



Araştırma Makalesi / Research Article

## Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünellerinin Yapım Aşamalarında Karşılaşılan Sorunların Değerlendirilmesi

*Evaluation of Problems Encountered During the Construction of the Çamlıca Hill Access Tunnels*

Feyat TAZ<sup>1</sup>, Ömer ÜNDÜL<sup>2</sup>, Hasan DENEK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İSTANBUL

<sup>2</sup>İstanbul Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL

<sup>3</sup>Taşıyapı İnşaat Taahhüt AŞ., İSTANBUL

Geliş (Received): 19 Eylül (September) 2017 / Düzeltme (Revised): 02 Nisan (April) 2018 / Kabul (Accepted): 15 Mayıs (May) 2018

### ÖZ

Nüfusu hızla artan İstanbul'da, ulaşımındaki aksamaların en aza indirilmesi için metro ve tünel gibi yeraltı yapıları inşa edilmektedir. Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri, Çamlıca Cami'ne karayolu ulaşımını sağlamak amacıyla inşa edilmektedir. Tüneller, İstanbul Paleozoyik istifinde yer alan Kurtköy, Aydos ve Gözdağ formasyonları ile bu birimlere sokulum yapan Kretase yaşlı dayklar içerisinde açılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünellerine ait T2 Tüneli (km:0+795-1+066) ile Yaklaşım Tünelindeki (km:0+275-0+308) kazı ve destek çalışmaları ve meydana gelen jeo-mühendislik sorunlar, sayısal analizler ile birlikte değerlendirilmiştir. Tünel çalışmaları sırasında, özellikle kazı ve destek sistemlerinin yer yer yetersizliği nedeniyle ilave iyileştirme çalışmaları yapılmış ve buna rağmen yeterli duraylılık koşullarının sağlanamadığı bölgeler ile karşılaşmıştır. Tünel çalışmaları sırasında genel olarak aşırı sökülme, tünel içerisine doğru gelişen deformasyonlar ve su sızıntıları jeo-mühendislik sorunlar olarak belirlenmiştir. Tünel ilerleme hızına ve maliyetine etki eden bu sorunların değerlendirilmesinde bölgenin genel jeolojik özellikleri, tünel kazısı sırasında karşılaşılan birimlerin malzeme özellikleri, kaya kütle özellikleri, kazı ve destek uygulamaları ile güncel tünel içi gözlemler birlikte ele alınmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen kaya malzemesi ve kaya kütle parametreleri, Hoek-Brown yenilme ölçütünü ve sonlu elemanlar yöntemini esas alan iki boyutlu sayısal analiz yardımlarıyla (Rocscience © Phase 2D) değerlendirilmiştir. Tünelin incelenen kesimleri için hazırlanan jeolojik en kesit modelleri sayısal olarak analiz edilmiş, elastik-plastik zon sınırları ve kalınlıkları belirlenmiş, yukarıda ifade edilen sorunlara neden olan jeolojik sınır koşulların tariflenmesine çalışılmıştır. Laboratuvar verileri, tünel içindeki gözlemler ve sayısal analizlerin birlikte değerlendirilmesi ile ortasık eklemlili killi kumtaşı ve arkozik kumtaşından oluşan ileri derecede ve tamamen ayrılmış (V-VI) seviyeler ile özellikle zayıf zonların (makaslama, fay vb.) bulunduğu kaya ortamı, aşırı sökülme potansiyelinin en yüksek olduğu alanlar olarak belirlenmiştir. Bunun yanında, az-orta çatlaklı, az-orta derecede (II-III) ayrışmanın gözlemlendiği, yapısal unsurların (fay, makaslama zonu gibi) olmadığı arkozik kumtaşı ve kuvars arenit kaya ortamlarında ise aşırı sökülme potansiyelinin düşük olduğu ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri, İstanbul Paleozoyik istifi, jeo-mühendislik özellikler, sayısal modelleme.

**ABSTRACT**

*In Istanbul, where population is rapidly increasing, underground engineering structures such as subways and tunnels are being constructed to minimize disruptions in transportation. Çamlıca Hill Access Tunnels are constructed to access road transportation to Çamlıca Mosque. Tunnels are excavated in the Kurtköy, Aydos and Gözdağ formations in Istanbul Paleozoic sequence and in the Cretaceous dykes that intrude into these units. Within the scope of this study, excavation and support works and geo-engineering problems of T2 Tunnel (km:0+795 - 1+066) and Approach Tunnel (km:0+275 - 0+308) belonging to Çamlıca Hill Access Tunnels are studied to be evaluated together with numerical analyses. During tunneling works, additional improvement works have been done especially due to inadequate excavation and support systems. However, it has been determined that proper stability conditions can not be achieved in the tunnels. In addition, generally overbreak, deformations and water inflow are other geo-engineering problems. In the evaluation of these problems affecting the rate of advance and cost, the geological characteristics of the region, the rock properties of the units encountered during the tunnel excavation, rock mass characteristics, excavation and support applications, and current tunnel observations are discussed together. The rock material and rock mass parameters obtained in the study were evaluated in two dimensional numerical analysis based on Hoek-Brown failure criterion and finite element method (Rocscience © Phase 2D software). Longitudinal geological models that were prepared for the examined sections of the tunnel, elastic-plastic zone boundaries and thickness were determined, geological boundary conditions that caused above-mentioned problems have been tried to describe. Together with the evaluation of the laboratory data, observations in tunnels and numerical analyses, rock environment that moderate-frequently jointed clayey sandstone and arkosic sandstone with highly and completely weathered (V-VI) levels and especially weak zones (shear, faults etc.) were determined the highest overbreak potential area. In addition it has been revealed overbreak potential is low at rock environment that is slight-moderately fractured, slight-moderately (II-III) weathered arkosic sandstones and quartz arenite without any structural component (fault, shear zone etc.).*

**Keywords:** Çamlıca Hill Access Tunnels, Istanbul Paleozoic sequence, geo-engineering properties, numerical analyses.

**GİRİŞ**

Kaya ortamlarında açılan tünellerde, kaya biriminin fiziksel ve mekanik özellikleri, süreksizlik özellikleri (faylar, kıvrımlar vb.), ayrışma, magmatik sokulumlar, yeraltı suyu ve doğal gerilmeler gibi bölgenin jeolojisinden kaynaklı birçok sorun gelişebilmektedir. Bu sebeplerin bir veya birkaçının birlikte etkilemesinden dolayı, İstanbul Paleozoyik istifinde açılan tünellerde aşırı sökülme, göçme, kaya patlaması, tünel içine su girişi, tünel içine doğru deformasyon artışı gibi sorunlar gelişmektedir (Eriş ve Vardar, 1994; Varol ve Dalgıç, 2006). Benzer olarak, Yılmaz vd. (1994) İstanbul Paleozoyik istiftteki Karbonifer çökelleri olan kıltaşı, siltaşı, kumtaşı ve bunlara sokulum yapan diyabaz dayklarda açılan İstanbul Metrosu

ayna kazılarında aşırı sökümlerin geliştiğine değinmiştir. Albayrak (1994), İstanbul Metrosu, Elmadağ Tüneli ve diğer bazı demiryolu tünellerindeki problemlere ilişkin yapmış olduğu çalışmada, tünel aynasının kuru olması durumunda dahi çatlaklardaki kil ve yağlı killerin duraysızlık sorunları oluşturabileceğini ifade etmiştir. Dalgıç (2000), Beykoz Tüneli açımı sırasında jeolojik koşullara uygun seçilmeyen destek sistemleri nedeniyle kaya düşmesi ve çökme sorunlarıyla karşılaşıldığını ifade etmiştir. Dalgıç (2002) İstanbul Metrosu kazı çalışmalarında, Volkmann ve Schubert (2005) ise Birgl Tüneli kazı ve destek sistemlerinin optimizasyonunu araştırdıkları çalışmalar sırasında, yaptıkları yerinde ölçümler sonrası tünel içine doğru gerilmelerin arttığını ve buna bağlı deformasyonların geliştiğini belirtmişlerdir.

Benzer şekilde farklı jeolojik ortamların (birim sınırları, zayıflık zonları, dayklar, yeraltı suyu) yaratacağı değişken gerilme koşullarının TBM performansına etki edebileceği Kadıköy-Kartal Metro kazısı örneğinde ifade edilmiştir (Bilgin vd. 2008). Bu çalışmaların yanı sıra, Türkiye'deki çeşitli tünellerde, farklı jeomekanik özelliklere sahip kaya ortamlarında TBM sıkışması, duraysızlıklar vb. sorunlara bağlı olarak zaman ve maliyet artışlarının olduğu Bilgin (2016) tarafından belirtilmiştir.

Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri (ÇTUT) güzergâhında farklı jeo-mühendislik özellikler gösteren ortamlar olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda, önceki çalışmalarda da belirtilen jeolojik yapıyla etkileşimli sorunların değerlendirilmesi için ÇTUT Yaklaşım Tüneli km:0+275 - km:0+308 arası ve T2 Tünelinin km:0+795 - km:1+066 arası incelenmiştir (Şekil 1). Tünel güzergâhının jeolojik özellikleri (faylar, birim sınırları, dayklar vb.), kaya malzemesi ve kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri (birim hacim ağırlık, tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü, poisson oranı, ayrışma, süreksizlik koşulları, yeraltı suyu durumu vb.), uygulanan kazı ve destek sistemleri dikkate alınarak, tünel açımı sırasında karşılaşılan jeo-mühendislik sorunlar değerlendirilmiştir. Tünel projelendirilmesi aşamasında belirlenen RMR kaya kütle sınıflaması da dikkate alınarak, GSI sınıflaması ilgili çizelge yardımı ile belirlenmiş ve bu çalışmada kullanılmıştır. Kaya kütle sınıflamalarının tünel çevresindeki gerilme dağılımları ve deformasyonları tanımlamadaki yetersizliğinden dolayı ortamdaki gerilmeleri de dikkate alan sayısal yöntemlerin kaya kütle sınıflamaları ile birlikte kullanılmasının önemli olduğu literatürdeki pek çok çalışmada da vurgulandığı üzere bilinmektedir (Dalgıç, 2003; Geniş vd., 2007; Özsan vd., 2009; Gürocak, 2011; Mahmutoglu, 2011). Bu nedenle, meydana gelen jeolojik etkileşimli sorunların

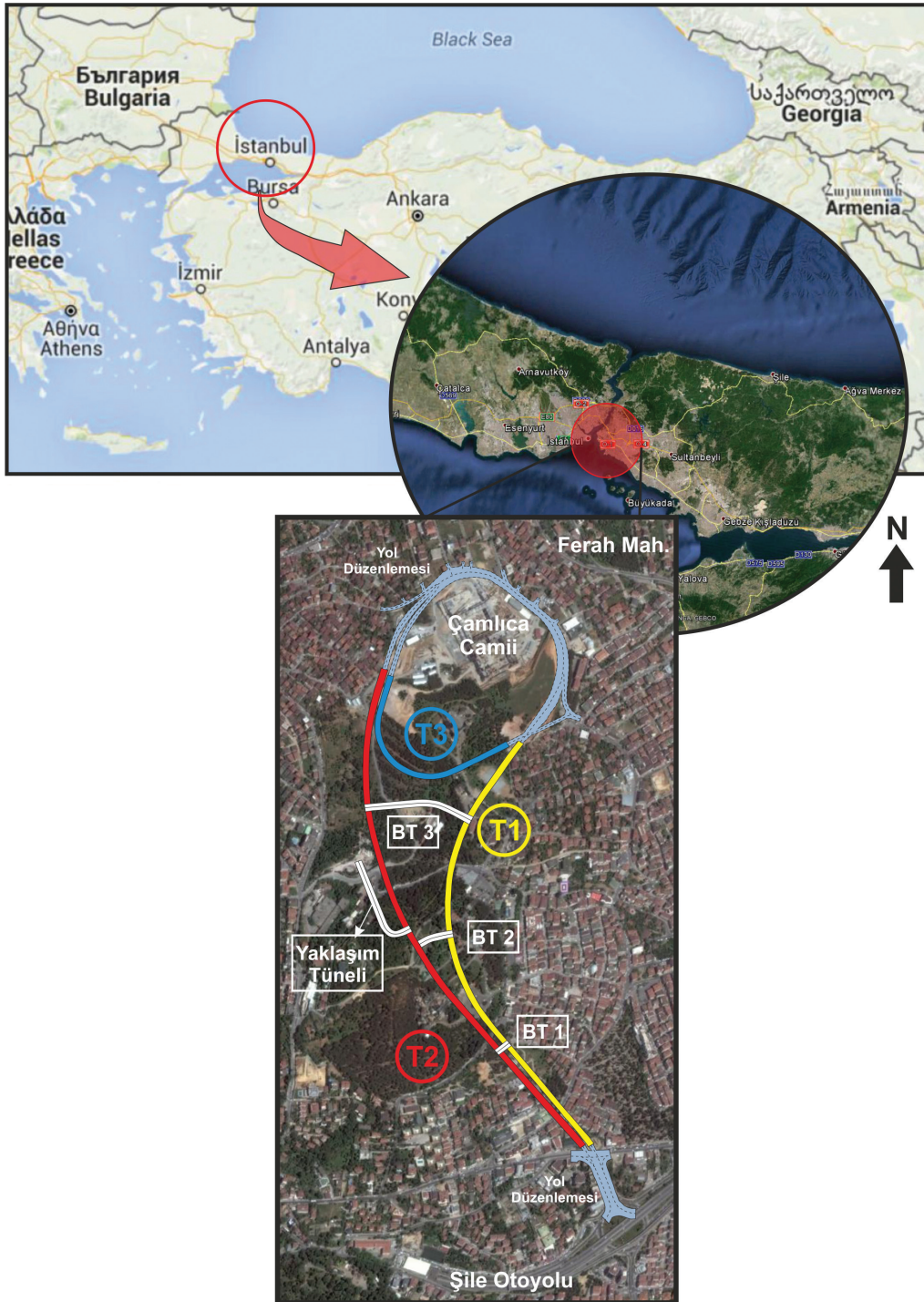
anlaşılabilmesine yönelik değerlendirmelerde kullanılmak üzere, kaya malzemesi ve kaya kütle parametreleri, Hoek-Brown yenilme ölçütünü ve sonlu elemanlar yöntemini esas alan iki boyutlu sayısal analizlerde dikkate alınmış ve bu amaçla (Rocscience Phase 2D Version 8.005, (2011)) yazılımı kullanılmıştır.

