

## Tünel Açma Yöntemlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Sınıflama Sistemleri ile Değerlendirilmesi

*Evaluation of Tunnel Excavation Methods in Accordance with Engineering Geology and Rock Mass Classification Systems*

**Özgür SATICI<sup>1</sup>, Tamer TOPAL<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Karayolları Genel Müdürlüğü, Yüce-tepe, ANKARA

<sup>2</sup>Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Geliş (received) : 26 Mayıs (May) 2015

Düzeltilme (revised) : 09 Haziran (June) 2015

Kabul (accepted) : 19 Haziran (June) 2015

### ÖZ

Bu çalışmada mühendislik jeolojisi uygulamalarının tünel açma yöntemleri ile ilişkisi anlatılmaktadır. Geçmişten bugüne çeşitli tünel açma yöntemleri ortaya çıkmış ancak bunların büyük çoğunluğu aşamalı kazı ve tam ayna kazılarının çeşitli türevleri şeklinde olmuştur. Uluslararası alanda yaygın bilinen tünel açma yöntemleri, kaya kütlelerinin davranışlarını sınıflandırmaya çalışmakta, ancak bu sınıflandırmaya sayısal bir altlık oluşturamamaktadır. Bu nedenle bu yöntemlerin uygulanması sırasında sayısal ve objektif değerlendirmelere ihtiyaç duyulmakta, bu eksiklikse kaya kütle sınıflamaları kullanılarak kapatılmaya çalışılmaktadır. Günümüz tünelciliğinde yaygın olarak NATM ve ADECO-RS adı verilen iki yöntem kullanılmaktadır. Her iki yöntem de kaya kütle davranışını çeşitli şekillerde kategorize etmiş ancak bunun için değerlendirmeye esas objektif bir altlık oluşturamamıştır. Bu çalışmada, tünel tasarımında yaygın olarak kullanılan tünel açma yöntemlerinin, uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflama sistemleri ve sayısal modeller ile olan ilişkisi ve uygulamada yaşanan sorunlar anlatılmaya çalışılmıştır. Uygulamada; kaya kütle sınıflamalarından tünel kazı ve destek sınıflarına geçiş, bunların sayısal modellere yansıtılması, yapılan kabuller ve özellikle sayısal modelleme sırasında yazılımların dayandığı kabullerden kaynaklanan mühendislik jeolojisi modelleme hataları ve doğru tasarım için yapılması gerekenler birer örnek ile açıklanmaya çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kaya kütle sınıflaması, Mühendislik jeolojisi, Sayısal modelleme, Tünel açma yöntemleri.

Ö. Satıcı

E-Posta: osatici@gmail.com

**ABSTRACT**

In this study, the relationship between engineering geological applications and tunnel excavation methods were described. Even if several tunnel excavation methods have been suggested from past up to the present, most of them were only the various derivations of full face and sequential excavation techniques. Internationally well-known tunnel excavation methods try to classify rock mass behaviors, but, cannot form a numerical base for the claimed methods. Therefore, objective evaluations are required (especially for their applications) to overcome the deficits rock mass classification systems are used. NATM and ADECO-RS are the two widespread methods at the present day tunnel practice. In both methods, rock mass behavior has been categorized in different ways. However, both of them failed to generate objective base to describe the rock mass behavior. In this study, practical difficulties, functional relation of commonly used tunnel excavation methods between rock mass classifications systems and their application to numerical models, have been described. For this aim; transition of rock mass classification systems to tunnel excavation and support classes, their application to numerical models, their assumptions, and in point of view of the engineering geology; assumption defects have been described with the help of an example.

**Key Words:** *Rock mass classification, Engineering geology, Numerical models, Tunnel excavation methods.*

**GİRİŞ**

Yeraltı kazıları gerek madencilik uygulamaları, gerek drenaj, sulama ve benzeri ihtiyaçları sağlamak gerekse de coğrafi engelleri aşma amaçlı olsun, geçmişten günümüze farklı coğrafyalarda uygulanmıştır. Yeraltı kazılarında kazı ve destekleme mantığı hemen hemen aynı ancak uygulama sıraları farklı olacak şekilde çeşitli tünel açma yöntemleri ortaya çıkmış, ancak bunların büyük çoğunluğu aşamalı kazı ve tam ayna kazılarının çeşitli türevleri şeklinde olmuştur. Uygulayıcıları ise hemen hemen birbirinin mantık olarak aynı olan yöntemleri kendi adları ile tarihe kaydetmişlerdir. 18. ve 19. yüzyıllar arasında uygulanmış olan ve klasik yöntemler olarak tanımlanan bu yöntemlere örnek olarak; Alman, Amerikan, Avusturya, Belçika, İngiliz ve İtalyan tünel açma yöntemleri ve benzeri diğer yöntemler

sayılabilir (Tonon, 2010; Brierley, 2014). Burada söz etmekte fayda olan bir diğer eski tünelcilik uygulaması ise Osmanlı İmparatorluğu dönemindeki, Osmanlı askeri teşkilatında yeniçerilerin kale kuşatmalarında tünel kazarak sur duvarlarına ulaşması ve surları alttan havaya uçurarak, kale içine kadar tünel kazması ve kaleyi içten fethetmesi için kurulmuş bir askeri birlik olan Lağımçı Ocağı'dır (Wikipedia, 2015). Ancak tüm bu yöntemlerin genel yapısı incelendiğinde, tamamının, insan gücü ile parçalı kazı yapılarak ve keresteler kullanılarak destekleme yapılan sistemler olduğu görülecektir. Günümüze kadar teknolojik gelişmelerin de etkisi ile ortak bir paydaya oturan tüm bu yöntemler, bir şekilde içinde kazı yapılan kaya kütle davranışını sınıflandırmaya çalışmakta, ancak bu sınıflandırmayı tünel açma yöntemi ile ilişkilendirilebilecek sayısal

