

SAYISAL MODELLEME YÖNTEMİYLE RMR SİSTEMİNCE ÖNERİLEN TAHKİMAT SİSTEMLERİNİN ANALİZİ

THE ANALYSIS OF THE SUPPORT SYSTEMS PROPOSED BY THE RMR SYSTEM USING NUMERICAL MODELING

Ertuğrul KARAKAPLAN*

Hakan BAŞARIR**

ÖZET

RMR sınıflama sistemi yeraltı açıklıklarının tahkimat tasarımında yaygınlıkla kullanılmaktadır. Sistem aynı kalite kaya kütlelerinde farklı derinliklerde oluşturulacak açıklıklar için herhangi bir fark gözetmeksizin aynı tahkimat sistemi önerisinde bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı varsayılan farklı gerilme koşulları altında aynı kalitede kaya kütlesi için RMR sistemince önerilen tahkimat sistemlerinin performanslarının sayısal modelleme tekniği kullanılarak değerlendirilmesidir.

Literatürde yer alan farklı araştırmacılar tarafından yapılmış olan proje sonuçları incelenerek orta ve zayıf kalitede kaya kütlesi örnekleri saha verisi olarak seçilmiştir. Derlenen bilgiler kullanılarak örneklerin sayısal modelleri oluşturulmuş ve araştırmacıların elde ettiklerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonraki aşamada farklı derinlik değerleri varsayılarak gerilme koşulları değiştirilmiştir. Sayısal olarak modellenen açıklıklara RMR sistemince önerilen tahkimat sistemleri iç basınç cinsinden uygulanmış ve varsayılan farklı gerilme koşullarında açıklıklar etrafındaki gözlemlenen deformasyonlar kaydedilmiştir. Yaygınlıkla kullanılan limit birim deformasyon değerlerinden biri performans ölçütü olarak kullanılmış ve önerilen tahkimat sistemlerinin performanslarına ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: RMR sistemi, görgül tasarım, sayısal modelleme, tahkimat sistemi performans değerlendirimi.

ABSTRACT

RMR rock mass classification system is widely used to design support systems for underground openings. For the underground opening excavated in the same quality rock mass at different depths the system proposes same support system. The purpose of this study is to evaluate the performances of the support systems proposed by RMR system for the openings excavated in the same quality rock mass but under different stress conditions.

By using current literature and the results of projects conducted by different researchers fair and poor quality rock masses were selected as case studies. Using the collected information the numerical models of selected cases were constructed and similar results with the researchers were obtained. As a next step the in situ stress conditions were simulated by assuming different depths. The pressure of the support system proposed by RMR was applied to modelled openings in terms of internal support pressure and corresponding deformations were recorded. One of the most widely used critical strain values was used as performance criteria for the support systems and the performance of the proposed support systems were evaluated.

KEYWORDS: The RMR system, empirical design, numerical modelling, support system performance evaluation.

* Öğr.Gör., Pamukkale Üniv., Kale M.Y.O., Madencilik ve Maden Çık. Böl., DENİZLİ, ekarakaplan@pau.edu.tr
** Doç. Dr., Orta Doğu Teknik Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., ANKARA

GİRİŞ

Madencilik amaçlı yeraltında açılan galeriler, kuyular gibi geniş yeraltı açıklıklarının tasarımları karmaşık jeolojik ve jeoteknik özelliklerden dolayı oldukça güçtür. Yeraltı madencilik açıklıkları için kullanılan mühendislik tasarım yaklaşımları üç ana gruba ayrılabilir. Bunlar; görgül, sayısal ve analitik yaklaşımlardır.

Günümüzde kullanım kolaylığı nedeniyle görgül yöntemlerin uygulamacılar tarafından yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

Bu yöntemlerden birisi kaya kütle puanlama sistemidir (RMR). RMR sınıflama sistemi, Bieniawski (1974) tarafından geliştirilmiştir. Sistem Bieniawski'nin sedimanter kayalarda açılmış tünellerde yaptığı gözlem ve deneyimler esas alınarak geliştirilmiştir. Bieniawski (1989) tarafından 1973'ten 1989'a kadar tüneller, büyük yeraltı açıklıkları, maden işletmeleri ile ilgili toplam 351 farklı uygulamadan derlenen veriler ve kazanılan deneyimler çerçevesinde sisteme son şekli verilmiştir.

