19	0	23	15	0,35
Çakıl Kum Kil	Alüvyon Dolgu Tabakası		20	0	26	25	0,30
Rezidüel Kil	Kil Tabakası		21	0	30	50	0,40
Çakıllı Kum Kil	Belgrad Formasyonu		21	0	26	80	0,30
Kireçtaşı–Seyl Ardalanması	*Kartal Formasyonu*	Kaya Sınıfı I	24	80	30	250	0,30
		Kaya Sınıfı II	25	150	35	450	0,30
		EZİK ZON	23	0	30	100	0,30

Çalışma alanına konu olan KM 3+500- KM8+000 aralığında yer alan ve "Kartal Formasyonu- Zon A" adı altında incelenen jeolojik birimler, sarımsı kahve- gri renkli, iyi yapraklanmalı, seyrek silttaşı ile kumtaşı aratabakalı şeylerden ve kireçtaşı seviyelerinden oluşmaktadır (İBB,TYGR, 2006). Birimlerin değişken aralıklı eklem takımları içeren, kıvrımlı-kırıklı bir yapıya sahip olmaları nedeniyle %TCR ve %RQD değerleri %0-100 gibi geniş bir aralık içinde değişkenlik göstermektedir. Oldukça sık olarak, parçalı ezik-zayıf zonlar ve volkanik sokulumlardan kaynaklanan ezilme-örselenme zonları da içermektedir (İBB,TYGR, 2006).

BÖLÜM DÖRT

TAM CEPHELİ TÜNEL AÇMA MAKİNELERİ (TBM)

4.1 Giriş

Madencilik ve inşaat sektöründe yeraltı yapılarının önemi teknolojik gelişmelere paralel olarak her geçen gün artmaktadır. Özellikle yerleşim merkezleri ve büyük şehirlerde elektrik, su, kanalizasyon, telefon, doğalgaz ve metro tünelleri gibi yer altı yapıların açılması sırasında, çevreye ve yer üstünde yapılara zarar vermemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi büyük önem taşımaktadır (Tunçdemir, 1998). İlk yatırım maliyeti yüksek olan tam cephe tünel açma makineleri (TBM) tasman gibi istenmeyen yeraltı hareketlerini önleme kabiliyeti, daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir. Sert, orta sert, yumuşak ve akıcı formasyonlar için kullanılacak kesici kafa ve keski tipleri, makine dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri çeşitli yönlerden farklılıklar göstermektedir. Açılacak yeraltı boşluğu boyunca geçilecek formasyonların önceden tespiti, kullanılacak makinenin seçiminde en önemli faktörlerden biri olmaktadır (Tunçdemir, 1998).

4.2 TBM Gelişim Süreci, Özellikleri Ve Sınıflandırılması

İlk tünel açma makinesi Amerika'daki Hoosac Tünelinde kullanılmıştır. Bu makine daire şeklinde döner bir kesme kafasına sahipti ve keskiler konsantrik daireler çizerek kazı yapacak şekilde dizilmişlerdi. Tutunma mekanizması, itme (baskı) mekanizması ve pasa uzaklaştırma düzenekleri vardı. 1856 yılı için oldukça başarılı sayılabilecek olan bu makine metalürji ve yapısal tasarım şekliyle sert kayaçlarda sağlıklı sonuçlar vermiyordu. Herman Haupt isimli meşhur inşaat mühendisi, bu makine ile 3 metrelik bir ilerleme yapmayı başarmıştı (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Tam cephe tünel açma makinelerinin esasını oluşturan bu kavram, takip eden yüz yıl için zayıf kalmış ve önemli bir gelişme yaşanmamıştır. Bazı keski ve kesme cihazları ile donatılmış tam cephe tünel açma makineleri yumuşak kayaçlar ve kömür

damarlarında denenmek istenmiş fakat istenen sonuçlara ulaşılamamıştır. James Robbins isimli mühendis 1956 yılında, kalem keskiler yerine döner disklerin kullanılma fikrini ortaya atmıştır. Bu fikir günümüzdeki tam cephe tünel açma makinelerinin gelişiminde çok önemli bir yere sahiptir. Toronto'daki bir uygulamada günde 38 m'lik ilerleme gerçekleşmiştir. Bu uygulama, tam cephe tünel açma makinelerinin yumuşak ve orta sert kayaçlarda ekonomik olarak kullanılabileceğinin ilk örneği olmuştur.

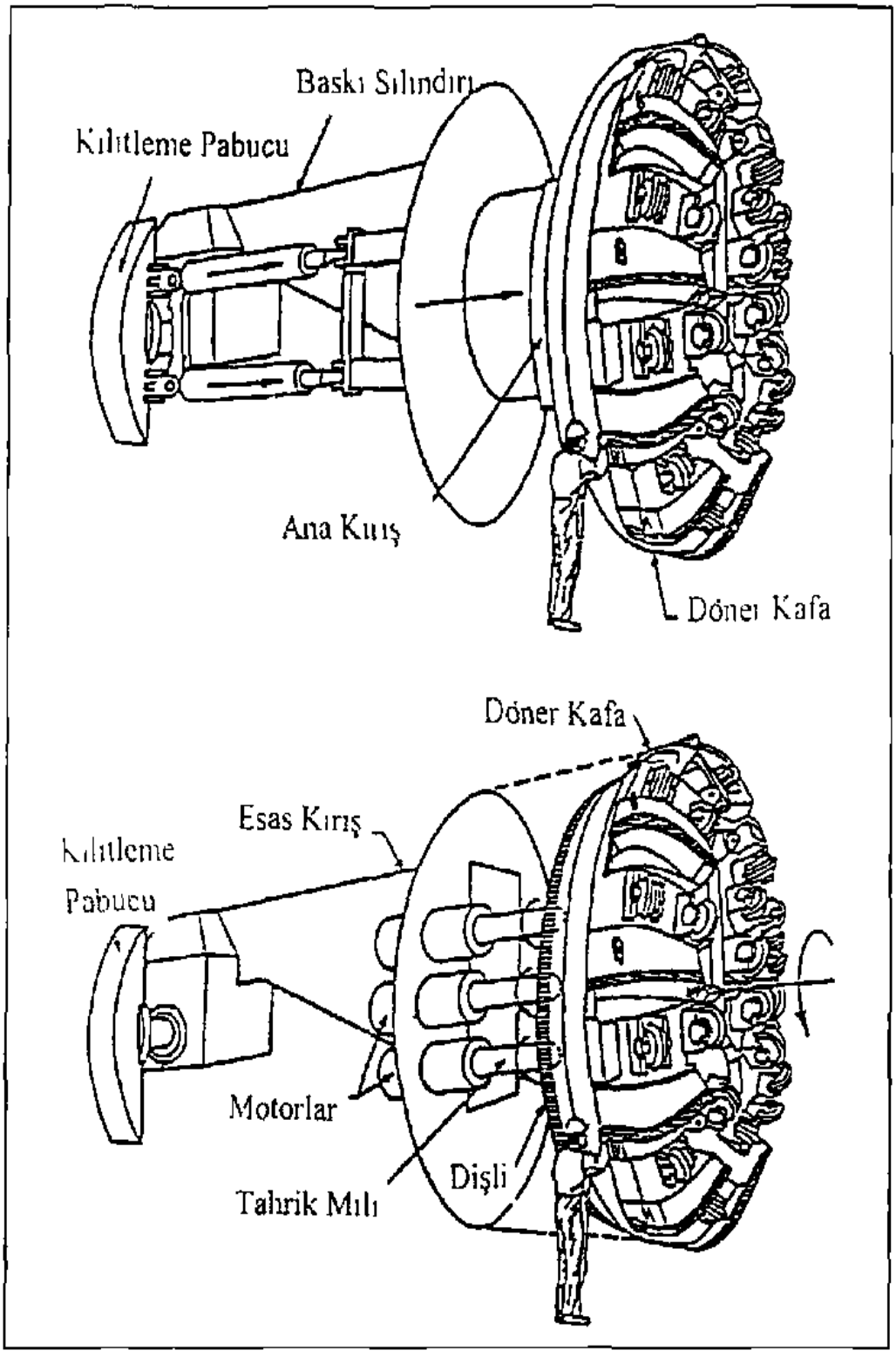
Toronto'daki uygulamayı izleyen 26 yıl boyunca teknoloji oldukça yavaş ilerlemiştir. Tam cephe tünel açma makine imalatçıları deneme yanılma politikası izleyerek makinelerin daha sert ve aşındırıcı kayaçlarda kullanılmasını sağlamaya çalışmışlardır. 1970'lerin sonu ve 1980'li yılların başlarında Amerika ve Avrupa'da birçok üniversite ve araştırma kurumu disk kesicilerin sert kayaçlardaki performansının fizik prensiplerini anlamak üzere çok sayıda araştırma yapmışlardır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Benzer şekilde, yumuşak arazideki tünel teknolojisi de, Times nehrini 1824 - 1840 yılları arasında geçtiği meşhur Brunei şildinden başlıyarak, gelişim göstermiştir. Brunei'in tasarımları 1864'de daire şilt patenti alan Peter Parlow tarafından geliştirildi. Bu şilt içine yerleştirilen astar segmentlerin itilmesi suretiyle baskı oluşturulmuştu. Makine ön kısımdan pasa akışını ve uzaklaştırılmasını temin edecek açıklığa sahipti. Bu şildin bir benzeri ile 1869'da Times nehri bir yılda geçilmiştir.

Bahsedilen bu makine, Arazi Basınç Dengeleme Makinesi'nin (EPB) ilk örneğidir. EPB ve biraz daha karmaşık yapılı çamur basınçlı makineler kavram olarak esasta Avrupa'dan çıkmış olsa da, esas gelişim Japonya'da yapılmıştır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Japonlar yeraltında yaptıkları nakliye ağını genişletirken, I960' lardan 1980'lere doğru, bu tür şiltlerden yüzlercesini üretmiştir.

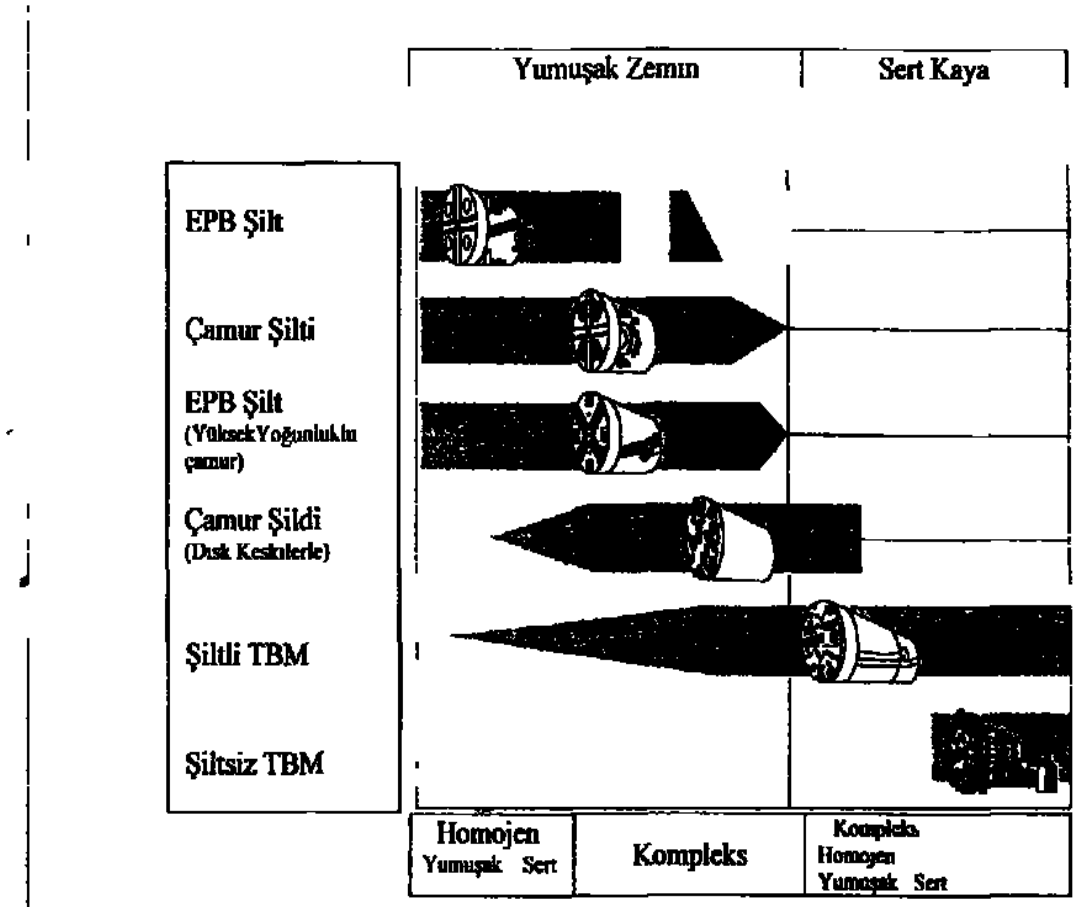
Tam cephe tünel açma makinelerinin yapısal elemanları olarak kesici kafa, itme silindirleri, yönlendirme silindirleri, kilitleme pabuçları (gripper), kesici kafayı döndüren motorlar ve beton tahkimat elemanlarını yerleştiren erektörler sıralanabilir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Tam cepheli tünel açma makinesinin arkasında bulunan ve back-up sistemler olarak adlandırılan kısımda ise hidrolik güç üniteleri, elektrik trafoları, kaya bulonları için bir delici, havalandırma fanları, pasa nakliyatı

için bant konveyörler, vagonlar bulunmaktadır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Şekil 4.1'de tam cephe tünel açma makineleri bastırma ve tork sistemleri şematik olarak gösterilmiştir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Tam cephe tünel açma makineleri genel olarak çalıştıkları formasyonlara göre sınıflandırılır. Genel anlamda sert kaya ve yumuşak formasyonlar olmak üzere iki ana sınıf mevcuttur. Sert formasyondan, yumuşak formasyona doğru gidildikçe tam cephe tünel açma makineleri yapısal açıdan önemli ölçüde değişim gösterir. Şekil 4.2'de çalışılan formasyonlara göre tam cephe tünel açma makinesi sınıflandırılması gösterilmiştir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).



Şekil 4.1 TBM baskı ve tork sistemleri (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).



Şekil 4.2 TBM sınıflandırması (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

4.3 TBM Tipleri

150 yıllık bir gelişim sürecinin ardından tam cephe tünel açma makineleri her türlü tünel ortamı ve formasyonda mekanik kazının yapılabildiği bir noktaya gelmiştir. Önceden sadece delme-patlatma ile açılabilecek formasyonlarda bile tam cephe tünel açma makineleri kullanılmaktadır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Tam cephe tünel açma makineleri aynanın tüm yüzeyini keskileri ile kavrar ve kazı yapar. Kazma işleminin oluşabilmesi için iki önemli kuvvet vardır. Aynaya dik olarak itilen kesici kafa ve itme kuvvetinin uygulanması sırasında kafanın dönmeye başlaması. Bu iki kuvvet ile kazı olayı gerçekleşmektedir. İtme kuvveti ve tork kazı aşamasının en önemli iki parametresidir. Aynadan kazılan pasa kesici kafa üzerinde bulunan kanatçıklar tarafından kesici kafa arkasındaki hazneye aktarılır. Hazne içerisinde bulunan konveyörle çıkan pasanın nakli gerçekleştirilir. Aynanın kesici kafa tarafından tamamen kapatılması aynaya yanaşmayı engeller. Bu yüzden

keskilerin değiştirilmesi zordur. Kimi durumlarda kesici kafanın önüne bir işçi geçerek keskileri kontrol edebilir. Bu yöntem iş güvenliğ ve işçi sağlığı açısından oldukça tehlikelidir. Yeni geliştirilen modellerde keskiler kesici kafanın içinden değiştirilebilmekte böylece aynaya geçmeye gerek kalmaz ve iş güvenliği tehlikeye atılmamış olur. Tam cephe tünel açma makine kesici kafa ve keski tasarımları makinelerin çalışacakları formasyona göre değişmektedir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Genel olarak yumuşak zemin ya da kayaçlarda riper dişler, kalem keskiler kullanılır. Kompleks zeminlerde ise kesici kafa hem riperler hem de disk keskilerden oluşur. Disk keskiler olası sert damarları ve kayaları kesmek için kesici kafaya yerleştirilmiştir. Sert zeminlerde ise kesici kafa da sadece disk keskiler bulunur (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Lovat firmasının ürettiği tam cephe tünel açma makinelerinde keskiler kesici kafanın arkasından değiştirilebilmektedir böylece arına geçerek meydana gelebilecek iş kazaları ortadan kalkmış olur (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Muammer Çınar ve Cenk Feridunoğlu tarafından hazırlanan Tünel Açma Makineleri (TBM) isimli çalışmada yapılan tam cephe tünel açma makineleri sınıflandırması;

1. Sert kayaç kayaç tünel açma makineleri
    a. Şiltsiz TBM
    b. Tek şiltli TBM
    c. Çift şiltli TBM
2. Yumuşak zemin tünel açma makineleri
    a. Arazi dengeleme makineleri
    b. Çamur şildi

olarak sıralanmıştır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Aşağıda bu çalışmanın konusu olan makine ile ilgili detaylar verilmiştir.

4.4 Arazi Dengeleme Makineleri (EPB) Ve Uygulamaları

Arazi basıncını dengeleme esasına göre çalışan EPB makineleri ilk olarak Japonya'da 1960 ve 1970' li yıllarda görülmeye başlamıştır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Yapışkan olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan

zeminlerde ilerlemeler sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Genellikle bu gibi alanlarda ve kendini kısa süreli bile tutamayan kayaçların kazısında bu tip makineler kullanılmaktadır. Temel çalışma prensibi su getirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması, Friant ve Özdemir (1994) tarafından bizzat arazi ve içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkan verilmesi şeklinde tanımlanmıştır. Amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve yüzeyin tamamını desteklemesidir. Böylece açılan yer altı boşluğu kazılan pasayla doldurularak arazi basıncı dengelenir ve ilerleme sağlanırken kayacın kendi kendini desteklemesi sağlanmış olur. Bu destekleme basıncının tünel kalınlığındaki doğal arazi basıncını karşılayacak bir değerde ayarlanması gerekir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Bu makineler 10 bara (1 MPa) kadar ulaşan basınç altında çalışabilecek şekilde tasarlanabilirler. En iyi çalışma koşullan arazi nemlilik oranının % 10-15 veya daha az olduğu durumlardır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

EPB makinesi çok sert kayaçlardan, çok yumuşak kayaçlara kadar, değişik kayaç ve zemin formasyonlarında kullanılmak üzere üretilmektedirler. Uygulama alanlarının genişliği ve uygulamanın basitliğinden dolayı, giderek çamur makinelerin yerlerini almaktadırlar.

