



Araştırma Makalesi / Research Article

Kabataş-Mecidiyeköy Metro (İstanbul) Tünellerinde Zor Zemin Koşullarının Tünel Kazısına Etkisi

Effect of Difficult Ground Conditions on Tunnel Excavations in Kabataş-Mecidiyekoy Metro (Istanbul) Tunnel

Mehmet ÖZÇELİK 

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İSPARTA

Geliş (Received): 15 Aralık (December) 2017 / Düzeltme (Revised): 12 Şubat (February) 2018 / Kabul (Accepted): 03 Nisan (April) 2018

ÖZ

Son yıllarda ulaşım tünelleri mekanik yöntemlerle açılmaktadır. Verimli bir tünel kazısının gerçekleştirilebilmesi için jeolojik yapıya uygun kazı makinasının seçimi önemli bir etkidir. Bu makalede, Kabataş-Mecidiyeköy tünel güzergahındaki jeolojik formasyonlar kazı mekaniği açısından değerlendirilmiştir. Kabataş-Mecidiyeköy istasyonları arasındaki İstanbul Metro Projesi, Tünel açma makineleri (TBM) ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) olmak üzere iki tip tünel kazısını içermektedir. TBM kullanılarak açılacak olan tünelin iki hattının toplam uzunluğu 6180 m dir. Ayrıca, NATM yöntemiyle açılacak olan iki hattın toplam uzunluğu ise 4490 m dir. Çalışma kapsamında, Kabataş-Mecidiyeköy tünel güzergahındaki zemin ve kayaç birimlerinin mühendislik jeolojisi çalışılmış, tünel kayacı olması açısından sınıflandırılmıştır. Zor zemin koşullarının tünel kazı çalışmalarına etkisi incelenmiştir. Ayrıca, jeolojik birimlerin geçirimsizlikleri ve yeraltı suyu seviyesi hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İstanbul, Jeolojik yapı, Metro, Tünel kazısı

ABSTRACT

In recent years, transportation tunnels have been excavated by mechanical methods. The selection of a suitable excavator for the geological structure is an important factor in achieving an efficient tunnel excavation. For this purpose, geological formations along the Kabataş-Mecidiyeköy tunnel alignment have been evaluated in terms of excavation mechanics. The Istanbul Metro Project between Kabatas-Mecidiyekoy stations includes two types of tunnel excavations, tunnel boring machines (TBM) and New Austrian Tunneling Method (NATM). The total length of the two lines of the tunnel to be opened using TBM is 6180 m. In addition, the total length of the two lines to be opened by NATM method is 4490 m. In this study, soil and rock units along the Kabataş-Mecidiyeköy tunnel alignment were classified in terms of engineering geology, and tunneling, and the effects of difficult ground conditions on tunnel excavation were investigated. In addition, the related information is given for the permeability of the geological units and the groundwater level.

Keywords: Istanbul, Geological structure, Metro, Tunnel excavation

GİRİŞ

Kentsel alanlarda yapılan metro çalışmalarında alt ve üst yapıların zarar görmemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi önemlidir. Metro kazıları TBM, NATM, aç-kapa tünel gibi inşaat yöntemlerinin biri veya birkaçı uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Planlanan yeraltı mühendislik yapılarının tasarımında jeolojik yapıya aktarılacak yükler yeterli duyarlılıkta belirlenebilmelidir. Bununla birlikte, kazı sırasında jeolojik yapının oluşturabileceği risklerde (şev kayması, tünel göçmesi, derin kazı çukurlarında aşırı deformasyon ve oturma, aşırı su gelimi vb.) minimize edilmelidir (Arioğlu vd., 2002). Ayrıca jeolojik yapı, tünel açma işlemlerinde tünelin zamanında ve başarılı olarak açılmasındaki önemli parametrelerden biridir. Son yıllarda dünyada birçok projede kullanılan TBM'ler ilerleme sırasında oluşan gerilmeleri, sağlam kayanın basınç direnci düzeyine yaklaştırırlar. Yeraltında karşılaşılan jeolojik birimlerin türü TBM'lerin ilke olarak aynı, fakat ayrıntıda çeşitli yönlerden farklı olmasını gerektirmiştir. Örneğin, kullanılacak kafa tasarımları ve keski tipleri, makinayı dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri çeşitli yönlerden sert, orta sert, yumuşak ve akıcı jeolojik birimler için farklılıklar göstermektedir. Bir tünel yapımında TBM kullanımı öncesi jeolojik yapının araştırılması geleneksel tünel açma yöntemlerinden daha ayrıntılı olmalıdır. Kaya sertliği ile ilgili özgül problemler, kaya tabakalarının duruş ve değişimi, kayacın

dayanma süresi tünel açma makinesinin başarısını etkileyen önemli öğelerdendir (Deere vd., 1974). Sonuçta, açılacak yeraltı açıklığı boyunca kazılacak jeolojik birimlerin önceden bilinmesi, kullanılacak TBM seçiminde en önemli etmenlerden biri olmuştur (Tunçdemir, 1998). TBM'lerin bilinçli seçilmesi ve kullanımı; hızlı, ekonomik ve verimli tünel ve galeri açmanın en temel unsurudur. Mecidiyeköy - Kabataş istasyonları arasındaki İstanbul Metro Projesi, TBM ve NATM tünel açma yöntemleri olmak üzere iki tünel kazı tipini içermektedir. Metro güzergahında 4 istasyon yer almaktadır. İki hat olarak açılan tüneller, NATM tünel delme yöntemi (4490 m) ve TBM yöntemiyle (6180 m) kazılmaktadır. Ek olarak muhtelif lokasyonlarda inşaat shaftları, TBM giriş shaftları gibi yapılar yer almaktadır. İstasyonların tamamı yüzeye yakın olmakla beraber yeraltındadır. Genel olarak ray hattı, peron seviyesi ile bunlara bağlanan merdiven grupları delme tüneldedir. Peron ile bilet holü arasındaki ara katlar genellikle aç-kapa yöntemiyle yapılmaktadır. Bilet holü/konkors seviyesi aç-kapa inşaat yöntemi kapsamındadır.

Bu çalışmada seçilen, Kabataş-Mecidiyeköy tünel güzergahındaki (Şekil 1) zemin ve kayaç birimlerinin mühendislik jeolojisi incelenmiş, tünel kayacı olması açısından bunlar sınıflandırılmıştır. NATM yöntemiyle açılacak olan shaft, peron tünelleri, makas tünelleri ve bağlantı tünelleri ile TBM kullanılarak yapılacak olan ana hat kazı çalışmalarında zor zemin koşullarının etkisi incelenmiştir.