Sistemin girdi parametreleri kaya malzemesi dayanımı, kaya kalite belirteci (RQD), süreksizlik aralığı, süreksizlik yüzey durumu ve yeraltı suyu koşullarıdır. Her bir parametreye verilen puanların toplamı sonucunda temel RMR değeri elde edilir. Süreksizlik yönelimi düzeltmesi gibi gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra düzeltilmiş RMR değeri elde edilir. Bu elde edilen değere göre ise oluşturulacak olan galeri veya açıklık için tahkimat sistemi önerilir.

Sistemin orijinal hali yaygınlıkla kullanılmasına rağmen bazı araştırmacılar tarafından farklı düzeltme gereklilikleri belirtilmiştir. Bu düzeltmeler uygulamalarda yaygın olarak kullanılmamakla birlikte, gerilme düzeltmesi, patlatma düzeltmesi ve başlıca zayıflık düzlemleri düzeltmesidir (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Açıklık geometrisi, kaya özellikleri ve gerilmeler duraylılığı etkileyen en önemli parametrelerdendir. Ancak RMR sistemi aynı kaya kütlelerinde farklı derinliklerde dolayısıyla farklı gerilme koşullarında oluşturulacak açıklıklar için aynı tahkimat sistemi önermektedir. Bu çalışmanın amacı varsayılan koşullar altında RMR tarafından önerilen tahkimat sisteminin performansını artıran derinlikle veya değişen gerilme koşulları altında değerlendirilmesidir.

Belirlenen amaçlar doğrultusunda açıklık duraylılığı ve tahkimat performansı hakkında miktarsal

bilgiler verebilen ve yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi esaslı Phase² bilgisayar programı (Rocscience, 2009) ile varsayılan gerilme koşulları altında derlenen saha verileri kullanılarak çok sayıda hesaplamalar yapılmıştır.

Çalışmalar neticesinde RMR sisteminin önerdiği tahkimat elemanlarının performanslarının aynı kalitede kaya kütlelerinde farklı derinlik dolayısıyla gerilme koşulları için aynı olmadıkları belirlenmiştir.

1. KAYAÇ ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, daha gerçekçi yaklaşımda bulunabilmek amacı ile literatürden derlenen saha verileri kullanılmıştır. Çalışmaların ortak noktaları, kaya sınıflandırmasında ve tahkimat tasarımında RMR sisteminin kullanılmış olması, çoğu durum için kaya dayanım özelliklerinin belirlenmesinde GSI (Hoek ve ark., 1995) sisteminin kullanılmış olması ve sonlu elemanlar yöntemi esaslı yazılımlardan yararlanılmış olmalarıdır.

Üç farklı karayolu tüneli projesinden (Ghafoori ve ark., 2006; Sarı ve ark, 2008; Satıcı, 2007) elde edilmiş veriler saha verisi olarak kullanılmıştır. Bu verilere bağlı olarak hesaplanan dayanım ve deformasyon değerleri Phase² yazılımı için girdi olarak kullanılmıştır. GSI değerine ulaşamadığı durumlarda Hoek ve Brown (1997) tarafından önerilen $GSI=RMR_{95}-5$ ilişkisinden faydalanılmıştır. RMR ve GSI sistemleri arasındaki ilişkilere dair kapsamlı bir derleme çalışması Osgoui ve Ünal (2005) tarafından sunulmuştur.

1.1. Bilecik – İstanbul Karayolu (Osmangazi) Tüneli

Türkiye'nin Bilecik ilinde bulunan Osmangazi tüneli 12,5 m genişliğinde, 9,6 m yüksekliğinde olup yaklaşık 2,5 km uzunluğa sahiptir. Tünel boyunca yedi farklı kaya biriminden geçilmektedir (Sarı ve ark, 2008). Araştırmacılar tarafından sunulan farklı kaya birimlerine ait RMR, GSI, tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}), deformasyon modülü (E_p), Hoek sabiti (m_p), Poisson oranı (ν) değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Osmangazi Tüneli Kayaç Özellikleri (Sarı ve ark, 2008).