bir altlık oluşturamamaktadırlar. Bu nedenle, bu sistemlerin özellikle büyük kesitli karayolu tünellerinde uygulanması sırasında sayısal, objektif değerlendirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu eksik ise, uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflamaları kullanılarak kapatılmaya çalışılmaktadır. Günümüz uygulamalarında en çok karşımıza çıkan ve bilinen iki yöntem; NATM (New Austrian Tunneling Method - Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) ve ADECO-RS (The Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils - Kaya ve Zeminlerde Kontrollü Deformasyon Analizi) adı verilen yöntemlerdir. Her iki yöntem de kaya kütle davranışını çeşitli şekillerde kategorize etmiş ancak bunun için objektif değerlendirmeye esas sınıflama altlığı oluşturamamıştır. Tünel tasarımının gerçekçi olarak yapılabilmesi için yerinde fiziksel modeller kullanarak gerçek verilerle test yapmak en doğru ancak pahalı seçenektir. Bu yöntemin pahalı ve zaman alıcı oluşu, bilgisayar ve yazılım endüstrisindeki gelişmelerle de beraber sonlu elemanlar veya sonlu farklar içeren bilgisayar yazılımlarının ortaya çıkışı, tünel tasarımında bu tarz yazılımlara olan ihtiyacı artırmıştır. Bu yazılımlar bir takım kabullerle çalışmakta olup, oluşturulan sayısal modelin doğru çalışabilmesi için kaya kütle davranışını sisteme tanıttıkları jeoteknik özelliklerin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Sağlam kaya numunesi için jeoteknik özelliklerin laboratuvar ortamında belirlenmesi oldukça kolayken, kaya kütle için aynı özelliklerin laboratuvar ortamında veya arazide belirlenmesi çok zordur. Bu nedenle gerek bir takım ampirik yaklaşımlar, gerekse uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflama yöntemleri aracılığı ile kaya kütlelerine ait jeoteknik özellikler belirlenerek sayısal modeller oluşturulmakta ve buna göre tünel tasarımı yapılmaktadır. Bu çalışmada, öncelikle geçmişten günümüze çeşitli

tünel açma yöntemlerine kısaca değinilmiş, yaygın kullanılan tünel açma yöntemlerinin uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflama sistemleri ve sayısal modeller ile olan ilişkisi ve uygulamada yaşanan sorunlar anlatılmıştır. Uygulamada; kaya kütle sınıflamalarından tünel kazı ve destek sınıflarına geçiş, bunların sayısal modellere yansıtılması, yapılan kabuller ve özellikle sayısal modelleme sırasında yazılımların dayandığı kabullerden kaynaklanan mühendislik jeolojisi modelleme hataları çeşitli örneklerle anlatılarak, gerçeğe en yakın tasarım için yapılması gerekenler basit bir uygulama örneği ile açıklanmaya çalışılmıştır.

## TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

### Klasik Yöntemler (18. - 19. Yüzyıl)

Alman, Amerikan, Avusturya, Belçika, İngiliz, İtalyan ve Osmanlı tünel açma yöntemleri bu grupta sayılabilir ve 19. yüzyılın son yarısına kadar madencilikte yaygın olarak kullanılmışlardır (Tonon, 2010; Brierley, 2014 Wikipedia, 2015). Kazı, elle veya basit kazıcı araçlarla yapılmakta, destekleme için çoğunlukla kalın, dayanıklı keresteler kullanılmakta, pasa ise küçük taşıyıcı arabalar veya buharlı taşıma araçları ile atılmaktadır. Kazılar çoğunlukla parçalı olacak şekilde çok aşamalı yapılmakta ve yukarıdan aşağıya doğru inmektedir. Her kazı aşamasının tamamlanmasını takiben destekleme yapılmakta veya önce destekler çakılarak araları kazılmaktadır. Günümüzde bu yöntemlerin terkedilmiş olmasına rağmen, bilinen bazı büyük tüneller bu yöntemler kullanılarak açılmıştır (Brierley, 2014). Bu yöntemler büyük oranda birbirlerine benzemekle birlikte bunlardan bazıları aşağıda kısaca anlatılmıştır.

### Alman Tünel Açma Yöntemi (Göbek Alma)

Tabandan yukarı doğru birbirini izler şekilde açılan bir seri kutu galeri ve onların desteklemesinden oluşan bir sistemdir (Şekil 1). Galerilerin açılması, kazı ilerlemesi sırasında karşılaşılabilecek birimler hakkında da bilgi sahibi olmayı kolaylaştırır. Bu yöntemde öncelikle kaplama için bir temel oluşturulduktan sonra duvar şeklinde bir kaplama sağlamı yerleştirilir ve daha sonra merkez boşaltılır, bu şekilde yan duvarlardan gelebilecek aşırı yüklere de engel olunmuş olur (Tonon, 2010).

### Avusturya Tünel Açma Yöntemi (Çapraz-Sürgü)

Bu yöntem üstyarının üst kesiminde (tacında) taban merkezine oturan sağlam bir yapı gerektirir. Daha sonra tam ayna kazısı için kereste desteklemesi, kazı çevresine boyuna doğrultuda kazılan alanı örtecek şekilde yerleştirilmiş olan kereste desteklerle merkezdeki sağlam çekirdek destek arasına yerleştirilir. Bu yöntem yüksek zemin basınçlarına dayanabilir, ancak yüksek dayanımlı çok miktarda kereste gerektirir (Tonon, 2010).