## ÖRNEKLERİN TANIMLANMASI VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Çalışma sırasında, ÇTUT Yaklaşım ve T2 Tünellerinin açımı sırasında karşılaşılan kaya birimlerinden en az 40x40x40cm boyutlarında blok örnekler tünel aynasından alınmıştır. Örneklerin ait oldukları birimlere ilişkin tanımlamalar yapılmıştır. Blok örnekler genel olarak, sedimenter kırıntılı kayalar ve bu kayalara sokulum yapan dayklardan alınmıştır. Sedimenter kayalar genelde ince taneli kumtaşı, kuvars arenit ve arkozik kumtaşı-çakıltaşından oluşmaktadır. Dayklar ise sıkı, sert, az-orta derecede ayrışmanın gözlemlendiği, açık yeşil renkli olarak gözlenmiştir.

Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri için araziden alınan blok örneklerden boyu çapının iki katı olan 54 mm çaplı 37 adet karot örneği hazırlanmıştır. Çekme dayanımı deneyleri için ise boyu çapının yarısına eşit olacak şekilde 54 mm çaplı 24 adet örnek oluşturulmuştur. Tek eksenli sıkışma dayanımı ve Brazilyan çekme deneyi, bilgisayar kontrollü ve servo destekli 3000 kN kapasiteli rijit yükleme aygıtı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında karot örneklerinin bazıları için 2000 kN kapasiteli cihazlar yardımıyla elastisite modülü ve poisson oranı değerleri elde edilmiştir. Fiziksel deneyler kapsamında mekanik deneyler için hazırlanan karot örnekleri üzerinde kuru ve suya doygun birim hacim ağırlıklar ile etkin porozite değerleri tayin edilmiştir. Örnek hazırlama işlemleri ile fiziksel ve mekanik deneyler ISRM (1981 ve 2007) tarafından önerilen yöntemlere göre

Taz, Ündül, Denek



Şekil 1. Çamlıca Tepesi ulaşım tünellerinin güzergahları.

Figure 1. Alignments of Çamlıca Hill access tunnels.



tamamlanmıştır. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılan örneklerle ait ince kesitler çalışılan kayaların petrografik özelliklerini belirlemek için hazırlanmıştır. İnce kesit görüntüleri Leitz Orthoplan mikroskop ve Leica Suite Imaging yazılımı ile elde edilmiştir.

Laboratuvar çalışmalarının ardından, incelenen tünel kesimlerinde meydana gelen jeo-mühendislik sorunlara yönelik olarak sayısal analizler, Rocscience Phase 2D Version 8.005 (2011) bilgisayar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tünel çalışmalarının bulunduğu kaya ortamı dikkate alınarak, eklemli kaya ortamı için önerilen Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme modeli tercih edilmiştir. Farklı kaya ortamı, kazı ve destek sistemi ve tünel içinde gelişen jeo-mühendislik sorunlar dikkate alınarak iki tünel aynası üzerinde detaylı analizler yapılmıştır.

## ÇALIŞMA ALANININ GENEL JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

Tünel güzergâhında İstanbul Paleozoyik istifeye ait sedimenter kırıntılı kaya birimleri olan Kurtköy formasyonu, Aydos formasyonu ve Gözdağ formasyonu yer almaktadır (McCallaien ve Ketin, 1947; Altınlı, 1954; Ketin, 1958; Abdüsselamoğlu, 1963; Önalın, 1982; Özgül, 2011; Lom vd., 2016). Ayrıca bu kaya birimlere sokulum yapan yeşil renkli diyabaz dayklar gözlenmiştir (Şekil 2). Tünel güzergâhında stratigrafik olarak en altta yer alan Alt Ordovisiyen yaşlı Kurtköy formasyonu genel olarak mor renkli, kıltaşı, silttaşı, kumtaşı ve çakıltaşından oluşan arkoz bileşimli kırıntılı kayalardan oluşmaktadır (Kaya, 1978; Önalın, 1981 ve 1982). Tünel güzergâhında ise birim, sert, az ayrılmış, yer yer yeşilimsi gri ve mor renkli çakıllı kumtaşı seviyeleri ile yumuşak, orta-ileri derecede ayrılmış, mor renkli çakıllı, killi, siltli kumtaşı seviyeleri şeklinde gözlenmiştir (Şekil

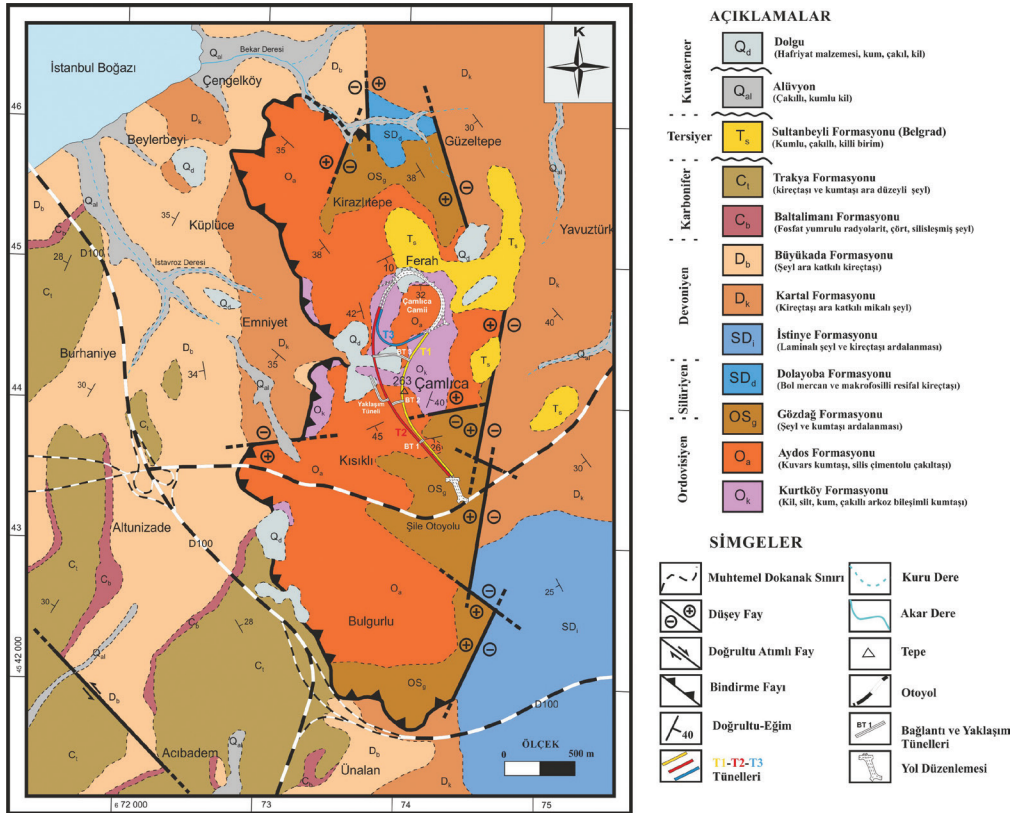
3). Birimin ince kesit görüntülerinde metamorfik kayaç parçaları (fillat, kuvarsit, gnays) belirgin olarak gözlenmektedir. Matriks kısmı daha ince taneli olup serizitleşmeler gözlenmektedir. (Şekil 4a ve 4b). Bu birim üzerinde uyumlu olarak bulunan Üst Ordovisiyen yaşlı Aydos formasyonu genel olarak iri taneli orto-kuvarsit, kuvars arenit, kuvarslı kumtaşından oluşmaktadır (Ketin, 1958; Baykal ve Kaya, 1965; Kaya, 1978; Önalın, 1981 ve 1982). Tünel güzergâhında ise birim, sert, masif, yer yer taze, çoğu bölgede ise az-orta derecede ayrılmış, kızıl kahverengi, açık sarı renkli, kuvarslı kumtaşı, kuvars arenit seviyeleri ile belirgindir (Şekil 3c). Birime ait ince kesit görüntülerinde ise farklı boyutta kuvars minerallerinin birbirine kenetlenmiş durumda olduğu görünmektedir (Şekil 4c ve 4d). Genel olarak yeşilimsi gri, ayrılmaya maruz kalmış kesimleri sarımsı kahverengi renkli, ince tabakalı-laminallı silttaşı-şeyl ve yeşilimsi gri renkli, ince-orta tabakalı kumtaşı ardalanmasından oluşan Gözdağ formasyonu, Aydos formasyonu üzerine uyumlu olarak gelmektedir (Önalın, 1981 ve 1982; Tüysüz vd., 2004). Gözdağ formasyonu tünel güzergâhında, dayanımı düşük, orta-ileri derecede ayrılmış, yeşilimsi gri ve sarımsı kahverengi renkli, ince taneli kumtaşı seviyeleri ile tespit edilmiştir. Kurtköy formasyonu ile uyumsuz olarak dokanak yaptığı kesimleri de gözlenmiştir (Şekil 3d). Çalışma alanında gerek sondajlarda ve gerekse tünel kazı kesimlerinde gözlenen, Paleozoyik yaşlı istifleri sık sık kesen Üst Kretase yaşlı (58.9 - 72.5 Ma, Aysal vd., 2015) yeşil, koyu yeşil renkli diyabaz bileşimli dayklar mevcuttur. Petrografik incelemelere göre dayklar genel olarak amfiboller ve piroksenlerden oluşmaktadır. Dayklar ofitik-subofitik dokulu, kısmen kaolinitik, yer yer karbonatlaşma, kloritleşme ve opaklaşma türü alterasyonlar gözlenmektedir (Şekil 3e ve Şekil 4e-4f). Bölgedeki Paleozoyik yaşlı birimler, bindirme fayları ile iç içe geçmiş biçimdedir.

Taz, Ündül, Denek

Çalışma bölgesindeki bindirme fayı McCallein ve Ketin (1947) tarafından şariyaj olarak tanımlanmış ve bölgedeki gerilmeleri etkilediği düşünülmüştür. Özgül (2011), Çamlıca Tepesi'ni oluşturan Ordovisiyen yaşlı Aydos ve Kurtköy formasyonlarının yaklaşık 35° doğuya eğimli ters faylanma ile Silüriyen-Devoniyen yaşlı kaya birimlerine bindirdiğine değinmiştir ve Çamlıca Bindirmesi olarak tanımlanmıştır. Çalışmamız sırasında, tünel güzergâhında Kurtköy formasyonuna ait mor renkli çakıllı, killi, kumtaşı seviyeleri ile Gözdağ formasyonunun yeşilimsi, sarımsı kahverengi renkli, ince taneli kumtaşı seviyelerinin dokanak yaptığı kesimin uyumsuz olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3d).

Bu uyumsuzluğun Çamlıca Bindirmesine ait ters fay düzlemlerinden birine ait olabileceği düşünülmektedir (Şekil 5).