Şekil 1. Kabataş-Mahmutbey istasyonları arasındaki İstanbul Metro Projesi lokasyon haritası.

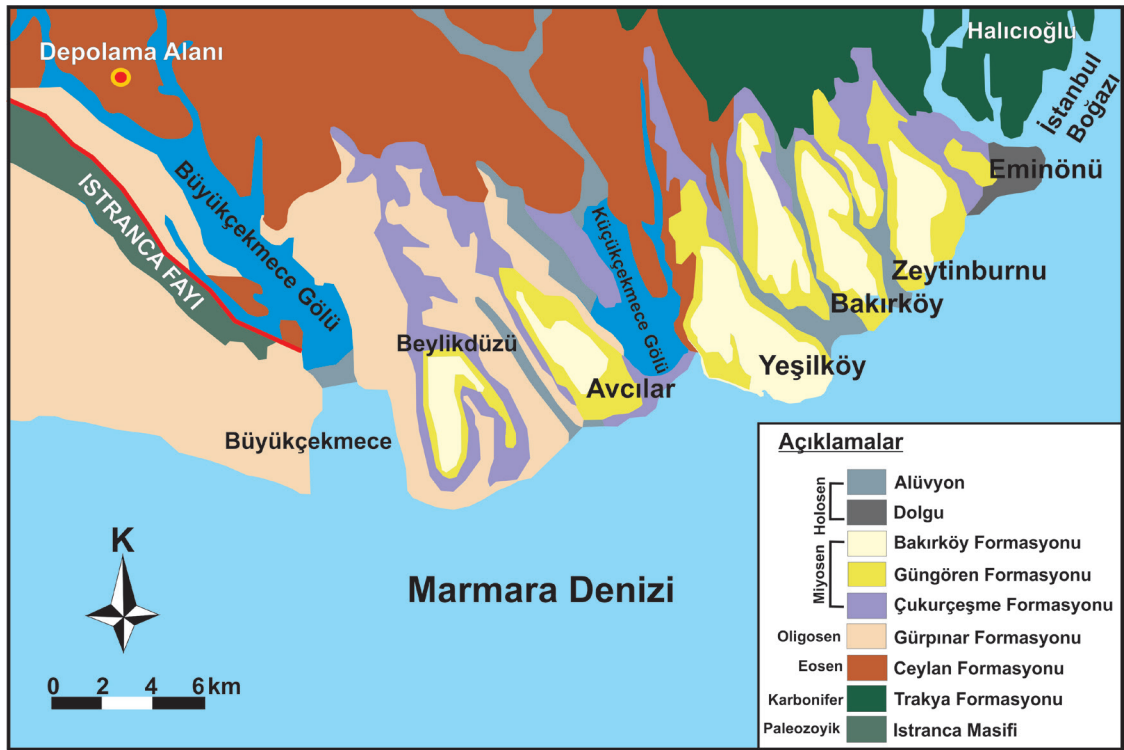
Figure 1. Location map of Istanbul Metro Project between Kabataş and Mahmutbey stations.

JEOLOJİ

Çalışma alanı jeolojik olarak Trakya ve Ceylan formasyonlarından oluşmaktadır (Şekil 2). Trakya formasyonu genel olarak kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kiltası birimleri ve bunların ardalanmasından meydana gelmektedir. Formasyon içerisinde kalınlıkları 2-3 m olan ve nadiren 50-60 m'ye ulaşan diyabaz ve andezit daykları yer almaktadır (Ketin, 1991; Seymen, 1995). Çoğunlukla oldukça ve tamamen ayrıışmış olan bu magmatik sokulumlar, kazı sırasında fazla güçlük çıkarmamaktadır. Ancak ayrıışmamış ve diyabaz bileşimli olanlar ise önemli kazı güçlüğü yaratmaktadır. Trakya formasyonu'nun kıvrımlı ve kırıklı bir yapı sunduğu aşırı derecede kırıklandığı ve parçalandığı görülmektedir. Plastik davranış gösterme özelliği nedeniyle kiltası ve çamurtaşı birimleri aşırı derecede kıvrımlanırken, daha rijit olan kumtaşları kırılarak yer yer budinler oluşturmuşlardır. Bu formasyon, yüzeyden ortalama 3 m derinliğe kadar yapay dolgunun altındadır ve yine yüzeyden 10-15 m derinliğe kadar orta veya aşırı derecede ayrıışmıştır. Kumtaşı tabakaları silttaşı veya kiltası düzeylerine göre daha kalın katmanlıdır (5-50 cm). Silttaşı ve kiltası düzeylerinin ortalama kalınlıkları 1-10 cm

arasında değişmektedir. Tabaka yüzeyleri genelde düz-düzlemsel, kaygan veya az pürüzlü (özellikle kumtaşları) olup, kil ile sıvalıdır. Tabakalar dışındaki süreksizlik düzlemlerini; eklem takımları, faylar, makaslamalar ve düzensiz kırıklar oluşturmaktadır. Özellikle tünel ve istasyon kazıları esnasında 2-3 adet eklem takımı ve bunların yanında düzensiz çatlaklar izlenmiştir. Çatlak sıklıkları ortalama 5-20 adet/m dir (kırıklı, çok kırıklı kayaç). Çatlak yüzeyleri çoğunlukla düz ve kaygandır. Ancak yer yer özellikle kumtaşı çatlaklarında az pürüzlü yüzeyler gözlenmektedir. Çatlak aralıkları çoğunlukla mm mertebesinde ve kil ile dolguludur (Ketin, 1991; Seymen, 1995).

Çalışma sahasının yerleşim yeri olmasından dolayı tünel güzergahını temsil edecek sayıda mostra bulunamamış ve istenilen oranda çatlak ölçümü yapılamamıştır. Ancak Trakya formasyonu'ndaki tünel kazısı çalışmalarında aynada gerçekleştirilen çatlak ölçümleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Şekil 3'de çatlak sistemlerinin Gül diyagramında tünel eksenine ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Şekil 4'de ise Eşit Alan (Schmidt) diyagramı verilmiştir. Burada çatlak düzlemlerine ait doğrultuların KB ve KD, eğim yönlerinin ise KD-GB yönlerinde yoğunlaştığı görülmektedir.