Bir EPB makinesinde kazılan malzeme bir vida konveyör yardımıyla kesici kafa haznesinden çıkarılır. Kazı bölgesindeki arazi basıncının düşmesi ve buna bağlı olarak oluşacak oturmaları engellemek için kesici kafa haznesinden çıkarılan malzemenin kontrollü bir şekilde yapılması gerekmektedir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Bu yüzden vida konveyörün hızı malzeme çıkış hızını kontrol etmek için ayarlanır. Vida konveyör hızının ayarlanması bilgisayarlı bir monitörden izlenerek de yapılabilir. Dengeli ve güvenli bir kazı yapabilmek için malzeme çıkış hızının makine ilerleme hızına eşit olması gerekir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Böylece zemin oturmalarına yol açabilecek fazla malzeme çıkışına izin verilmez. Eğer ortamda bulunan suyun basıncı atmosfer basıncının üzerine çok fazla çıkarsa bazı basınç kilitleri gerekli olabilir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Basınç kilitleri vidanın bir yanından diğerine doğru bir patlamayı önlemek için gereklidir ve vidanın çıkış kapısında konumlandırılır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

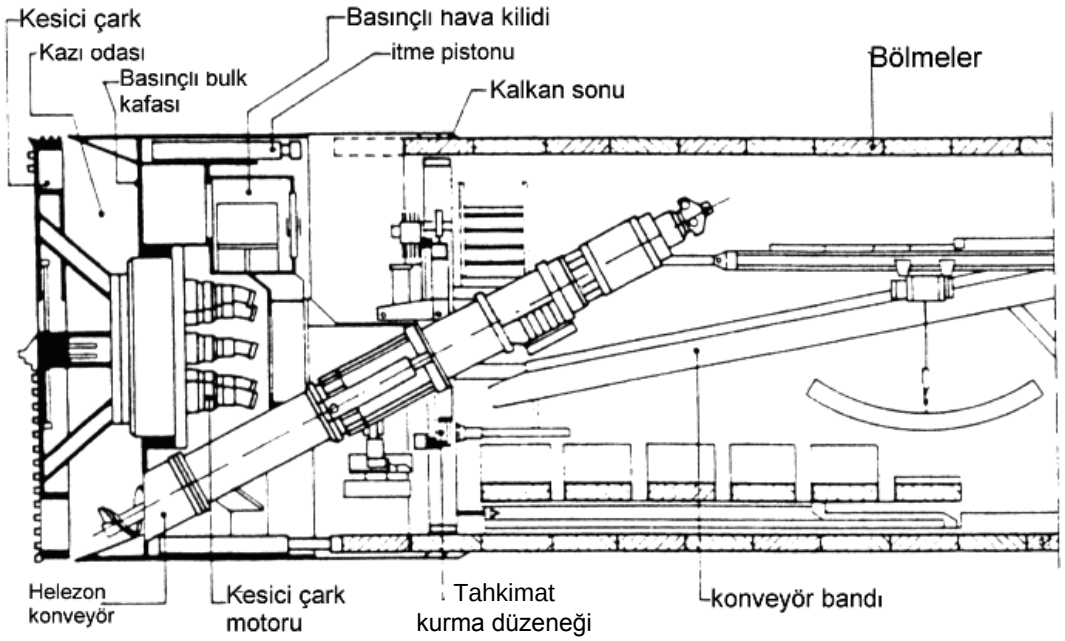
EPB makinelerinde diğer metotların aksine sıkıştırılmış hava ve süspansiyon gibi ikincil bir destekleme metodu kullanılmaz. Akıcı formasyon döner kafadaki keskiler tarafından kazılır. Kazı haznesinin doldurulmasıyla meydana getirilen basınç duvarı yoluyla itme kuvveti aynaya iletilir. Böylece kazı bölgesinde malzeme akışı kontrollü bir şekilde yapılmış olur. Kazı bölgesindeki zemin ya da kayaç uygulanan itme kuvveti nedeniyle daha fazla yük alamadığı anda denge sağlanılmış olur (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Formasyonu destekleme basıncı, sağlanan dengenin üzerine çıkarılırsa kazı bölgesindeki akıcı formasyon çok daha sağlam bir hale gelecektir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Eğer açılan tünel yeryüzüne yakınsa çok fazla uygulanan itme basıncı sebebiyle kabarmalar meydana gelebilir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Tünel boyunca taşıma, bant konveyörlerle, vagonlarla, damperli kamyonlarla ya da borular içerisine taşınmayı kolaylaştıran bir katkı maddesi eklendikten sonra katı taşıma pompaları yardımıyla yapılabilir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Eğer malzeme destekleme basıncını sağlayabilecek durumda ve vida konveyörle taşınacak kıvamda değilse; çeşitli kıvamlaştırıcı katkı maddeleri eklemek gerekebilir. Standart durumda, çeşitli katkı maddeleri kayaca ya kazı aynasındayken direkt olarak ya da kesici kafa haznesine alındıktan sonra enjekte edilir, fakat verimlilik açısından en iyisi birinci seçenektir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Bu maddeler üç amaç için malzemeye enjekte edilir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004):

- Malzemenin akışkanlığını arttırarak kesici kafa ve vida konveyörden geçişini kolaylaştırmak,
- Kesici kafadaki herhangi bir boşluğu doldurmak ve stabiliteyi sağlamak,
- Eğer kazılan kaya geçirgense, su fışkırmasını önleyen hemen hemen sızdırmaz bir engel oluşturmak.



Şekil 4.3 Zemin Basıncını Dengeleyici Şild (EPBM) (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

EPB makinesinin kazı anında çalışma aşamaları da şu şekilde gerçekleşmektedir: Şekil 4.3'te EPB makinesinin elemanları verilmiştir. Kesici kafa döndürme motorlarıyla dönmeye başlar. Kesici kafaya ittirme silindirleriyle araziyi destekleyecek kadar ya da biraz daha fazla kuvvet verilmesiyle akıcı alüvyal zemin kazı haznesine dolmaya başlar. Kazı haznesinin dolmasının ardından gerekli destekleme ortamı yaratılır ve kazılan pasa vida konveyör yardımıyla normal basınçtaki bölgeye alınmaya başlanır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Vida konveyörün en önemli görevi aynada oluşturulan basıncın kademeli olarak düşürülmesi ve normal basınca indirilerek düzenli bir malzeme çıkışının sağlanmasıdır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Vida konveyörün çıkış kapısından bant konveyöre boşalan malzeme kuyruk bölümde bekleyen vagonlara ulaşır ve buradan da kuyu ağzına taşınır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Eğer kazı sırasında istenilen miktarda malzeme geliri olmuyorsa yani malzeme yerine su geliyor veya kuru ortam sebebiyle vida konveyörden malzeme geçişi mümkün olmuyorsa, kazı aynasına doğru malzemeyi daha kaygan yapan ve böylece su geçişini engelleyen katkı madde enjekte edilmesi gerekebilir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Kazı ilerlerken şildin tam arkasına raylar yardımıyla getirilen beton segmentler erektörler yardımıyla yerleştirilirler. Bu arada segmentler ve zemin arasında kalan boşluklar beton- bentonit karışımı ile doldurularak kapatılarak enjeksiyon işlemi gerçekleştirilir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Dünyada birçok EPB uygulaması vardır. Tablo 4'de uygulama örnekleri verilmiştir. Bunlardan biri 5,4 m çaplı bir EPB Fransa'da Bordeaux şehrinde karstik kireçtaşı olan formasyonda kazıya başlamıştır. Kesici kafası pik ve disk keskilerle donatılmış EPB' nin günde 16 saatlik bir çalışma ile en iyi ilerlemesi 15,6 m, en iyi haftalık ilerleme 54 m olmuştur. Her biri on altı saat olan dört üretim günü herhangi bir arıza olmaksızın tamamlanmıştır. Tam cephe tünel açma makinesi iki kanalizasyon ve hızlı tren tüneli altından hiçbir tasman olayı olmaksızın kazasız geçmiştir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

İtalya Valencia da açılan tünelde kullanılan EPB makine Tablo 4' den de görüleceği gibi aynı zamanda İzmir metrosunda da kazı işlemini sürdürmektedir. Formasyon hemen hemen aynı olmasına rağmen Valencia' da en iyi günlük ilerleme

8 m iken İzmir de 21,6 m ye kadar çıkmıştır. Tablo 4.1'deki veriler, formasyona ve tünelin boyutlarına göre bir EPB makinesinin nasıl boyutlandırılacağını göstermesi açısından da önemlidir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

İtalya Milano'da bir nehir altında Passante Ferroviaro' da akıcı-kumlu-çakıllı sulu merceklerin bulunduğu bir formasyonda kullanılan EPB makinesinin çapı 8 m, uyguladığı en yüksek ittirme kuvveti 551 ton, kesici kafa torku 900tm, kesici kafa gücü 110 kW makinenin ilerleme hızı 70 mm/dak olmuştur. Oluşan oturma toleransları ise 7 mm olarak hesap edilmiştir (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Japonya Taipei metrosunda iri kil silt kum karışımı bir formasyonda kullanılan 6,00 m dış çaplı EPB makinesinin en iyi günlük ilerlemesi, 24 saat çalışarak, 6 m olurken e n iyi haftalık ilerlemesi de 76 m olmuştur. Oluşan oturmalar 20mm'nin altında kalmıştır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

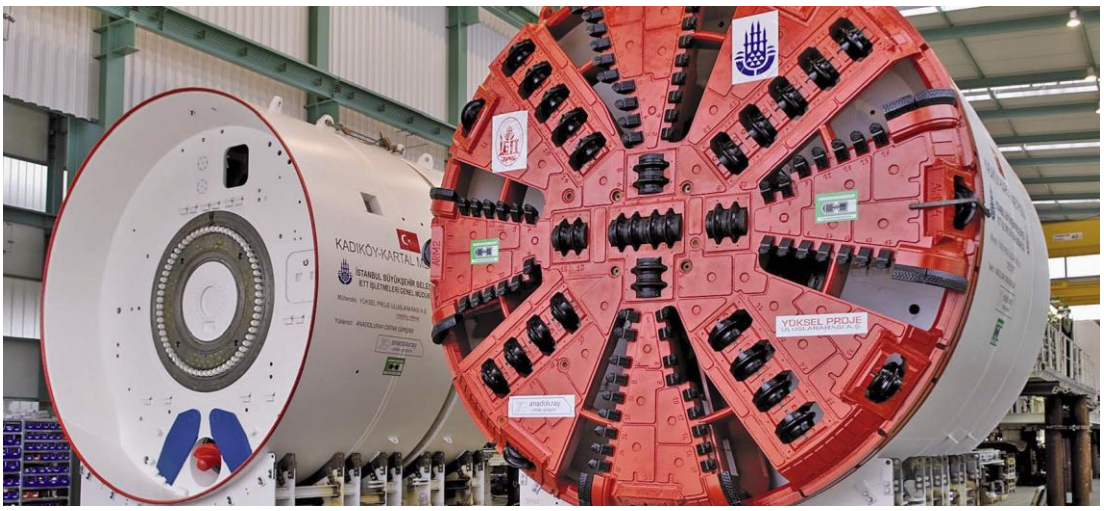
Amerika Birleşik Devletleri'nde South Bay'da açılan bir tünelde 3,9 m dış çapındaki EPB makinesinin uyguladığı en büyük ittirme kuvveti 2000t, kesici kafa torku 150 tm, kesici kafa gücü 115 kW, kesici kafa dönüş hızı ise 2,4 dev/dak olmuştur. Bu özeliklere sahip makinenin net ilerleme hızı 20,5 mm/dak, en iyi günlük ilerleme hızı da 30,5 m olarak saptanmıştır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Tablo 4.1 EPB uygulamaları (Walks, 1994.1995) (Yüksel, 1998).

Uygulandığı Yer	Fransa Bordeaux	İtalya Valencia	Türkiye İzmir
Formasyon	Alüvyal kumlu karstik Kireçtaşı	Kil-Silt-Çakıl	Kil-silt-kum-çakıl
Dış Çapı (m)	5.4	6.5	6.5
Toplam Uzunluk (m)	75	74	74
Vida Konveyör (Uzunluk x çap)	2 parçalı 7,5mx200mm	12mx700mm	11,5mx700mm
İtme Kapasitesi (ton)	3000	4300	4300
Silindir troku (m)	1,2	1,70	1,70
Kesici Kafa Gücü (kW)	650	800	800
Kesici Kafa Torku (ton x ni)	330	500	500
Dönüş Hızı (devir/dk)	0-6	0-3	0-3
Enjeksiyon	Köpük+bentonit	Köpük+bentonit	Köpük+bentonit
İlerleme Hızı (mm/dk)	60-75	60	60
Rn iyi günlük ilerleme (m)	15,6	8	21,6
En iyi haftalık İlerleme (m)	54	-	103,2
Kafa Basıncı (MPa)	0,1	0,3	0,3
Tahkimat	Prekast beton	Prekast beton	Prekast beton
Nakliyat	Bant+lokomotif	Bant+lokomotif	Bant+lokomotif
Oturma (mm)	<20	<25	-

4.5 Kadıköy-Kartal Metro Tünelinde Kullanılan EPB/TBM Makineleri

Kadıköy-Kartal metro projesinde kullanılan iki adet TBM, Herrenknecht firmasının üretmiş olduğu S-360 ve S363 olarak adlandırılan, hem arazi basınç dengeleme prensibiyle çalışan, hem de sert kayaçlarda kazı yapabilen yeni nesil makinelerdir. Şekil 4.4'te S-360 ve S363 EPB/TBM makinelerinin genel görünüşü verilmiştir.



Şekil 4.4 S-360 ve S363 EPB/TBM (Herrenknecht AG, 2007).

EPB makinelerinin çalışma prensipleri ve bazı uygulamaları önceden verildiği için burada söz konusu makinelerin bazı önemli teknik verilerine yer verilecektir. Tablo 4.2'de S-360 ve S-363 TBM teknik özellikleri genel olarak verilmiştir (Herrenknecht AG, 2007). Tablo 4.3'te ise kesici kafa teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.2 S-360 ve S363 TBM genel teknik özellikleri (Herrenknecht AG, 2007).

1	Model	EPB Hard Rock
2	Makine Tipi	EPB Hard Rock
3	Donanım Gücü (kW)	4 x 315 = 1260 kW
4	Çap (mm)	6540 mm
5	Kalkan Dış Kesici (mm)	15 mm
6	Kalkan Üzeri Kazı Tipi	Disk Kesici (Disk/cutter)
7	Kalkan Uzunluğu (mm)	8225 mm
8	TBM ve Geri Donanım Uzunluğu	96000 mm
9	Kalkan, Kesici kafa, Güç Nakli ve Segment Erektörü ağırlığı (t)	350 t
10	TBM Geri Donanım Ağırlığı	240 t
11	Yatay ve Düşey Kavis	Yatay: 300 m, Düşey: 1000 m

Tablo 4.3 EPB/TBM kesici kafa teknik özellikleri (Herrenknecht AG, 2007).

1	Nominal Çap (mm)	6570 mm
2	Uzunluk (mm)	1500 mm
3	Diyafram Oranı (Eğim Derecesi)	+-4%
4	Tork / Devir Sayısı (hızı) (kNm)	5200 kNm (1,6 rpm' de) 1515 kNm (5,5 rpm' de)
5	Koparma Torku (kNm)	6356 kNm
6	Maksimum Devir Sayısı(hızı)	5,5 rpm
7	Ağırlık (t)	73 t
8	Çelik Sınıfı	S355J2G3
9	Enjeksiyon Deliği Sayısı (Su, Yağ, Köpük)	5 / - / 5
10	Kazı Bölgesine Giriş İçin Delik Sayısı	1
11	Sondaj İçin Delik Sayısı	4
12	Rotatif Transmisyon Şeması	4 x Köpük ve su
13	Kesici Kafa Bağlantı Tipi ve Güç Nakli	Cıvatalı / Perçinli
14	Pasa Taşıma Sistemi	EPB Modu: Helezon (vida) konveyör. Sert Kaya Modu: Konveyör Bant
15	Disk Ucu ve Kesici Kafa Aralığı	175 mm
16	Tavsiye Edilen Temas Basıncı	9345 kN

Tablo 4.4'te disk keskilerin teknik özellikleri verilmiştir. Tablo 4.5'te ise güç aktarım (nakil) özellikleri bulunmaktadır.

Tablo 4.4 Disk keski teknik özellikleri (Herrenknecht AG, 2007).

1	Disk tipi	17 inç çift diskli
2	Disk sayısı	(26 + 6 x 2) = 38 adet
3	Keskiler arası mesafe	90 mm (Spacing, S)
4	Her bir disk için max. kümeleme kuvveti	267 kN (contact pressure)
5	Dış kesim için disk sayısı	4 adet

Tablo 4.5 Güç nakli (aktarım) teknik özellikleri (Herrenknecht AG, 2007).

1	Güç nakil tipi	Hidrolik ring drive SKF
2	Motor sayısı	8 un.
3	Güç (kW)	4 x 315 = 1260 kW
4	Motor torku (kNm)	5200 kNm (1,6 rpm' de)
5	Translasyon şanzıman-motor (i)	51,42
6	Şanzıman torku (kNm)	M_{D1}=5200 kNm; M_{D2}=2912 kNm
7	Pinyon şaftı referans çapı (mm)	324 mm
8	Pinyon şaft dişli sayısı	17 adet
9	Ana mil yatağı referans çapı (mm)	2178 mm
10	Ana mil yatağı dişli sayısı	120 adet
11	Mil yatağı iç halka yapım hesabı	RKS Calculation
12	Ana mil yatağı tipi	Axial /Radyal
13	Ana mil yatağı çapı (mm)	3000 mm
14	Mil yatağı ömrü	>10000 h
15	Max. Ana yatak itme kuvveti (kN)	20000 kN (statik)
16	İç conta sistemi için conta sayısı	3 adet
17	Dış conta sistemi için conta sayısı	3 adet
18	Conta yağlama tipi	yağ / gres

BÖLÜM BEŞ
TBM PERFORMANS TAHMİNİ

5.1 Giriş

Bir tünel projesine başlamadan önce tam cephe tünel açma makinesi kullanacak firmalar, işi ne kadar sürede yapabileceklerini bilmek isterler. Yıllar içerisinde farklı yaklaşımların etkin olduğu performans tahmin metotları geliştirilmiştir. TBM performansını etkileyen parametreler aşağıda belirtilmiştir.