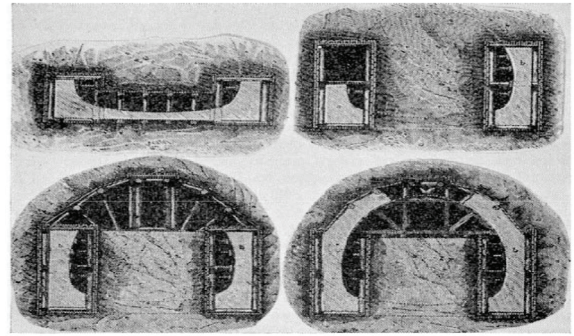
### İngiliz Tünel Açma Yöntemi (Taç-Sürgüsü)

Üstyarının orta kesiminden kazıya başlanan bu yöntemde, orta kesimin kazısı tamamlandıktan sonra buraya kereste destekler konulmakta, kereste desteklerin üst tarafı tünel içi kaplamayı desteklerken, alt bölümü üstyarı kazısının orta kesimine bastırılmaktadır (Şekil 2). Üstyarı kazısı ilerledikçe ilave destekler bu kesimde kazı çevresi boyunca dikilmekte ve ilave destekler konuldukça zemin kazısı yapılabilmektedir. Bu sistem kereste kullanımından dolayı ekonomiktir

ve tam ayna kazısına izin vermektedir, ayrıca birçok zemin koşulunda da uygulanabilmektedir. Ancak, düşük örtü yükü olmadığı takdirde uygulanması zordur (Tonon, 2010).

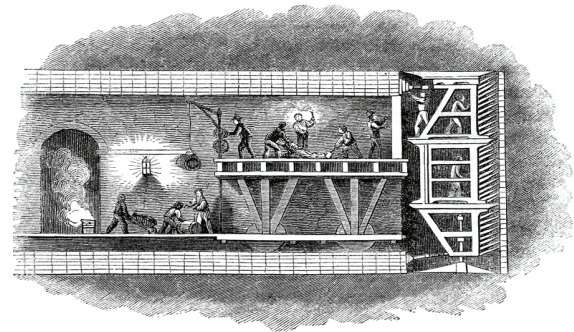
### Amerikan ve İtalyan Tünel Açma Yöntemleri

Tünelciliğin yakın tarihine bakıldığında Amerikan ve İtalyan (Şekil 3) yöntemlerinin yukarıda sözü edilen yöntemlerin aksine tam ayna kazısına yakın bir şekilde büyük kesitte kazı yaparak ilerleme sağladıkları, bunun için de kazı boşluğunu hemen doldurdıkları (tuğla veya taş ile) ve bu şekilde tünel stabilitesini sağladıkları görülmektedir (Tonon, 2010).



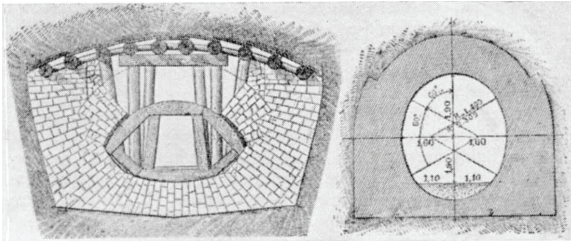
Şekil 1. Alman tünel açma yöntemi.

Figure 1. The German tunneling method.



Şekil 2. İngiliz tünel açma yöntemi.

Figure 2. The English tunneling method.



Şekil 3. İtalyan tünel açma yöntemi.

Figure 3. The Italian tunneling method.

### Günümüzde Kullanılan Yöntemler

Günümüzde yaygın olarak kullanılan iki tünel açma yöntemi ise NATM ve ADECO-RS yöntemlerdir. Ayrıca bunlardan başka, daha çok kazı yöntemi olarak adlandırılabilir; del-patlat, aç-kapa, mekanik kazı, tünel açma makinası ile kazı vb. gibi yöntemler de mevcuttur. Bunlardan, yukarıda anlatılan yöntemlere hemen hemen benzer ancak farklı bir felsefeye sahip olan iki yöntem (NATM ve ADECO-RS) kısaca değinilmiştir.

### NATM

Bu yöntem ilk defa Rabcewicz tarafından 1962’de ortaya atılmış, ancak 1964’te yaygın hale gelmiştir. Özellikle Avusturya Alpleri’nde elde edilen deneyimlerden ortaya çıkan yöntemin, ilk uygulaması 1969’da Frankfurt metro inşaatında olmuştur. Yöntemin ana felsefesinin altında iki unsur yer almaktadır. Bunlardan ilki; yeraltı kazısında kazılan kayayı desteklemek yerine güçlendirmek, yani çevre kayacın bir miktar rahatlamasına izin vererek, ilk kazıdan sonra ortaya çıkan yüksek basınçları taşımak yerine, çevre kayayı, uygulanan güçlendirme elemanları ile güçlendirerek kendi kendini taşımasını sağlamaktır. Bunu da sağlamanın en rahat yolu kazı sonrası esnek bir kaplama yaparak

(püskürtme beton) deformasyonlara bir miktar izin vermek ve daha sonra kaya bulonları ile güçlendirmektir. Diğer önemli felsefesi ise; özellikle zayıf kaya koşullarında kazıyı farklı küçük kesitlerde yaparak bölümlendirmektir (Rabcewicz, 1964). Rabcewicz’in felsefesi dinamik bir projelendirme esasına dayanmakta olup, kazı sonrası çevre kaya davranışını izleyerek deformasyon karakteristiklerine karşı aksiyon geliştirme esasını içermektedir. Bu yöntem, kaya kütle davranışını sınıflandırmak için her ne kadar çeşitli kaynaklarda kaya veya kazı sınıflarını A, B, ve C ile ifade edilen harflerle sınıflandırmış (KTSŞ, 2013) olsa da, bu sınıflandırma oldukça subjektif olduğu için kendisine sayısal bir altlık oluşturma ihtiyacı duymuş, bu açığı da uygulamada RQD (Deere, 1963), RMR (Bieniawski, 1989), GSI (Hoek ve Brown, 1997) ve Q (Barton, 2002) gibi uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflandırma sistemlerini kullanarak yapmaya çalışmıştır.