Zaman	Devir	Alt Devir	Litoloji	Litolojik Özellik
SENOZOİK	KUVATERNER			ALÜVYON Çakıl, Kum, Silt, Kil
	TERSİYER	PLİOSEN		DOLGU MALZEMESİ Kuvars Çakıllı Kil, Silt
				BAKIRKÖY FORMASYONU Kireçtaşı
		MİYOSEN		GÜNGÖREN FORMASYONU Marn Aratabakalı Kil
				ÇUKURÇEŞME FORMASYONU Siltli Killi Kum, Kum
				GÜRPINAR FORMASYONU İnce bantlı Kil
	OLİGOSEN			
PALEOZOİK	ORTA-ÜST EOSEN		CEYLAN FORMASYONU Kalkerli Kil, Killi Kireçtaşı, Kalkarenit, Killi Çakıllı Kum, Kumlu Kil Kırklareli Kireçtaşı, Resifal Kireçtaşı, Mamlı Kireçtaşı	
		KARBONİFER		TRAKYA FORMASYONU Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı, Kiltası

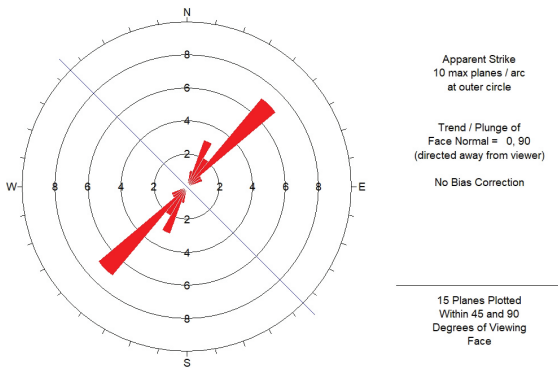
Şekil 2. İstanbul'un batı yakasının jeoloji haritası ve stratigrafik kolon kesiti (Arıç, 1955; Dalgıç, 2004; Güven, 2009).
Figure 2. Geological map and stratigraphic columnar section of the western side of Istanbul (Arıç, 1955; Dalgıç, 2004; Güven, 2009).

Özçelik

Çizelge 1. Kazı aşamasında Trakya formasyonu'nda aynada yapılan süreksizlik ölçümleri.

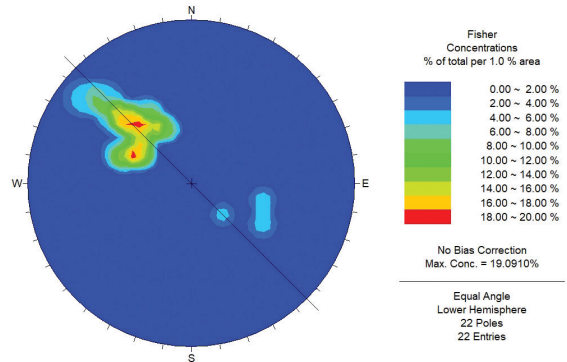
Table 1. Discontinuity measurements at the tunnel face during the excavation stage in the Thrace formation.

Lokasyon No	Çatlak sistemleri	Tabaka	
		Doğrultu	Eğim açısı
L-05 Hattu	K48B/40KD	K40D	25GD
L-05 Hattu	K46B/38KD	K55D	32GD
L-05 Hattu	K45B/41KD	K50D	30GD
L-05 Hattu	K44B/40KD	K60D	45GD
L-05 Hattu	K46B/40KD	K48D	70GD
L-05 Hattu	K48W/38KD	K53D	68GD
L-05 Hattu	K85D/80GD	K73D	45GD
L-05 Hattu	K45B/41KD	K40D	25GD
L-05 Hattu	K45B/40KD	K50D	48GD
L-05 Hattu	K44B/39KD	K60D	45GD
L-05 Hattu	K44B/42KD	K44D	40GD
L-05 Hattu	K43B/40KD	K38D	63GD
L-05 Hattu	K29B/21KD	K48D	77KB
L-05 Hattu	K44B/40KD	K53D	60KB
L-05 Hattu	K25D/66GD	K30D	45KB
L-05 Hattu	K60D/45KB	K45D	45GD
L-05 Hattu	K55D/43KB	K80D	52GD
L-05 Hattu	K58D/44KB	K55D	46GD
L-05 Hattu	K56D/45KB	K65D	50GD
L-05 Hattu	K54D/46KB	K37D	60GD
L-05 Hattu	K57D/45KB	K46D	67GD
L-05 Hattu	K58D/43KB	K40D	57GD



Şekil 3. Süreksizliklerin gül düyagramı.

Figure 3. Rose diagram of the discontinuities.



Şekil 4. Tabaka doğrultu ve eğim açılarının eşit alan (Schmidt net) diyagramında gösterimi.

Figure 4. Drawing the layer direction and slope angles at the equal area (Schmidt net) diagram.

Ceylan formasyonu kalkerli kiltası, killi kireçtaşı, kalkarenit, taban kısmında ise killi çakıllı kumtaşı ve kumlu kiltaşlarından oluşmaktadır. Bu kayaçlar ince tuf ara düzeyleri içerir.

HİDROJEOLOJİ

Çalışma alanının büyük kısmını oluşturan Trakya formasyonu hidrojeolojik olarak geçirimsiz-az geçirimli özelliğe sahiptir. Sahanın batı tarafında Trakya formasyonu üzerinde yer alan Ceylan formasyonu'nda ise genel olarak kil baskın olup geçirimsiz özelliktedir. Ancak tabana yakın kesimleri çakıl ve kum katkılı olup kısmen geçirimli olabilmektedir. Trakya formasyonu içinde yapılan basınçlı su deneylerinde Lugeon değerleri ağırlıklı olarak geçirimsiz (<1 Lugeon), çok az bir kısmı ise az geçirimli olarak (1-5 Lugeon) tespit edilmiştir. Kazı sırasında genel olarak çalışmalarını güçleştirecek yeraltı suyu akımıyla karşılaşılması beklenmemektedir. Ancak kumtaşının baskın olduğu düzeylerde, kayacın çok kırıklı veya parçalı olduğu zayıflık zonlarında beklenenin üzerinde yeraltı suyu

sızıntılarıyla karşılaşılabilir. Özellikle, Ceylan formasyonu ile Trakya formasyonu'nun dokanağında yer alan kum-çakıl seviyelerinde, az da olsa yeraltı suyu ile karşılaşılması beklenmektedir. Tünel güzergahını oluşturan kayaç biriminin geçirimsizlik özellikleri ve tünellerin sığ derinlikte yer alıyor olması nedeniyle, tünel kazılarında genel olarak damlama veya zayıf sızıntılar halinde yeraltı suyu ile karşılaşılması beklenmektedir.