| Birim | RMR | GSI | σ_{ci} , MPa | E_p , MPa | m_i | ν |
|-------|-----|-----|---------------------|-------------|-------|-------|
| 1 | 37 | 27 | 3 | 3976 | 4 | 0,25 |
| 2 | 50 | 45 | 72 | 6905 | 12,79 | 0,28 |
| 3 | 55 | 50 | 90 | 8715 | 18,04 | 0,31 |
| 4 | 63 | 58 | 63 | 6698 | 22,68 | 0,30 |
| 5 | 66 | 61 | 81 | 7873 | 23,38 | 0,29 |
| 6 | 63 | 58 | 75 | 7675 | 20,83 | 0,32 |
| 7 | 65 | 60 | 85 | 7703 | 18,27 | 0,31 |

1.2. Mashhad – Kallat Karayolu (Kallat) Tüneli

İran'ın Mashhad ilinde bulunan Kallat tüneli 8 m genişliğe, 8,4 m yüksekliğe ve 725 m uzunluğa sahiptir. Tünel boyunca 3 farklı kaya kütesinden geçilmektedir (Ghafoori ve ark., 2006). Araştırmacılar tarafından sunulan tünel boyunca geçilen üç kaya birimine ait kaya özellikleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Kallat Tüneli Kayaç Özellikleri (Ghafoori ve ark., 2006).

| Birim | RMR | GSI | σ_{ci} , MPa | E_p , MPa | m_i | ν |
|-------|-----|-----|---------------------|-------------|-------|-------|
| 1 | 53 | 48 | 55 | 18000 | 28,78 | 0,30 |
| 2 | 46 | 41 | 45 | 19000 | 19,23 | 0,31 |
| 3 | 40 | 35 | 35,1 | 12000 | 10,48 | 0,32 |

1.3. Kavak – Merzifon Karayolu (Şehzadeler) Tüneli

Amasya ilinde bulunan Şehzadeler tüneli 12 m genişliğe, 9 m yüksekliğe ve 345 m uzunluğa sahiptir. Tünel boyunca dört farklı kaya biriminden geçilmektedir. Bu dört kaya birimine ait özellikler Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Şehzadeler Tüneli Kayaç Özellikleri (Satici, 2007).

| Birim | RMR | GSI | σ_{ci} , MPa | E_p , MPa | m_i | ν |
|-------|-----|-----|---------------------|-------------|-------|-------|
| 1 | 58 | 53 | 65 | 19000 | 17 | 0,3 |
| 2 | 43 | 38 | 45 | 10000 | 11 | 0,3 |
| 3 | 51 | 46 | 55 | 13000 | 9 | 0,3 |
| 4 | 34 | 29 | 10 | 10000 | 12 | 0,3 |

2. KAYA KÜTLE ÖZELLİKLERİ VE GERİLMELER

Sayısal modellemede kaya malzemesine ait gir-di değerleri Hoek ve ark. (2002) tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Açıklık geometrileri birbirlerine göre farklılıklar göstermektedir. Bu çalışmada sistematik analiz yapılabilmesi için, farklı şekilde açıklıkların dairesel olarak modellenebilmesine imkan veren eşdeğer çap yaklaşımı (Curran ve ark., 2003) kullanılmıştır. Benzer şekilde farklı türde tahkimat elemanlarının modellenebilmesi için eşdeğer tahkimat basınçları Carranza-Torres ve Fairhurst (2000) tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmış ve sayısal modele uygulanmıştır.

Osmangazi, Kallat ve Şehzadeler tünellerinde karşılaşılan kaya kütlelerine ait hesaplanan dayanım ve deformabilite özellikleri Çizelgeler 4, 5 ve 6'da verilmiştir.

Yatay gerilmelerin tahmini oldukça farklı ve zor bir işlemdir. Bu amaçla Hoek ve Brown (1980) dünya genelinde toplanan verileri analiz etmişlerdir. Bu analiz sonucunda yatay gerilmelerin sığ derinliklerde değişken olduğu daha derinlere inildikçe hidrostatik gerilme halini alma eğiliminde olduklarını belirlemişlerdir.