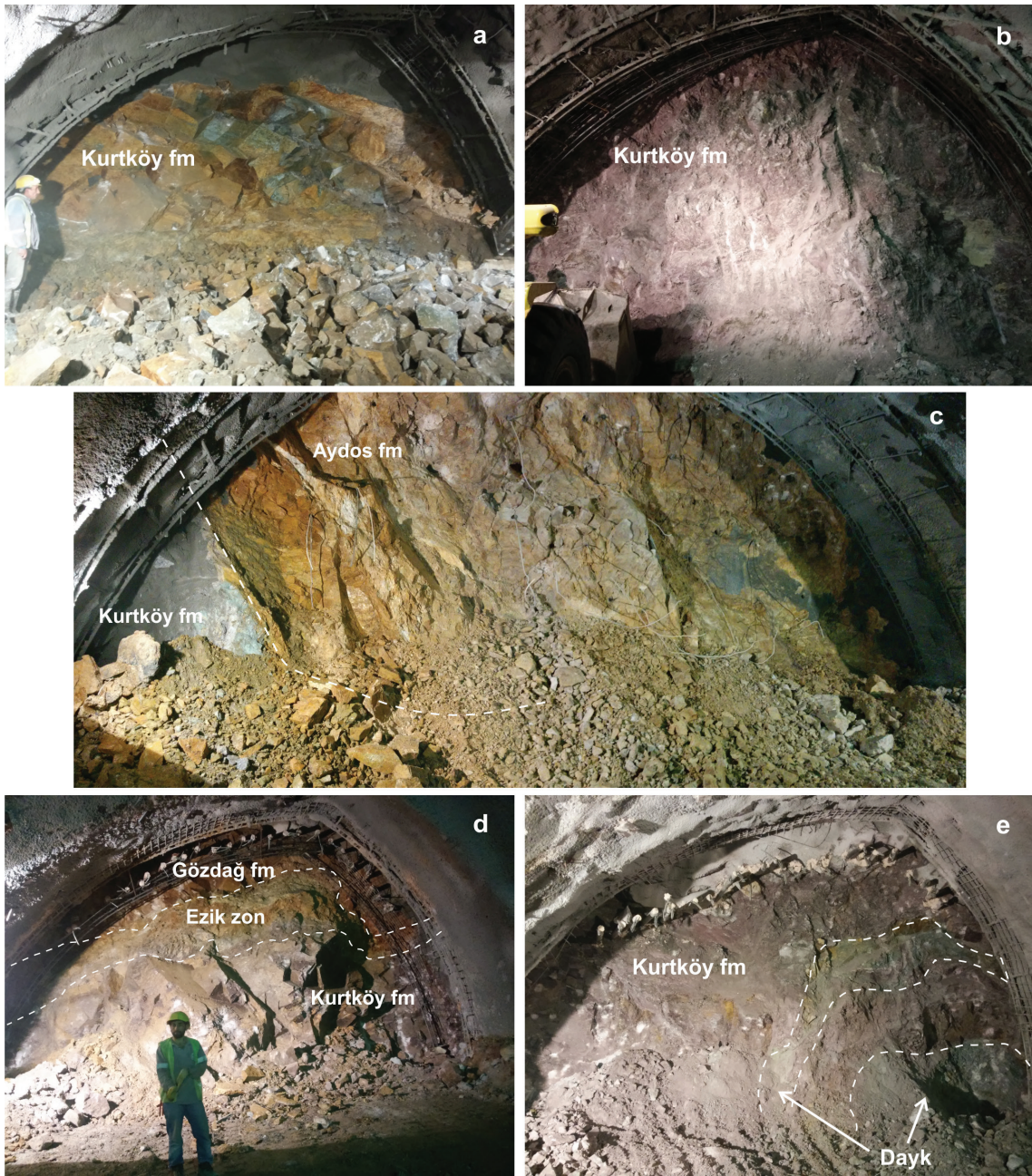
Çalışma bölgesinde toplamda 50 adet süreksizlik ölçümü yapılmıştır. Ölçülmüş süreksizlik yönelimleri stereografik projeksiyona dayalı olarak ve Rocscience © Dips v.6.008 (2013) yazılımı kullanılarak ana süreksizlik setleri belirlenmiştir. Ana süreksizliklerin eğim yönü ve açıları 181/27, 105/40 ve 53/22 olarak elde edilmiştir (Şekil 6). Aynı şekil üzerinde incelemesi yapılan tünel kesiminin tünel doğrultusu da (K30B) gösterilmiş olup doğrultu boyunca kesişen süreksizliklerin varlığı belirgindir.



Şekil 2. Çamlıca bölgesinin jeoloji haritası (Özgül, 2011'den değiştirilerek).

Figure 2. Geological map of the Çamlıca region (modified from Özgül, 2011).



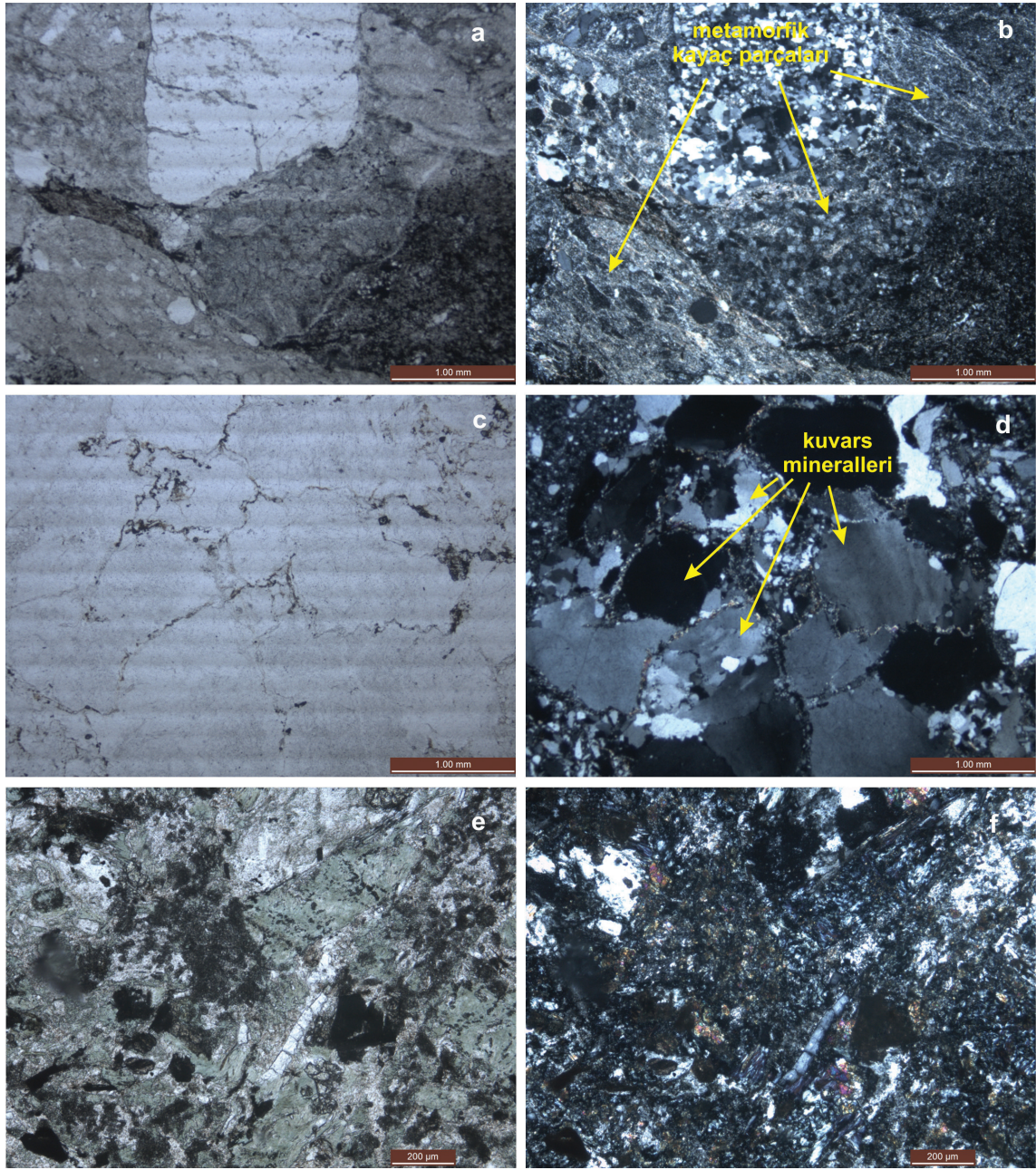


Şekil 3. T2 Tünel güzergâhında karşılaşılan kaya birimlerinin ayna görüntüleri; a) km:0+974, b) km:1+054, c) km:0+882, d) km:0+801, e) km:1+027.

Figure 3. Rock units encountered at tunnel face on the T2 tunnel route; a) km:0+974, b) km:1+054, c) km:0+882, d) km:0+801, e) km:1+027.



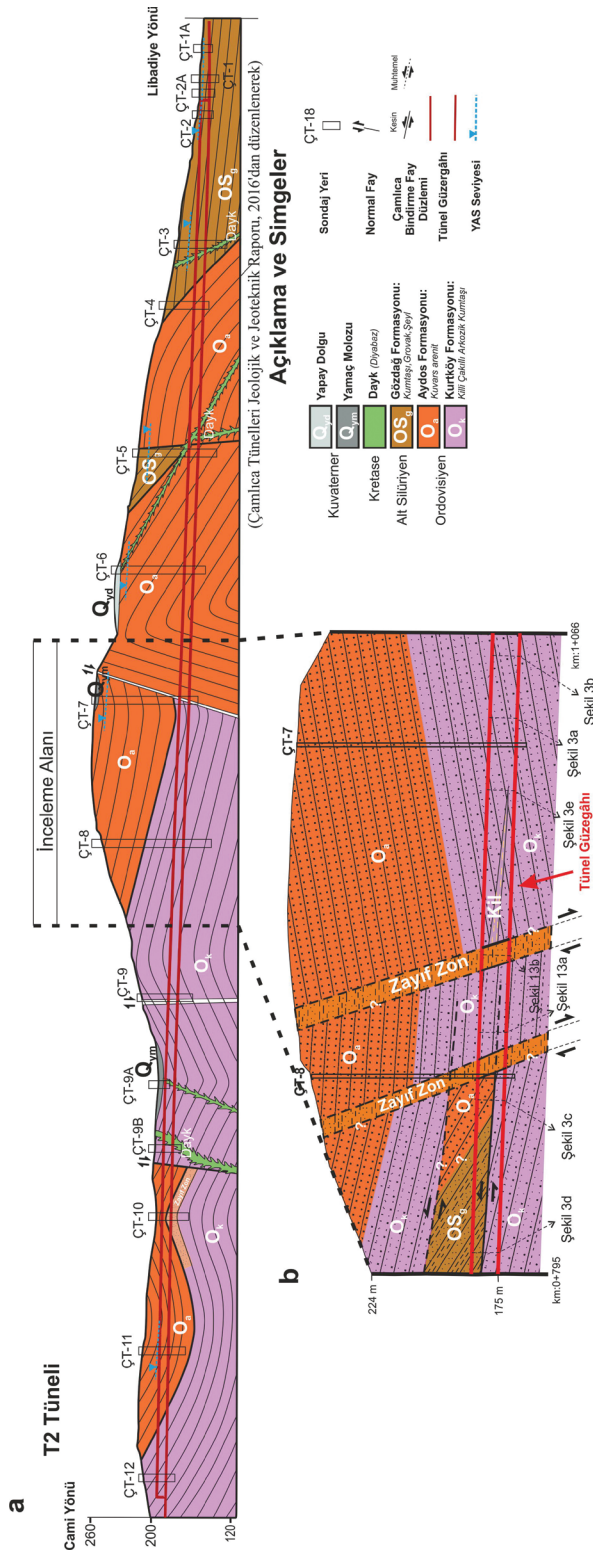
Taz, Ündül, Denek



Şekil 4. T2 Tünel güzergâhında karşılaşılan kaya birimlerine ait ince kesit görüntüleri a) Kurtköy formasyonu tek nikol, b) Kurtköy formasyonu çift nikol, c) Aydos formasyonu tek nikol, d) Aydos formasyonu çift nikol, e) Dayk tek nikol, f) Dayk çift nikol.

Figure 4. Thin section views of the rock units encountered on the T2 tunnel route; a) Kurtköy formation single nicol, b) Kurtköy formation cross nicols, c) Aydos formation single nicol, d) Aydos formation cross nicol, e) Dike single nicol, f) Dike cross nicol.