Kayaç Karakteristikleri

- Tek eksenli sıkışma dayanımı
- Kayaç sağlamlığı (kayaç dokusu)
- Çatlak İndeksi

Keski Geometrisi

- Çap
- Ağız Genişliği

TBM Özellikleri

- Keski başına düşen baskı kuvveti
- Keskiler arası mesafe
- Güç (tork ve devir sayısı)

Günümüzde laboratuar koşullarında en gerçekçi performans tahmini tam boyutlu kesme deneyleri sonucunda elde edilebilir. Tam boyutlu kesme deneyinde tünel güzergâhındaki formasyonlardan alınan yaklaşık 1 m^3 hacimdeki büyük blok numuneler gerçek boyuttaki keskiler kullanılarak kesilir. Kesme işlemi sırasında keski üzerine gelen kuvvetler kayıt altına alınır. Farklı kesme derinlikleri ve keskiler arası mesafeler uygulanarak yapılan kesme deneylerinde amaç optimum spesifik enerji değerini sağlayan s / d oranını bulmaktır. Tam boyutlu kesme deneyleri sonucunda kazı hızı, baskı kuvveti, tork ve kesici kafa motor gücü de bulunur. Ancak tam boyutlu kesme deney seti pahalı bir laboratuar donanımı olduğu için açılan

tünellerden alınan veriler ve laboratuarda yapılan deney sonuçlarının analiz edilmesiyle deneysel yaklaşımlar oluşturulmuştur (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

Uluslararası alanda kabul görmüş bir performans tahmin yöntemi Trond-Heim Üniversitesi ve Norveç Teknoloji Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde kazılacak kayaca kırılganlık testi, minyatür delme testi ve aşındırıcılık testleri uygulanır ve arazide çatlak sistemleri gözlemlenir. Keski aşınmasının tahmininde aşındırıcı mineral yüzdeleri de göz önünde bulundurulur. Elde edilen indeks değerler, tünel özellikleri ve makine spesifikasyonları çeşitli abaklar üzerinde kullanılarak itme kuvveti, net ilerleme hızı, keski sarfiyatı, makineden faydalanma oranı ve maliyetler tahmin edilebilir.

Kadıköy-Kartal metro projesi EPB/TBM kazısı sırasında yukarıda bahsedilen iki deneysel metoda dayalı yaklaşımlarla ilgili yapılan araştırmalar ve sonuçları incelenmiştir. Bölüm 6' da açılan tünellerden alınan veriler ve laboratuarda yapılan deney sonuçlarının analiz edilmesi ile oluşturulan ampirik yaklaşımlar, EPB/TBM Tünel açma makineleri kazı parametreleri adı altında, Bölüm 7'de ise tam boyutlu kesme deneyi ile ilgili araştırma ve yaklaşımlar tam boyutlu kesme deneyi ile EPB/TBM performans tahmini adı altında verilmiştir.

BÖLÜM ALTI

EPB/TBM TÜNEL AÇMA MAKİNELERİ KAZI PARAMETRELERİ

6.1 Giriş

Proje kapsamında Kadıköy Kozyatağı arası metro tünelleri inşaatında kullanılan makineler, EPB/TBM tipi olup S360 ve S363 kodlu Herrenknecht marka tünel açma makineleridir. İki makinenin de ortak özellikleri şöyledir:

Kesici kafa çapı 6540 mm olup, makinenin toplam uzunluğu 9,6 m' dir. Kesici kafasında 35 adet 17 inç çapında disk keskiler bulunmaktadır. 32 adet itme silindirleri olup, maksimum itme kuvveti 42575 kN' dır. Her biri 315 kW gücünde 4 adet kesici kafa motoruna sahip olup, bunların sağladığı toplam tork miktarı 1,6 devir/dak için 5200 kNm kadardır. 12 m uzunluğunda helezon konveyöre sahip olup, hızı dakikada 22 devire çıkabilmektedir.

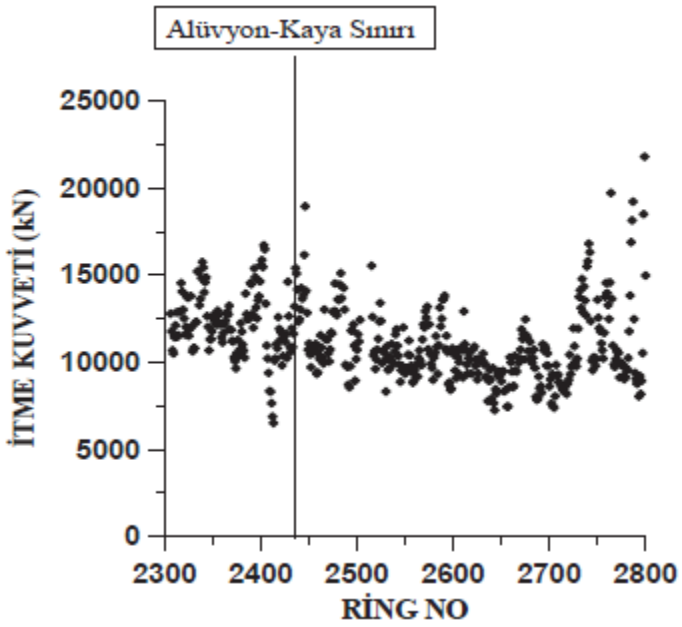
Bu çalışmada incelenen ilk tahmin yöntemi Mayıs 2011 dönemi Ankara'da yapılan Türkiye 22. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi'nde yayımlanan Kadıköy-Kozyatağı Arası Tünel Kazısında Kullanılan EPB Tünel Açma Makinaları Kazı Parametreleri Analizi (Acaroğlu ve Bayram, 2011) isimli çalışmadır.

Acaroğlu ve Bayram (2011) tarafından yapılan çalışmada Kadıköy- Kozyatağı arasında sol ve sağ hat kazısında kullanılan iki EPB/TBM'in kazı parametrelerinin incelenmesi Ağustos ve Eylül 2009 ayları arasında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sol hat makinede kayaç ortamında gerçekleştirilmiş olan kazıda ring aralığı 2663-2763 arasında nokta yük deneyine uygun numuneler alınarak kayaçların basınç dayanımları belirlenmiştir. Kazı parametreleri olarak makinenin uygulamış olduğu itme kuvveti, tork ve bu iki parametreye ait penetrasyon indeksi değerleri ile makine hızını ifade eden ilerleme miktarı, dakikadaki devir sayısı ve penetrasyon değerleri arasındaki ilişkiler grafiklerle açıklanmıştır. Sağ hat kazısında bulunan makine çalışmanın yapıldığı dönemde hem kayaç ortamında hem de alüvyonlu bölgede kazı yapmıştır. Kazı parametrelerine ait sonuçlar kayaç ortamında sol ve sağ hatta

kullanılan makinelerle benzer olduğu için bütün değerlendirmeler S363 kodlu sağ hatta kullanılan makine ele alınarak incelenmiştir (Acaroğlu ve Bayram, 2011).

6.2 İtme Kuvvetine Ait Değerlendirmeler

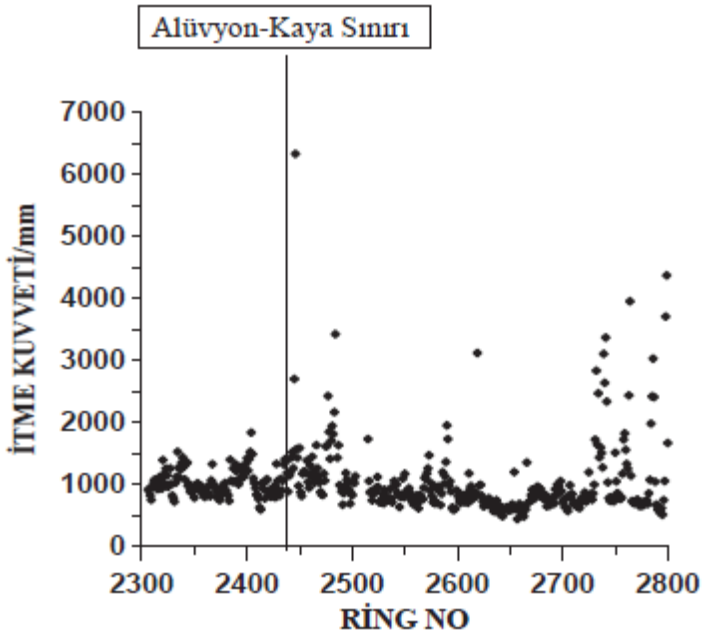
İtme kuvveti, tam cepheli tünel açma makinesinin kesici kafasındaki keskilerin aynaya batmasını sağlayan kuvvettir. Daha önce bahsedildiği gibi kazı işlemi itme kuvveti ile birlikte kesici kafanın döndürülmesiyle gerçekleşir. Kadıköy Kartal Metro Projesinde çalışan S-363 kodlu tünel açma makinesinin uyguladığı itme kuvveti makinenin kafasına yerleştirilmiş sensörler tarafından okunmakta ve bilgisayar ortamına kayıt edilmektedir. Makinenin uyguladığı itme kuvvetinin 2300 ile 2800 nolu ringler asındaki değişimi Şekil 6.1'deki gibidir (Acaroğlu ve Bayram, 2011). 3+800 ile 4+115 km ler arasında makine alüvyonda çalışmıştır. Bu mesafe ring numaraları olarak 2300 ile 2439 nolu ringler arasına denk gelmektedir. 2440 ve 2800 nolu ringler arasında ise makine önce Kartal Formasyonu sonra Trakya (Grovak) Formasyonu'nda ilerlemiştir (Acaroğlu ve Bayram, 2011). Şekil 6.2'de görüleceği üzere, makine 2300 ve 2439 ringleri arasında zeminde kazı işlemi yapmış ve arazi basınç dengeleme yöntemi (EPB) ile çalışmıştır. Bu kısımdaki itme kuvvetinin değerleri 2439-2725' e kadar olan kısma göre daha yüksek değerlere sahiptir. Bu durum makine ile zemin arasındaki sürtünmeye bağlanabilir (Acaroğlu ve Bayram, 2011). 2439-2725 arasında ise daha çok kayaç kazısı söz konusudur. 2725 den sonra itme kuvvetlerinde olan yükselme ise makinenin başka bir formasyona geçişi ve yer yer daha sert kayaçlara rastlanması ile ilgilidir (Acaroğlu ve Bayram, 2011). Acaroğlu ve Bayram tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarına göre itme kuvveti değerleri; makinenin alüvyonda çalıştığı durumda ortalama itme kuvveti 12260 kN olurken maksimum 16733 kN olmuş, 2439- 2725 arasındaki kayaç ortamında ise ortalama itme kuvveti değeri 10517 kN, maksimum ise 18974 kN olmuştur.



Şekil 6.1 İtme kuvvetinin değişimi (Acaroğlu ve Bayram, 2011).

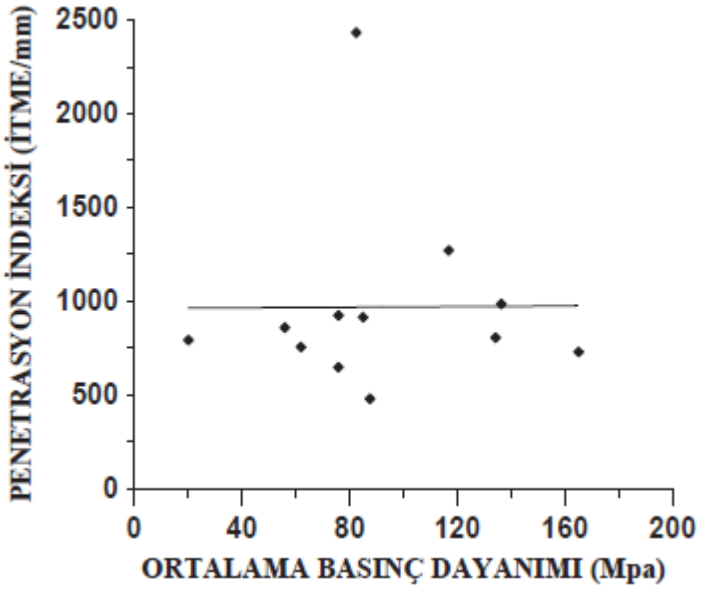
İtme kuvvetine ait penetrasyon indeksi değerlerinin tünel ekseni boyunca değişimi Şekil 6.2'de verilmiştir (Acaroğlu ve Bayram, 2011). İtme kuvvetine ait penetrasyon indeksi bir ringdeki ortalama itme kuvveti değerinin o ringdeki ortalama penetrasyon değerine bölünmesi ile elde edilmektedir. Diğer bir ifadeyle birim kesme derinliğine düşen kuvvet değeri bulunmaktadır. Burada da Şekil 6.1'deki benzeri bir dağılım elde eden Acaroğlu ve Bayram (2011) alüvyondaki değerlerin daha yüksek çıkmasını makine şiltinin zeminde sıkışma ihtimali ve itme kuvvetinin bir kısmının da makine ile zemin arasındaki sürtünmeye harcanmış olabileceği sonucuna varmıştır. Penetrasyon indeksi birim kesme derinliğine düşen itme kuvvetidir. İtme kuvvetinin kayaç dayanımıyla olan ilişkisinin belirlemek için penetrasyon indeksini incelemek yeterlidir. Çeşitli ringlere ait numunelerin nokta yük indeksi değerlerinden elde edilen ortalama basınç dayanımı ile penetrasyon indeksleri karşılaştırılmış ve Şekil 6.3 elde edilmiştir. Grafikteki genel eğilimi göstermek amacıyla lineer eğri geçirilmiştir. Eğrinin r^2 değeri sıfıra yakındır. Bu bize kayacın basınç dayanım ile birim derinlik başına düşen itme kuvveti değerleri arasında anlamlı bir ilişkinin olmadığını göstermektedir. Yalnız 100 Mpa basınç dayanımı değerlerinden sonra

mm başına düşen itme kuvveti değerlerinde diğerlerine göre genel olarak hafif bir yükseliş grafikten gözlenebilmektedir (Acaroğlu ve Bayram, 2011).



Şekil 6.2 İtme kuvvetine ait penetrasyon indeksi değişimi

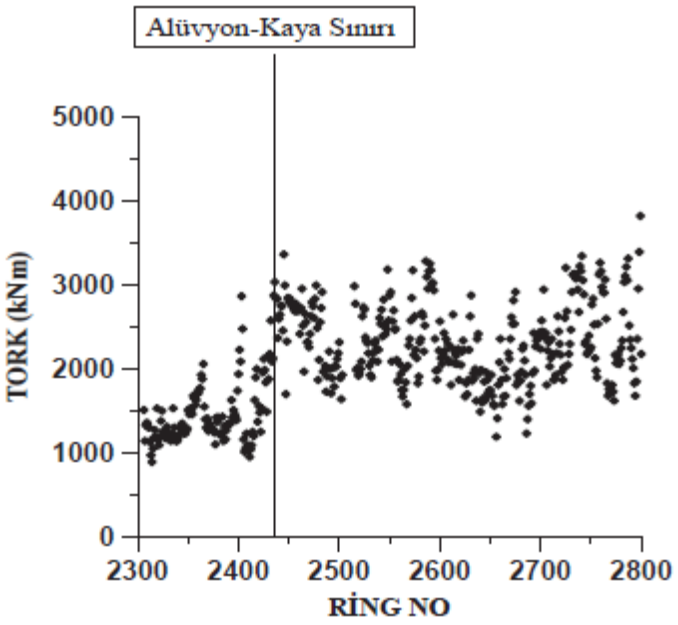
(Acaroğlu ve Bayram, 2011).



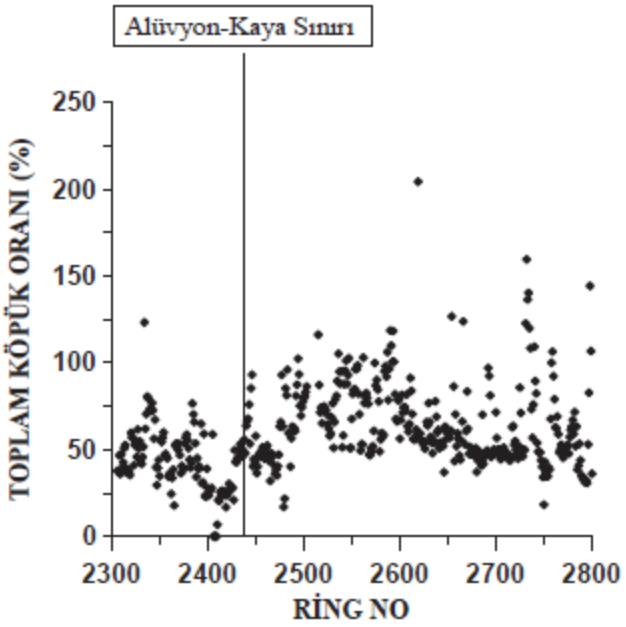
Şekil 6.3 İtme kuvveti penetrasyon indeksi ve basınç dayanımı ilişkisi (Acaroğlu ve Bayram, 2011).

6.3 Torka Ait Değerlendirmeler

Kazının gerçekleşmesini sağlayan ikinci faktör kesici kafanın döndürülmesidir. Makine tarafından kaydedilen tork değerlerinin tünel ekseni boyunca değişimi(Acaroğlu ve Bayram (2011) tarafından incelenmiş ve Şekil 6.4'te vermiştir. Çalışmada tork değerleri itme kuvvetinin tersine alüvyonda kayaç ortamına göre oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. 2300-2439 ringleri arasındaki ortalama tork değeri 1492 kNm olurken maksimum değer 3040 kNm' ye kadar çıkmıştır (Acaroğlu ve Bayram, 2011). 2439'dan sonra kayaca giren makinede tork değerleri ortalama olarak 2307 kNm, maksimum 3370 kNm' ye yükselmiştir (Acaroğlu ve Bayram, 2011). Kazı sonrası çıkarılan pasanın konveyöre kadar yükseltip akıcı bir şekilde tahliyesinin sağlanabilmesi için bol miktarda köpük verilmektedir. Köpük miktarı kayaç ortamında daha yüksek tutulmuştur (Şekil 6.5). Bunun nedeni kesici kafa arkasındaki basınçlı odaya dolan kayaç parçacıklarının kafayı ağırlaştırıp torkun artmasını önlemektir (Acaroğlu ve Bayram, 2011).