Bu çalışmada literatürde yer alan farklı çalışmalara benzer şekilde (Asef ve ark., 2000; Sari, 2007; Basarir, 2008; Basarir ve ark., 2010) Hoek ve ark. (1995) tarafından önerildiği gibi ilksel yaklaşım olarak yatay ve düşey gerilmelerin eşit olduğu varsayılmıştır. Bu yaklaşım geniş topografik gevşemelerin, büyük tektonik kuvvetlerin gözlemlendiği yerlerde değiştirilmelidir. Hidrostatik gerilme durumu varsayımı ile kayaç özelliklerinin ve tahkimat performanslarının sayısal modellemedeki etkileri daha açık olarak gözlenebilir. Düşey gerilmeler ise varsayılan derinliğin örtü tabakası birim hacim ağırlığı ile çarpımı ile elde edilmektedir (Hoek and Brown, 1980).

$$\sigma_v = \gamma * z \quad (1)$$

σ_v : Düşey gerilme, MPa

γ : Malzemenin birim hacim ağırlığı, MN/m³

z : Derinlik, m

Çizelge 4. Osmangazi Tüneli Kaya Kütle Özellikleri

| Kayaç Özelliği | Kaya birimi | | | | | | |
|---------------------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Kaya kütleinin deformasyon modülü [MPa] (E_m) | 121 | 878 | 1648 | 2389 | 3564 | 2738 | 3221 |
| Kaya kütleinin Hoek-Brown sabiti (m_b) | 0,15 | 0,89 | 1,51 | 2,53 | 2,90 | 2,32 | 2,19 |
| Kaya kütleinin Hoek-Brown sabiti (s_m) | 0,0002 | 0,0011 | 0,0019 | 0,0047 | 0,0065 | 0,0047 | 0,0058 |
| Birim ağırlık - MN/m ³ (γ) | 0,0263 | 0,0267 | 0,0268 | 0,0269 | 0,0269 | 0,0265 | 0,0263 |
| Derinlik, H, [m] | 30 | 50 | 215 | 275 | 280 | 300 | 280 |

Çizelge 5. Kallat Tüneli Kaya Kütle Özellikleri.

| Kayaç Özelliği | Kaya birimi | | |
|---------------------------------------------------|-----------------|---------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Kaya kütleinin deformasyon modülü [MPa] (E_m) | 3965 | 2397 | 1496 |
| Kaya kütleinin Hoek-Brown sabiti (m_b) | 0,4 | 0,15 | 0,05 |
| Kaya kütleinin Hoek-Brown sabiti (s_m) | 0,0002 | 0,00006 | 0,00005 |
| Birim ağırlık [MN/m ³] (γ) | 0,0241 - 0,0262 | 0,021 - 0,034 | 0,022 - 0,036 |
| Derinlik, H, [m] | 80-160 | 100-150 | 40-145 |

Çizelge 6. Şehzadeler Tüneli Kaya Kütle Özellikleri.

| Kayaç Özelliği | Kaya birimi | | | |
|---------------------------------------------------|-------------|--------|--------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Kaya kütleinin deformasyon modülü [MPa] (E_m) | 4280 | 1212 | 2210 | 790 |
| Hoek-Brown sabiti (m_b) | 1,28 | 0,316 | 0,38 | 0,135 |
| Hoek-Brown sabiti (s_m) | 0,0019 | 0,0002 | 0,0005 | 0,00002 |
| Birim ağırlık [MN/m ³] (γ) | 0,025 | 0,022 | 0,023 | 0,024 |
| Derinlik, H, [m] | 30-100 | 30-100 | 30-100 | 30 |

3. SAYISAL MODELLEME

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi esaslı yazılımlarından Phase² yazılımı (Rocscience, 2009) kullanılmıştır. Hazırlanan bir yama yazılım sayesinde sonlu elemanlar ile hesaplama yapan yazılımda kaya kütle özellikleri, gerilme değerleri gibi girdi değerlerinin değiştirilmesi ve istenilen noktalara ait okumaların alınması kolaylıkla yapılabilir.