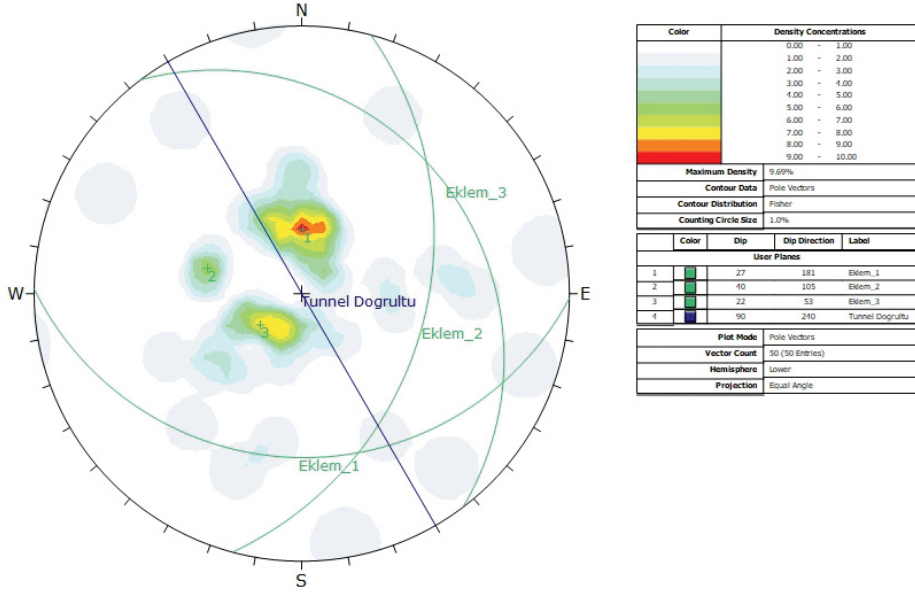




Şekil 5. T2 Tüneline ait jeoloji boy kesitler; a) T2 Tünelinin projelendirilmesi için hazırlanan boyunca jeoloji kesiti (Çamlıca Tüneli Jeolojik ve Jeoteknik Raporu, 2016), b) İncelemesi yapılan tünel kesimine ait bu çalışmada hazırlanan jeoloji boyuna kesit modeli.

Figure 5. Geological longitudinal section models of T2 Tunnel; a) Geological longitudinal cross-sections prepared for T2 Tunnel project (Geological and Geotechnical Report of Çamlıca Hill Access Tunnels, 2016), b) Geological longitudinal cross-sections of the studied tunnel section prepared in this study.

Taz, Ündül, Denek



Şekil 6. Ana süreksizlik setlerinin stereografik diyagramı.

Figure 6. Stereographic diagram of the main discontinuity sets.

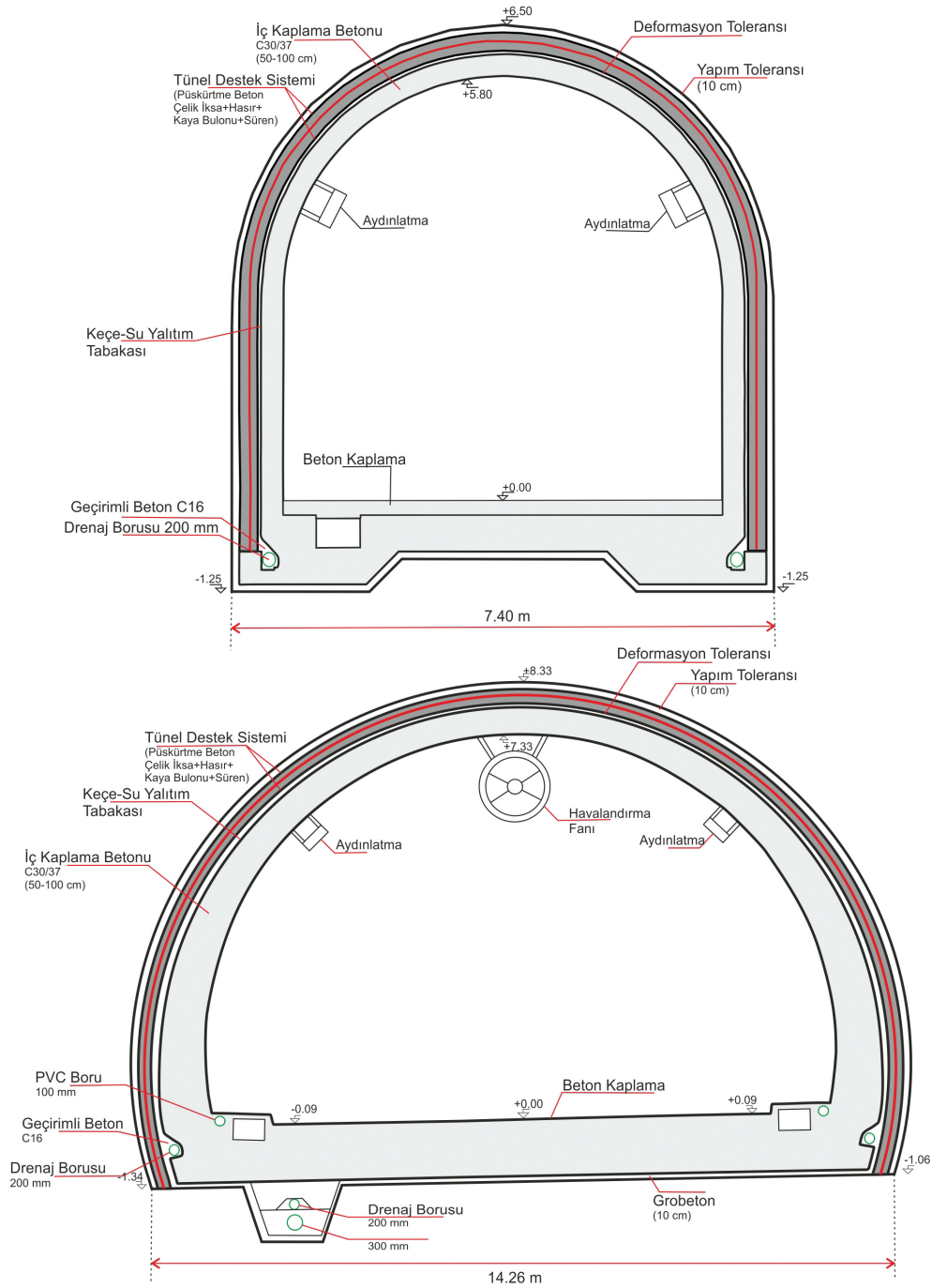
## TÜNEL AÇIMINDA UYGULANAN KAZI VE DESTEK SİSTEMLERİ

Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri üç ana tünel (T1, T2, T3), üç bağlantı tüneli (BT1, BT2, BT3) ve bir Yaklaşım Tüneli olarak projelendirilmiştir (Şekil 1). İncelemenin yapıldığı T2 Tüneli at nalı şeklinde olup yüksekliği 9.50 m ve taban genişliği 14.26 m'dir (Şekil 7). Yaklaşım Tüneli ise alt kesimi köşeli, üst kesimi ise kemerli geometriye sahip 7.75 m yüksekliğinde ve 7.4 m genişliğindedir (Şekil 7). Çalışılan tünel kesimlerinin kazı ve destek çalışmalarında NATM yöntemi kullanılmıştır. Tünel açımı öncesinde kazı paterni ve destek türleri, araştırma sondajları ve saha çalışmalarına göre RMR kaya kütle sınıflaması kullanılarak ÖNORM B2203'e göre tanımlanmıştır. Kazı çalışmalarında önerilen kazı ve destek sistemlerinin yetersiz olduğu tünel kesimlerinde ayna profiline ait

kaya kütle sınıflamaları (RMR) ile karşılığı olan ÖNORM B2203 sınıfları yeniden belirlenmiştir. Bu bağlamda incelenen tünel kesimlerinde, Yaklaşım tüneli km:0+275-km:0+289 arasında C2-2 ve km:0+289-km:0+308 arasında C2-1 kazı ve destek yöntemi uygulanmıştır. T2 Tünelinde ise km:0+795-km:0+888 arası ile km:0+897-km:1+066 arası C3-3, km:0+888-km:895 arası B3 ve km:0+985-km:0+987 arası ise C3-1 kazı ve destek yöntemi uygulanmıştır (Çizelge 1).

## TÜNEL ÇALIŞMALARI SIRASINDA GELİŞEN SORUNLAR VE İLERLEME HIZINA ETKİLERİ

İncelemesi yapılan tünel kesimlerinde karşılaşılan ve tünel ilerleme hızını etkileyen önemli sorunların başında aşırı sökülme, tünel içine doğru deformasyon gelişimi (konverjans) ve tünel içine su girişi gelmektedir.



Şekil 7. Yaklaşım ve T2 tünellerinin profili (Çamlıca Tepesi Ulaşım Tüneli Jeolojik ve Jeoteknik Raporu, 2016).  
 Figure 7. Cross-section of the access and T2 tunnel (Geological and Geotechnical Report of Çamlıca Hill Access Tunnels, 2016).

Taz, Ündül, Denek

Çizelge 1. İncelenen tünel kesimlerinde karşılaşılan kaya birimleri için kazı ve destek sistemleri.

Table 1. Excavation and support systems for the rock units along the tunnel sections examined.

Tünel km	0+795-0+888	0+888-0+895	0+895-0+897	0+897-1+066	
Litoloji	üst kesimde orta ayrılmış kumtaşı (Grovak), alt kesimde orta ayrılmış çakıllı arkozik kumtaşı	üst kesimde az ayrılmış kuvars arenit, alt kesimde orta ayrılmış çakıllı arkozik kumtaşı	az ayrılmış çakıllı arkozik kumtaşı	orta-çok ayrılmış çakıllı arkozik kumtaşı ve çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı seviyeli fay zonu	
RMR*	23-32	30-32	32-36	14-36-32-35	
ÖNORM B 2203*	C3-3	B3	C3-1	C3-3	
Kazı	Hidrolik kırıcı ile dört aşamalı	Hidrolik kırıcı ile dört aşamalı	I. aşamada patlatma, diğer üç aşamada hidrolik kırıcı ile	Hidrolik kırıcı ile dört aşamalı	
İksa	Kafes 200	IPN 160	Kafes 200	Kafes 200	
Hasır	Q295/295 çift kat	Q221/221 çift kat	Q295/295 çift kat	Q295/295 çift kat	
Püskürtme	C25/30	C20/25	C25/30	C25/30	
Beton	30 cm	25 cm	35 cm	30 cm	
Destek Sistemleri*	Kaya Bulonu	PG-IBO 28 mm çaplı, 4 ve 6 m boyunda, radyal 1.25 m-boyuna 1 m aralıklı, 11-12 şaşırtmalı	PG-IBO 28 mm çaplı, 4 ve 6 m boyunda, radyal 1.50 m aralıklı-boyuna 1.50 m aralıklı, 16-17 şaşırtmalı	PG-IBO 32 mm çaplı, 4 ve 6 m boyunda, radyal 1.09 m-boyuna 0.75 m aralıklı, 22-23 şaşırtmalı	PG-IBO 28 mm çaplı, 4 ve 6 m boyunda, radyal 1.25 m-boyuna 1 m aralıklı, 11-12 şaşırtmalı
	Süren	4" çaplı, 8 m uzunluğu, 4 m bindirme boyu, 25 cm aralıklı, Çift sıra	4" çaplı, 6 m uzunluğu, 3 m bindirme boyu, 30 cm aralıklı, Tek sıra	4" çaplı, 8 m uzunluğu, 4 m bindirme boyu, 25 cm aralıklı, Tek sıra	4" çaplı, 8 m uzunluğu, 4 m bindirme boyu, 25 cm aralıklı, Çift sıra
İlerleme	Üst yarı	0.75-1.00 m	1.25-1.50 m	0.75 m	0.75-1.00 m
	Alt yarı	1.50-2.00 m	2.50-3.00 m	1.50 m	1.50-2.00 m

\*Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri Jeolojik ve Jeoteknik Raporu (2016).

### Aşırı sökülme

İncelemesi yapılan tünel kesimlerinde, tünel ilerleme hızını önemli ölçüde etkileyen üçü Yaklaşım Tüneli (km:0+286, km:0+291 ve km:0+308) ve biri T2 Tüneli (km:0+935) aynalarında olmak üzere toplam dört aşırı sökülme olayı meydana gelmiştir.