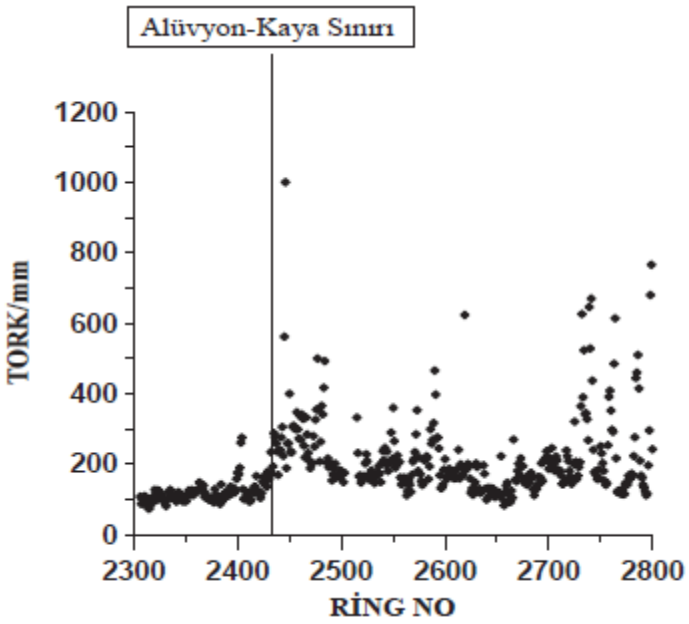
Şekil 6.4 Torkun değişimi (Acaroğlu ve Bayram, 2011).



Şekil 6.5 Köpük miktarının değişimi (Acaroğlu ve Bayram, 2011).

Tünel boyunca tork değerinin değişimini daha iyi görebilmek amacıyla penetrasyon tork ilişkisine ait değerler grafik haline getirilmiştir. Bu amaçla ringlere ait ortalama tork değerleri ortalama penetrasyon değerlerine bölünerek torka ait penetrasyon indeksi değerleri elde edilmiştir. Bu indeks değerin ringlere göre

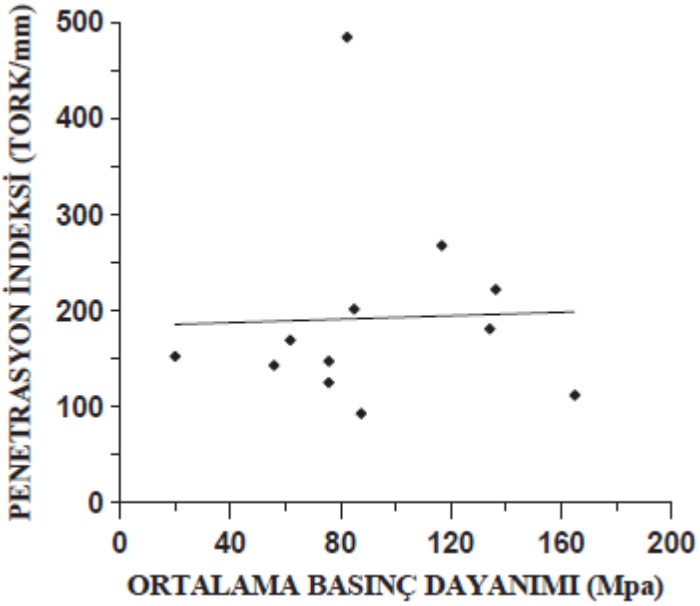
değişimi Şekil 6.6'da verilmiştir. Zeminde torka ait penetrasyon indeksi ortalama 125 tork/mm çıkarken kayada bu değer 215 tork/mm' ye çıkmaktadır (Acaroğlu ve Bayram, 2011).



Şekil 6.6 Tork değerine ait penetrasyon indeksini değişimi

(Acaroğlu ve Bayram, 2011).

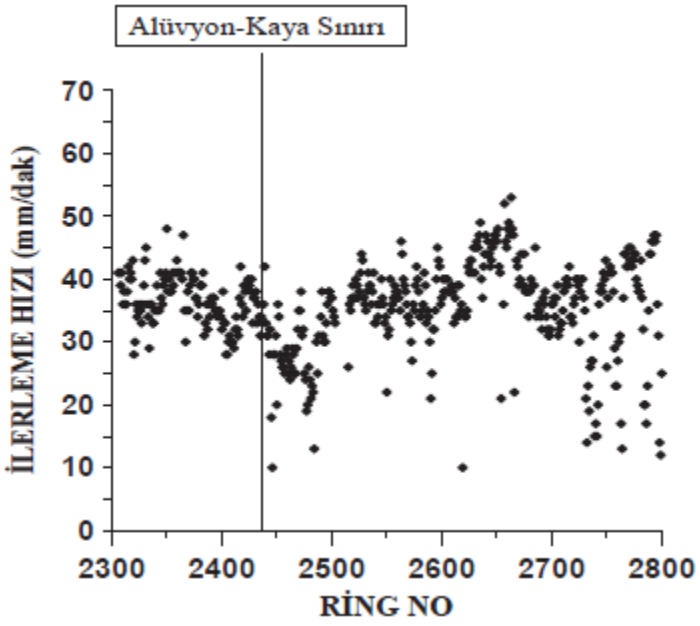
Kayaca ait basınç dayanımı ile torka ait penetrasyon indeksinin nasıl değiştiğini Şekil 6.7'den görebilmek mümkündür. Acaroğlu ve Bayram (2011) tarafından yapılan çalışmada genel olarak kayaç dayanımının artışı ile penetrasyon indeksinin artışı arasındaki ilişkiyi göstermek için geçirilen eğrinin r^2 değerleri yüksek olmayıp sıfıra yakın olduğu tespit edilmiştir. Ancak 100 MPa değerinden sonra diğer değerlere göre genel olarak hafif bir artış olduğu söylenebilir (Acaroğlu ve Bayram, 2011).



Şekil 6.7 Torka ait penetrasyon indeksinin basınç dayanımı ile değişimi (Acaroğlu ve Bayram, 2011).

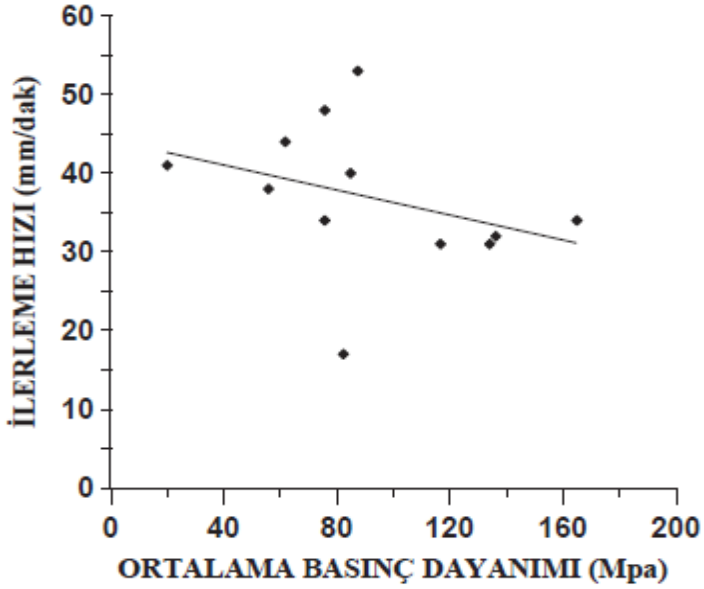
6.4 İlerleme hızının incelenmesi

Şekil 6.8'de makinenin ilerleme hızının ring numaraları üzerinde dağılımı görülmektedir. İlerleme hızına ait değerler 2300-2439 ringleri ve 2439-2725 arasında benzer iken, bu ringlerden sonra daha sert formasyona geçilmesiyle birlikte düşüş göstermeye başlamıştır (Acaroğlu ve Bayram, 2011).



Şekil 6.8 İlerleme hızının değişimi (Acaroğlu ve Bayram, 2011).

Şekil 6.9'da makinenin kayaç ortamında ilerlemesi durumunda kayacın basınç dayanımı artarken ilerleme hızının düştüğü geçirilen lineer eğrinin eğiminden anlaşılabilmektedir, fakat eğrinin r^2 değerinin 0,12 çıkması ilişkinin çok kuvvetli olmadığını göstermektedir. Düşüşün genel olarak daha çok 100 Mpa değerlerinden sonra olduğu söylenebilir (Acaroğlu ve Bayram, 2011).

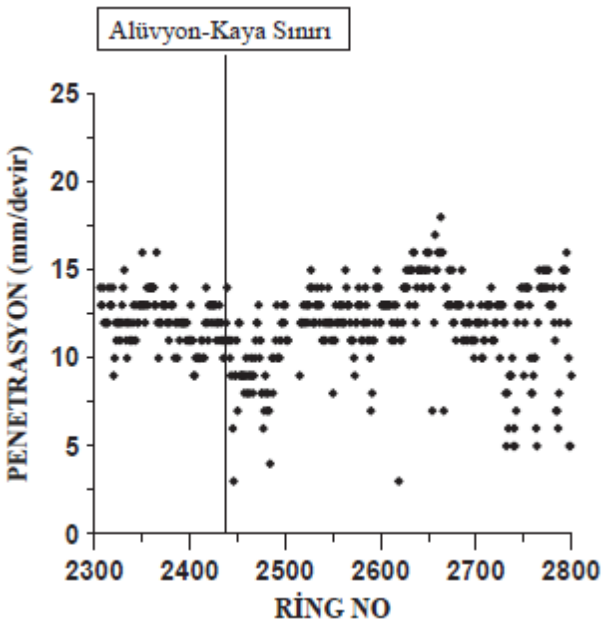


Şekil 6.9 İlerleme hızının basınç dayanımı ile değişimi

(Acaroğlu ve Bayram, 2011).

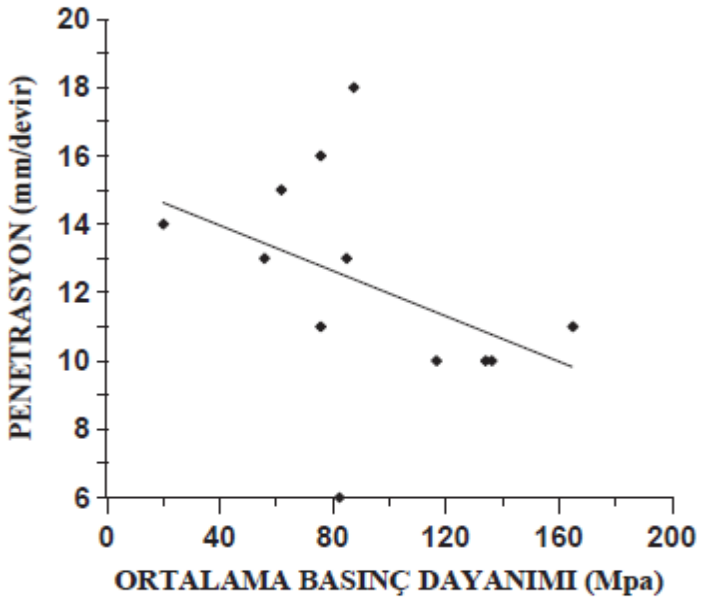
6.5 Penetrasyonun İncelenmesi

Şekil 6.10'da Acaroğlu ve Bayram (2011) tarafandan elde edilen grafikte penetrasyonun ring numaraları üzerindeki dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 6.10 Penetrasyonun değişimi (Acaroğlu ve Bayram, 2011).

Şekil 6.11'de makinenin kayaç ortamında kazı yapması durumunda penetrasyon ile kayaç basınç dayanımları arasında ters bir orantı olduğu görülmektedir. Penetrasyon değerinin değişimi ile ilerleme hızının değişimi benzer çıkmıştır. Kayacın basınç dayanımı artıkça penetrasyon değerlerinde düşüş görülmektedir. Geçirilen lineer eğrinin r^2 değeri 0,17 olup bağıntının çok anlamlı olmadığı söylenebilse de özellikle 100 Mpa değerinden sonra düşüşün daha yüksek olduğu grafikten görülmektedir.



Şekil 6.11 Penetrasyonun basınç dayanımı ile değişimi

(Acaroğlu ve Bayram, 2011).

BÖLÜM YEDİ
TAM BOYUTLU KESME DENEYİ İLE EPB/TBM PERFORMANS TAHMİNİ

7.1 Giriş

Tam boyutlu kesme deneyleri yardımı ile tam cepheli tünel açma makinelerinin bazı tasarım parametreleri ve kazı performans ön görülerinin yapılması mümkündür. Kadıköy Kartal Metro Projesi yapım aşamasında Bilgin ve Arkadaşları (2008) tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuarlarında proje kapsamında karşılaşılan ana kayaç formasyonlarının tam ölçekli kaya kesme deneyleri kullanılarak tam cepheli tünel açma makinesinin tasarım parametreleri ve kazı performans ön görüleri belirlenmiştir.

Yapılan deneylerde kayaç numuneleri en az 1,0 x 0,5 x 0,7 m boyutlarında olmak kaydı ile tünel hattı boyunca dört farklı formasyondan alınmıştır. Bu tezde makinenin geçtiği ana formasyon olan Kartal Formasyon'u ile ilgili Nuh Bilgin ve arkadaşları tarafından ortaya konan sonuçlara yer verilmiştir. Kayaç örnekleri, farklı kesim derinliğinde ve kesici boşluk değeri 13 inç (330 mm) olan CCS disk kesici kullanılarak tam ölçekli laboratuar kesme testlerine tabi tutulmuştur. Kesme kuvvetleri, yani, itme kuvveti, haddeleme(yuvarlanma) kuvveti ve spesifik enerji (kWh/m3) değerleri her kesim için kaydedilmiştir (Bilgin ve diğer, 2008).

Performans verileri; ilerleme, makine itme, tork ve diğer bazı parametreler tünel kazısı sırasında dikkatli bir şekilde kaydedilmiş ve gerçek değerler, tahmin edilen değerler ile karşılaştırılmıştır (Bilgin ve diğer, 2008). Sonuç olarak kazı performansı, jeoloji ve kaya kütle özellikleri ile verilere dayanarak ilişkilendirilmiştir (Bilgin ve diğer, 2008). TBM performansına su, jeolojik süreksizlikler ve dayk kapanımlarının muazzam ölçüde etkileri bulunduğu tespit edilmiştir (Bilgin ve diğer, 2008). Yapılan deneyler sonucu performans değerlendirmesinde kullanılan parametreler aşağıda verilmiştir (Bilgin ve diğer, 2008).