Bu çalışmada üç farklı bölgedeki toplam 14 farklı kaya birimi özelliği kullanılmıştır. Her birim için farklı derinlik değerlerinde, tahkimatsız, eşdeğer tahkimatlı ve gerekli tahkimat basıncı analizi olmak üzere toplamda 462 farklı analiz yapılmıştır.

Galerilere uygulanacak tahkimat için RMR sisteminin önerdiği "Ön tahkimat seçimi kılavuzu" baz alınmıştır. RMR tarafından önerilen tahkimat elemanları sayısal modelde iç basınç olarak

uygulanmıştır. Kaya kalitesine göre değişen bu tahkimat elemanlarının iç basınç cinsinden uygulanabilmesi için söz konusu elemanlar tarafından üretilecek olan tahkimat basınçları Carranza-Torres ve Fairhurst (2000) tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Kullanılan eşitlikler aşağıda verilmektedir, yaygın kullanılan farklı türde tahkimat elemanlarının mekanik özellikleri gibi daha detaylı bilgi ve açıklamalar Carranza-Torres ve Fairhurst (2000) tarafından gösterilmektedir.

$$P_{sh}^{max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[1 - \frac{(R-t_c)^2}{R^2} \right] \quad (2)$$

P_{sh}^{max} : Püskürtme beton maksimum tahkimat basıncı (MPa)

σ_{cc} : Püskürtme betonun tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

t_c : Püskürtme beton kalınlığı (m)

R : Tahkimatin dış yarıçapı (m)

$$P_b^{max} = \frac{T_{bf}}{s_c s_l} \quad (3)$$

P_b^{max} : Kaya saplaması maksimum basıncı (MPa)

T_{bf} : Kaya saplaması maksimum taşıma kapasitesi (MPa)

s_c : Tünel kesitinde saplamalar arası çevresel uzaklık (m)

s_l : Tünel eksenli boyunca saplamalar arası uzaklık (m)

$$P_{st}^{max} = \frac{3 \sigma_{ys}}{2 SR \theta} \frac{A_s I_s}{3 I_s + D A_s [R - (t_B + 0.5D)] (1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

P_{st}^{max} : Çelik bağ maksimum basıncı (MPa)

D : Çelik kesit derinliği (m²)

A_s : Kesit alanı (m²)

I_s : Kesit atalet momenti (m⁴)

σ_{ys} : Çelik akma dayanımı (MPa)

S : Tünel eksenli boyunca çelik bağ aralığı (m)

R : Açıklık eşdeğer çapı (m)

θ : Bloklama noktaları arası yarı açı (radyan)

t_B : Blok kalınlığı (m)

Varsayılan derinliklerin her biri için hesaplanan iç tahkimat basıncı uygulanmış ve gözlenen deformasyonlar kaydedilmiştir.

Sakurai (1983) tünel duraylılığının tünel birim deformasyonu ile kestirilebileceğini önermiştir. Açıklık ya da tünel birim deformasyonu, oluşan/oluşacak olan deformasyonun tünel ya da açıklık

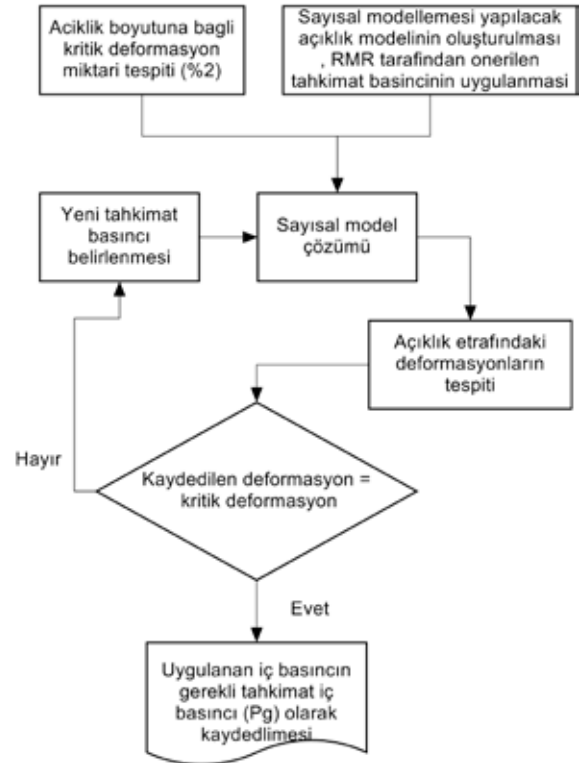
çapına oranı olarak tanımlanmaktadır.