TÜNEL KAZISI

Tüneller geometri ve gabarilerine göre NATM veya TBM ile açılmaktadır. Peron, makas, makas bağlantıları ve paralel tüneller arası acil kaçış bağlantı tünelleri başta olmak üzere, gerekli görülen yerlerde tünellerin bir kısmının NATM yöntemiyle; güzergah ana hat tünellerinin ise mekanize olarak TBM yöntemiyle açılması mümkündür. (Artson Geoteknik, 2016a, b). Kabataş-Mecidiyeköy metro projesinde her iki yöntemle açılan tünel kazılarının metrajları şöyledir;

1.Hat; km: 0+087.811 ile km: 0+764.189,1+991.189 ile 2+212.189, km: 3+390.080 ile 3+610.080 ve km: 4+350.199 ile 5+703.478 arası;

2. Hat boyunca ise km: 0+85.018 ile km: 0+824.982, 2+005.982 ile km: 2+226.982, km: 3+377.182 ile km: 3+59.182 ve km: 4+304.982 ile km: 5+645.222 arasındaki kısımlar NATM yöntemi kullanılarak açılmaktadır. Bununla birlikte;

1. Hat; km: 0+764.189 ile km: 1+991.189, km: 2+212.189 ile 3+390.080 ve km: 3+610.080 ile km: 4+350.189 arası;

2. Hat; km: 0+824.982 ile km: 2+005.982, km: 2+226.982 ile km: 3+377.182 ve km: 3+597.182 ile km: 4+304.982 arası kısımlar TBM kullanılarak açılmaktadır.

NATM yöntemi; kazı sonrası oluşacak deformasyonun bir kısmının ana kayaya, bir kısmının ise tahkimat elemanına taşıtırılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde asıl olan kazı sonrası, ilk destek oluşturulana kadar geçen zamandır. Bu yöntemin en önemli ilkesi; kayacın direncini korumak ve harekete geçirmek; tünel çevresindeki kayacın kendini destekleyen genişçe bir halka oluşturmaktır. Bunun için ilk iksa, kayanın kendisinin desteklemesine yardımcı olması amacıyla yerleştirilir ve zamanlaması çok önemlidir. Ayrıca iksada birikecek gerilmedeki jeoteknik ölçümlerin düzenli olarak yapılması ile potansiyel tehlikelerin önüne geçilmesinde ve zamanında önlem alınabilmesinde ayrıca bir öneme sahiptir. Tünellerde kazı esas olarak, üst yarı ve alt yarı olmak üzere iki kısımda yürütülmektedir. İstanbul Metrosu Tünelleri gidiş-dönüş olarak, iki ayrı hat olarak açılmakta olup; dört ayrı özellikte tünel kesiti kullanılmaktadır. Bunlar; A (Ana Hat Tünelleri), P (Peron Tünelleri), T (Makas Tünelleri) ve B Tipi (Bağlantı Tünelleri) tünellerdir. A tipi, P tipi, T tipi, B tipi tünellerde kazılar üst yarı ve alt yarı kazı olmak üzere iki kademedede açılmaktadır (Şekil 5). Ancak T tipi tünellerin kesit alanının fazla büyük olması nedeniyle; diğer tünel tiplerinden farklı olarak sadece T tipinde üst yan; kendi içinde iki ve alt yan ve tek olmak üzere, toplam üç aşamada kazılır.



Şekil 5. Üst yarı (a) ve alt yarı kazı (b) olmak üzere iki kademedeki yapılan tünel kazıları.

Figure 5. Tunnel excavations in two levels, upper half (a) and lower half (b) excavation.

TBM' ler mekanize şekilde tünel açarak ilgili istasyonlara ulaştırılmaktadır. TBM'lerin istasyonlar içinden kazı yapmadan geçebilmeleri için şaft, peron tünelleri, makas tünelleri ve bağlantı tünelleri NATM yöntemiyle daha önceden açılmaktadır. Peron tünellerinin nihai beton kaplamalarından invert betonları TBM' ler tünelden geçmeden; kemer betonları ise peron tünellerinden TBM' ler geçtikten sonra yapılmaktadır. İçinden TBM geçmesi söz konusu olmayan NATM tünellerde ise kazı aşaması ve iksa işleri tamamlandıktan sonra ilgili diğer tünel kazılarını aksatmayacak şekilde nihai beton kaplamaları yapılmaktadır. Kısıtlı zaman içinde TBM' lerin geçeceği istasyonların TBM çalışma programını aksatmayacak biçimde peron tünellerinin kazı ve destekleme işlerinin yapılabilmesi için uygun yerler tespit edilerek NATM tünel işletme şaftları açılmakta ve ulaşım tünelleriyle peron tünellerinin yapılacağı kısımlara erişilebilmektedir. Proje kapsamında şaft yerlerinden başlanmak üzere şaftlar açılmakta ve ulaşım tünellerinin yapımını takiben peron tünelleri imal edilerek ve taban (invert) beton kaplama işleri tamamlanmaktadır.

ZEMİN KOŞULLARI

Yeraltı kazılarının güvenli ve ekonomik şekilde gerçekleştirilmesi, kazı sırasında karşılaşılabilecek kaya ve zemin koşullarının önceden doğru şekilde tespit edilmesi ve sınıflandırılmasıyla mümkündür. İnceleme alanında esas olarak Trakya formasyonu ile birlikte sahanın batı tarafında dar bir alanda Ceylan formasyonu yer almaktadır. Ceylan formasyonu ağırlıklı olarak kalkerli kil - kiltaşları ve özellikle aynı formasyonun tabanında olmak üzere çakıllı killi kum ve çakıllı kumlu kiltaşlarından oluşmaktadır. Genel olarak zayıf çimentolanmış olan birim, göreceli olarak taban kesiminde daha zayıf çimentolanmıştır. Trakya formasyonu genel olarak kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kiltası seviyelerinin ardalanmasından oluşur ve bu farklı litolojilerin her biri, yer yer daha baskın konumdadır. Ardalanma nedeniyle, Trakya formasyonu farklı litolojik seviyeler yerine, ayrışma düzeylerine göre gruplandırılmıştır.