### ADECO-RS

Günümüzde tünel açmak için kullanılan bir diğer yöntem de Türkçe’ye, “Kaya ve Zeminlerde Kontrollü Deformasyon Analizi” şeklinde çevrilebilen ADECO-RS adlı yöntemdir. Lunardi tarafında ortaya atılan bu yöntemde, aşamalı kazının tünelcilik açısından doğru bir yöntem olmadığı, bunun yerine tam ayna kazısı yapılması gerektiği ifade edilmiş ve tam ayna kazısı sonrası 3 farklı kaya davranışı tanımlanmıştır. Bunlar; kopma veya blok düşmesi, aynanın şişmesi veya ayrılması ve akan zemin şeklindedir. Lunardi’ye göre ayna mutlaka desteklenmelidir. Çünkü tünel aynasının davranışı ve hareketi arkası için anahtar görevi görmektedir. Özellikle sıkışan zemin koşullarında, kazı-ayna davranışının anlaşılması, başarılı bir şekilde

tünel kazısı yapabilmeyenin sırrıdır. Bu yöntemle göre, deformasyonlar bir kez başladıktan sonra durdurulamayacağı için, tünel içi deformasyonlara çok fazla izin vermeden destekleme yapılması önerilmektedir. (Lunardi, 2008).

## **KAYA SINIFLAMA SİSTEMLERİNİN SAYISAL MODELLER VE TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ İLE İLİŞKİSİ**

Tarihsel gelişiminden ve yukarıdaki örneklerden de görüleceği üzere esasen yeraltı kazıları için ortaya atılmış iki temel yöntem bulunmaktadır: parçalı veya bölümlendirilmiş kazı ve tam ayna kazısı. Bunlar dışında bu çalışmada çok fazla değinilmeyen delme-patlatma, makineli kazı veya TBM kazısı gibi yöntemler ise tünel açma yönteminden ziyade tünel aynasının kazı yöntemi olarak değerlendirilmelidir. Tüm tünel açma yöntemleri incelendiğinde, hepsinde; destekle ve kaz, ya da kazdıktan sonra destekle şeklinde bir ortak payda olduğu halde, bugüne kadar hiçbir sistemin kazılan kaya veya zemin ortamını değerlendirmek için bir yaklaşımı olmadığını görmekteyiz. Adı ister tünel açma yöntemi olsun, ister ayna kazı yöntemi, tüm yeraltı çalışmalarında mutlaka kazılan ortamın tanımlanması ve kazılacak ortam hakkında önceden fikir sahibi olunabilmesi yeraltı kazılarının ekonomisi ve başarısı için olmazsa olmaz bir husustur. Ancak tünelciliğin tarihsel gelişimine bakıldığında, ortaya atılan hiçbir yöntemde jeolojik-jeoteknik tanımlama yapabilecek bir altlık olmadığı rahatlıkla görülebilir. Bu nedenle tüm yöntemler yeraltı kazıları öncesinde detaylı jeolojik-jeoteknik araştırmalara ihtiyaç duyarlar. Bu çalışmalar neticesinde ise mühendislik jeolojisi modeli ortaya çıkarılabilmekte, saha etütlerinden elde edilen verilerle de kaya kütle

davranışları ile kaya kütlelerinin jeomekanik özellikleri belirlenebilmektedir. Bu noktadan hareketle kazılan ortamı tanımlamaya çalışan yaklaşımlar sadece girdi parametreleri açısından aşağıda açıklanmıştır.

## **Kaya Sınıflama Sistemleri**

Terzaghi'nin kaya sınıflama sistemi 1946'da ortaya atılmış ve kayaçları; sağlam, tabakalı, orta derece eklemli, bloklu veya kenetli, parçalı ve sıkışan kaya olarak gruplara ayırmıştır. Bu sınıflamada, sayısal olarak ifade edilebilecek bir girdi olmamakla beraber modern kaya sınıflama sistemlerinin temeli atılmıştır (Terzaghi, 1946).

Lauffer (1958)'de desteksiz açıklığın (son destek ile ayna arasında kalan desteksiz tavan açıklığı) ayakta kalma süresi arasında bir ilişki tanımlamıştır. Bu yöntem görece olarak sayısal veriler içerse de, kaya kütlelerini sınıflamaktan oldukça uzaktır ve birçok kez değişikliğe uğramıştır.

Günümüzde birçok uygulamada sıklıkla kullanılan ve aynı zamanda diğer sınıflama sistemlerinin girdisi de olan ve Deere tarafından önerilmiş olan RQD (Rock Quality Designation – Kaya Kalite Göstergesi) sistemi, NW büyüklüğündeki (54,7 mm) sağlam karot numunelerinden boyu 10 cm ve büyük olanlarının toplam manevra boyuna oranını ifade eder (Deere, 1963). Bu yöntem oldukça sayısal ve objektif bir tanımlama yöntemi olmakla beraber sadece kayanın sürekliliği ve masifliği hakkında bilgi verir ve doğru konumlandırılmamış yetersiz sondaj yapılması durumunda anizotropik koşulları göz ardı eder. RQD sonuçlarının doğru değerlendirilebilmesi için, en azından birbirine yeterli mesafede konumlandırılmış aynı eksen

üzerinde ve tünel eksenine ve tabakalanmalara çeşitli yönlerde dik doğrultuda 3 adet sondaj yapmak gereklidir.

Wickham RSR (Rock Structure Rating – Kaya Yapı Sınıflaması) sistemini önermiştir (Wickham vd., 1979). Bu sistemde RSR puanını jeolojik yapı, geometri ve yeraltısuyu koşullarına ait değerlendirmeden elde edilen puanların toplamı oluşturur. Oldukça başarılı, sayısal olarak ifade edilebilen ve objektif bir yöntem olmasına rağmen, kaya ortamını aydınlatmaya yetecek kadar detaylı bir sistem değildir. Ancak modern kaya kütle sınıflama sistemlerinin temelini atmıştır.

Bieniawski ilk kez 1976 yılında önerdiği sistemde; kayanın tek eksenli basınç dayanımı, RQD değeri, süreksizliklerin açıklığı, süreksizliklerin durumu, yeraltısuyu koşulları ve süreksizliklerin konumuna bağlı olarak bir puanlama yaparak kaya kütlelerini 5 sınıfa ayırmış ve buna bağlı olarak da kazı ve destek sistemleri önermiştir. Tünelcilik uygulamalarında süreksizlikler ile ilgili parametreler dışında kazı öncesinde diğer parametreler hakkında oldukça objektif fikir sahibi olunabilen bu sistemde, süreksizliklerin durumu ile ilgili değerlendirmeler yapılırken mostra veren kesimler değerlendirmeye alınabilmekte ancak, süreksizliklerin devamlılığı ve yüzey koşullarının derinlerdeki durumu tünel kazısı başlamadan önce sağlıklı bir şekilde değerlendirilememektedir (Bieniawski, 1989).