Hoek'a (2000) göre bir galerideki deformasyon miktarı, galeri çapının %2'sini geçerse önlenemez duraylılık problemleri ile karşılaşılacağı düşünülmektedir. Bu öneri dikkate alınarak yapılan bu çalışmada maksimum deformasyonun galeri çapının %2'si sınırını geçmesine izin vermeyecek tahkimat basıncı modelleme sonuçları izlenerek bulunmuş ve gerekli tahkimat basıncı (P_g) olarak isimlendirilmiştir. Gerekli tahkimat basıncının elde edilmesi için izlenen yolu gösteren akım şeması Şekil 1'de verilmektedir.

Modellenen açıklıkların boyutları, eşdeğer çapları ve sınır deformasyon (K_s) değerleri Çizelge 7'de verilmektedir.

Çizelge 7. Tünel ve Deformasyon Sınırları

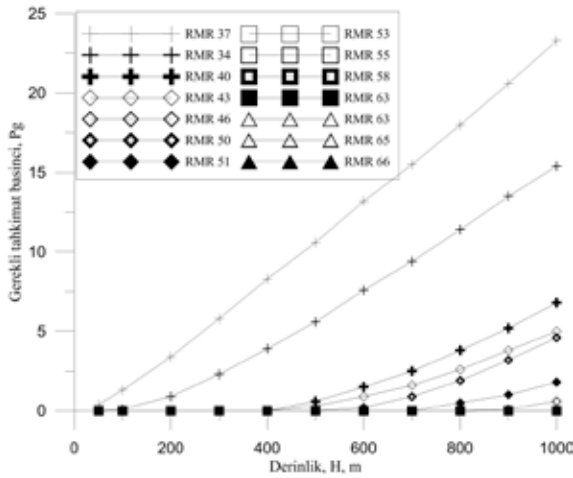
| Tünel İsmi | Eşdeğer Tünel Çapı, m | Sınır deformasyon, K_s , m |
|------------|-----------------------|------------------------------|
| Osmangazi | 11,44 | 0,23 |
| Kallat | 9,03 | 0,18 |
| Şehzadeler | 10,20 | 0,20 |



Şekil 1. Galeri Tahkimat Basıncı Hesaplanırken İzlenen Yol

4. MODELLEME SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Derinliğe göre, deformasyon miktarını galeri çapının %2'sini geçmeyecek sınırdaki (Ks) tutmak için gereken tahkimat basınçları (Pg) 14 farklı birim için Şekil 2'de verilmiştir. RMR puanı arttıkça gerekli tahkimat basıncı düşmektedir. Herhangi kalitede bir kaya kütlesi için derinlik arttıkça deformasyonu sınır değerinde tutmak için uygulanması gerekli tahkimat basıncının da arttığı görülmektedir. Ancak bu artış oranı kaya kalitesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.



Şekil 2. RMR Puanlarının Derinliğe Bağlı Olarak Değişen Gerekli Tahkimat Basınçları

Çalışma kapsamında içerilmeyen kalitede kaya kütleleri ile RMR sisteminde önerilen tahkimat sistemlerinin etkileşiminin kestirilebilmesi için çoklu regresyon modellemesi yapılması düşünülmüştür. Modeldeki bağımlı değişken gerekli tahkimat basıncının, RMR sisteminin önerdiği tahkimat basıncına oranı (Pg/Prmr) olarak seçilirken bağımsız değişkenler ise RMR puanı ve derinlik değerleri olarak seçilmiştir.