Litolojik olarak üstte yer alan Ceylan formasyonu, mühendislik özellikleri açısından zayıf çimentolanmış sert zemin olarak değerlendirilmiştir. Trakya formasyonu ise mühendislik özellikleri açısından, tamamen

ayırışmış (W5), çok - orta derecede ayırışmış (W3-W4) ve az ayırışmış - ayırışmamış (W1-W2) kayaç olmak üzere 3 seviye halinde dikkate alınmıştır. Tamamen ayırışmış kayaç seviyesi zemine dönüşmüş, diğer iki seviye ise kayaç olarak değerlendirilmiştir. Tünel güzergahını oluşturan farklı zemin - kayaç ortamlar aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

ZEMİN TABAKALARININ TÜNEL KAZISI AÇISINDAN SINIFLANDIRILMASI

Açık kazı veya tünel kazı kotlarında karşılaşılan beklenen Ceylan formasyonunun zemin niteliğindeki kısımları ile tamamen ayırışmış kayaç özelliğinde olan kısımları bu bölümde konu edilmiştir (Çizelge 2). Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması'na (USCS) ek

olarak, tünel mühendisliğinde zeminler kütleli dayanım ve permeabiliteleri ile bunlara bağlı özellikleri açısından da sınıflandırılmaktadır. Bu bakımdan Terzaghi (1950), Huer (1974), Huer ve Virgens (1987), Deere vd. (1969) tarafından geliştirilen zemin sınıflamaları dikkate alınarak, tünel kazısı zemin tabakaları için yapılan sınıflandırma Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 2. L2 Bağlantı tünel kazısında karşılaşılan Ceylan formasyonu.

Table 2. Ceylan formation encountered in L2 connection tunnel excavation.

Mesafeden (km)	Mesafeye (km)	Aradaki uzunluk (m)	Jeolojik birim
0+440	0+650	190	Ceylan
1+000	1+700	700	Formasyonu

Çizelge 3. Güzergahtaki zemin seviyelerinin tünelcilik açısından sınıflandırılması.

Table 3. Classification of the soil layers along the alignment from tunneling point of view.

Kesilecek Birim (Formasyon, üye - Litoloji)	SPT (N)	Birleştirilmiş zemin sınıflaması	Yeraltı suyu durumu	Tünelcilik açısından sınıflandırma
Ceylan formasyonu (Sert Kil- Çakıllı Kumlu Kil)	40	%60CL, %20CH, %10CL-ML, %10CL-GC	Yeraltı su seviyesi üstünde	Sağlam
Ceylan formasyonu (Sert Kil- Kilitaşı)	40	%60CL, %20CH, %10CL-ML, %10CL-GC	Yeraltı su seviyesi altında	Sağlam – Yavaş Dökülen
Tamamen Ayırışmış Kaya	20	%40 CL, %40SC, %10CH, %10GC- GP	Yeraltı su seviyesi üstünde	Sağlam veya Yavaş Dökülen
Tamamen Ayırışmış Kaya	20	%40 CL, %40SC, %10CH, %10GC- GP	Yeraltı su seviyesi altında	Hızlı Dökülen

Zayıf Zeminde Kazı

Kazı öncesi zemin, enjeksiyon veya jet grouting ile sağlamlaştırılarak geçirimsiz hale getirilmektir. Kazı, kırıcı uçlu makineler yardımıyla (Jack Hammer) yapılmaktadır. Ancak, kazı Kalot-Stros-Radye kademeleri halinde ve kısa adımlarla yürütülmektedir.

Orta Sertlikteki Zeminde Kazı

Orta sertlikteki zeminde kazı kırıcı uçlu makinelerle (Jack Hammer) yapılmaktadır. İki aynada bir kazı makinası ve delici makina (Jumbo) planlanmıştır. Bir aynada kazı ve kazı malzemesi nakli yapılırken, ikinci aynada çelik hasır, iksa, püskürtme beton (shotcrete) ve blonlama ile destekleme yapılmaktadır. Kazı zemini izin verdiği ölçüde tam kesit olarak açılmaktadır. Bu durum ulaşım yönünden büyük kolaylık sağlamaktadır. Olumsuz koşullarda zemin kademeli kazılacak ve halka (tünel kesiti) en kısa zamanda tamamlanacaktır. Ayrıca, gerektiğinde aynada, aynanın gelmemesi (stabilitesinin bozulmaması) için ayna göbeği bırakılmaktadır. Kazı malzemesi, geniş ölçüde oluşturulacak manevra ceplerinden yararlanılarak kamyonla shaft altına nakledilmektedir. Bu tip zeminlerde kırıcı uçlu makinelerle günlük ilerleme hızı ortalama 1 - 1.5 m'dir.

Sert Zemin Kazısı

Tünellerde ortaya çıkabilecek ve Jack Hammer ile kazılmaya izin verilmeyen zeminlerde, zemin denetimli olarak dinamit ile kazılarak aynı şekilde nakledilecektir. Sert zeminlerde günlük ilerleme hızı ortalama 1.5 - 2 m'dir.

KAYAÇ SEVİYELERİNİN TÜNEL KAZISI AÇISINDAN SINIFLANDIRILMASI

Tünel çalışmalarında ve kayaç kazı işlerinde, kayacın kütle özelliği dikkate alınmaktadır. Yeraltı kazılarında yaygın olarak kullanılan üç önemli kayaç sınıflaması vardır. Bu sınıflamalar; Kaya Kalite İndeksi (Q), Eklemlili Kaya Kütlelerinin Jeo-mekanik Sınıflaması (RMR) ve Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) sınıflamasıdır. Q-sınıflamasında, Q-değeri 0,001 ile 1000 arasında değerler almakta olup, en kötü kaya koşulu ile mükemmel kaya arasını kapsamaktadır. Benzer şekilde, 0-100 aralığında değişen puan sistemine dayalı RMR sınıflaması, çok iyi ile çok kötü olmak üzere 5 kaya sınıfını tanımlar. GSI sınıflamasında ise, kayaç kütlelerinin yapısal özelliğine bağlı olarak 5, çatlakların durumu ve ayrışma derecesi açısından (süreksizlik yüzey koşuluna bağlı olarak) ise 5 olmak üzere toplam (5 × 5) 25 kategori içinde sayısal olarak ifade edilmektedir. GSI sınıflaması, en kötüden en iyi kayaç koşuluna uygulanabilirliği nedeniyle günümüzde özellikle mühendislik değerlendirmeleri açısından RMR sınıflamasına tercih edilmektedir. Başlangıçta RMR ve Q sınıflandırma puanları ile ilişkilendirilen GSI, daha sonraki yıllarda yapılan değişikliklerle 1999'dan sonra tek başına bir sınıflandırma sistemi olarak kullanılmaktadır (Barton vd., 1974; Hoek ve Brown, 1980; Hoek, 2000; Ulusay ve Sönmez, 2000).