Yaklaşım Tüneli km:0+286'da tünel aynasında ayrılmış olan diyabaz daykı ve daykın

üzerinde orta ayrılmış, mor renkli arkoz birimi, km:0+291'de tünel aynasında orta ayrılmış, mor renkli arkoz ve ayrılmış kiltaşı, km:0+308'de tünel aynasında ise tabanda orta-çok ayrılmış, mor renkli arkoz ve ayna üst kesimlerinde orta-çok ayrılmış, sarımsı kahverengi renkli kilttaşları aşırı sökülme olayı öncesinde gözlenmiştir. Ayrıca Yaklaşım Tüneli km:0+308 aynasında aşırı sökülme öncesinde tünel aynasında yaklaşık 3 lt/dk debilik su akışı olduğu belirlenmiştir. En



fazla aşırı sökülme olayının geliştiği T2 Tüneli km:0+935 aynasının üst kısmında, muhtemel bir makaslama zonuna ait killi zayıf zon, alt kısmında ileri derecede ayrılmış, yer yer parçalanmış sarımsı açık kahverengi renkli kumtaşı gözlenmiştir (Şekil 8). Aşırı sökülme sonrası ayna üst kısmından dökülen malzeme, blok boyutu ile kil boyutu aralığında değişmektedir. Bu bağlamda, tünel üst kısmında makaslama

zonu üzerinde yer alan kaya biriminden de blok boyutunda malzemenin geldiği anlaşılmaktadır (Şekil 8d). Bu durum aşırı sökülme olayı sonrasında yapılan teknik incelemede makaslama zonunun tünel üst kısmından 2.5-3m yukarısında sonlandığı şeklindeki ön değerlendirme (Çamlıca Tepesi Ulaşım Tüneli Jeolojik ve Jeoteknik Raporu, 2016) bilgisiyle uyumaktadır.



Şekil 8. Tünellerde gelişen aşırı sökülme sonrası ayna görüntüleri a) Yaklaşım tüneli km:0+286, b) Yaklaşım tüneli km:0+291, c) Yaklaşım tüneli km:0+308, d) T2 tüneli km:0+935.

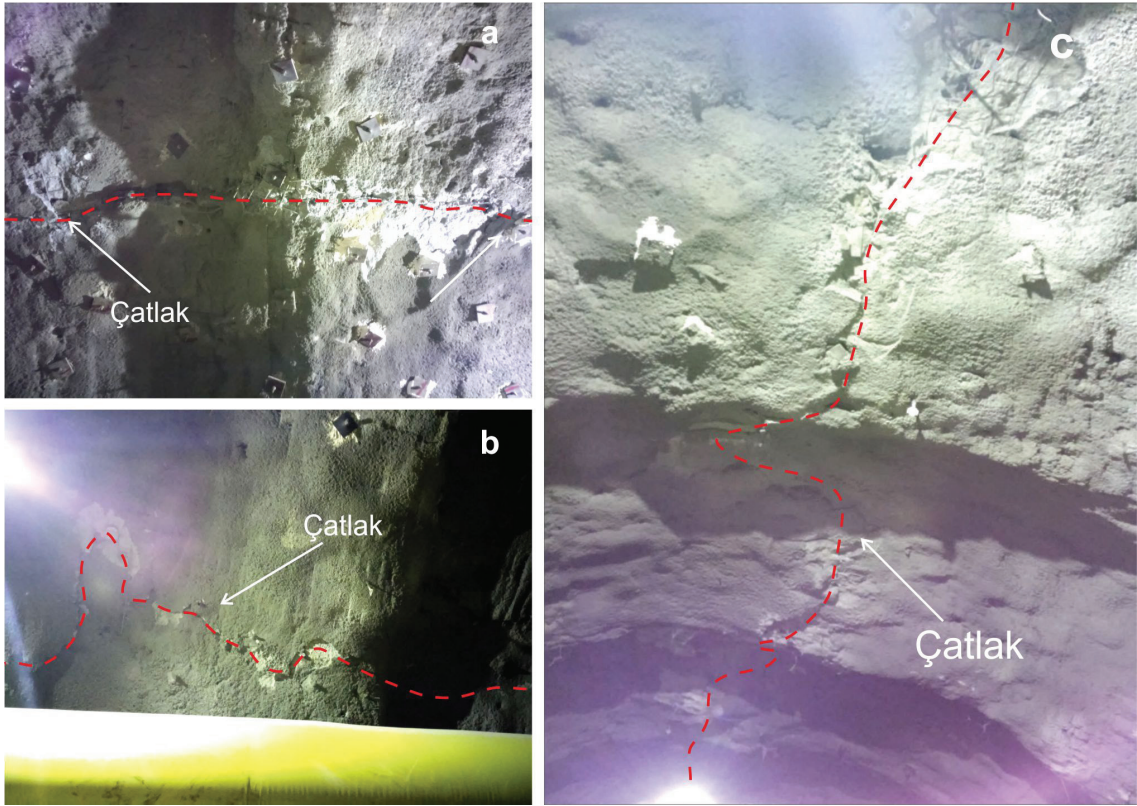
Figure 8. Tunnel face after overbreak in the tunnels a) Access tunnel km:0+286, b) Access tunnel km:0+291, c) Access tunnel km:0+308, d) T2 tunnel km:0+935.

Taz, Ündül, Denek

### Tünel içine doğru gelişen deformasyonlar (Konverjans)

Tünel içerisinde karşılaşılan diğer bir sorunu konverjanslar oluşturmaktadır. Konverjans problemi genellikle alt yarı kazı ve destek çalışmalarından sonra gelişmeye başlamıştır.

Deformasyon toleransının 10 cm'den düşük olduğu tünelde, deformasyon okumaları yer yer 10 cm'nin üzerine çıkmıştır. T2 Tüneli içerisinde km:0+800 ile km:0+887 arasında, km:0+922 ile km:0+955 arasında ve km:0+960 ile km:0+977 arasında tünel içine doğru gerilmelerin artması ile tünel tavanında çatlaklar gelişmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Tünel içine doğru gelişen çatlak görüntüleri a) T2 tüneli km:0+800-km:0+887 arası, b) T2 tüneli km:0+922-km:0+955 arası, c) T2 tüneli km:0+960-km:977 arası.

Figure 9. Cracks developed into the tunnel a) T2 tunnel between km:0+800-km and 0+887, b) T2 tunnel between km:0+922-km and 0+955, c) T2 tunnel between km:0+960 and km:977.

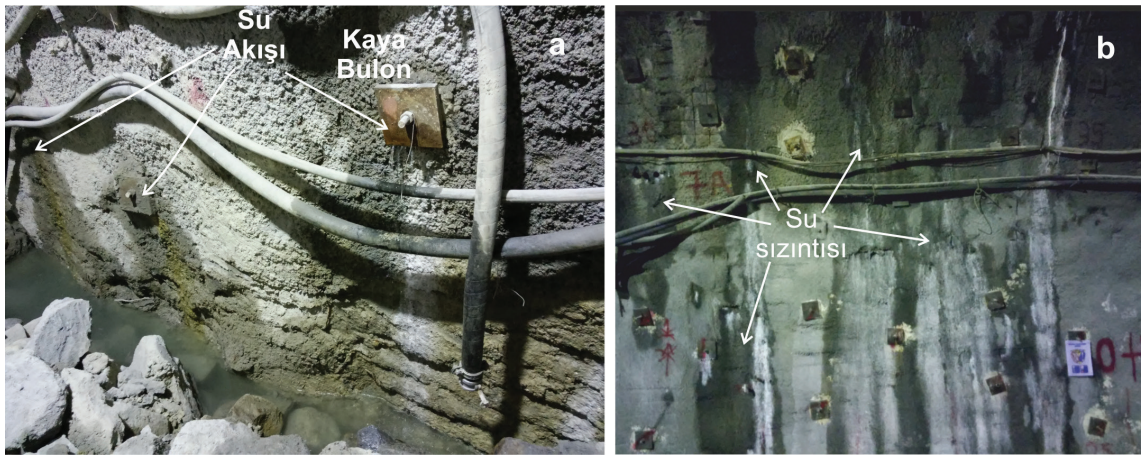


### Tünel içine su girişleri

Tünel içine su girişleri, yeraltı su seviyesinin altında açılan tünellerde görülen genel sorunlardandır. Bu bağlamda incelenen tünel kesimleri için ön çalışmalarda yapılan 23 adet sondaj verisine göre YAS seviyesi yüzeyden 4.50-23.5 m aralığında bulunmaktadır. Açılan ve incelemesi yapılan tünel, yeraltı suyu seviyesinin altında kalmaktadır ve bu durum hazırlanan jeolojik kesitte gösterilmiştir (Şekil 5a). Ancak incelenen tünel kesimlerinde tünel aynası boyunca tünele su gelimi Yaklaşım Tüneli km:0+308 dışında gerçekleşmemiştir. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi Yaklaşım Tüneli km:0+308'de gelişen su girişinin tünel aynasının orta-çok ayrılmış, sarımsı kahverengi renkli, killi kumlu zayıf zonda gerçekleştiği belirlenmiş ve tünel içine su girişinin zayıf zon boyunca ilerleyen yeraltı sularının olduğu düşünülmüştür. İncelemesi yapılan Yaklaşım Tüneli ve T2 Tüneli'nde yersel olarak genellikle desteklemeden sonra uygulanan kaya

bulonlarından su girişlerinin sızıntı (<0.1 litre/dakika) şeklinde geliştiği tespit edilmiştir (Şekil 10).

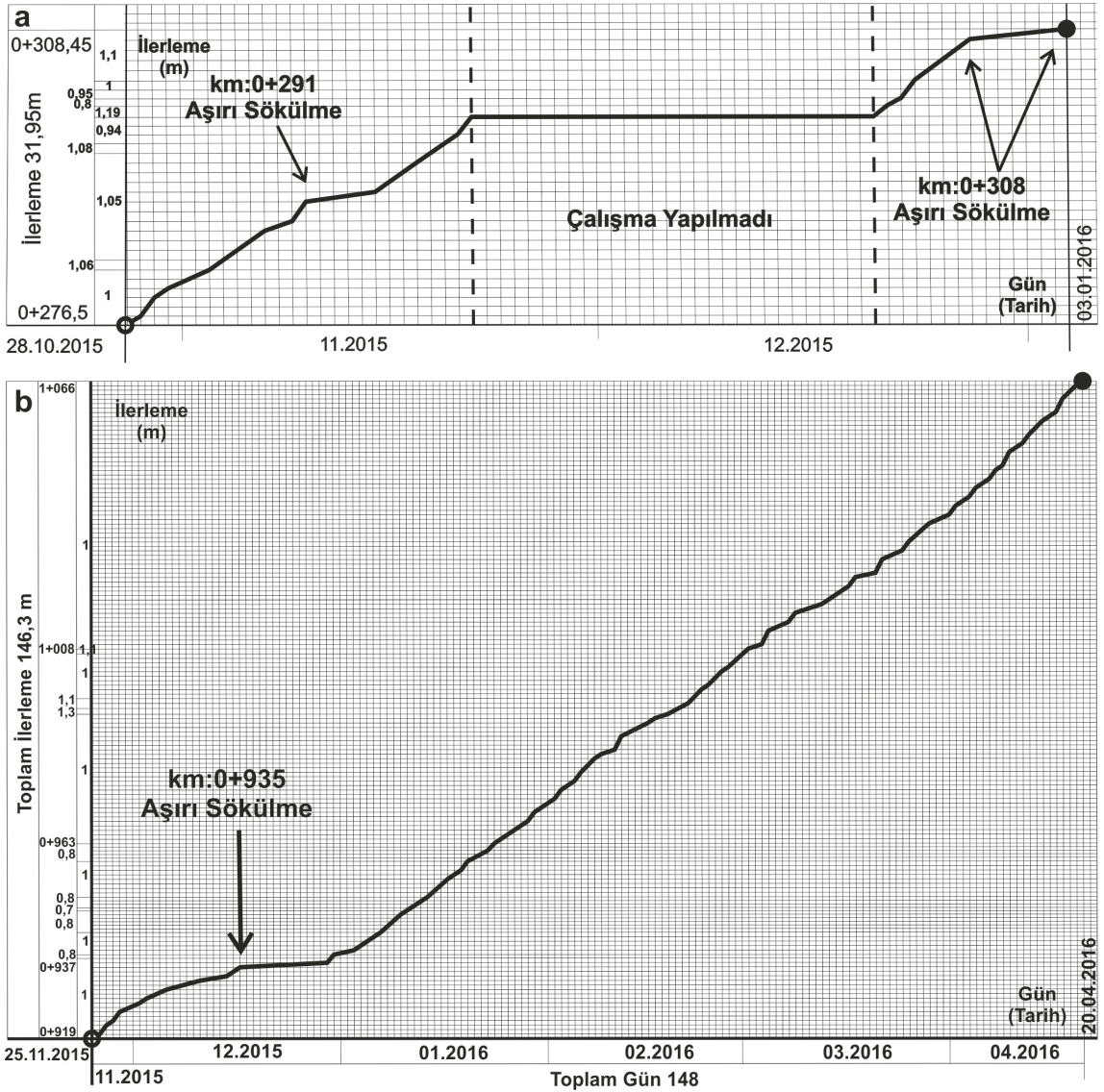
Tünel çalışmaları sırasında karşılaşılan jeoteknik sorunların ilerleme hızına etkileri Şekil 11'de verilmiştir. İlerleme hızını en olumsuz etkileyen I. aşama kazılarında gerçekleşen aşırı sökümlerdir (Şekil 11). Yaklaşım tüneli I. aşama km:0+291 ve km:0+308 de gerçekleşen aşırı sökümler tünel çalışmalarının ilerlemesini önemli düzeyde aksattığı görülmüştür. km:0+291 de gelişen aşırı söküme, ilerleme hızında yaklaşık 5 günlük aksamaya neden olmuştur. km:0+308 de gelişen aşırı söküme olayı sırasında 4-5 günlük iyileştirme çalışması yapılmış ancak ilerleme aşamasında tekrar aşırı söküme olayı meydana gelmiştir. Bu aşamadan sonra Yaklaşım tüneli projesi durdurulmuştur (Şekil 11a). T2 tüneline gelişen en büyük aşırı söküme km:0+935 de gerçekleşmiştir. Hazırlanan T2 tüneli I. aşama ilerleme hızı grafiğinden yaklaşık 18-20 günlük bir aksamanın olduğu görülmektedir (Şekil 11b).