Barton, Q adı verilen bir sistemi ortaya atmış, RQD, J<sub>n</sub> (eklem takım sayısı), J<sub>r</sub> (eklem pürüzlülük puanı), J<sub>a</sub> (eklem alterasyon puanı), J<sub>w</sub> (su azaltma faktörü veya su durumu) ve SRF (gerilim azaltma faktörü) punlarının birbirlerine oranlarının çarpımından elde edilen bir puan ve buna bağlı olarak destekleme önerilerinde bulunmuştur (Barton vd., 1974). Kağıt üzerinde oldukça sayısal

görünen bu sistemin arazide tüneller açısından, özellikle eklemelerle ilgili değerlendirmelerin yapılabilmesi için çeşitli kısıtları bulunmaktadır. Bu sistemin en büyük kısıtlarından biri RMR'de olduğu gibi süreksizliklerin derinlere indikçe yüzey koşullarının durumu ile devamlılıkları hakkında net değerlendirme yapma güçlüğü ve SRF ile ilgili puanlama yapılırken, uygulamada yerinde ölçümler yapılmamasından ötürü bu değerinin tahmine dayalı ve hatalı belirlenmesidir. SRF değerinin yüksek seçilmesi Q puanını önemli ölçüde düşürmektedir (Barton, 2002).

Hoek tarafından ortaya atılmış olan GSI sistemi ise tüm bunlardan daha subjektif ve neredeyse tamamen görsel değerlendirmeye dayanan bir sistemdir (Hoek ve Brown, 1997). Sönmez ve Ulusay ise bir miktar daha bu sistemi sayısal hale getirmişlerdir. Özellikle tünel kazı aynasının puanlanması açısından uygulama kolaylığı sağlayan pratik bir sistemdir. Bu sistem daha çok görsel ölçüm ve değerlendirmeye dayalı olduğu için, tünel proje tasarımında özellikle tünel kazısı öncesi uygulanması, tünel kazı aynasının gerçek durumunun gözlenememesi nedeni ile önemli hataları beraberinde getirebilmektedir (Sönmez ve Ulusay, 2002).

Günümüzde yakın zamanda önerilen en güncel sistem ise RMQR adı verilen ve Aydan vd. (2014) tarafından önerilmiş kaya sınıflama sistemidir. Bu sistemde de ayrışma derecesi, süreksizlik set sayısı, süreksizlik açıklığı veya RQD değeri, süreksizlik koşulları, yeraltısuyu akış durumu ve yeraltısuyu emilme koşulları olabildiğince sayısallaştırılarak puanlanmaya çalışılmış ama subjektiviteyi tam olarak ortadan kaldıramamıştır. Bu sistemde de süreksizliklerin derinlere doğru devamında yaşanacak değişimlerin, tünel tasarımı açısından ortaya konamaması ve gerçek tünel kazı aynasının

durumunun ancak kazı sırasında görülebilmesi sistemin uygulama güçlüğü olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bir önceki bölümde açıklanan tünel açma yöntemleri ayrıntılı olarak incelendiğinde, hiçbirisinin burada bahsedilen kaya sınıflandırma sistemleri ile organik bir bağı olmadığı ancak, yeraltındaki koşulları tanımlayabilmek ve kazı destek sınıfının belirlenebilmesi için bir şekilde kaya sınıflamasına ihtiyaç duyduğu görülecektir. Özellikle günümüzde yaygın bilinen NATM ve ADECO-RS sistemlerinin bu tanımlamalara daha çok ihtiyaç duyduğu ve kaya sınıflaması altlığı olmadan sadece bu yöntemlerin önerdiği altlıklarla uygulama yapmanın oldukça güç olduğu görülecektir.

### **Tünel Projelendirilmesinde Kullanılan Sayısal Yöntemler**

Tünel projelendirmesinde fiziksel modeller kullanmanın ekonomik ve fiziksel güçlükleri ile gelişen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan ileri düzeyli bilgisayar yazılımları, yeraltı kazısının yapılacağı ortamı gerçeğe yakın bir şekilde modelleyerek, kazı sırasında ortaya çıkabilecek kaya davranışları ile olası sorunları öngörme ve bunlara çözüm üretebilme yeteneğine sahiptir. Bu yazılımlar, sonlu farklar, sonlu elemanlar, ayrık elemanlar adı verilen bir takım nümerik yaklaşımlarla çalışmakta ve yeraltı kazısı yapılacak ortamla ilgili olarak kayanın jeoteknik parametrelerine ihtiyaç duymaktadır. Ancak mühendislik projelerinin tasarımında kullanılan tüm bilgisayar yazılımları bir takım kabullerle çalışmaktadır. Örneğin kazı yapılacak ortamı homojen ve izotrop kabul etmekte veya eğer ölçülebiliyorsa (ki bu çok zordur) anizotropiyi sisteme tanıtmayı beklemektedirler. Bunların yanında kaya kütlesine ait bir takım