Saha gözlemleri, yeraltı suyu durumu ve laboratuvar deneylerinden elde edilen jeoteknik veriler (Çizelge 4) birlikte değerlendirilerek, tünel güzergahındaki kaya ortamlarının (Çizelge 5 ve 6) litoloji ve farklı ayrışma düzeyleri dikkate alınarak Q, RMR ve GSI kayaç kütle sınıflama sistemlerine göre sınıflandırılmıştır. RMR sınıflandırması Bieniawski (1993)'e göre yapılmıştır. Sınıflamada yeraltı su planı,

eklemlerdeki su basıncı/en büyük asal gerilim (sığ tüneller için en büyük asal gerilim = düşey gerilim kabul edilir), oranına göre belirlenmiş, süreksizlik yönelim düzeltmesi için ise (-5) orta değeri alınmıştır (Hoek ve Brown, 1980; Hoek, 2000). RMR puanı; tünel için, süreksizlik düzeltmesi yapılarak ve GSI değerlerinin belirlenmesine yönelik olmak üzere üç şekilde hesaplanmıştır. GSI değerinin belirlenmesine

yönelik RMR hesaplamasında, yeraltı su durumu için “15” (tamamen kuru), süreksizlik yönelim düzeltmesi için ise “0” (çok uygun) puanı dikkate alınmıştır. GSI değerleri, sahada yeterli kaya mostralara görülemediği için RMR ve Q değerlerinden, yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak belirlenmiştir. Sınıflandırma sonuçları Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 4. Tünel güzergahındaki jeolojik birimlerin jeoteknik özellikleri (Artson Geoteknik, 2016 a,b).

Table 4. Geotechnical characteristics of the geological units along the tunnel alignment (Artson Geotechnic, 2016 a,b).

Formasyon Özellikleri		Jeoteknik Parametreler				
Jeolojik birim	Litoloji	Birim hacim ağırlığı	Dayanım Parametreleri			Deformasyon Parametreleri
			Kohezyon c	Tek eksenli basınç dayanımı	İçsel sürtünme açısı Ø	Young modülü E
		kN/m ³	kPa	MPa	(°)	N/m ²
Ceylan Formasyonu	Sert kil	26.0-27.7		18-28		0.12-0.28
	Sert kil- kilitaşı	28.6-28.9		67-185	30-34	0.16-0.22
	Killi kum	24.5-27.4		32-47	20-26	0.23-0.30
Trakya Formasyonu	Kumlu kil	27.8-28.0	18-20	15-18	11-15	0.14-0.20
	Kumtaşı	26.3-28.4		40-165	40-56	4.9-5.40
	Silttaşı	23.5-27.6		15-25	30-35	0.28-0.26
	Kilitaşı	23.4-27.6		12-17	20-55	1.90-4.58

Çizelge 5. Mecidiyeköy - Kabataş Metro hattında NATM yöntemi ile kazılan jeolojik formasyon (başlangıçtan Kabataş istasyonuna kadar olan tünel bölümü).

Table 5. Geological formation excavated by NATM method in Mecidiyeköy - Kabataş subway line (tunnel section from the beginning to Kabataş station).

Mesafeden (km)	Mesafeye (km)	Aradaki uzunluk (m)	Jeolojik birim
0+000	0+240	240	Trakya formasyonu
0+240	0+460	220	
4+437	4+658	221	
4+568	5+365	707	

Çizelge 6. Mecidiyeköy - Kabataş Metro hattında TBM yöntemi ile kazılan jeolojik formasyon (Kabataş İstasyonu – Mecidiyeköy şaftı arasındaki tünel bölümü).

Table 6. Geological formation excavated by TBM method in Mecidiyeköy - Kabataş subway line (tunnel section between the Kabatas Station and Mecidiyeköy Shaft).

Mesafeden (km)	Mesafeye (km)	Aradaki uzunluk (m)	Jeolojik birim
0+460	2+079	1619	Trakya formasyonu
2+079	2+300	221	
2+300	3+425	1125	
3+425	3+646	221	
3+646	4+437	791	

Özçelik

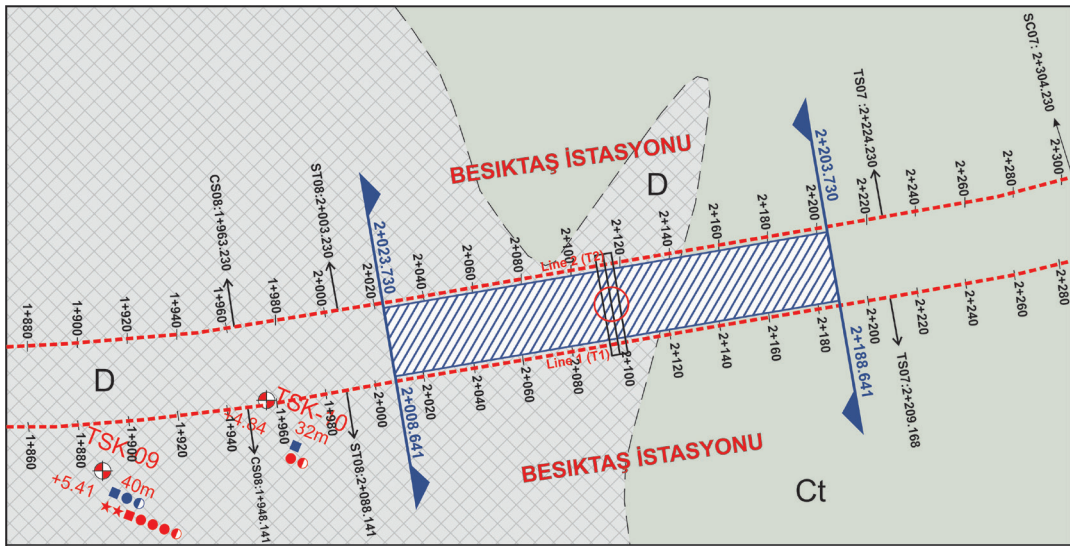
Çizelge 7. Tünel güzergahındaki kayaların litoloji ve ayrışma derecelerine göre sınıflandırılması (Artson, Geoteknik 2016 a,b).
Table 7. Classification of rocks along the tunnel alignment according to lithology and weathering degrees (Artson Geotechnic, 2016 a,b).