S : Keskiler arası mesafe, cm

d : Keski derinliği (penetrasyon), cm

FR : Ortalama yuvarlanma kuvveti, kgf

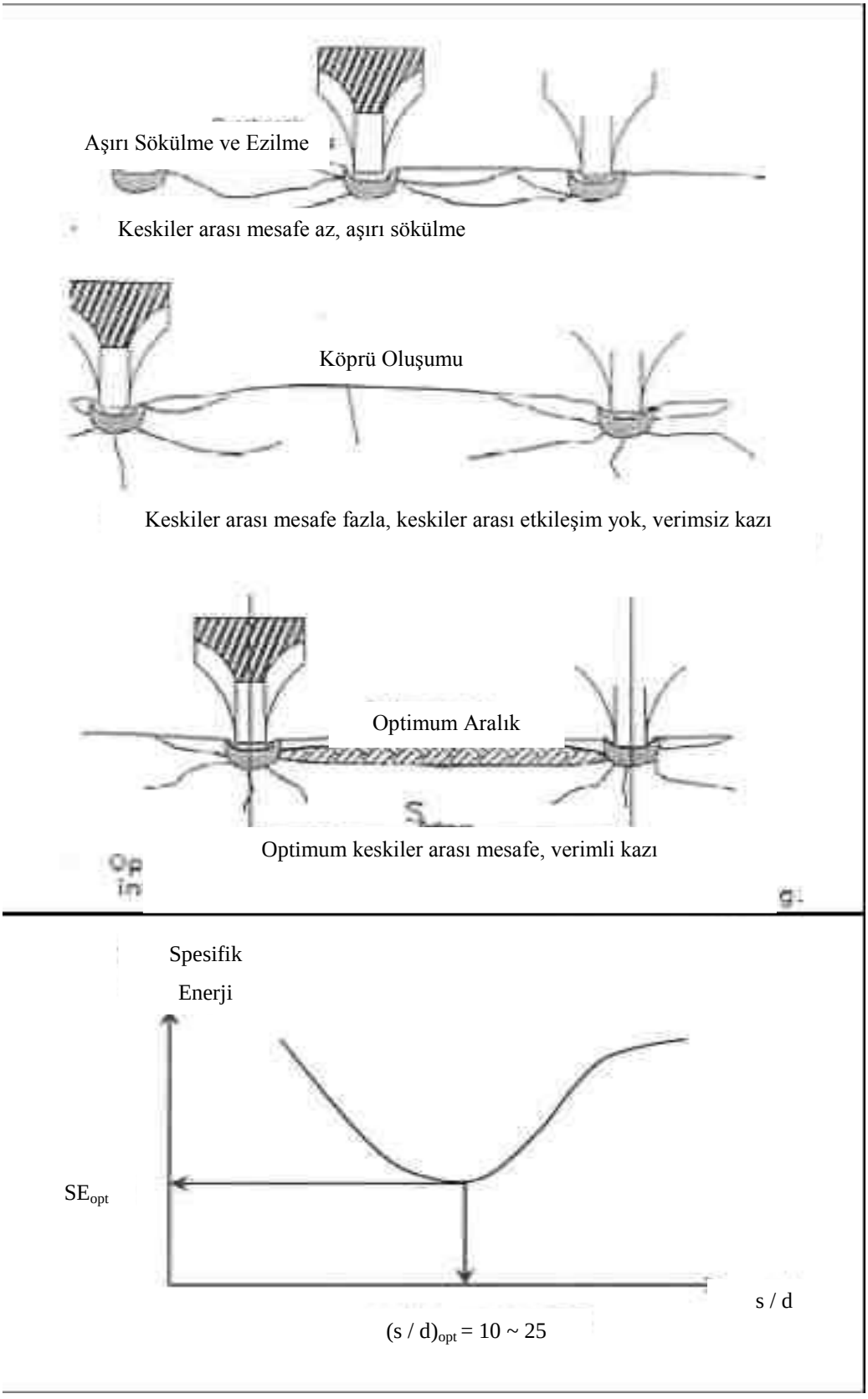
FN : Ortalama itme kuvveti, kgf

FR' : Maksimum yuvarlanma kuvveti, kgf

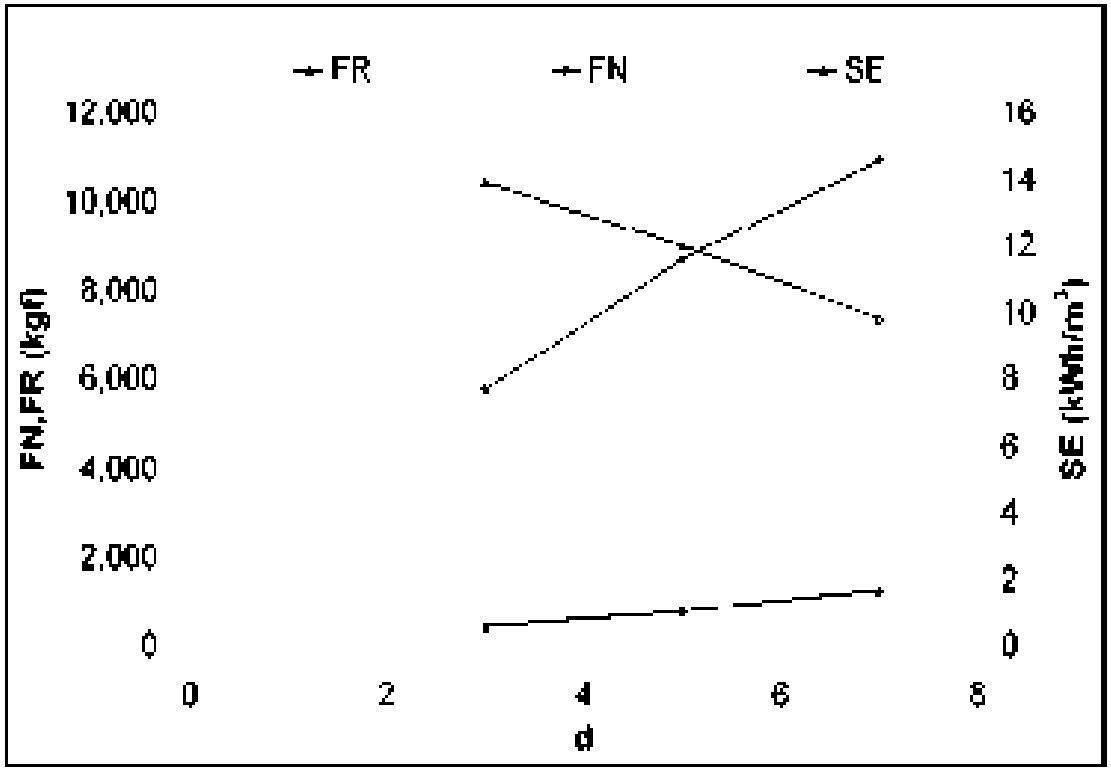
FN': Maksimum itme kuvveti, kgf

SE : Spesifik enerji, kWh/m^3

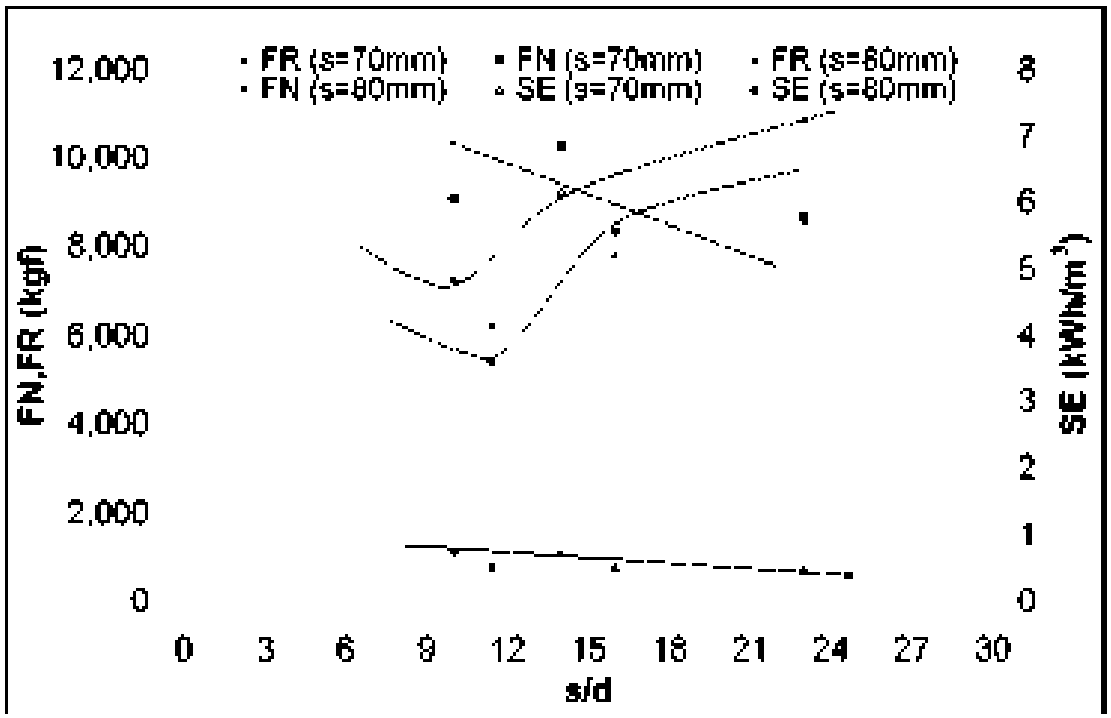
Bilgin ve diğer. (2008) tarafından yapılan kesme deneylerinde 13 inç çapında ve 1,2 cm genişliğinde sabit kesitli bir disk kullanılmıştır. Kesici aralığı deneyler boyunca 7-8 cm tutulmuştur. Kesme derinliği ve keskiler arası mesafenin sabit kesitli diskte oluşan spesifik enerjiye etkisi Şekil 7.1'de verilmiştir Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'de ise Kartal Formasyonu (kireçtaşı) yardımsız ve yardımlı deneylerinde oluşan keski kuvvetleri ve spesifik enerji değerleri verilmiştir (Bilgin ve diğer, 2008). Tablo 7.1'de ise dört farklı formasyonda yapılan kesme deneyi özetlenmiştir (Bilgin ve diğer, 2008).



Şekil 7.1 Kesme derinliği ve keskiler arası mesafenin sabit kesitli diskte oluşan spesifik enerjiye etkisi (Bilgin ve diğer, 2008).



Şekil 7.2 Kartal formasyonu (kireçtaşı) yardımsız deneylerinde oluşan keski kuvvetleri ve spesifik enerji değerleri (Bilgin ve diğer, 2008).



Şekil 7.3 Kartal formasyonu (kireçtaşı) yardımlı deneylerinde oluşan keski kuvvetleri ve spesifik enerji değerleri (Bilgin ve diğer, 2008).

Tablo 7.1 Dört farklı formasyonda yardımlı deneylerinde yapılan kesme deneyi özeti (Bilgin ve diğer, 2008).

Formasyon	Optimum (s/d) Oranı	SE (kWh/m^3)
Kurtköy (arkaz)	13	5,0-5,5
Kartal (Kireç taşı)	10	3,5-4,0
Dolayba (Kireç taşı)	23	7,0-7,5
Trakya (Silt taşı)	11	6,0-7,0

7.3 TBM Kesici Kafa Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi ve TBM Performans Tahmini

Kesim sürecinde keski arası mesafe ve keski derinliği (penetrasyon) oranı (s/d) en temel parametrelerden bir tanesidir. Belirli bir kaya formasyonunda bu oran için her zaman bir minimum spesifik enerji değeri mevcuttur. Ancak bazı özel sebeplerle makine üreticileri genel olarak keskiler arası mesafeyi 7 ya da 8 cm olarak tercih etmektedirler. Bu durumda, TBM'i en uygun keski derinliği koşullarında kullanmak büyük önem taşır (Bilgin ve diğer, 2008).

Nuh Bilgin ve arkadaşları tarafından bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

Keski sayısı (N_C) aşağıdaki eşitlikte verilmiştir;

$$N_C = \frac{D_{TBM}}{2S} + N_{GAUGE}$$

D_{TBM} : TBM kesici kafa çapı (mm)

S : Keskiler arası mesafe (mm)

N_{GAUGE} : Ölçülen keski sayısı

Kesici kafa devir hızı (RPM) aşağıdaki eşitlikte verilmiştir;

$$RPM = \frac{V}{\pi D_{TBM}}$$

V : 432 mm çaplı disk keskide çoğu zaman ölçülen keski hızı limiti 150m/dak. için kabul edilen keski hızı (Bilgin ve diğer, 2008).

Eğer $D_{TBM} = 6.57m$, $N_{GAUGE} = 3$ ve $V = 120m/dak$ kabul edilirse; disk keskilerin sayı 44 ve maksimum kesici kafa devir hızı 6 rpm olarak bulunur.

Kesici kafa devri başına düşen en uygun disk keski derinliği aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Bilgin ve diğer, 2008);

Optimum $S/d = 10$, burada $S = 80\ mm$, $d = 80/10$, $d = 8\ mm$

Optimum keski derinliğinde makine toplam itme (FT) tahmini için aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır (Bilgin ve diğer, 2008);

$$FT = N_C . F_N . f_L$$

F_N : Bir disk keski için ortalama itme (kN)

f_L : Sürtünme kayıpları için katsayı

Şekil 30'dan 8 mm derinlik, 8 cm keskiler arası mesafe ve 13 inçlik disk keski için ortalama itme kuvveti 6500 kgf olarak bulunmaktadır. 17 inçlik bir disk keski için ise bu değer %20 artmakta ve 7800 kgf olmaktadır.

Optimum keski derinliği için TBM itme kuvveti aşağıdaki bağıntıda verilmiştir (Bilgin ve diğer, 2008);

$$\sum_{i=1}^{n=44} FN = 44\ x\ 7800\ x\ 1{,}2 = 411840\ kgf = 412\ t.$$

Maksimum itme kuvveti için, itme kuvveti pik değerleri dikkate alınmalıdır (Bilgin ve diğer, 2008);

$$\sum_{i=1}^{n=44} F'N = 44\ x\ 15600\ x\ 1{,}2 = 823680\ kgf = 824\ t.$$

Güvenlik faktörü 2,0 olarak kabul edilirse makine itme dizayn değeri 1648 t olmaktadır (Bilgin ve diğer, 2008).

Aşağıdaki eşitlikler kesici kafa tork (T) ve güç (P) hesaplamalarında kullanılmaktadır (Bilgin ve diğer, 2008);

$$T = \frac{N_C . F_R . D_{TBM} . f_L}{4}$$

T : Kesici kafa torku (kNm)

F_R : Bir keski için ortalama yuvarlanma kuvveti (kN)

D_{TBM} : TBM kesici kafa çapı (m)

$$P = 2\pi \frac{RPM}{60} T$$

P : Kesme Gücü (kW)

T : Tork (kNm)

$RPM/60$: Devir hızı (devir/saniye)

Şekil 30'dan 8 mm keski derinliği ve 13 inçlik disk keski için ortalama FR değeri 750 kgf olarak bulunur. 6500 kgf olarak bulunmaktadır. 17 inçlik bir disk keski için ise bu değer %20 artış ile tahmin edilebilir ya da FR = 750 x 1,2 = 900 kgf'dir (Bilgin ve diğer, 2008).

Bundan dolayı;

$$T = \sum_{i=1}^{n=44} F_R \frac{D_{TBM}}{4} 1{,}2$$

(Sürtünme kayıpları dahil)

$$T = \sum_{i=1}^{n=44} 900\ x\ \frac{6{,}57}{4}\ x\ 1{,}2 = 78052\ kgm = 780\ kNm$$

Ancak, yuvarlanma kuvvetleri pik değerleri, ortalama yuvarlanma kuvvet değerlerinden 2,4 kat daha fazla. Bu nedenle tork kuvveti pik değeri de 780 x 2,4 = 1872 kNm olarak beklenmelidir (Bilgin ve diğer, 2008).

Optimum kesme koşullarında güç, ortalama tork değerleri alınarak hesaplanır (Bilgin ve diğer, 2008);

$$P = 2\pi \frac{6}{60} 780 = 490\ kW$$

%60 verimle;

$$P = \frac{490}{0{,}6} = 817\ kW$$

Güvenlik faktörü 1,5 olarak kabul edilirse makine kesici kafa gücü dizayn değeri 1225 kW olmaktadır (Bilgin ve diğer, 2008).

Net kesme hızı ise aşağıdaki eşitlikte verilmiştir (Bilgin ve diğer, 2008);

$$ICR = k.\frac{P}{SE_{opt}}$$

IRC : Net kesme hızı (m^3/h)

P : Optimum şartlarda tüketilen güç (kW)

k : Kesici kafadan tünel yüzeyine olan enerji akış oranı (0,8)

SE_{opt} : Optimum spesifik enerji (kWh/m^3)

$$ICR = 0{,}8\ x\ \frac{490\ kW}{4{,}0\ kWh/m^3} = 98\ m^3/h$$

Günlük ilerleme hızı için, günlük çalışma saati ve makine kullanım süresi dikkate alınmalıdır. Günlük ilerleme hızını hesaplamak için makine kullanım süresi ortalama %40 olarak kabul edilir (Bilgin ve diğer, 2008). Ancak zor koşullarda bu değer %20 azalabilir (Bilgin ve diğer, 2008).

Her vardiyada 10 saat olmak üzere 2 vardiya çalışma ve %20 makine çalışma süresi için günlük ilerleme hızı şu şekildedir (Bilgin ve diğer, 2008);

$$Günlük\ ilerleme\ hızı = 98\ m^3/sa\ x\ 2\ x\ 10\ sa/gün\ x\ 0{,}2/39{,}9 m^2\ (arın\ alanı)$$
$$= 11{,}5\ m/gün$$

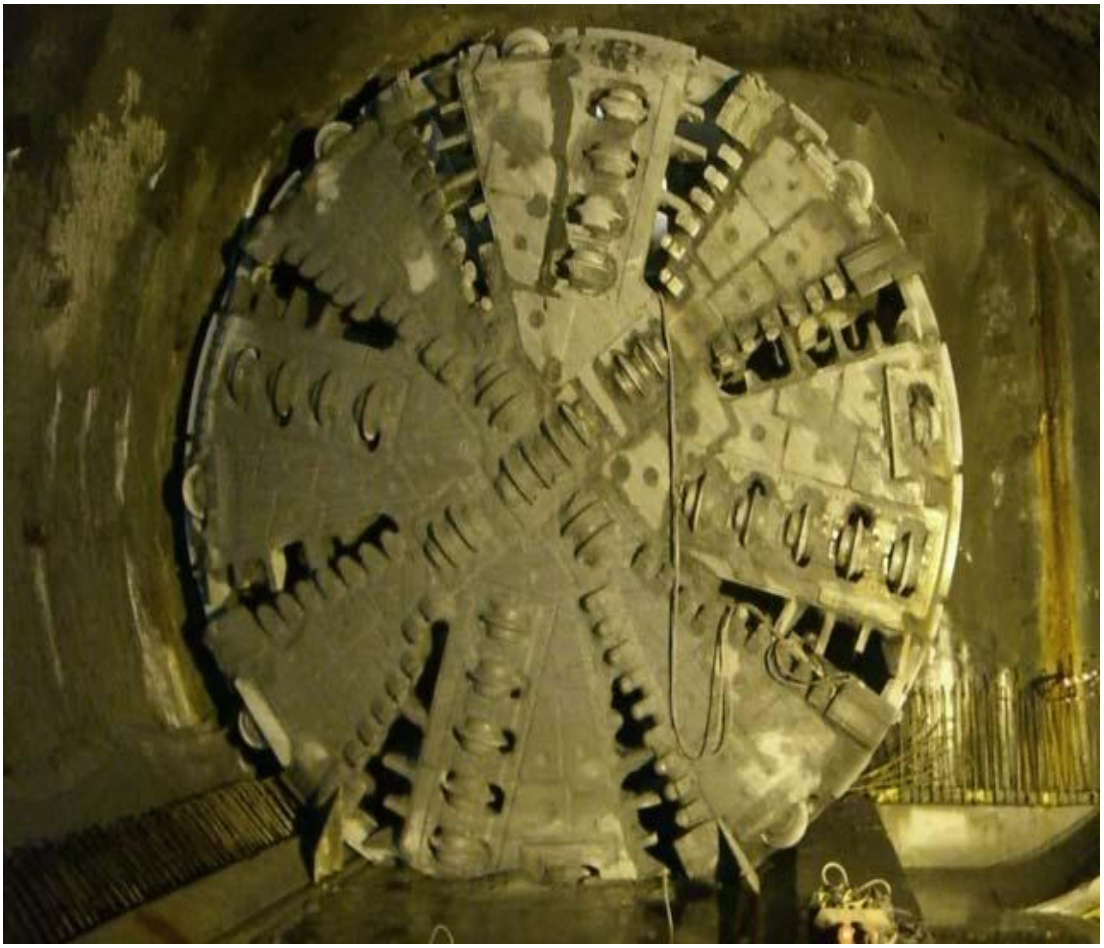
7.4 Performans Tahmini İle Gerçek Değerlerin Karşılaştırılması

Tam boyutlu kesme deneyi ile yapılan hesaplamalar sonu bulunan makine parametreleri ve üretici firmanın tasarım değerleri karşılaştırması Tablo 7.2'de verilmiştir (Bilgin ve diğer, 2008).

Herrenknecht TBM S360 açık modunda hat 2' deki tünel kazısına 20 Ağustos 2007 tarihinde başladı. Herrenknecht TBM S363 ise yine açık modunda hat 1'deki tünel kazısına 3 Kasım 2007 tarihinde başladı. 16 Nisan 2008 tarihinde kesici kafada yapılan küçük bir değişiklik ile çok zor şartlar altında ilerleyen ilk makine ortalama 11 m/gün ilerleme hızıyla 8 şaftını geçti (Şekil 7.3). Makine performans verileri yüklenici firma tarafından veri toplama sistemi ile sürekli olarak kontrol edilmektedir (Bilgin ve diğer, 2008).

Tablo 7.2 Deneysel değerler ile tasarım değerlerinin karşılaştırılması (Bilgin ve diğer, 2008).

	Disk Keski Adedi	Maksimum İtme (kN)	Maksimum Tork (kNm)	Kesici Kafa Gücü (kW)
Kesme Deneyleri ile Hesaplanan Değerler	44	1648 t	1872 kNm	1225 kW
Üretici Firma Tasarım Değerleri	38	4257 t (350 bar ile)	1515 kNm (5,5 rpm) 5200 kNm (1,6 rpm)	4 X 3125 kW



Şekil 7.4 TBM S360 şaft 8 (Bilgin ve diğer, 2008).