Şekil 10. Tünel sızan sulara ait görüntüler; a) Yaklaşım tüneli kaya bulonundan su sızıntısı, b) T2 tüneli yan duvardan su sızıntısı.

Figure 10. Views of water leakages into the tunnel; a) water leakage from rock bolt at Access tunnel, b) water leakage from sidewall of T2 tunnel.

Taz, Ündül, Denek



Şekil 11. İncelenen tünel kesimlerinin 1. aşama ilerleme grafikleri; a) Yaklaşım tüneli, b) T2 tüneli.

Figure 11. The first stage advance rate graphs of the tunnel sections examined for; a) Access tunnel, b) T2 tunnel.

### SAYISAL ANALİZLERDE KULLANILAN KAYA KÜTLE PARAMETRELERİ

Tünel güzergâhındaki jeolojik birimler kaya davranışı gösterdiğinden dolayı analizlerde Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme yöntemi tercih edilmiştir. Eklemlili kaya ortamları için

geliştirilen bu yöntem yardımıyla sayısal analizlerde kullanılacak Hoek-Brown kriterleri mevcut kaya malzemesi ve kaya kütle parametrelerinden belirlenmektedir (Hoek vd., 2002).



Kaya kütle parametreleri olan Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), Hoek-Brown katsayıları ( $m_b$ ,  $m_i$ ,  $s$ ,  $a$ ), kaya kütlelerinin dayanımı ve kaya kütlelerinin deformasyon modülü analizlerde kullanılan önemli parametrelerdir. Çalışılan kaya ortamları için GSI değeri Hoek (1983), Hoek vd. (1998), Marinis ve Hoek (2000) tarafından çalışılan ve geliştirilen nicel GSI Çizelgesinden elde edilmiştir. Tünel içerisinde gözlenen ve incelemesi yapılan arkoz, kuvars arenit ve zayıf zon içerisindeki killi kumtaşı kaya birimleri için ayrı ayrı GSI değeri belirlenmiştir. GSI için belirlenen süreksizlik yapısı/süreksizlik yüzey koşulu arkoz için çok bloklu/orta, kuvars arenit için çok bloklu/zayıf ve killi kumtaşı için bloklu-bozunmuş/çok zayıf aralığında tanımlanmıştır (Şekil 12).

Hoek-Brown katsayıları olan  $m_b$ ,  $s$ ,  $a$  değerleri Hoek vd. (2002) tarafından geliştirilen kaya kütlelerine ait parametrelerdir. Bu parametrelerin hesaplanmasında Eşitlik 1, 2 ve 3 kullanılmıştır.

$$m_b = m_i \exp \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \quad (1)$$

$$s = \exp \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (3)$$

Eşitliklerde yer alan örselenme faktörü ( $D$ ) değeri patlatma yapılan tünel aynası (km:0+897)

için 0.6, hidrolik kırıcı ile kazılan tünel aynası (km:0+935) için ise sıfır alınmıştır (Hoek, 2012).

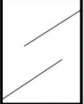





Kaya kütlelerinin dayanımını (Hoek ve Brown, 1980; Ramamurthy, 1986; Kalamaris ve Bieniawski, 1995; Sheorey, 1997; Aydan ve Dalgıç, 1998; Hoek vd., 2002) ve deformasyon modülünü (Bieniawski, 1973; Serrafim ve Pereira, 1983; Mitri vd., 1994; Barton, 1995; Aydan vd., 1997; Palmström ve Singh, 2001; Hoek ve Diederichs, 2006; Sönmez vd., 2006) belirlemek için farklı araştırmacılar tarafından birçok çalışma yapılmış ve farklı denklemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve deformasyon modülünü belirlemek amacıyla Hoek vd. (2002) tarafından kaya ortamında açılan yeraltı kazı çalışmalarına yönelik önerilmiş olan kaya kütlelerinin sıkışma dayanımı ( $\sigma_{cm}$ ) Eşitlik 4, kaya kütlelerinin deformasyon modülü ( $E_m$ ) ise Hoek ve Diederichs (2006) tarafından önerilen ve Eşitlik 5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b / 4 + s)^{as-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (4)$$

$$E_m = E_i \left[ 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right] \quad (5)$$

Burada; GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi,  $D$ : örselenme faktörü,  $m_i$ ,  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$  Hoek-Brown katsayıları,  $\sigma_{ci}$ : kaya biriminin tek eksenli sıkışma dayanımı,  $E_i$ : kaya biriminin elastisite modülü şeklindedir.

Taz, Ündül, Denek

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	N/A	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	70	60	Arkoz		
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	50	50	Kuvvars arenit		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	40	30	Killi Kumtaşı		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	20	20			
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Şekil 12. Tünel içerisinde incelemesi yapılan kaya birimlerine ait GSI aralığı (Marinos ve Hoek, 2000).

Figure 12. GSI interval of the rock units examined in the tunnel (Marinos and Hoek, 2000).

## SAYISAL ANALİZLERİN DEĞERLENDİRMESİ

Sayısal analizlerde Rocscience Phase 2D Version 8.005, (2011) yazılımı kullanılmıştır. İncelenen aynalardaki litolojik sınırlar Şekil 13’te verilen aynalara göre belirlenmiştir. Bunun yanında sayısal analizlerin gerçekleştirildiği alanlarda yapılan ön çalışmalara göre yeraltı suyu seviyesinin altında tanımlanmaktadır. Ancak incelenen aynalarda yerinde yapılan gözlemlerde herhangi bir su belirtisi gözlenmediği için sayısal analizlerde yeraltı suyu tanımlanmamıştır. Analizlerde, tünel çevresinde oluşan gerilmeler, süreksizlikler, kaya türü, kaya ve kaya kütlelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri, ayrışma gibi jeolojik özellikler ile kazı ve destek sistemleri birlikte değerlendirilerek tünel içine doğru artan gerilmeler sonucu gelişen aşırı sökülmenin nedenleri oluşturulan jeolojik model üzerinde tartışılmıştır. Ayrıca tünel aynası ve çevresinde gelişen plastik zon kalınlıkları belirlenmiştir.

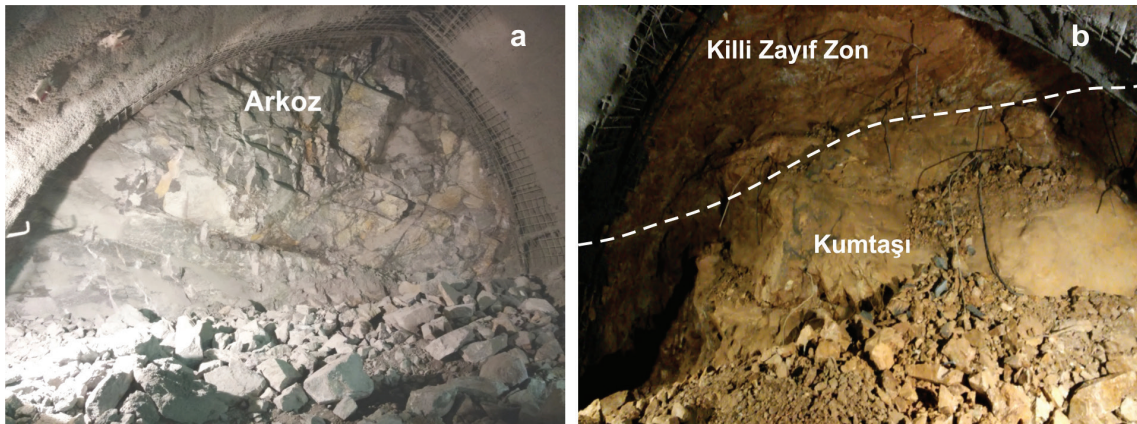
Bu çalışma kapsamında T2 Tüneline ait iki aynanın sayısal analizi yapılmıştır. Analizler, aşırı sökülmenin olmadığı çalışılan tünel güzergahında

en sorunsuz tünel aynalarından olan T2 Tüneli km:0+897 aynası ile aşırı sökülmenin en fazla gözlemlendiği T2 Tüneli km:0+935 aynasında gerçekleştirilmiştir. Böylece sağlam, aşırı sökülmenin olmadığı ve sorun yaratan jeolojik koşullar değerlendirilmiştir. Analizler sırasında Çizelge 2 ve Çizelge 3’te verilen kaya ve kaya kütle özellikleri kullanılmıştır. Örtü kalınlığı ise km:0+897 için 78m ve km:0+935 için 84m olarak belirlenmiştir. İlgili tünel aynaları için uygulamada kullanılan kazı ve destek sistemleri sayısal analizlerde de aynı sistematiğe tanımlanmıştır (Çizelge 1).

Çalışma ortamındaki gerilmelerin hesaplanmasında, kaya kütlelerinin herhangi bir noktasındaki düşey gerilmelerin örtü kalınlığı ağırlığına eşit olduğunu kabul eden ve en yaygın olarak kullanılan Eşitlik 6 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma_v = \gamma.H \quad (6)$$

Eşitlikte yer alan “ $\gamma$ ” kayanın birim hacim ağırlığı, “H” ise örtü kalınlığını ifade etmektedir.



Şekil 13. T2 tüneline sayısal analizi yapılan ayna görüntüleri; a) km:0+897, b) km:0+935.

Figure 13. Tunnel faces numerically analysed in the T2 tunnel; a) km:0+897, b) km:0+935.

Taz, Ündül, Denek

Çizelge 2. Sayısal analizi yapılan T2 tünel aynalarında karşılaşılan kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri.

Table 2. Physical and mechanical properties of the rocks in T2 tunnel faces numerically analysed.

Özellikler	Kaya birimi ve parametreleri			
	Litoloji	Çakıllı arkozik kumtaşı (Kurtköy formasyonu)	Kumtaşı ve zayıf zon içerisinde kil*	Kuvars arenit Kumtaşı (Aydos formasyonu)
Örnek Adedi		27	3	15
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı ( $\sigma_{ci}$ - MPa)		50	15	80
Elastisite Modülü ( $E_i$ - MPa)		13750	3750	22000
Poisson Oranı ( $\nu$ )		0.15	0.25	0.12
Birim Hacim Ağırlık ( $\gamma_k$ - kN/m <sup>3</sup> )		25.7	19	25.3

\*Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri Jeolojik ve Jeoteknik Raporu (2016)

Çizelge 3. Sayısal analizi yapılan T2 tünel aynalarının kaya-kaya kütlesi ve Hoek-Brown parametreleri.

Table 3. Rock-rock mass and Hoek-Brown parameters for T2 tunnel faces numerically analysed.

Özellikler	Kaya ve kaya kütle parametreleri			
	Litoloji	Çakıllı arkozik kumtaşı (Kurtköy formasyonu)	Kumtaşı ve zayıf zon içerisinde kil	Kuvars arenit kumtaşı (Aydos formasyonu)
GSI		50	18	30
Deformasyon Modülü ( $E_{mass}$ - MPa)		1727.77	155.608	1777.41
$m_i$		17	4	17
$m_b$		1.326	0.214	1.395
s		0.001	0.0001	0.0004
a		0.506	0.550	0.522
Dilatasyon parametresi ( $\psi$ )		0.254	0.062	0.652
GSI <sub>resid</sub>		25	14	20
Deformasyon Modülü <sub>resid</sub> ( $E_{mass\ resid}$ - MPa)		457.4	132.127	1008.25
$m_{b\ resid}$		0.382	0.186	0.978
$s_{resid}$		$3.25e^{-5}$	$7.2e^{-5}$	0.0001
$a_{resid}$		0.530	0.565	0.543

GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi,  $E_{mass}$ =Kaya Kütlesinin Deformasyon Modülü,  $m_i$  -  $m_b$  - s - a değerleri Hoek-Brown kaya kütle katsayıları.