parametrelerin de deneysel tespiti çok zor veya pahalı olduğundan ülkemiz koşullarında ampirik yöntemlerle bulunarak sisteme tanıtılmaktadır. Ayrıca uygulamada kazı, hafriyat ve destekleme süreçleri de bu tarz yazılımlarda olduğu kadar hızlı ve rahat olamamaktadır. Böylesi bir durumda, bu parametrelerin hatalı veya eksik belirlenmesi de tasarım aşamasında öngörülemeyen ancak uygulama aşamasında ortaya çıkacak önemli sorunlara sebep olmaktadır. Nümerik modelleme yazılımlarının ihtiyaç duyduğu jeoteknik ve diğer parametreleri ve bunların elde edilme yöntemleri aşağıda bir çizelge halinde özetlenmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1'e bakıldığında oluşturulacak sayısal modelin başlıca 3 tip kaynaktan veri sağladığı görülecektir. Bunlar: jeolojik-jeoteknik saha çalışmaları ve mühendislik jeolojisi modelleri, laboratuvar deneyleri ve ampirik yaklaşımlardır. Bu veriler ise kendi içinde birbirlerine veri sağlar niteliktedir. Dolayısı ile yetersiz ve hatalı saha çalışması neticesinde sayısal model için ilk girdi niteliğinde olan mühendislik jeolojisi modelinin hatalı kurulması, saha çalışmasından elde edilen verilere uygulanan laboratuvar testleri sonucunun da hatalı veya eksik belirlenmesine neden olacaktır. Böylece, bunların her ikisini de kendisine veri olarak kullanan ampirik yöntemlerden elde edilecek verilerde hatalı olacaktır. Bazı kabullerle çalışan sayısal model yazılımları bu verileri kullandığında, gerçek durumdan uzak sonuçlar elde edilebilecektir. Buraya kadar yapılan açıklamalardan da görüleceği üzere ister NATM, ister ADECO-RS veya önceki bölümlerde sözü edilen yöntemler olsun, tüm yöntemler kazı yapılan ortamı sınıflandırmaya ve jeoteknik özelliklerini tanımlamaya ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle mühendislik jeolojisi modeli doğru kurulmalı ve ihtiyaç duyulan tüm arazi etütleri eksiksiz yapılmalıdır.



Çizelge 1. Nümerik modellerin ihtiyaç duyduğu girdiler, bunların elde edilme yöntemi ve modele etkisi.

Table 1. The input parameters, which are required by numerical models, their obtaining methods and effects to numerical models.

Parametre adı	Elde edilme yöntemi	Etkisi
Litolojik tanımlama ve istifsel ilişki	Jeolojik - Jeoteknik saha çalışması, müh. jeo. modeli	Doğrudan
Ayrışma, dayanım, pürüzlülük	Jeolojik - Jeoteknik saha çalışması	Dolaylı
Süreksizlik set sayısı, uzunluğu, açıklığı, dolgusu	Jeolojik - Jeoteknik saha çalışması, müh. jeo. modeli	Doğrudan, dolaylı
RQD	Jeolojik - Jeoteknik saha çalışması	Dolaylı
Yeraltısuyu koşulları	Jeolojik - Jeoteknik saha çalışması, müh. jeo. modeli	Doğrudan
Kaya kütle sınıflama puanı (RMR, Q, GSI, GSI <sub>r</sub> )	Jeolojik - Jeoteknik saha çalışması, müh. jeo. modeli	Doğrudan, dolaylı
Dayanım deneyleri (UCS, TCS, PLT vb.)	Laboratuvar deneyleri	Doğrudan, dolaylı
Sağlam kayanın elastisite modülü (E <sub>i</sub> )	Laboratuvar deneyleri	Doğrudan
Kaya kütlelerinin deformasyon modülü (E <sub>m</sub> )	Ampirik yöntemler	Doğrudan
Sağlam kayanın C, Φ, γ, ν, UCS	Laboratuvar deneyleri	Doğrudan
Kaya kütlelerinin C, Φ, γ, ν, UCS	Ampirik yöntemler	Doğrudan
Süreksizliklerin C, Φ	Ampirik yöntemler	Doğrudan
σ <sub>v</sub> , σ <sub>h</sub>	Ampirik yöntemler veya arazi deneyleri	Doğrudan

\*UCS: Tek eksenli basınç dayanımı, TCS: Üç eksenli basınç dayanımı, PLT: Nokta yükleme deneyi

Bunun için öncelikle tünel güzergahı üzerinde jeofizik etütler yapılarak kritik ve farklılaşan kesimler saha jeolojisi çalışmaları ışığında değerlendirilmeli, bu doğrultuda farklılıkları veya devamlılıkları tanımlamaya ihtiyaç duyulan kesimlerde tünel eksenine dik, birbiri ile aynı doğrultuda ve mühendislik jeolojisi kesiti çıkarmaya yeterli sayıda jeoteknik sondaj planlanmalı, bu sondajlardan elde edilen tüm numuneler için, tecrübeli bir

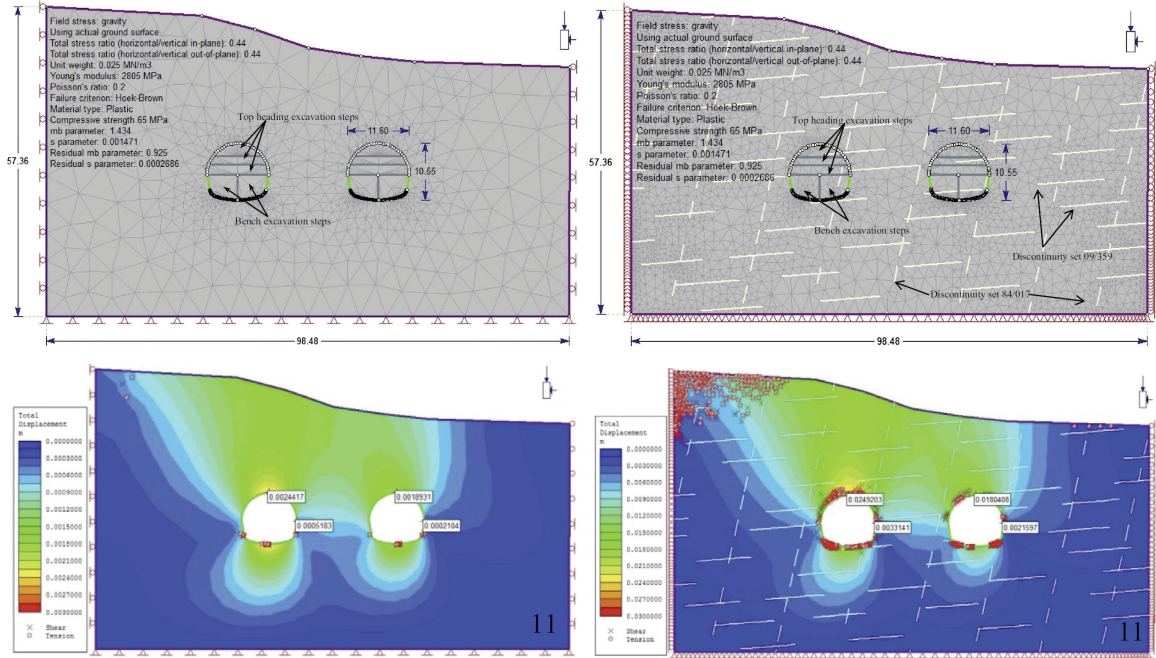
jeoloji mühendisinin gözü ile ihtiyaç duyulan laboratuvar deneyleri programlanmalıdır. Daha sonra, kazı yapılacak ortamın mühendislik jeolojisi özellikleri ve laboratuvar verileri doğrultusunda kaya kütle davranış tipi (yenilme davranışı modeli) belirlenmeli ve ihtiyaç duyulan sayısal modelleme yöntemi seçilerek (sonlu elemanlar, ayırık elemanlar, sonlu farklar vb.) sayısal model oluşturulmalıdır.