Oluşturulan regresyon modeline ait bilgiler aşağıdaki eşitlikte verilmiştir. Çoklu belirleme sabiti değerleri (R²) %88,27 olarak elde edilmiştir. Bu yüksek değerlerden de anlaşılacağı üzere, önerilen modelin seçilen değişkenler arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde kurduğu görülmektedir.

$$P_g/P_{rnr} = a * b^{RMR} * H^c \quad (5)$$

Regresyon eşitlik sabitleri

$$a = 0,065928$$

$$b = 0,889308$$

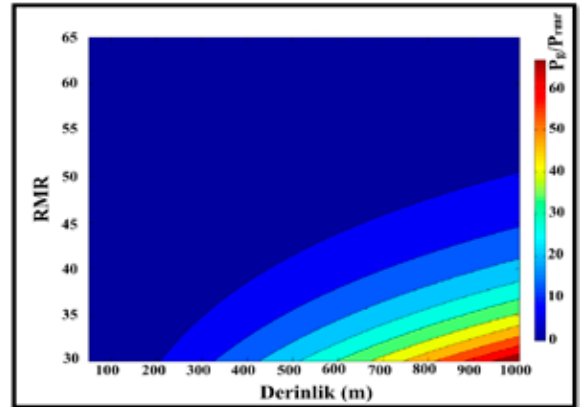
$$c = 1,524772$$

Şekil 3'te regresyon modellemesi sonucu elde edilen, gerekli tahkimat basınçları ile RMR sisteminin önerdiği tahkimat basınçları oranının (Pg/Prmr), derinlik ve RMR puanlarına bağlı olarak değişimini gösterir üç boyutlu grafik gösterilmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, tahkimat tasarımında yaygın olarak kullanılan kaya kütle sınıflama sistemlerinden birisi olan RMR tarafından önerilen tahkimat sistemlerinin performansları sayısal yöntemlerle değerlendirilmiştir. Performans göstergesi olarak Hoek (2000) tarafından önerilen kritik birim deformasyon değeri kullanılmıştır.

Analizler için sonlu elemanlar tabanlı hesaplama yapan Phase² yazılımı kullanılmıştır. Sayısal model sonucunda elde edilen veriler kullanılarak saha verileri arasında yer almayan RMR değerlerinin durumunun tespiti için çoklu regresyon modeli oluşturulmuştur. Model Pg/Prmr, RMR ve derinlik arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 3. Regresyon Sonucunda Elde Edilen Pg/Prmr ile RMR ve Derinlik Arasındaki İlişki

Hazırlanan grafik incelendiğinde takip eden çıkarımlara ulaşılmıştır.

Açıklık deformasyonunu belirli bir kritik değer altında tutabilmek için RMR tarafından önerilen tahkimat sistemleri sığ derinlik ve yüksek kalitede kaya kütleleri için yeterli sayılabilmektedir. Ancak kaya kalitesi düştükçe ve derinlik arttıkça sistemce önerilen tahkimat yetersiz kalabilmektedir.

Varsayılan saha verileri ve gerilme koşulları altında RMR sınıflama sisteminde önerilen tahkimat sistemlerinin kaya kütle kalitesine ve derinliğe bağlı olarak değerlendirilmesi gerektiği gözlenmiştir. Bu nedenle, önemli projelerde sa-

dece sınıflama sistemlerince önerilen tahkimat tasarımına bağlı kalınmayarak yapılan önerilerin sayısal modelleme yöntemleri ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde bu çalışma sonucunda da gösterildiği üzere beklenmedik deformasyon ve duraysızlık sorunları ile karşılaşılabilir.

Bu çalışmada, sistematik analiz yapılabilmesi amacı literatürde ulaşılan çalışmalara benzer şekilde hidrostatik gerilme varsayımında bulunulmuştur. Söz konusu yaklaşım sistematik ve ilksel çalışmalar için yeterli görülmeyle beraber önemli detay projelerde gerilme koşullarına yerinde deneyler kullanılarak ulaşılmaması gerekmektedir. Bu çalışmada dairesel açıklık ve eşdeğer çap yaklaşımları kullanılmıştır. Hidrostatik gerilme koşullarında dairesel açıklıklar etrafında tahkimat elemanlarının simetrik yüklendiği ve bükülme momenti uygulanmadığı varsayılmıştır. Ancak gerçekte püskürtme beton ve çelik bağ gibi tahkimat elemanları yüzey pürüzlülüğü nedeni ile asimetrik yüklenebilir ve bükülme momenti etkisi altında kalabilirler. Dolayısıyla pratikte burada önerilenden daha yüksek tahkimat basıncı uygulanması gerekebilir. Çalışmada Hoek Brown yenilme kriteri kullanılmıştır. Dolayısıyla kullanılan yenilme kriteri gereği açıklığın oluşturulacağı kaya kütlelerinde anizotropik davranışa neden olabilecek hakim süreksizlik içermediği varsayılmaktadır.