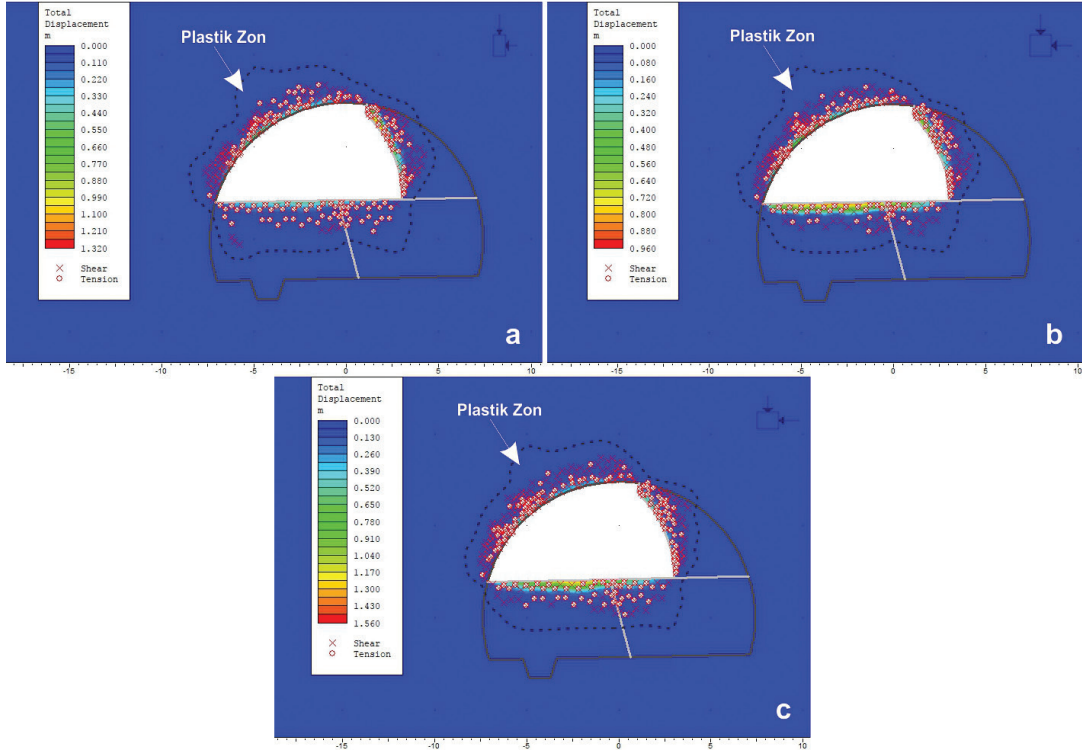
Yatay gerilmeleri ( $\sigma_h$ ) belirlemek için ise yerinde ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmemiştir. Bu bağlamda, Aydan (2000) ile Tuncay vd. (2002)'nin İstanbul ve çevresinde gerçekleştirdikleri çalışmalardan yararlanılmıştır. Aydan (2000), geliştirmiş oldukları yöntem yardımıyla faylardan aldıkları ölçümleri kullanarak yer kabuğuna etkiyen gerilmeleri belirleyerek yatay ve düşey gerilmelerin oranını ( $k=\sigma_h/\sigma_v$ ) hesaplamıştır. Bu çalışmada da Aydan (2000)'in belirlemiş olduğu gerilmelerin oranları ( $k=1$  ve  $k=1.3$ ) kullanılmıştır. Tuncay vd. (2002) ise Akustik Emisyon (AE) yöntemi ile bölgedeki yatay gerilmeleri hesaplamıştır. Bu çalışmada da Tuncay vd. (2002) belirlemiş olduğu yatay gerilme değerleri dikkate alınarak Eşitlik 6 yardımıyla farklı bir  $k$  değeri ( $k=0.6$ ) daha belirlenmiştir. Sayısal analizlerde, yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranı ( $k=\sigma_h/\sigma_v$ ) 0.6, 1 ve 1.3 olmak üzere üç farklı değer tanımlanarak kullanılmış ve farklı gerilmeler altındaki davranışların anlaşılması için ayrı ayrı analizler yapılmıştır.

T2 Tüneli km:0+897 aynasında, az ayrışmış kil, kum seviyeleri içeren çakıllı arkozik kumtaşı (Kurtköy formasyonu) yer almaktadır (Şekil 13a). T2 Tüneli km:0+935 aynası önceki bölümlerde tariflendiği şekilde bir makaslama zonu içermekte olup zayıf zonun alt ve üst kısmında arkozik kumtaşı (Kurtköy formasyonu) yer almaktadır. Arkozik kumtaşının üst kesimlerinde ise kuvarslı kumtaşı, kuvars arenit (Aydos formasyonu) bulunmaktadır (Şekil 5b ve 13b).

Analiz görüntülerinde, makaslama (shear) gerilmelerinin etkin olduğu bölgelerde kenetlenmenin ve çekme (tension) gerilmelerinin etkin olduğu bölgelerde ise kaya malzemesinin sökülüp dökülebileceğini göstermektedir. Plastik zon sınırı (kazı yapılan tünelin çevresinde bulunan kaya ortamının etkilendiği bölge, gevşeme bölgesi) ise bu bölgeleri içine alacak şekilde yenilme analizleri yardımı ile belirlenmiştir.

Analizlerde, T2 Tüneli km:0+897 I. aşama kazı sonrasında "k" değeri için alınan farklı değerlere rağmen tünel kemer kısmında plastik zon kalınlığı en fazla 3-3.5 m civarında kalmaktadır (Şekil 14, Çizelge 4). Bununla beraber toplam yer değiştirme değerlerinin kısıtlı bir bölgede etkin olması nedeniyle tünel içerisinde aşırı sökülme sorununun gelişmeyebileceği sonucunu vermektedir. Tünel içerisinden alınan ve Şekil 11a'da verilen ayna görüntüsünden de anlaşılacağı gibi tünel içerisinde aşırı sökülme olayı gerçekleşmemiştir. Bu bağlamda gelişen plastik zon kalınlığı ve toplam yer değiştirme değerleri dikkate alındığında kaya kütlelerinin orta çatlaklıdan az, ayrışmanın ise W2-W3 olduğu ve arkozik kumtaşı ortama sahip (Çizelge 2 ve 3) yapısal bir unsurun olmadığı aynalarda herhangi bir aşırı sökülme sorununun gerçekleşmeyeceği düşünülmektedir. Ayrıca incelenen tünellerin farklı metrelerinde, benzer jeolojik ortama sahip tünel aynalarında yapılan analizlerde de yakın sonuçlar elde edilmiştir (Taz, 2016).

Taz, Ündül, Denek



Şekil 14. T2 tüneli km:0+897 için 1. aşama kazı sonrası sayısal analiz görüntüleri; a)  $k=0.6$  için durum, b)  $k=1$  için durum, c)  $k=1.3$  için durum.

Figure 14. Numerical analyses results for the T2 tunnel at km:0+897 after the first stage excavation; a) the case for  $k=0.6$ , b) the case for  $k=1$ , c) the case for  $k=1.3$ .

Çizelge 4. Sayısal analizi yapılan tünel aynalarına ait plastik zon kalınlıkları, toplam yer değiştirme ve jeo-mühendislik özellikler.

Table 4. Plastic zone thicknesses, total displacement and geo-engineering properties of the tunnel faces numerically analysed.

T2 Tünel km	k ( $\sigma_h/\sigma_v$ )	1. Aşama Plastik Zon Kalınlığı (m)		Toplam en yüksek yer değiştirme (m)	Ayrışma derecesi (W)
		en düşük	en yüksek		
0+897	k=0.6			1.32	II-III
	k=1	3	3.5	0.96	
	k=1.3			1.56	
0+935	k=0.6	2	4	0.6	V-VI
	k=1	3	5	1.2	
	k=1.3	4	5.5	1.2	

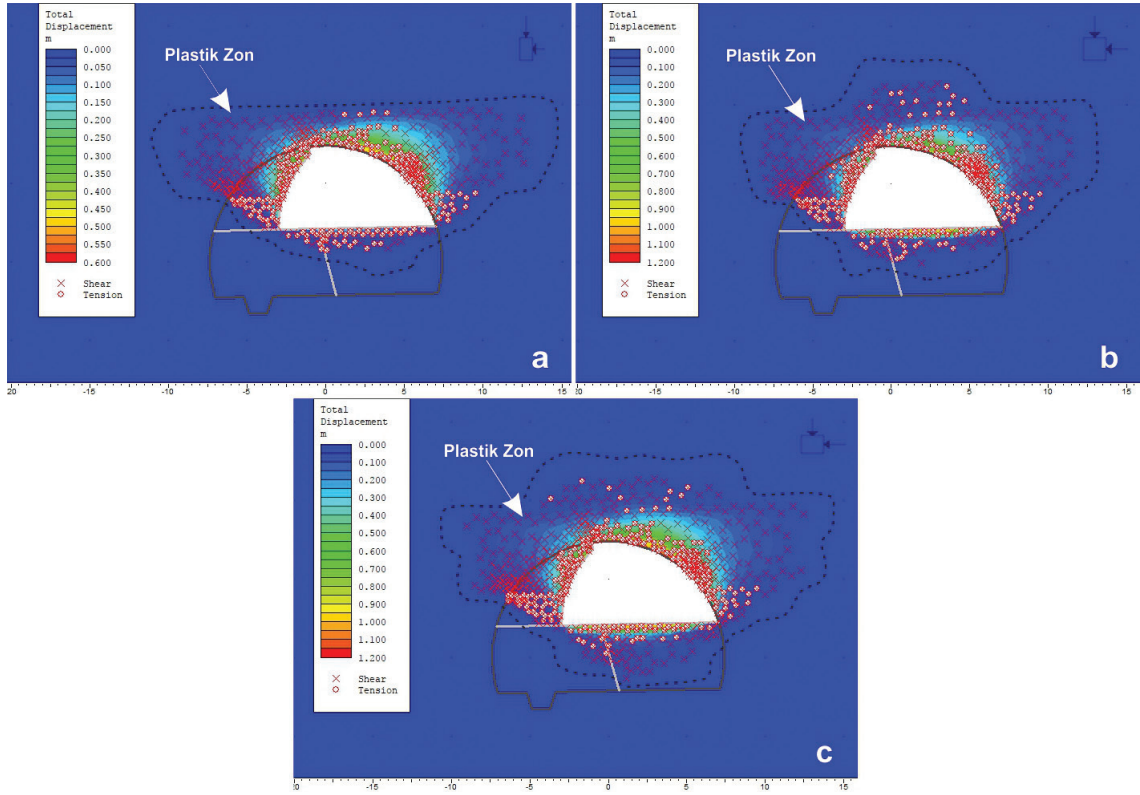
$\sigma_h$  =yatay gerilme,  $\sigma_v$  =düşey gerilme.

T2 Tüneli km:0+935 I. aşama sonrasında elde edilen analizler,  $k=0.6$  için tünel tavan kısmında plastik zon kalınlığı en fazla 2-4 m civarında kalmakta iken, toplam yer değiştirme değerleri en fazla 0.6 m,  $k=1$  için tünel tavanında plastik zon kalınlığı en fazla 3-5 m civarında, toplam yer değiştirme değerleri ise en fazla 1.2 m'dir.  $k=1.3$  için tünel tavanında plastik zon kalınlığı 4-5.5 m civarında ve toplam yer değiştirme değerleri en fazla 1.2 m olmaktadır (Şekil 15; Çizelge 4). Tünel içerisindeki yapılan gözlemlerde, km:0+935 ayna kazı sırasında aşırı sökülme sorunu gerçekleştiği bilinmektedir. Aşırı sökülme öncesi ayna görüntüsü Şekil 13b ve aşırı sökülme sonrası ayna görüntüsü Şekil 8d'de verilmiştir. Gerçekleşen aşırı sökülmenin boyutları dikkate alındığında,  $k=0.6$  için elde edilen analiz değerleri gerçekleşen aşırı sökülmenin boyutlarından daha düşük kalmaktadır (Şekil 15a). Ancak  $k=1$  ve  $k=1.3$  için analiz sonuçları aşırı sökülme sonrası yapılan gözlem ve incelemelerde belirtilen (Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri Jeolojik ve Jeoteknik Raporu, 2016) aşırı sökülme boyutlarına yakın değerler vermektedir (Şekil 15b ve 15c). Bu bağlamda kurulan jeolojik modelin

gerçeğe yakın olduğu ve benzer ortamlarda aşırı sökülmenin gelişebileceği sonucuna varılabilir. Bazı noktalarda yapılan kaya bulunu gibi iyileştirmeler plastik zon içerisinde kalma ihtimali olacağından uzun dönem tünel performansında mutlaka göz önüne alınmalıdır. Bu bağlamda, gelişen aşırı sökülmenin nedenleri olarak kazı yöntemi, ayrışmanın (V-VI) ve zayıf zonun etkisi ile kaya ve kaya kütle koşullarının (örneğin süreksizlik aralığının az olması) zayıf olması şeklinde sıralanabilir (Çizelge 2 ve 3). Analizler sonucunda tünel aynalarına ait plastik zon kalınlıkları ve kaya kütlelerinin jeo-mühendislik özellikleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında T2 Tüneli km:0+935'deki jeolojik koşullara benzer jeolojik koşullarda aşırı sökülme ve benzeri profil fazlası kazıların gelişebileceği çok açıktır. Benzer jeolojik koşullarda açılacak tünellerde, tünel açımı, destekleme çalışmaları ve tünel sonrasında gerekli bölgelerde iyileştirme çalışmaları (enjeksiyon, kaya bulunu, püskürtme beton, kazı kesit alanı küçültme, kazı adım sayısı arttırma vb.) mutlaka jeo-mühendislik özelliklerin detaylıca araştırılması ile tamamlanmalıdır.