Kaya birimi	Kaya özellikleri	Q	RMR	GSİ	ÖNORM B 2203-1
Trakya formasyonu Çok - Orta Derecede Ayrışmış Kayaç (W3-W4)	Ağırlıklı silttaşı olmak üzere, kiltası - kumtaşı - silttaşı ardalanması (parçalı)	0.08 Çok fazla Zayıf Kaya	26-31 Zayıf Kaya	30	C2-B3 Baskılı - Taneli
Trakya formasyonu Az Ayrışmış - Ayrışmamış Kaya (W1-W2)	Ağırlıklı silttaşı olmak üzere, kiltası - kumtaşı - silttaşı ardalanması (sık çatlaklı - parçalı)	0.31 Çok Zayıf Kaya	31-36 Zayıf Kaya	40	B3 Baskılı

KAZI SIRASINDA OLUŞAN GÖÇÜK

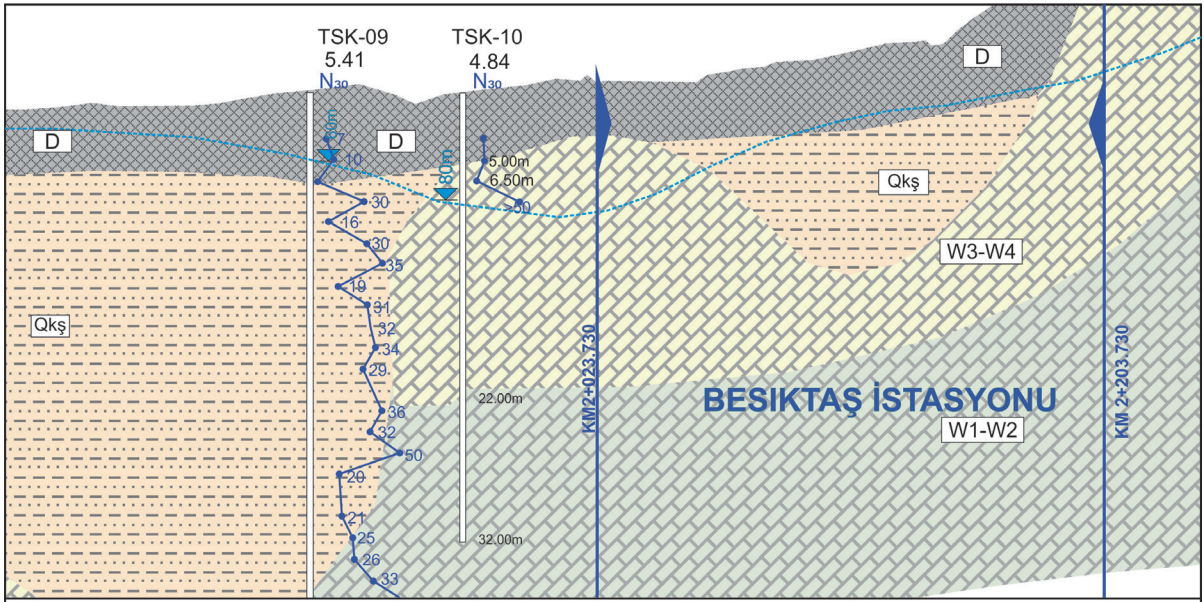
İstanbul'un Avrupa yakasında geniş alanları kaplayan kumtaşı, silttaşı ve kiltasından oluşan Trakya formasyonunda ayrışma derinlikleri, dayklar, eklemler, kiltasının yetersiz taşıma gücünden dolayı kazı mekaniği açısından sorunludur. Ayrıca, Trakya formasyonu yoğun olarak faylanmış ve kıvrımlanmıştır (Şekil 6 ve 7). Bu nedenle, temel kazıları ile fay ve kıvrım gibi yapıların uygun olmayan doğrultu ve eğimleri sorunlara neden olmaktadır. NATM kullanılan projenin bu kesiminde tüneller, makas

tüneli T tipi olarak açılmakta ve 14.50 m'ye kadar genişlemektedir. Yükseklikleri 9.80 m'ye çıkarken, tünellerin yeryüzü ile arasında kalan zemin kesiti yaklaşık 11.00 m'ye inmektedir. Ayrıca makas tünellerinin yanı sıra ana tünellerin de imalatları yapılmaktadır. Dar bir alanda açılan bu tünellerde, sıg örtü yükü, değişken ve suya doygun zemin koşulları, ortamdaki gerilme dağılımının değişmesi ve birincil destek sisteminin özelliklerine bağlı olarak Beşiktaş Barbaros Bulvarı'nda 3 m derinliğinde, 75 cm çapında bir göçük meydana gelmiştir (Şekil 8).



Şekil 6. Tünel güzergahının Beşiktaş istasyonu kesimi (km: 2 + 023.730 ile 2 + 203.730) (Artson Geoteknik, 2016 a,b).

Figure 6. Beşiktaş station section of the tunnel alignment (km: 2 + 023.730 to 2 + 203.730) (Artson Geotechnic, 2016 a, b).



Şekil 7. Beşiktaş istasyonu ve civarının jeolojik kesiti (km: 2 + 023.730 ile 2 + 203.730) (Artson Geoteknik, 2016 a, b).

Figure 7. Geological section of Beşiktaş station and its vicinity (km: 2 + 023.730 to 2 + 203.730) (Artson Geotechnic, 2016 a, b).



Şekil 8. Beşiktaş Barbaros Bulvarı'nda (Kabataş-Mecidiyeköy Hattı) meydana gelen göçük olayının yüzeydeki hasarları.

Figure 8. Damages at the surface due to the collapse occurred at the Beşiktaş Barbaros Boulevard (Kabataş-Mecidiyeköy Line).

TARTIŞMA VE SONUÇ

Kabataş-Mecidiyeköy Tünel kazılarının, hemen hemen tamamına yakınının (asgari %95'i oranında) Trakya formasyonu içinde, çok az bir kısmı (yaklaşık %5'i) ise Ceylan formasyonu içinde bulunmaktadır. Ceylan formasyonu kalkerli sert kilttaşlarından oluşmuştur, tabanında çakıl ve kum katkılı seviyeler yer almaktadır. Trakya formasyonu ise, başlıca kumtaşı-şeyl (kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kiltası) araldanmasından oluşmakta ve farklı ayrışma seviyelerini içermektedir. Tünel kazılarında ağırlıklı olarak çok-orta derecede ayrışmış (W3-W4) kayaç seviyesi, nispeten daha az oranda ise az ayrışmış (W1) ve ayrışmamış (W2) kayaç seviyelerinin kazılması beklenmektedir. Depo sahası kazılarında ise orta derecede ayrışmış (W3) ve çok ayrışmış (W4) derecede kayaç kazılması beklenmektedir. Trakya formasyonu (kaya birimi) genel olarak kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kiltası araldanmasından oluşmakla birlikte, tünel kazıları sırasında yer yer bu litolojilerden herhangi birinin baskın olduğu kesimlerle de karşılaşılabilir. Trakya formasyonu, yaygın şekilde kıvrımlı ve eklemli olmanın yanı sıra, sıkça makaslanma ve fay zonları ile kesilmiştir. Söz konusu zonlar genellikle parçalanmış-milonitleşmiş ve killeşmiştir.