Çalışmada kullanılan tüm saha verileri ve projeler için önerilen eşitliğe bağlı olarak bulunan gerekli tahkimat basıncının RMR tarafından önerilen tahkimat sistemi basıncına oranı (P_g/P_{rmm}) 1'e yakın ve 1'in altındadır. Diğer bir deyişle seçilen saha örnekleri için RMR tarafından önerilen tahkimat sisteminde uygulanan basınç değeri (P_{rmm}) gerekli tahkimat basıncına (P_g) yakın veya daha yüksektir. Yazarın bilgisi dâhilinde saha verisi olarak kullanılan projeler kapsamında tasarlanan tünellerde çalışma sonuçları ile uyumlu olarak herhangi bir duraysızlık rapor edilmemiştir. Bu durum çalışma kapsamında yapılan değerlendirme ve varsayımların en azından saha verisi olarak kullanılan projeler için kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

Asef, M.R., Reddish, D.J., Lloyd, P.W. (2000). Rock-Support interaction analysis based on numerical methods. *Geotechnical and Geological Engineering*, 18, 23-27.

Basarir, H. (2008). Analysis of rock-support interaction

using numerical and multiple regression modeling. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 45, 1-13.

Basarir, H., Genis, M., Ozarslan, A. (2010). The analysis of radial displacements occurring near the face of a circular opening in weak rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (5), 771-83.

Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.

Bieniawski, Z.T. (1974). Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling. *Proceedings of the third international congress on rock mechanics*. (s. 27-32). Denver: International Society of Rock Mechanics.

Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (2000). Application of the convergence confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Tunneling and Underground Space Technology*, 15(2), 187-213.

Curran, J., Hammah, R., & Yacoub, T. (2003). A Two-Dimensional Approach for Designing Tunnel Support in Weak Rock. November 2013 tarihinde Rocscience research papers: <http://www.rocscience.com/assets/files/uploads/7689.pdf> adresinden alındı.

Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., Sadeghi, H., & Tarigh Azali, S. (2006). Comparison of predicted and actual behavior and engineering geological characterization of Kallat tunnel. *IAEG Symposium* (s. 1-8). The Geological Society of London.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). *Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition*, *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada, Vol. 1, p. 267 – 273.

Hoek, E. (2000). Big tunnels in bad rock. *ASCE journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 726-740.

Hoek, E., & Brown, E. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1165-1186.

Hoek, E., Kaiser, P., & WF, B. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: AA Balkema.

Hoek, E., & Brown, E. (1980). *Underground excavations in rock*. London: Instn Min. Metall.

Osgoui, R., & Ünal, R. (2005). Rock reinforcement design for unstable tunnels originally excavated in very poor rock mass. *Underground space use: Analysis of the past and lessons for the future*, (s. 291-296).

Rocscience-Phase². (2009). *Finite element analysis of excavations and slopes*. Toronto: Rocscience Inc.

Sakurai, S. (1983). Displacement measurements associated with the design of underground openings.,

1163-1178, s. Field measurements in geomechanics. Zurich.

Sari, D. (2007). Rock mass response model for circular openings. Canadian Geotechnical Journal, 44, 891-904.

Sarı, Y.D., Paşamehmetoğlu, A.G., Çetiner, E., & Dönmez, S. (2008). Numerical analysis of a tunnel support design inconjunction with empirical methods. International journal of geomechanics, 74-81.

Satıcı, Ö. (2007). Kavak Merzifon yolu T4 (Küçükbelvar) tünel duraylılık analizi. Hacettepe Üniversitesi Y. Lisans tezi.

Ulusay, R., & Sonmez, H. (2007). Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri. Ankara: TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları.

*Bu Makale 14 – 17 Nisan 2015 tarihinde düzenlenen **IMCET 2015-Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi'nde** bildiri olarak sunulmuştur.*