Bölgede kayaç formasyonu yüksek kırıklı Kartal kireçtaşı dasiti ve andezit dayklarından oluşmaktadır. RQD değerleri ortalama %21 olmak üzere %0-80 aralığında değişkenlik göstermektedir. Kırıklı zonlar TBM performansını inanılmaz ölçülerde etkileyebilir (Bilgin ve diğer, 2008). Çoğu durumda tahmin edilen performans değerleri uygulamadan farklılıklar gösterse de bazı sağlam kayaç bölgeleri geçilirken/kazılırken sağlıklı bir kıyaslama yapabilmek mümkündür (Bilgin ve diğer, 2008). Tablo 7.3'de sağlam kayaç formasyonu içeren ring bölgeleri ve performans değerleri verilmiştir. Karşılaştırmada kesme koşulları optimum düzeyde kabul edilmiştir. Şekil 30' da görüldüğü gibi keskiler arası mesafe ve keski derinliği oranı (s /d) 10 olduğunda optimum spesifik enerji elde edilmektedir. Seçilen keskiler arası mesafenin 8 cm olduğu hatırlanırsa, optimum keski derinliği 8 mm olmaktadır. Optimum koşullar için S = 7 ve keski derinliği 7 mm alınırsa bir disk keski için optimum itme kuvveti 906 kgf olmaktadır (Bilgin ve diğer, 2008). Bu durumda

penetrasyon indeksi 906 / 7 = 1295 kgf / mm olur (Bilgin ve diğer, 2008). Bu indeks kaya formasyonlarının kesilebilirlik özelliklerinin belirlenmesinde oldukça kullanışlıdır. Disk keskilerinin sayısının 38 olduğu hatırlanırsa, Kartal formasyonu için TBM penetrasyon indeksi tahmini 38 x 1295 = 49210 kgf / mm yani,492 kN/mm' dir (Bilgin ve diğer, 2008).

Tablo 7.3 Sert kayaçlarda TBM S360 performans verileri (Bilgin ve diğer, 2008).

Ring Numarası	Ölçülen RPM (devir/dakika)	Ölçülen Tork (kNm)	Penetrasyon (mm/devir)	Penetrasyon İndeksi (kN/mm)	İlerleme Hızı (mm/min)
54	2,8	1210	9	412	28
98	2,4	1130	10	515	25
246	2,5	2220	10	453	25
254	2,6	1790	8	545	22
279	2,7	1800	9	568	24
284	2,5	1870	9	544	23
287	2,6	1770	9	454	23
289	2,7	1880	8	502	23
307	2,6	1900	10	498	27
308	2,5	1400	10	491	25
340	2,9	2280	10	491	29
344	2,5	2220	9	444	24
347	2,5	1590	10	467	24
348	2,7	1950	9	470	23
349	2,6	1850	9	449	24
393	2,4	1450	10	452	30
453	2,9	2290	10	453	29
463	2,8	2450	10	463	29
Ortalama Uygulama	2,6+/-0,15sd	1840+/-360sd	9,4+/-0,7sd	485+/-39sd	25,4+/-2,4sd

Tablo 7.3'den faydalanarak ortalama makine devri 2,6 rpm ve penetrasyon oranı 9,4 mm/devir olarak bulunur ve buradan TBM net kesme hızı (Bilgin ve diğer,2008);

$9{,}4 \times 2{,}6 \times 3{,}14 \times 6{,}57 \times 6{,}57 \times 10^{-3} \times 60 / 4 = 50\ m^3/h$

Tahmin edilen ve uygula değerleri Tablo 7.4'de veriliştir. Tablo 7.4'de görüldüğü gibi süreksizliklerin olmadığı jeolojik sağlam kayaç ortamında tahmin edilen değerlerle, uygulama değerleri birbirine oldukça yakındır (Bilgin ve diğer, 2008).

Tablo 7.4 TBM tahmin ve uygulama performans değerleri (Bilgin ve diğer, 2008).

	Penetrasyon İndeksi (FN/d) (kN/mm)	Tork (kNm)	Net Kesim Hızı (m^3/h)	Günlük Ortalama İlerleme Hızı (%20 makine kullanımı ile)
Kesme Deneyi Sonuçları (d=8mm, 6 rpm)	492	1872	98	11,5 m/day
Uygulama Veri (d=810mm,2,6rpm)	485	1840	50	11-12 m/day

BÖLÜM SEKİZ
GENEL DEĞERLENDİRME

8.1 Giriş

Kadıköy kartal metro tüneli projesi ilk tasarım aşamasında tam cephe tünel açma makinesi (TBM) ile geçilmesi ön görülen güzergah KM 3+820 ile KM 8+520 arasında 4,7 km EPB moduyla ve KM 8+520 ile KM 21+690 arası 13,17 km TBM moduyla kazılacağı öngörülmüştür. Ancak, projede yüklenici firmanın değişmesi ve bazı şartların farklı gelişimiyle TBM kullanılarak kazılacak tünel kesimi Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu'yla (NATM) kazılmıştır. Söz konusu projede KM 3+620 ile KM 8+450 arasındaki kesimi EPB/TBM ile iki hat olarak kazılmıştır. Geriye kalan tünel kesimi NATM yöntemi ile açılmıştır. EPB/TBM ile geçilen formasyon hem alüvyonel zemin şartlarında hem de sağlam kayaç formasyonu içerisinde gerçekleşmiş ve TBM bu iki oluşum içerisinde iki farklı düzenekte (kapalı-açık) kazı yapmıştır.

Gerek proje tasarım aşamasında yapılan jeoteknik etüt ve ön görüler gerekse de TBM'in faaliyette olduğu dönem belirli formasyon aralıklarından alınan numuneler ile o aralıklardaki performans değerlerinin karşılaştırılması ve performans tahmini çalışmaları dikkate alınarak, kazısı tamamlanan aralıktaki (KM 3+620 ile KM 8+450) günlük ilerleme miktarları baz alınarak TBM kazı performans analizi araştırılmış ve yorumlanmıştır.

8.2 Kazı İlerleme Hızı

Kazı ilerleme hızı belirli bir zaman diliminde yapılan kazı miktarı olarak özetlenebilir. Tablo 8.1 ve Tablo 8.2'de makinelerin aylık ilerleme miktarları ve kazıda geçen çalışma süreleri kümülatif olarak verilmiştir.

Tablo 8.1 S-363 hat-1 kazı ilerlemeleri ve çalışma süreleri

EPB-TBM S363 Hat - 1					
	Kazı			Ring No	Kazı Çalışma Süresi (dak.)
Tarih	Başlangıç Km	Bitiş Km	İlerleme(m)		
Eki.11	8+469,60	8+444,10	25,50	1-17	1,360,00
Kas.07	8+444,10	8+415,47	28,63	17-34	1,320,00
Ara.07	8+415,47	8+361,22	54,25	34-72	1,695,00
Oca.08	8+361,22	8+358,92	2,30	72-73	705,00
Şub.08	8+358,92	8+241,91	117,01	73-151	6,315,00
Mar.08	8+241,91	8+118,43	123,48	151-232	8,175,00
Nis.08	8+118,43	7+978,45	139,98	232-325	7,500,00
May.08	7+978,45	7+774,84	203,61	325-461	7,935,00
Haz.08	7+774,84	7+546,43	228,41	461-617	8,790,00
Tem.08	7+546,43	7+546,43	-		
Ağu.08	7+546,43	7+249,58	296,85	617-637	1,395,00
Eyl.08	7+249,58	7+062,87	186,71	637-761	5,775,00
Eki.08	7+062,87	6+724,08	338,79	761-986	9,015,00
Kas.08	6+724,08	6+359,69	364,39	986-1228	10,560,00

Tablo 8.1 S-363 hat-1 kazı ilerlemeleri ve çalışma süreleri(Devamı)

EPB-TBM S363 Hat - 1					
	Kazı			Ring No	Kazı Çalışma Süresi (dak.)
Tarih	Başlangıç Km	Bitiş Km	İlerleme(m)		
Ara.08	6+359,69	6+070,69	289,00	1228-1420	7,725,00
Oca.09	6+070,69	5+867,47	203,22	1420-1555	8,625,00
Şub.09	5+867,47	5+646,09	221,38	1555-1702	7,725,00
Mar.09	5+646,09	5+585,56	60,53	1702-1747	1,740,00
Nis.09	5+585,56	4+830,38	755,18	1747-1961	8,370,00
May.09	4+830,38	4+568,47	261,91	1961-2140	6,600,00
Haz.09	4+568,47	4+114,49	453,98	2140-2227	3,780,00
Tem.09	4+114,49	4+000,17	114,32	2227-2303	4,245,00
Ağu.09	4+000,17	3+814,65	185,52	2303-2427	5,595,00
Eyl.09	3+814,65	3+619,31	195,34	2427-2556	7,515,00
Toplam ilerleme			4,796,16		131,100,00

Tablo 8.2 S-360 hat-2 kazı ilerlemeleri ve çalışma süreleri

EPB-TBM S360 Hat - 2					
	Kazı			Ring No	Kazı Çalışma Süresi (dak.)
Tarih	Başlangıç Km	Bitiş Km	İlerleme(m)		
Eyl.07	8+565,28	8+463,28	102,00	1-68	6,280,00
Eki.07	8+463,28	8+418,86	44,42	68-98	2,055,00
Kas.07	8+418,86	8+326,97	91,89	98-159	6,365,00
Ara.07	8+326,97	8+218,43	108,54	159-231	6,275,00
Oca.08	8+218,43	8+160,06	58,37	231-269	4,590,00
Şub.08	8+160,06	7+984,94	175,12	269-386	9,750,00
Mar.08	7+984,94	7+743,92	241,02	386-546	9,015,00
Nis.08	7+743,92	7+590,22	153,70	546-647	6,045,00
May.08	7+590,22	7+590,22	-		30,00
Haz.08	7+590,22	7+129,41	460,81	647-956	9,750,00
Tem.08	7+129,41	6+856,93	272,48	956-1138	10,500,00
Ağu.08	6+856,93	6+566,29	290,64	1138-1331	10,275,00
Eyl.08	6+566,29	6+400,77	165,52	1331-1441	5,400,00
Eki.08	6+400,77	6+143,24	257,53	1441-1612	7,005,00

Tablo 8.2 S-360 hat-2 kazı ilerlemeleri ve çalışma süreleri (Devamı)

EPB-TBM S360 Hat - 2					
	Kazı			Ring No	Kazı Çalışma Süresi (dak.)
Tarih	Başlangıç Km	Bitiş Km	İlerleme(m)		
Kas.08	6+143,24	6+039,23	104,01	1612-1681	5,970,00
Ara.08	6+039,23	5+888,88	150,35	1681-1781	7,290,00
Oca.09	5+888,88	5+711,37	177,51	1781-1899	5,385,00
Şub.09	5+711,37	5+135,81	575,56	1899-2184	2,940,00
Mar.09	5+135,81	4+715,74	420,07	2184-2464	11,205,00
Nis.09	4+715,74	4+278,61	437,13	2464-2755	4,440,00
May.09	4+278,61	4+106,81	171,80	2755-2869	4,110,00
Haz.09	4+106,81	4+016,44	90,37	2869-2929	2,970,00
Tem.09	4+016,44	3+777,32	239,12	2929-3088	8,250,00
Ağu.09	3+777,32	3+431,21	346,11	3088-3318	10,815,00
Eyl.09	3+431,21	3+219,00	212,21	3318-3496	7,230,00
Toplam ilerleme			5,244,28		157,660,00

8.3 Makine kazı parametre kayıtları

Kazı uygulamaları sırasında makine, kazı parametrelerine ait değerleri üzerinde bulunan sensörler yardımı ile kayıt altına alır ve bilgisayar ortamına aktarır. Ek.5'de kümülatif kayıt raporlarının aylık ortalamaları dikkate alınarak hazırlanmış icmal

verilmiştir. Burada kesici kafaya ait dönüş hızı, tork, çalışma basıncı ve itici silindirlere ait toplam güç, ilerleme hızı ve penetrasyon gibi parametrelerin değerleri toplu olarak görülmektedir.

8.4 Kazı Performansının Değerlendirilmesi

Kadıköy-Kartal metro tüneli EPB/TBM kazı çalışmaları sırasında tam cephe tünel açma makineleri vardiya mühendisleri tarafından günlük olarak hazırlanan raporlar baz alınarak oluşturulan Tablo 8.1 ve Tablo 8.2'de belirtilen çalışma süreleri fiili olarak makine kazısı sırasında ölçülen verilerdir. Bu noktada genel olarak Hat -1 için ortalama günlük ilerleme hızı, çift vardiya, vardiyada 11 saat olmak üzere,

4796,16m / (131100dak / 60 / 22) = 48,29m/gün'dür.

Hat-2 için ise bu değer;

5244,28m / (157660dak / 60 / 22) = 43,29m/gün

İki makine için ortalama günlük ilerleme ise (48,29+43,29) / 2 = 45,79 m/gün sonucuna ulaşılır. İki makine ile yapılan toplam tünel kesiti kazı uzunluğu 10040,44m'dir. Belirtilen bu günlük ilerlemeyle tünel kesitinin kazısının 10040,44 /45,79 = 219,3 günde tamamlanması gerekirdi. Oysa, bahsedilen aralığın kazısı ayda ortalama 24 gün verimli çalışma süresi kabul edilirse yaklaşık olarak 49 ay sürmüştür, yani 1176 gün. Buradan da görüleceği gibi makine kullanım değeri %18,64, yaklaşık olarak %20 olduğu ortaya çıkmaktadır. Nuh Bilgin ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarında ise günlük ilerleme hızı zor koşullarda %20 makine kullanım değeri ile hesaplanmıştı. Buna bağlı olarak bulunan ilerleme hızlarının teorik ve pratik açıdan birbiriyle uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Alüvyon dolgu tabakası, KM 3+800 - KM 4+260 ve KM 5+120 - KM 6+520 arasında kontrolsüz dolgu altında yer almaktadır. KM 3+840 - KM 4+140 arasında ise tünel aynasında ve tabanında belirlenmiştir. Sondajlarda belirlenen kil tabakası, dolgu tabakaları ve alüvyal çökeller altında yer almaktadır. Kil tabakaları, altında yer alan kaya formasyonunun ayrışması ile meydana gelmiş rezidüel zemin özelliğindedir. KM 5+100 - KM 6+520 aralığında alüvyon dolgular altında, KM

6+580 ila rapor sonu KM 8+000 arasında ise Belgrad formasyonu (çakıllı kum kil tabakası) altında göreli olarak ince kalınlıklarda yer almaktadır.

KM 6+570 ile yaklaşık EPB/TBM makinesinin geçtiği formasyon kilometre sonu olan KM 8+000 arasında, yapay dolgu tabakası altında görülen zemin niteliğindeki bu formasyon, çakıllar içermekte, kum boyutundan kil boyutuna dek katmanlar halinde değişik dane dağılımı özellikleri sergilemektedir.

Bahsedilen formasyonlarda kayaç içinde ilerlerken TBM ilerleme hızı dayanımın yüksekliği ile ters orantılı olduğu görünmektedir. Aynı zamanda, süreksizliklerin ve kırıklı yapının yoğun olduğu bölgelerde; dayanımın düşmesine bağlı hız artışı gözlenirken, pasa nakli su geliri v.b sorunlar nedeni ile ilerleme zamana bağlı olarak düşüş göstermektedir.

Sonuç olarak, TBM performansı tamamlanmış bir kesit için yapılan deneysel yaklaşımlar ve pratik performans verileri karşılaştırılmıştır.

Kadıköy Kartal Metro Projesi'nde kullanılan S360 ve S363 kodlu tam cepheli tünel açma makinelerinin aylık ortalama ilerleme hızları, kaya kalite tanımı, jeolojik dayanım indisi ve kayaç serbest basınç dayanımı kazılan formasyonlarla birlikte toplu olarak Tablo 8.3'te verilmiştir.

Tablo 8.3 S-363 hat-1 kazı ilerlemeleri, geçilen zonlar ve kayaç özellikleri

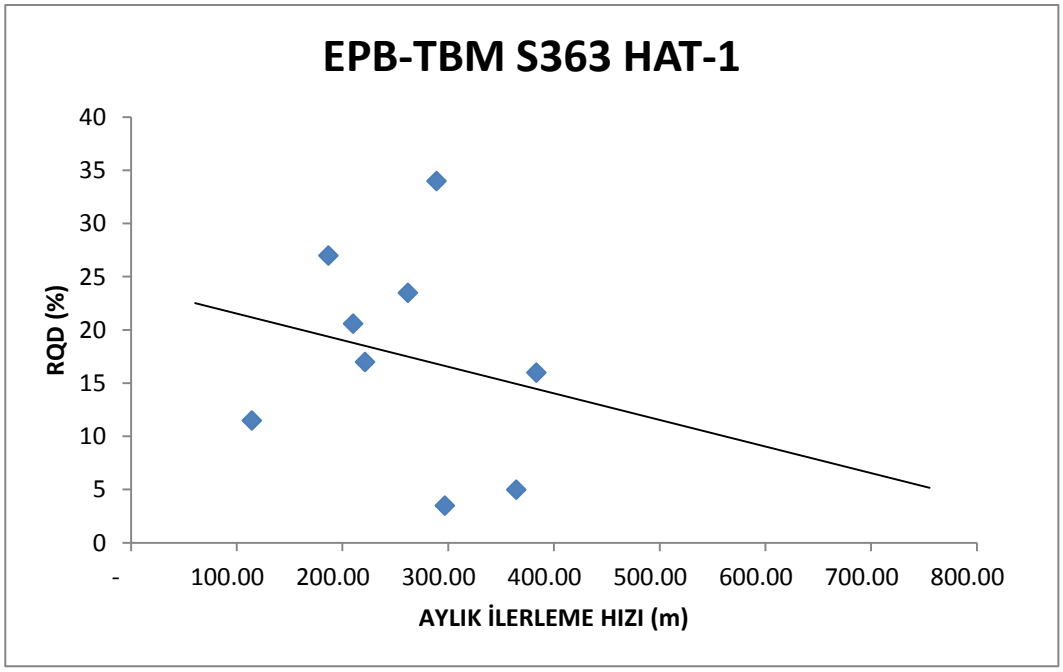
EPB-TBM S363 Hat - 1						KAYA KALİTE TANIMI	JEOLOJİK DAYANIM İNDİSİ	KAYAÇ SERBEST BASINÇ DAYANIMI, UCS
	Kazı			Kazı Çalışma Süresi (dak.)	ZON	RQD (%)	GSI	Mpa
Tarih	Başlangıç Km	Bitiş Km	İlerleme(m)					
May.08	7+984,94	7+774,84	210,10	8.331,75	I	20,6	20,8	20,46
Haz.08	7+774,84	7+546,43	228,41	8.790,00				
Ağu.08	7+546,43	7+249,58	296,85	1.395,00	EZİK ZON	3,5	6,5	31,05
Eyl.08	7+249,58	7+062,87	186,71	5.775,00	I	27	20	20,93
Eki.08	7+062,87	6+724,08	338,79	9.015,00				
Kas.08	6+724,08	6+359,69	364,39	10.560,00	EZİK ZON	5	8	39,6
Ara.08	6+359,69	6+070,69	289,00	7.725,00	II	34	29	30,63
Oca.09	6+070,69	5+867,47	203,22	8.625,00				
Şub.09	5+867,47	5+646,09	221,38	7.725,00	I	17	21	45,98
Mar.09	5+646,09	5+585,56	60,53	1.740,00				
Nis.09	5+585,56	4+830,38	755,18	8.370,00				
May.09	4+830,38	4+568,47	261,91	6.600,00	II	23,5	30,83	25,20
Haz.09	4+568,47	4+114,49	453,98	3.780,00				
Tem.09	4+114,49	4+000,17	114,32	4.245,00	ALÜVYON DOLGU	11,5	17,5	0
Ağu.09	4+000,17	3+814,65	185,52	5.595,00				
Eyl.09	3+814,65	3+431,21	383,44	11.272,50	EZİK ZON	16	15,5	
Toplam ilerleme			4.553,73	109.544,25				