### Örnek uygulama

Kaya kütlelerine ve modele ait tasarım parametreleri şekil üzerinde verilen (Şekil 4) orta dayanımlı kristalize kireçtaşı ara katkılı kumtaşı-silttaşı araldanmasından oluşan ve tüm mühendislik koşulları aynı iken, süreksizliklerin modele eklenmesi sonucu ortaya çıkan farklılıklar sayısal model üzerinde gösterilmiştir. Verilen bu örnekte sonlu elemanlar yaklaşımı ile çalışan bir yazılımda, arazide ölçülmüş sistematik süreksizlik setlerinin etkisi gerçeğe en yakın şekilde 5 farklı kazı adımı ile modellenmiştir. Arazideki gerçek kazı koşullarını yansıtabilmek için üstyarı ve altyarı kazısı şeklinde tünel ikiye bölünmüştür. Üstyarıda kazı aynası yukarıdan aşağıya 3 aşamada tamamlanmış, altyarı kazısı ise üstyarı kazı aynasına, uygulamada olduğu gibi erişimi sağlayabilecek şekilde 2 aşamada tamamlanmıştır. Bu şekli ile sağ ve sol tüp için tüm kazılar modelde 11 model adımında tamamlanabilmiştir. Modelde kaya kütlesi, süreksizliklerin sürekli ve oldukça sıkı oluşu nedeni ile Hoek-Brown yenilme davranış modeli ile açıklanmıştır. Modellemede kullanılan tüm parametreler Şekil 4 üzerinde verilmiştir. Aynı tünelin aynı kesimine ait iki farklı sayısal modelleme sonucunda, ilk modelde arazide tespit edilen süreksizlik setleri dikkate alınmamış ve bu şekilde elde edilen deplasman değerleri desteksiz durumda bile 2 mm mertebesinde kalmıştır. Süreksizlik setlerinin dikkate alındığı ikinci modelde ise deplasman değeri arazi verilerine de uyumlu şekilde 2.5 cm mertebelerine ulaşmıştır (Satici ve Ünver, 2015). Şekil 4'e bakıldığında, süreksizliklerin sisteme dahil edilmediği, sadece kaya kütlelerinin dayanım özelliklerinin kazı sonrası ortaya çıkan örselenme ile azaltıldığı durumda deformasyonlar yok denecek kadar azken (hiç destek elemanı kullanılmamasına

rağmen), süreksizliklerin de sisteme dahil edildiği durumda, destek sistemi olmaması halinde katastrofik sonuçlar doğabileceği açıkça görülmektedir.

Genellikle sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan yazılımlarda, çevre kayacın mühendislik özellikleri belli bir oranda azaltılarak süreksizlikler gibi yapısal bozuklukların etkisi modele yansıtılmaya çalışılmakta, süreksizlikler nedeni ile heterojen ve anizotropik yapıda olan kaya kütlelerinin mühendislik parametreleri, belirlenen bir azaltma oranı ile çarpılarak homojenize edilmeye çalışılmaktadır. Oysa bu şekilde devamlılığı olan süreksizliklerden dolayı gelişmiş olan süreksiz ortam ve bunun neden olacağı anizotropik koşullar göz ardı edilmiş olacaktır. Süreksizlikler içeren kaya kütleleri modellenirken ya ayrık elemanlar tarzı süreksiz ortam mekaniği mantığı ile çalışan (Jing ve Stephansson, 2007; Wu vd., 2014) yazılımlar kullanılmalı ya da sonlu elemanlar yazılımı aşağıdaki örnekte olduğu gibi arazide ölçülebilen sistematik süreksizlikleri ile birlikte modellenmelidir. Bu şekilde sistematik olmayan süreksizlikler gerçekçi olarak modellenemese de, sistematik süreksizlik setleri bir ölçüde sayısal modellere yansıtılmış olmaktadır. Bu nedenle mümkün olduğunca sayısal modelleme yapılırken, kabuller yapmadan kaçınılmalı, mühendislik jeolojisi modeli doğru kurulmalı, kaya kütle parametreleri gerçeğe en yakın şekilde seçilmeli ve arazi koşulları olabildiğince gerçekçi olacak şekilde modele yansıtılmaya çalışılmalıdır. Kaya kütlelerine ait arazi verileri sayısallaştırılabildiği ölçüde de subjektif tanımlamalardan uzaklaşılacak, zaten doğası gereği kaotik olan yer ortamı bir miktar daha objektif ve ölçülebilir bir hale gelmiş olacaktır.