Tünel güzergahındaki tüm zemin-kayaç seviyeleri mühendislik ve tünel mühendisliği açısından değerlendirilmiş, sınıflandırılmış ve tasarım için zemin parametreleri önerilmiştir. Jeolojik yapı olarak üstte yer alan Ceylan formasyonu, mühendislik özellikleri açısından sert zemin olarak değerlendirilmiştir. Trakya formasyonu ise mühendislik özellikleri açısından, tamamen ayrışmış (W5), çok - orta derecede ayrışmış (W3-W4) ve az ayrışmış - ayrışmamış (W1-W2) kayaç seviyeleri olmak üzere üç seviye halinde ele alınmıştır. Tamamen

ayrışmış kayaç seviyesi zemin, diğer iki seviye ise kayaç olarak değerlendirilmiştir. Zemin-kayaç birimlerine ait jeoteknik parametrelerin değerlendirilmesi sonucunda geçiş zonlarında dikkatli olunması gerekmektedir. Güzergahı oluşturan farklı zemin - kayaç ortamları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Yükseklikleri 9.80 m'ye çıkarken, tünellerin yeryüzü ile arasında kalan zemin kesiti yaklaşık 11.00 m'ye inmektedir. Ayrıca, makas tünellerinin yanı sıra ana tüneller de yapılmaktadır. Dar bir alanda açılan bu tünellerde, sığ örtü yükü, değişken ve suya doymuş zemin koşulları, ortamdaki gerilme dağılımının değişmesi ve birincil destek sisteminin özelliklerine bağlı olarak; Beşiktaş Barbaros Bulvarı'nda 3 m derinliğinde, 75 cm çapında göçük meydana gelmiştir. Bu nedenle, tünellerin genellikle sığ derinlikte yer alması nedeniyle, özellikle kayanın aşırı ezik olduğu kesimlerde göçük ve dolayısıyla yüzeyde oturma ile çökme tehlikelerine karşı dikkatli olunmalıdır. Otoyollar ve yan yolların altından geçen bu tür tüneller, benzer nedenlerle stabilite açısından kritik dengededir. Kritik yapıların bulunduğu bölgelerin geçişinde kazının kontrollü olarak yapılması, tünel içinde ve yüzeyde özenli şekilde jeolojik-jeoteknik ölçümler yapılması gereklidir. Jeolojik veriler ve kayaçların niteliği çok uygun gözükse bile, tünelin inşası sırasında kazı ve tünel emniyeti için gerekli deformasyon ölçümlerinin uzun süreli olarak mutlaka yapılması gerekmektedir.

KATKI BELİRTME

Yazar bu çalışmadaki katkılarından dolayı İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistem Daire Başkanlığı Avrupa Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü, ALSİM ALARKO Sanayi Tesisleri ve Ticaret A.Ş., EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik, ARTSON Geoteknik Mühendislik

ve Müşavirlik şirketine teşekkürlerini sunar. Ayrıca, yazar makalenin geliştirilmesindeki değerli katkılarından dolayı editör Prof. Dr. Tamer TOPAL ve hakemlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Arıç, C., 1955. Haliç-Küçükçekmece Gölü bölgesinin jeolojisi, Doktora Tezi, İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul.
- Arıoğlu, B., Yüksel, A., Arıoğlu, E., 2002. İzmir metro projesi Nenehatun tünelineki geoteknik çalışmalar ve değerlendirilmesi. ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, 14 Ekim 2002, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye. 358-368.
- ARTSON Geoteknik (Artson Araştırma Sondajları Mühendislik Ticaret Limitet Şirketi), 2016a. İstanbul Metrosu Kabataş-Mecidiyeköy arası Jeolojik-Geoteknik etüd raporu. Cilt 1, İstanbul (yayımlanmamış).
- ARTSON Geoteknik (Artson Araştırma Sondajları Mühendislik Ticaret Limitet Şirketi), 2016b. İstanbul Metrosu Kabataş-Mecidiyeköy arası Jeolojik-Geoteknik etüd raporu. Cilt 2, İstanbul (yayımlanmamış).
- ÖNORM B 2203-1. 2001. Austrian Standards Institute, Underground works, Part 1: Cyclic Driving. Works contract, Issue 2001-12-01.
- Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6 (4), 189–236.
- Bieniawski, Z.T., 1993. Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends. *Comprehensive Rock Engineering* Pergamon, 3, 553 s.
- Dalgıç, S., 2004. Factors affecting the greater damage in the Avcılar area of Istanbul during the 17 August 1999 Izmit Earthquake. *Bulletin of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Bulletin of Engineering Geology and Environment*, (63) 221 – 232.
- Deere, D.U., Peck, R.B., Monsees, J.E., Schmidt, B., 1969. Design of tunnel liners and support systems, Report to UMTA, DOT, available through NTIS.
- Deere, D.U., Merrifit, A.H., Cording, E.J., 1974. Engineering geology and underground construction. 2nd International Congress of Engineering Geology, Sao Paulo, Brasil, 18-24 August, 1974.
- Güven, G., 2009. İstanbul metrosu Otogar-Kirazlı 1 arasındaki mühendislik jeolojisi ve tünel kazılarına bağlı oluşan deformasyonların değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Programı, İstanbul (yayımlanmamış).
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground excavations in rock. *Institutions of Mining and Metallurgy*. London, 382 s.
- Hoek, E., 2000. Kaya Mühendisliği. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 319 s.
- Ketin, İ., 1991. İstanbul ve dolayının jeoloji haritası. İSKİ, İstanbul (yayımlanmamış).
- Seymen, İ., 1995. İzmit Körfezi ve çevresinin jeolojisi, İzmit Körfezi Kuvarterner istifi. (ed. Meriç, E.), Kocaeli Valiliği Çevre Koruma Vakfı, Kocaeli.
- Terzaghi, K., 1950. Geologic aspects of soft ground tunneling. Chapter 11 in *Applied Sedimentation*, R. Task and D. Parker, eds. New York, John Wiley & Sons.
- Tunçdemir, H., 1998. Arazi basıncının dengelenmesi esasına göre çalışan tam cephe tünel açma makinelerinin kazı performansını etkileyen zemin özellikleri ve İzmir Metrosu örneği. 4.Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, 22-23 Ekim, Zonguldak.
- Ulusay, R., Sönmez, H., 2000. Hoek-Brown yenilme ölçütüne ilişkin değişiklik önerileri ve bunların uygulanabilirliği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 23/24 (1), 1-21.