Tablo 8.4 S-360 hat-2 kazı ilerlemeleri, geçilen zonlar ve kayaç özellikleri

EPB-TBM S360 Hat - 2						KAYA KALİTE TANIMI	JEOLOJİK DAYANIM İNDİSİ	KAYAÇ SERBEST BASINÇ DAYANIMI, UCS
	Kazı			Kazı Çalışma Süresi (dak.)	ZON	RQD (%)	GSI	Mpa
Tarih	Başlangıç Km	Bitiş Km	İlerleme(m)					
Mar.08	7+984,94	7+743,92	241,02	9.015,00	I	20,6	20,8	20,46
Nis.08	7+743,92	7+590,22	153,70	6.045,00				
Haz.08	7+590,22	7+129,41	460,81	9.750,00	EZİK ZON	3,5	6,5	31,05
Tem.08	7+129,41	6+856,93	272,48	10.500,00	I	27	20	20,93
Ağu.08	6+856,93	6+566,29	290,64	10.275,00	EZİK ZON	5	8	39,6
Eyl.08	6+566,29	6+400,77	165,52	5.400,00	I	17	21	45,98
Eki.08	6+400,77	6+143,24	257,53	7.005,00				
Kas.08	6+143,24	6+039,23	104,01	5.970,00	II	34	29	30,63
Ara.08	6+039,23	5+888,88	150,35	7.290,00				
Oca.09	5+888,88	5+711,37	177,51	5.385,00	I	15,2	17,2	24,12
Şub.09	5+711,37	5+135,81	575,56	2.940,00				
Mar.09	5+135,81	4+715,74	420,07	11.205,00				
Nis.09	4+715,74	4+278,61	437,13	4.440,00	II	23,5	30,83	25,2
May.09	4+278,61	4+106,81	171,80	4.110,00				
Haz.09	4+106,81	4+016,44	90,37	2.970,00	ALÜVYON DOLGU	11,5	17,5	0
Tem.09	4+016,44	3+777,32	239,12	8.250,00				
Ağu.09	3+777,32	3+431,21	346,11	10.815,00	EZİK ZON	16	15,5	0
Toplam ilerleme			4.553,73	121.365,00				

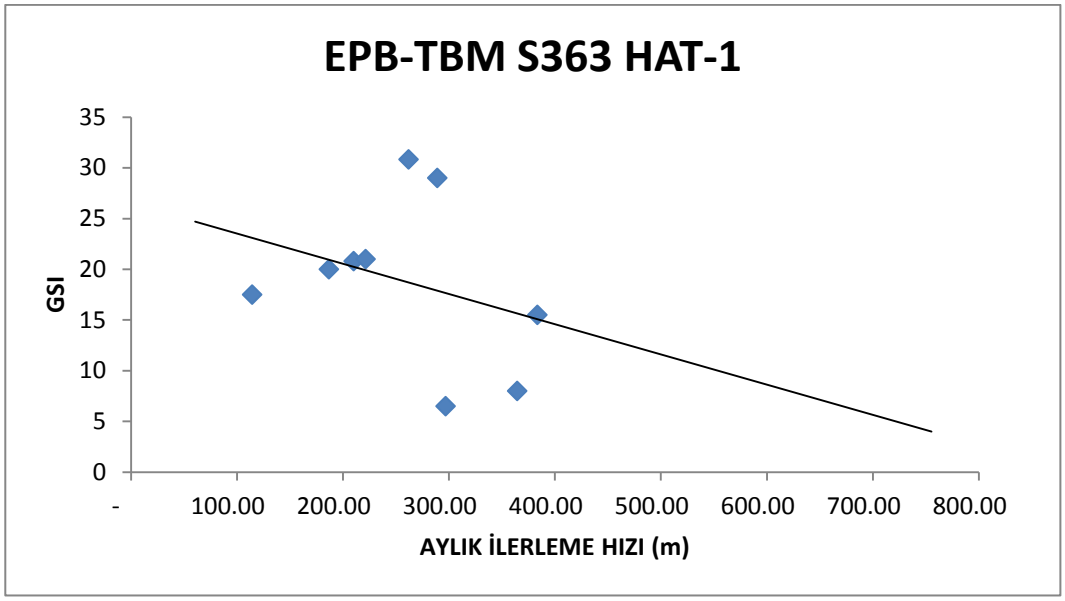
Tablo 8.3 ve Tablo 8.4'te geçilen zonlara göre kayaç özellikleri ve ilerleme hızları ile kazı çalışma süreleri pek çok farklılık göstermektedir. Hat-2'de çalışan S360 kodlu makinenin göreli olarak aynı kilometre aralığında daha fazla değişkenlik gösteren benzer zonlardan geçtiği görülmektedir. Formasyondaki çeşitlilik nedeniyle aynı uzunluktaki tünel kesiti aynı özelliklere sahip iki makine tarafından farklı zaman aralıklarında tamamlanabilmiştir. Burada farklı niteliklerde ekiplerin çalıştığı ve

insan faktörüne bağlı oluşabilecek zaman kayıpları ihmal edilirse formasyon özelliklerinin ilerleme hızına ve çalışma süresine etkiyen en önemli parametre olduğu sonucuna ulaşmak mümkündür. Bu tablolardan yola çıkarak aylık ilerleme hızlarıyla geçilen formasyonlara ait kaya kalite tanımı (RQD), jeolojik dayanım indisi (GSI) ve kayaç serbest basınç dayanımı (UCS) verileri arasına nasıl bir ilişki olduğu incelenmiştir. Şekil 8.1'de S363 kodlu makine aylık ilerleme hızı ile RQD ilişkisi grafiği verilmiştir.



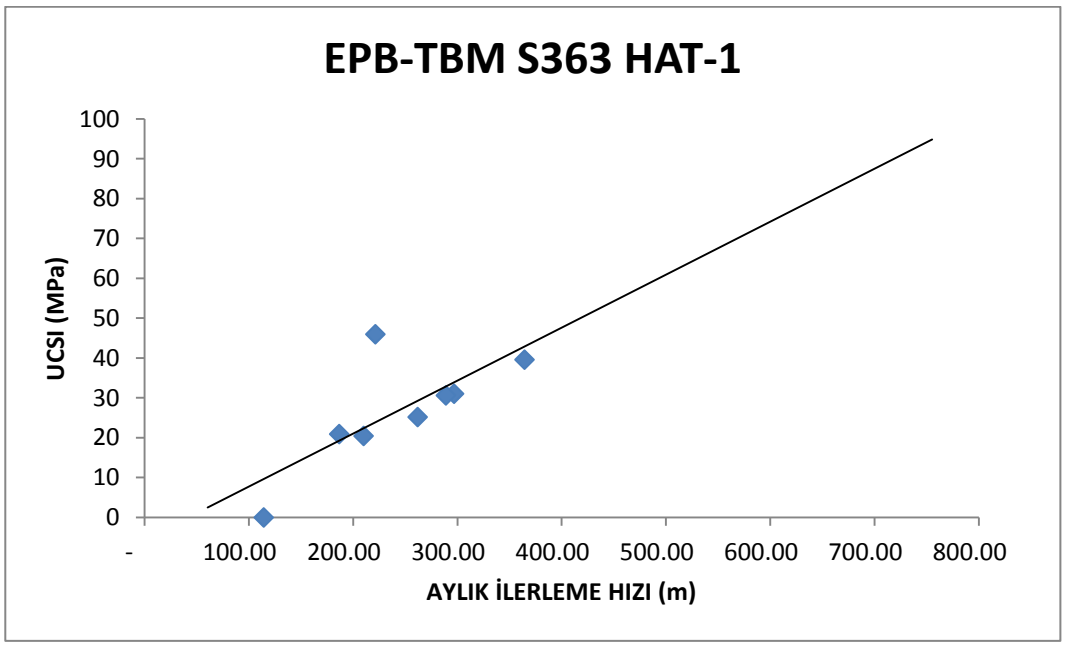
Şekil 8.1 TBM S363 aylık ilerleme hızıyla RQD ilişkisi.

Şekil 8.2.'de ise S363 kodlu makine aylık ilerleme hızı ile GSI ilişkisi grafiği verilmiştir.



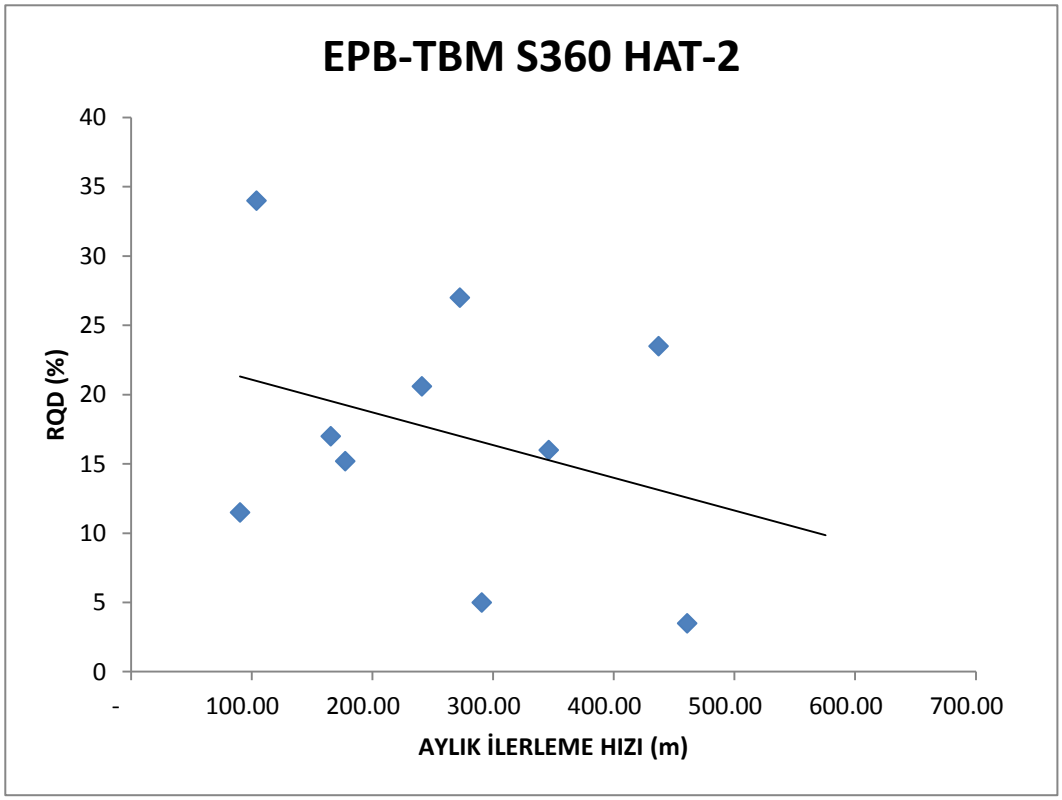
Şekil 8.2 TBM S363 aylık ilerleme hızıyla GSI ilişkisi.

Şekil 8.3.'de S363 kodlu makine aylık ilerleme hızı ile UCS ilişkisi grafiği verilmiştir.

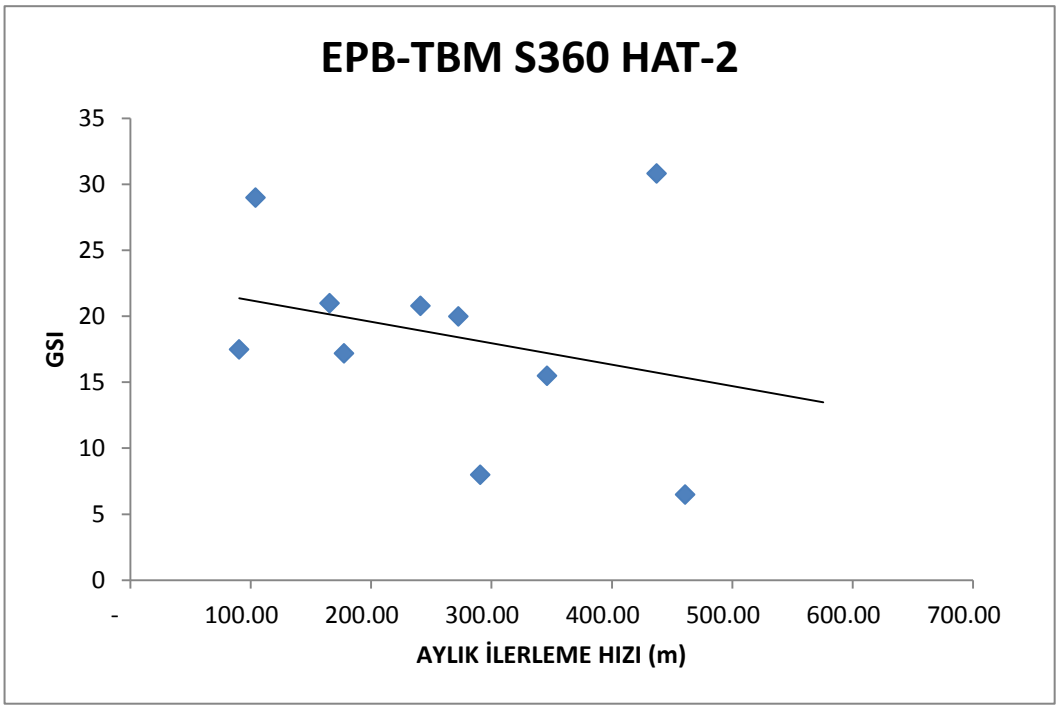


Şekil 8.3 TBM S363 aylık ilerleme hızıyla UCS ilişkisi.

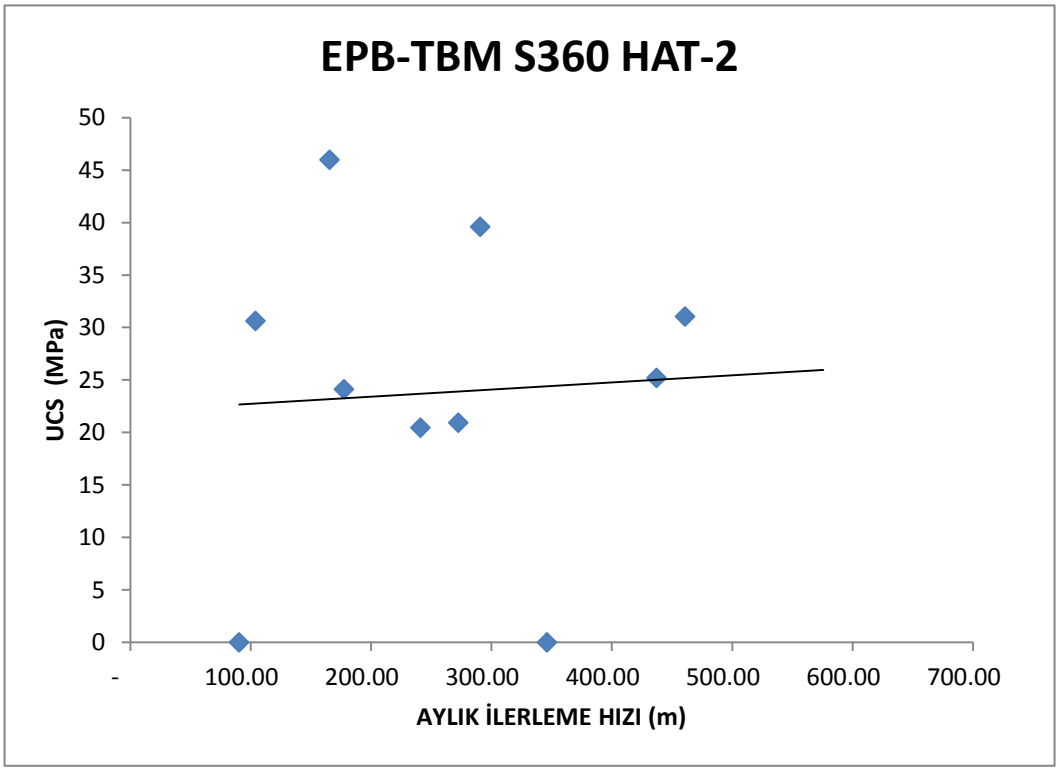
Şekil 8.4, Şekil 8.5, Şekil 8.6,'da ise Hat-2'de çalışan S360 kodlu makinenin sırası ile RQD, GSI ve UCS verileri ile aylık ilerleme hızlarının ilişkileri verilmiştir.



Şekil 8.4 TBM S360 aylık ilerleme hızıyla RQD ilişkisi.

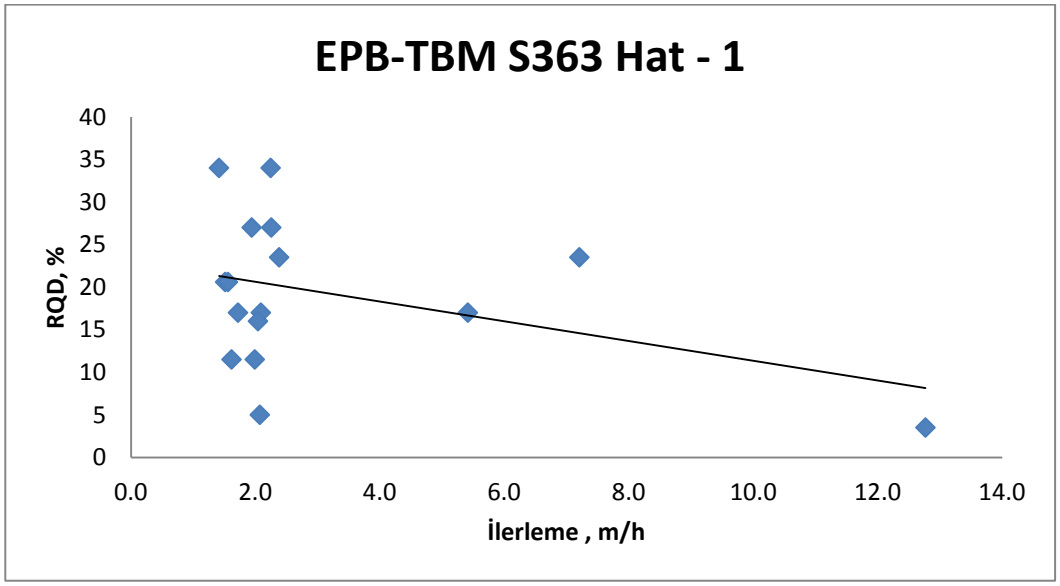


Şekil 8.5 TBM S360 aylık ilerleme hızıyla GSI ilişkisi.