Şekil 4. Aynı tünelin aynı kesimine ait iki farklı sayısal modelleme sonucu, modellerden birinde arazide tespit edilen süreksizlik setleri dikkate alınmamış ve deplasman değerleri 2 mm mertebesinde kalmıştır. Süreksizlik setlerinin dikkate alındığı modelde ise bu değer arazi verilerine uyumlu şekilde 2.5 cm mertebelerine ulaşmıştır (Satici ve Ünver, 2015).

Figure 4. Two different numerical model results for the same tunnel and for the same sections. On the left, observed and measured discontinuities were neglected and the final displacement is obtained as about 2 mm. On the right, displacements are reached to 2.5 cm when discontinuity sets are added the model (Satici and Ünver, 2015).

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuçlar göstermektedir ki, bugüne kadar önerilmiş tüm tünencilik yöntemlerinin temelinde “ya önce kazıyı yap sonra destekle, ya da destekledikten sonra kazıyı tamamla” gibi basit bir mantık yatmaktadır. Önerilen yöntemler içinde sadece Rabcewicz’in ortaya attığı “yeraltında yapılan kazıyı desteklemek yerine ortamı güçlendir. Bunun için de önce bir miktar deformasyona izin ver.” bakış açısı önemli bir adımdır. Bu temel dışında hemen hemen

tüm yöntemler birbirine çok yakın mantıklarla hareket etmekte ve sadece uygulayıcılarının ismini almaktadır. Önerilen yöntemin adı ne olursa olsun, kazısı yapılacak ortamın doğru ve eksiksiz tanımlanarak özelliklerinin belirlenmesi ve bunun sonrasında elde edilen sonuçların tasarım yapabilmek için uygun şekilde sayısal modele aktarılması gerekmektedir. Sayısal modelmeden elde edilen sonuçlar tünel kazısı sırasındaki gerçek ayna kazı ve deformasyon kayıtları ile kazı sırasında sürekli karşılaştırılarak

proje öngörülerinde sapma olan yerlerde gerekli revizyonlar yapılmalıdır. Tünel kazısı sırasında aynalarda mutlaka ölçümler yapılarak kaya kütle sınıfları belirlenmeli ve bunlar sayısal ortamda arşivlenmelidir. Oluşturulan sayısal modelin başarısı ve gerçeğe uygunluğu tünel kazısı sırasında ihtiyaç duyulan proje revizyon önerilerinin azlığı ile ölçülmelidir. Unutulmamalıdır ki her bilgisayar yazılımı, kendi yazılım mantığı içinde hareket edip veri girişi yapılan, her durumda kullanıcıya, yanlış ya da doğru, mutlaka bir sonuç verecektir. Daha çok kabule dayanan, hatalı ve eksik veri girişi durumunda ise elde edilen sonuçlar sadece renkli ve görsel güzelliği olan birer bilgisayar çıktısı olacaktır. Bu nedenle tünel tasarımında harf kategorizasyonlu sübjektif sınıflandırmalar yerine daha objektif, mühendislik jeolojisi, jeoteknik ve deformasyon tahmin verilerine ve beklenen deformasyonlara bağlı, kazı sırasında yapılan yerinde ölçümlerle gerektiğinde tekrar modellemeye dayanan ve neticesinde destek sistemini yeniden tasarlayabilecek etkileşimli bir yöntem kullanılmalıdır. Galileo Galilei'nin de dediği gibi jeoloji mühendisleri olarak amacımız, "Ölçülebilir olanı ölçmek, ölçülemeyeni de ölçülebilir hale getirmek olmalıdır. Çünkü doğanın dili matematiksel bir ifade ile yazılmıştır".

## KAYNAKLAR

- Aydan, Ö., Ulusay, R., Tokashiki, N., 2014. A new rock mass quality rating system: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47 (4), 1255-1276.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6, 189-239.
- Barton, N., 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 185-216.
- Brierley, G., 2014. <http://tunnelingonline.com/tunneling-historical-perspective/>
- Bieniawski, Z. T., 1989. Engineering rock mass classification. Wiley, New York, 251 p.
- Deere, D. U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes in Rock mechanics and engineering geology. Springer, Vienna.
- Hoek, E., Brown, E. T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34 (8), 1165-1186.
- Jing, L., Stephansson, O., 2007. Fundamentals of discrete element methods for rock engineering: theory and applications. *Developments in Geotechnical Engineering*, 85.
- KTŞ, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi, Bölüm 350.
- Lauffer, H., 1958. Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau. *Geology Bauwesen*, 74 (1), 46-51.
- Lunardi, P., 2008. Design and Construction of Tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils. Springer, 576 p.
- Rabcewicz, L., 1964. <http://www.eos.ubc.ca/courses/eosc547/lecture-material/Rabcewicz-NATM.pdf>
- Satıcı, O., Ünver, B., 2015. Assessment of tunnel portal stability at jointed rock mass: a comparative case study. *Computers and Geotechnics*, 64, 72-82.
- Sönmez, H., Ulusay, R., 2002. A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modification

- to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri Dergisi*, 26, 77-79.
- Terzaghi, K., 1946. Rock defects and loads in tunnel supports, Rock tunneling with steel supports, The Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio, 17-99.
- Tonon, F., 2010. Sequential excavation, NATM and ADECO: What they have in common and how they differ. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, 245–265.
- Wickham, G. E., Tiedemann, H. R., Skinner, E. H., 1972. Support determination based on geologic predictions. In Lane, K.S.; Garfield, L.A. Proc. 1st North American Rapid Excavation&Tunnelling Conference (RETC), Chicago 1. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York. 43–64.
- Wikipedia, 2015. [http://tr.wikipedia.org/wiki/Lağımçı\\_Ocağı](http://tr.wikipedia.org/wiki/Lağımçı_Ocağı) (Son Erişim: 25 Mayıs 2015)
- Wu J. H., Ohnishi, Y., Nishiyama, S., 2014. Simulation of the mechanical behavior of inclined jointed rock masses during tunnel construction using discontinuous deformation analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 41, 731–743.