Taz, Ündül, Denek



Şekil 15. T2 Tüneli km:0+935 için 1. aşama kazı sonrası sayısal analiz görüntüleri; a)  $k=0.6$  için durum, b)  $k=1$  için durum, c)  $k=1.3$  için durum.

Figure 15. Numerical analyses results for the T2 tunnel at km:0+935 after the first stage excavation; a) the case for  $k=0.6$ , b) the case for  $k=1$ , c) the case for  $k=1.3$ .

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, incelenen tünel kesimleri boyunca tünel güzergâhının jeolojisi, kazı-destek çalışmaları, gelişen jeo-mühendislik sorunlar ve iyileştirme çalışmaları takip edilmiştir.

Tünel çalışmaları sırasında güzergâh boyunca genel olarak İstanbul Paleozoyik istifeye ait çakıllı arkozik kumtaşı (Kurtköy formasyonu), kuvars arenit (Aydos formasyonu), ince taneli kumtaşı (Gözdağ formasyonu) ve bu birimlere sokulum yapan diyabaz dayklar ile karşılaşmıştır. Güzergâh boyunca eğimi düşeye yakın zayıf zonlar tespit edilmiştir. Zayıf zon boyunca birim sarımsı kahverengi renkli,

killi-kumlu seviyeler içerdiği gözlenmiştir. Ayrıca Çamlıca Bindirmesine ait olduğunu düşündüğümüz düşük açılı ters fay düzlemi, tünel aynalarında gözlenmiştir.

Tünel çalışmaları sırasında gelişen sorunlardan olan aşırı sökülme, tünel ilerleme hızına önemli boyutlarda etki etmektedir. Diğer bir sorun olan tünel içine su sızıntıları, yersel olarak geliştiğinden genel olarak ilerleme hızına etki etmemesine rağmen Yaklaşım Tüneli km:0+308'de gelişen aşırı sökülme olayı öncesinde yaklaşık 3 lt/dk su girişi gözlenmiştir.

Sayısal analizler sonucu ve tünel içindeki gözlemler ile birlikte değerlendirildiğinde orta-



çok çatlaklı killi kumtaşı ve arkozik kumtaşı kaya ortamında, ileri derecede ve tamamen ayrılmış (V-VI) seviyeler ile özellikle zayıf zonlar (makaslama, fay vb.) boyunca aşırı sökülmelerin gerçekleşme potansiyelinin çok yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, az-orta çatlaklı, az-orta ayrışmanın gözlemlendiği çakıllı arkozik kumtaşı ve kuvars arenit kaya ortamında aşırı sökülmelerin gerçekleşme potansiyeli bakımından düşük kalmaktadır. Tünel içerisinde gerçekleşen aşırı sökülme ile sayısal analiz-model sonuçları genel olarak birbirleri ile uyumludur. Bu durum kurulan sayısal modelin gerçeğe yakın olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, benzer jeolojik koşullarda yapılacak tünel vb. yeraltı çalışmalarında, bu çalışmada belirlenen jeo-mühendislik özelliklerin sınır koşulları olarak kullanılabilmesi ortaya konmuştur. Ayrıca bu tip sorunları yaratan belirsizliklerin bir kısmı detaylı ön jeolojik ve jeo-mühendislik çalışmalar ile belirli hale getirilebileceği unutulmamalıdır.

### Katkı Belirtme

Yazarlar, makalenin inceleme sürecinde titiz, detaylı ve katkı sağlayıcı eleştiri ve önerilerinden dolayı Hakemlere teşekkür ederler.

### KAYNAKLAR

Abdüselamoğlu, Ş., 1963. İstanbul Boğazı doğusunda mostra veren paleozoyik arazide stratigrafik ve paleontolojik yeni müşahedeler. İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, İstanbul.

Albayrak, Z., 1994. Göçüklerin enjeksiyonla onarımı demiryolu tünellerindeki problemlerin enjeksiyonla onarımı. Ulaşımında Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, 211-228.

Aydan, Ö., Dalgıç, S., 1998. Prediction of deformation behaviour of 3 lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anotolian Fault Zone (NAFZ). Reg. Symp. on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, 228-233.

Aydan, Ö., Ulusay, R., Kawamoto, T., 1997. Assessment of rock mass strength for underground excavations. Proceedings of the 36<sup>th</sup> US Rock Mechanics Symposium, 777-786.

Aydan, Ö., 2000. Fay çiziklerinden yerkabuğuna etkiyen gerilmelerin saptanması için yeni bir yöntem ve uygulaması. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 22, 223-236.

Aysal N., Keskin M., Peytcheva I., Duru O., Akgündüz S., 2015. Geochronology, Geochemistry and Isotope Systematics of a mafic-intermediate dyke complex in the İstanbul zone, Northern Turkey. Goldschmidt 2015. Prag, Çek Cumhuriyeti., 16-21, 155-155.

Altınlı, E., 1954. Çamlıcalar şarियajlı mıdır?. Fen Fakültesi Mecmuası Seri B, 19 (3), 213-222.

Barton, N., 1995. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. Keynote Lecture, 8th ISRM Congress. Vol 3. Balkema, Rotterdam, Tokyo, 1023-1032.

Baykal, F., Kaya, O., 1965. İstanbul Silüriyeni hakkında. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Türkiye Bülteni, 64, 1-8.

Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng. 15 (12), 335-344.

Bilgin, N., Çopur, H., Balci, C., Tumac, D. 2008. "The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in İstanbul Kozyatagi-Kadikoy metro tunnels". World Tunnel Congress 2008 Proceedings Book, 1509-1516.

Bilgin, N., 2016. An appraisal of TBM performances in Turkey in difficult ground conditions and some recommendations. Tunnelling and Underground Space Technology, 57, 265-276.

Dalgıç, S., 2000. The influence of weak rocks on excavation and support of the Beykoz Tunnel. Turkey. Engineering Geology 58, 137-148.

Dalgıç, S., 2002. A comparison of predicted and actual tunnel behavior in the İstanbul Metro, Turkey. Engineering Geology, 63, 69-82.

Dalgıç, S., 2003. Tunneling in fault zones, Tuzla tunnel, Turkey. Tunnelling and Underground Space Technology, 18, 453-465.

Taz, Ündül, Denek

- Eriş, İ., Vardar, M., 1994. İstanbul metrosu Taksim-4. Levent güzergâhı temel kayaçlarının jeomekanik özellikleri ve duraylılık sorunu. Ulaşımında Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, 1-3 Aralık 1994, İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 163-178.
- Geniş, M., Başarır, H., Özarıslan, A., Bilir, E., Balaban, E., 2007. Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey, Engineering Geology, 92, 14-26.
- Gürocak, Z., 2011. Analyses of stability and support design for a diversion tunnel at The Kapıkaya Dam Site, Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70, 41-52.
- Hoek, E., 1983. Strength of jointed rock masses, 23<sup>rd</sup> Rankine Lecture. Géotechnique, 33(3), 187-223.
- Hoek, E., 2012. Blast damage factor D, Technical Note for RocNews.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground Excavations in Rock. Inst. Min. Metall., London, 527.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 Edition.
- Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57(2), 151-160.
- Hoek, E., Diederichs, M.S., 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, 203-215.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1981, In: Brown, E.T. (Ed.), Rock characterization testing and monitoring-ISRM suggested methods, New York, Pergamon.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 2007. The Complete ISRM suggested methods for rock characterization, Testing and Monitoring Kozan, Ankara.
- Kalamaris, G.S., Bieniawski, Z.T., 1995. A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time. Proc. of 8th Int. Cong. Rock Mechanics. ISRM, 1. Balkema, Rotterdam, 295-302.
- Kaya, O., 1978. İstanbul ordovisyeni ve silüriyeni. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Enstitüsü, 4, 1-22.
- Ketin, İ., 1958. Çamlıca bölgesinin tektoniği hakkında. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 7, 10-18.
- Lom, N., Ülgen, S.C., Sakinç, M., Şengör, A.M.C., 2016. Geology and stratigraphy of Istanbul region. Geodiversitas, 38 (2), 175-195.
- Mahmutoğlu, Y., 2011. Surface subsidence induced by twin subway tunnelling in soft ground conditions in İstanbul. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70, 115-131.
- Marinos, P., Hoek, E., 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: Proceedings of the GeoEng2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Technomic Publishers, Lancaster, 1422-1446.
- McCallien, W.J., Ketin, İ., 1947. The structure of Çamlıca, Western Asia Minor, near İstanbul. Annales de l'Université d'Ankara, 1, 209-226.
- Melemoğlu İnşaat, 2016. Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri Jeolojik ve Jeoteknik Raporu, 134 s.
- Önalın, M., 1981. İstanbul Ordovisyen ve Silüriyen istifinin çökme ortamları. Yerbilimleri Dergisi, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 161-177.
- Önalın, M., 1982. Pendik bölgesi ile adaların jeolojisi ve sedimenter özellikleri. İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi, Doçentlik Tezi, 156s.
- ÖNORM B 2203, 1994. Untertagebauarbeiten Werkvertragsnorm, Avusturya.
- Özgül, N., 2011. Stratigraphy and some structural features of the İstanbul palaeozoic, Turkish Journal of Earth Sciences, 21, 817-866.
- Özsan, A., Başarır, H., Yücel, S., Cücen, Ö., 2009. Engineering geological evaluation and preliminary support design for the metro extension tunnel, Ankara. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68, 397-408.
- Palmström, A., Singh, R., 2001. The deformation modulus of rock masses-comparisons between in

- situ tests and indirect estimates. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16, 115–131.
- Ramamurthy, T., 1986. Stability of rock mass. 8<sup>th</sup> Annual Lecture. *Indian Geotechnical Journal*, 1–74.
- Rocscience, 2011. Phase 2D Version 8.005, User's Guide. Rocscience Inc., Toronto, Canada.
- Rocscience, 2013. Dips v.6.008, User's Guide. Rocscience Inc., Toronto, Canada.
- Sheorey, P.R., 1997. Empirical rock failure criteria. Balkema, Rotterdam, 176.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, H.A., Kayabaşı, A., 2006. Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 224–235.
- Taz, F., 2016. Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünellerinin yapım aşamalarında karşılaşılan sorunların jeo-mühendislik açıdan değerlendirilmesi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Tuncay, E., Ulusay, R., Watanabe, H., Tano, H., Aydan, Ö., Yüzer, E., 2002. Akustik emisyon (AE) tekniği: 2-AE tekniğiyle Türkiye'de arazi gerilmelerinin belirlenmesi konusunda bir ön inceleme. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 25, 83-98.
- Tüysüz, O., Aksay, A., ve Yiğitbaş, E., 2004. Batı Karadeniz bölgesi litostratigrafi birimleri. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Varol, A., Dalgıç, S., 2006. Grouting applications in the Istanbul Metro, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 602-612.
- Volkman, G., Schubert, W., 2005. The use of horizontal inclinometers for the optimization of the rock mass - support interaction, *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, Proceedings of the 31<sup>st</sup> ITA-AITES World Tunnel Congress, İstanbul.
- Yılmaz, Ö., Çınar, M., Özdemir, T., Varol, A., 1994. İstanbul metrosu tünel kazı çalışmalarında yaşanan problemler ve çözümleri. Ulaşımında Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, 93-112.