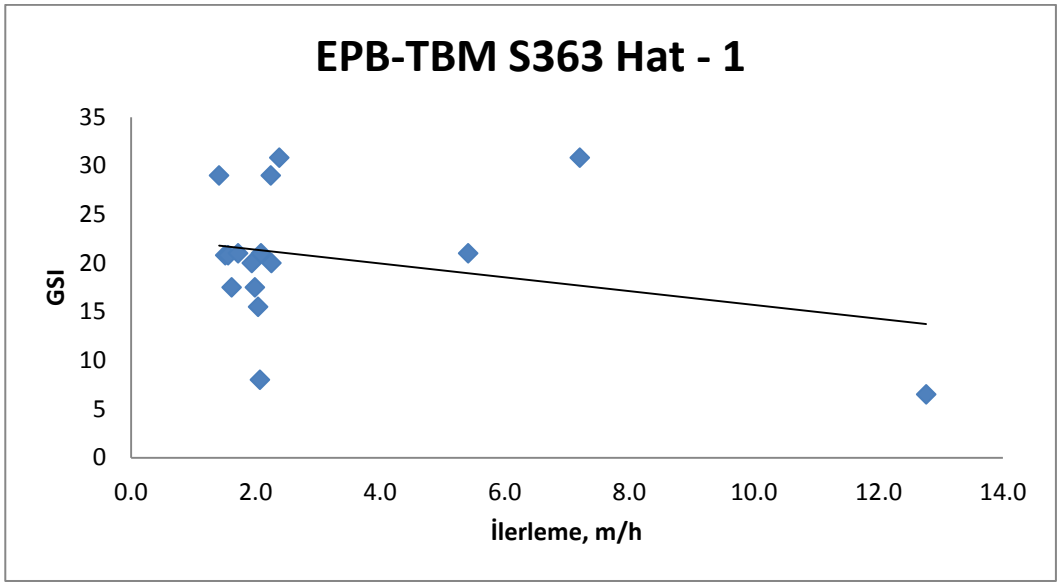


Şekil 8.6 TBM S360 aylık ilerleme hızıyla UCS ilişkisi.

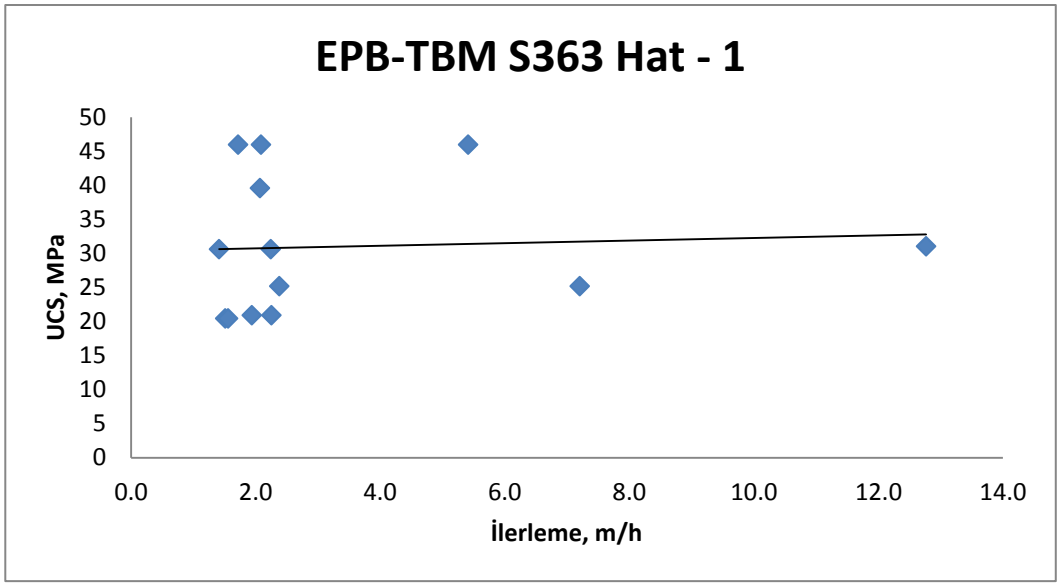
Tam cephe tünel açma makinelerinin fiili çalışma süreleri makine sensörleri tarafından dakika cinsinden kayıt altına alınmıştır. Tablo 8.1 ve Tablo 8.2'den yararlanılarak makine fiili çalışma sürelerin ve aylık ilerleme hızları kullanılarak makinelerin saatlik ilerleme miktarları bulunmuştur. İlerleme (m/h) miktarlarıyla geçilen formasyonlara ait kaya kalite tanımı (RQD), jeolojik dayanım indisi (GSI) ve kayaç serbest basınç dayanımı (UCS) verileri arasına nasıl bir ilişki olduğu incelenmiştir. S363 ve S360 kodlu makineler için ayrı ayrı grafikler çizilerek ilerleme ile kayaç özellikleri arasındaki bağlantı araştırılmıştır. Şekil 8.7, Şekil 8.8, Şekil 8.9'da ise Hat-1'de çalışan S363 kodlu makinenin sırası ile RQD, GSI ve UCS verileriyle ilerleme miktarları değişimi verilmiştir.



Şekil 8.7 TBM S363 ilerleme, RQD ilişkisi.

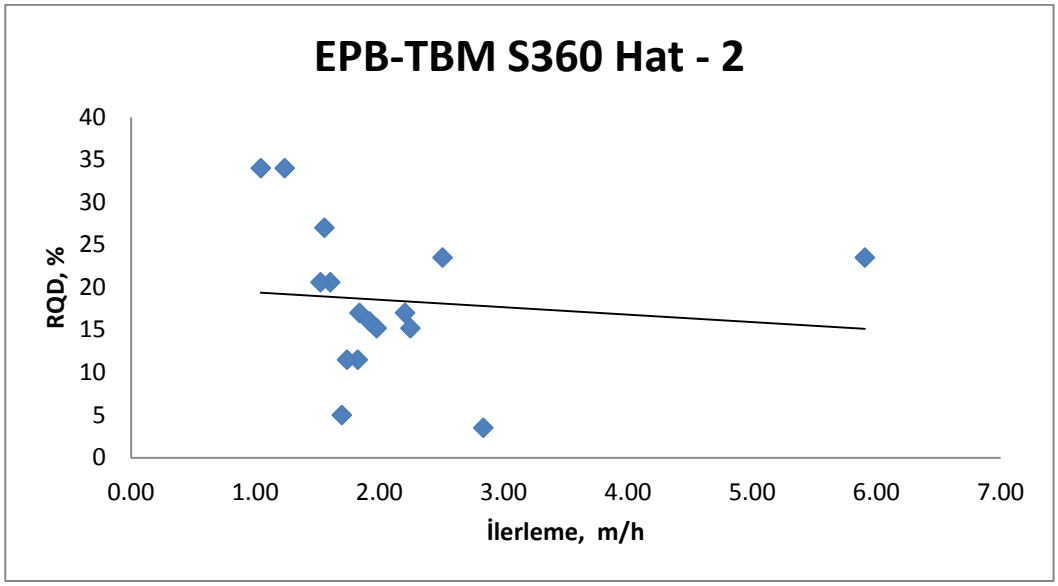


Şekil 8.8 TBM S363 ilerleme, GSI ilişkisi.

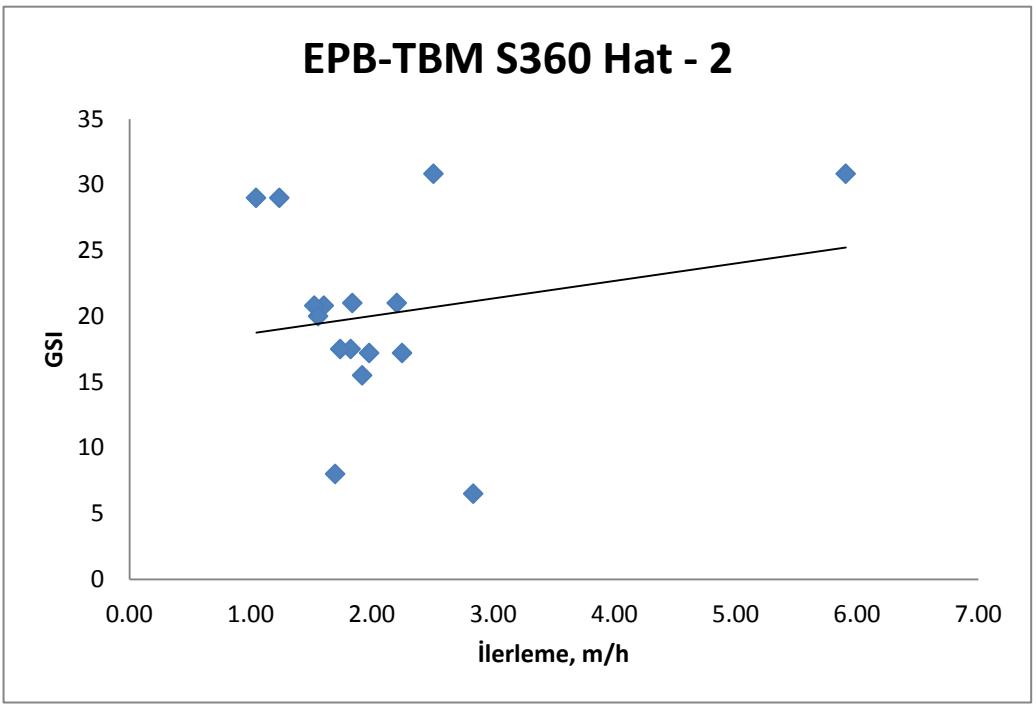


Şekil 8.9 TBM S363 ilerleme, UCS ilişkisi.

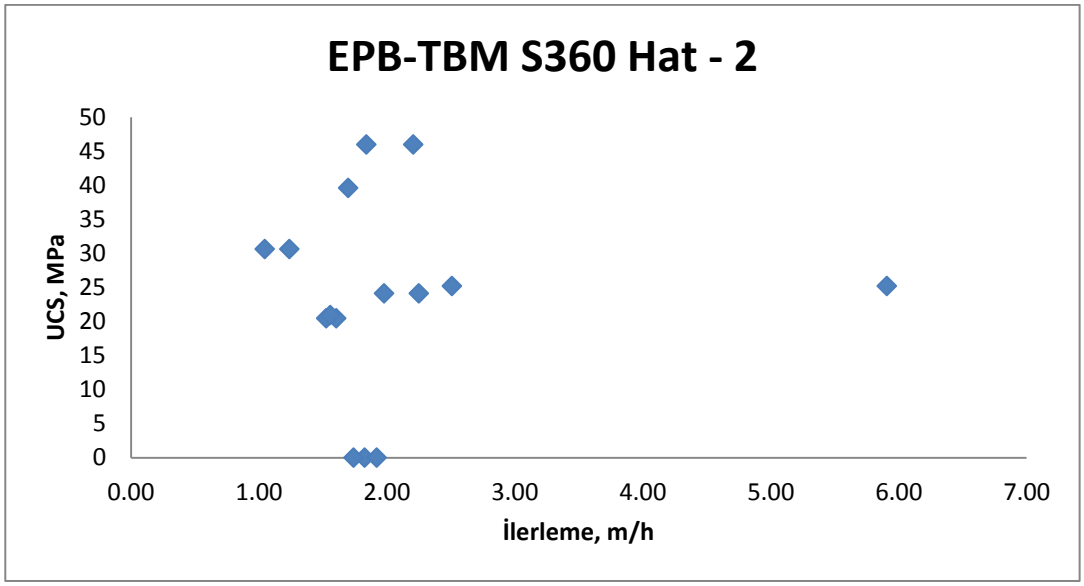
S360 kodlu hat-1 kazısını tamamlayan makineye ait değişim grafikleriyse Şekil 8.10, Şekil 8.11, Şekil 8.12'de verilmiştir. Bu makinenin geçtiği formasyonlara ait sırası ile RQD, GSI ve UCS verileri ve ilerleme miktarları değişimi ortaya konmuştur.



Şekil 8.10 TBM S360 ilerleme, RQD ilişkisi.



Şekil 8.11 TBM S360 ilerleme, GSI ilişkisi.



Şekil 8.12 TBM S360 ilerleme, UCS ilişkisi.

BÖLÜM DOKUZ

SONUÇ

Yer altı yapılarının kazılması sırasında, klasik kazı yöntemlerine göre hız, verimlilik, çevre duyarlılığı ve tasman önleme kabiliyeti gibi üstünlüklere sahip mekanik kazı yöntemleri tercih edilmektedir. Teknolojinin gelişimine paralel olarak geçtiğimiz yüzyıl içinde büyük ilerleme kaydeden tam cephe tünel açma makineleri mekanik kazıda nerdeyse rakipsiz hale gelmişlerdir.

Tam cephe tünel açma makineleri geçecekleri formasyona ve açacakları kesite göre dizayn edilirler. Tam cephe tünel açma makinelerinin kazı olayını gerçekleştirmesi itici silindirler ile aynaya iletilen itme kuvveti ve kesici kafanın döndürme motorları ile dönmesiyle mümkündür. Makinelerin kazı performansını etkileyen en önemli faktör kazılacak formasyondur. Arıza ve mucbir sebepler ihmal edildiğinde kazı ilerlemesindeki en etkin parametreler geçilen formasyon özellikleri, su geliri ve zeminin durumudur. Makine parametreleri açısından ilerleme hızı ve buna bağlı olarak kazı verimliliği, kesici kafadaki keskiler arası mesafe ve kesici disklerin penetrasyon indisi ile doğrudan bağlantılıdır.

Tam cephe tünel açma makinelerinin kazı performansının tahmini laboratuar ortamında tam boyutlu kesme deneyleri ile mümkün olmaktadır. Bu deneyler sonucu oluşturulan deneysel eşitliklerle kayaç fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılarak da benzer sonuçlara ulaşılabilir.

Kadıköy-Kartal metro tüneli EPB/TBM kazı çalışmaları sırasında tam cephe tünel açma makineleri vardiya mühendisleri tarafından günlük olarak hazırlanan raporlardan alınan çalışma süreleri fiili olarak makine kazısı sırasında ölçülen verilerdir. Bu noktada genel olarak Hat -1 için ortalama günlük ilerleme hızı, çift vardiya, vardiyada 11 saat olmak üzere,

4796,16m / (131100dak / 60 / 22) = 48,29m/gün'dür.

Hat-2 için ise bu değer;

5244,28m / (157660dak / 60 / 22) = 43,29m/gün

İki makine için ortalama günlük ilerleme ise (48,29+43,29) / 2 = 45,79 m/gün sonucuna ulaşılır. İki makine ile yapılan toplam tünel kesiti kazı uzunluğu 10040,44m'dir. Belirtilen bu günlük ilerlemeyle tünel kesitinin kazısının 10040,44 /45,79 = 219,3 günde tamamlanması gerekirdi. Oysa bahsedilen aralığın kazısı ayda ortalama 24 gün verimli çalışma süresi kabul edilirse yaklaşık olarak 49 ay sürmüştür, yani 1176 gün. Buradan da görüleceği gibi makine kullanım değeri %18,64, yaklaşık olarak %20 olduğu ortaya çıkmaktadır. Bilgin ve Arkadaşları (2008) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarında ise günlük ilerleme hızı zor koşullarda %20 makine kullanım değeri ile hesaplanmıştı. Buna bağlı olarak bulunan ilerleme hızlarının teorik ve pratik açıdan birbiriyle uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Bahsedilen formasyonlarda kayaç içinde ilerlerken TBM ilerleme hızı dayanımın yüksekliği ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, süreksizliklerin ve kırıklı yapının yoğun olduğu bölgelerde; dayanımın düşmesine bağlı hız artışı gözlenirken, pasa nakli su geliri v.b sorunlar nedeni ile ilerleme zamana bağlı olarak düşüş göstermektedir.

Sonuç olarak, TBM performansı tamamlanmış bir kesit için yapılan deneysel yaklaşımlar ve pratik performans verileri birbiriyle uyumludur.

KAYNAKLAR

Acaroğlu, Ö. Bayram, O. (2011). Kadıköy-Kozyatağı Arası Tünel Kazısında Kullanılan EPB Tünel Açma Makinaları Kazı Parametreleri Analizi. *Turkey 22. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi 11-13 Mayıs 2011*. Ankara.

Bilgin, N. Copur, H. Balci, C. Tumac, D. Akgul, M. VeYuksel, A. (2008). The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in Istanbul Kozyatagi-Kadikoy metro tunnels. *World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety*. Hindistan.

Çınar, M. Feridunoğlu, C. (15 Mart 2010). Tünel Açma Makineleri (TBM). 12 Şubat 2011, http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/41dd99a69df0404_ek.pdf

Friant, J.E. Özdemir, L. (1994). Tünel Açma Teknolojisi Bugün ve Yarın. *İTÜ Maden Fakültesi Tünel ve Galeri Açma Meslek İçi Semineri*. İstanbul.

Herrenknecht AG. (2007). S363 ve S360 EPB/TBM Kataloğu. İstanbul

İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Tünel Yapılarının Geoteknik Raporu. (İBB,TYGR). (2006). İstanbul.

Seymen, İ. (1995). İzmit Körfezi ve Çevresinin Jeolojisi, İzmit Körfezi Kuvaterner İstifi. (Ed. Meriç, Engin), *Kocaeli Çevre Koruma Vakfı*, Kocaeli.

TS EN 1997-1 (2005). Türk Standardı, Eurocode 7: Jeoteknik Tasarım Bölüm 1: Genel Kurallar.

Tunçdemir, H. (1998). Arazi Basıncının Dengelenmesi Esasına Göre Çalışan Tam Cephe Tünel Açma Makinelerinin Kazı Performansını Etkileyen Zemin Özellikleri ve İzmir Metrosu Örneği. *4.Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu*.