

Kazı Derinliğinin Püskürtme Beton Dayanımı Üzerindeki Etkisi: Sayısal Bir Yaklaşım

Effect of Excavation Depth on Shotcrete Strength: A Numerical Approach

Mustafa KANIK^{*a}, Zülfü GÜROCAK^b

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

• Geliş tarihi / Received: 17.08.2017 • Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 27.10.2017 • Kabul tarihi / Accepted: 30.10.2017

Öz

Uygun ve güvenilir destek sistemlerinin seçimi, tünellerde maliyet ve güvenliği etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Farklı araştırmacılar tarafından önerilmiş olan görgül kaya sınıflama yöntemleri destek tipinin seçiminde büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu konuda kullanılan diğer bir yöntem sayısal analizlerdir. Görgül olarak elde edilen destek tipinin sayısal olarak da analiz edilmesi sonucunda daha güvenilir ve ekonomik destek tipi belirlenebilmektedir. Bu çalışmada, farklı kaya sınıfları için RMR₈₉ tarafından önerilen püskürtme betonun dayanımı ile kazı derinliği arasındaki ilişkileri incelemek amacıyla Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak sayısal modeller yapılmıştır. Modellemelerde, Zayıf, Orta ve İyi kaliteli kaya sınıflarındaki kaya kütleleri ve farklı kazı derinlikleri dikkate alınmıştır. Kazı derinliğinin artması bağlı olarak, destek sisteminin yenilmeden çalışabilmesi için püskürtme beton dayanımının ne kadar olması gerektiği araştırılmıştır. Yapılan analizlere göre püskürtme beton dayanımının 30 MPa alınması durumunda, İyi kaliteli Kaya sınıfında 450 m, Orta kaliteli Kaya sınıfında 310 m, Zayıf kaliteli Kaya sınıfında ise 200 m kazı derinliğinde püskürtme betonda yenilmeler meydana gelmektedir. Bu derinliklerden sonra destek sisteminin duraylı kalabilmesi için püskürtme beton dayanımının artırılması gerekmektedir. Püskürtme beton dayanımı 40 MPa'ya çıkarıldığında, İyi kaliteli Kaya sınıfında 530 m, Orta kaliteli Kaya sınıfında 420 m ve Zayıf kaliteli Kaya sınıfında ise 260 m kazı derinliğine kadar destek elemanlarında yenilme meydana gelmemektedir. İyi kaliteli kaya sınıfında 20 MPa dayanımlı püskürtme beton için yapılan analizlerde, 410 m örtü kalınlığına kadar destek sisteminde yenilme meydana gelmemektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, kazı derinliğinin artması sonucunda, destek sistemlerinin yenilmemesi için püskürtme beton dayanımının artırılması veya bir alt kaya sınıfı için önerilen destek sistemlerinin seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Kazı derinliği, Püskürtme beton dayanımı, RMR sınıflama sistemi, FEM analizi

Abstract

Choosing appropriate and reliable support systems is one of the most important factors affecting cost and security in tunneling. The empirical rock classification methods proposed by different researchers provide great convenience in selecting the support type. Another method used in this regard is numerical analysis. With the aid of the numerical analyses, analyzing the support system empirically obtained helps to determine more reliable and economic support types. In this study, numerical models were developed using Finite Elements Method (FEM) to investigate the relationship between the strength of shotcrete and the excavation depth for the different rock classes proposed by RMR₈₉. Different excavation depths for Weak, Fair and Good rock masses are taken into account in the modeling. Depending on the increase in depth of excavation, it has been researched how much the strength of the shotcrete must be so that the support system can continue to support without being yielded. According to the evaluated models, when the shotcrete strength is assumed as 30 MPa, the elements of shotcrete was started to yielded at 200 m depth for the weak rock mass, 310 m depth for the fair rock mass and 450 m depth for the good rock mass. After reaching the mentioned depths, it is necessary to increase the strength of the shotcrete in order to keep the support system stable. Once the shotcrete strength is increased to 40 MPa, there was not failure in the support elements up to the excavation depth of 530 m in the good rock mass, 420 m for fair rock mass and 260 m for the weak rock mass. The support system was determined stable up to 410 m overburden in the evaluated analyses for 20 MPa strengthen shotcrete. In this study, it is revealed that, the increase in depth of excavation indicates that the strength of the shotcrete must be increased to avoid instabilities of the support systems or that the support systems recommended for a lower rock class should be selected.

Keywords: Excavation depth, Numerical modeling, RMR classification system, Shotcrete strength

^{*a} Zülfü GÜROCAK; zgurocak@gmail.com; Tel: (0532) 355 36 47; orcid.org/0000-0002-1049-8346

^b orcid.org/0000-0002-1019-5249

1. Giriş

Tünelcilikte maliyet üzerindeki en önemli parametrelerden birisi, tünelde kullanılacak olan destek sistemlerinin çeşididir. Bu parametre kazı sırasında geçilecek birimlerin jeolojik ve jeoteknik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Tünel güzergâhındaki birimlerin jeolojik ve jeoteknik özelliklerinin belirlenebilmesi ise tünel güzergâhı boyunca sondaj ve yüzey çalışmalar ile mümkündür. Tünelcilikte ön destek sistemlerinin saptanması amacıyla farklı araştırmacılar tarafından birçok kaya kütle sınıflama sistemi önerilmiştir (Terzaghi, 1946; Lauffer, 1958; Deere, 1964; Wickham vd., 1972; Bieniawski, 1989; Barton vd., 1974; Palmström, 1995). Önerilen bu sistemler zaman zaman revize edilerek günümüzdeki halini almıştır.

Terzaghi (1946) tarafından önerilen sınıflama sistemi 35 yıldan fazla bir süre etkili olarak kullanılmıştır. Lauffer (1958) ise, Stini (1950) tarafından yapılan bir çalışmadan esinlenerek, destek sisteminin çeşidi ve miktarını tünel genişliği ve desteksiz durma süresine bağlı olarak belirlemeye çalışmıştır. Deere (1964) sondaj karotlarından belirlenebilen Kaya Kalite Göstergesi (RQD) parametresini kullanarak bir sınıflama önermiştir. Wickham vd. (1972) tarafından Amerika Birleşik Devletleri'nde geliştirilen kaya yapısı değerlendirmesi (RSR) kavramı, sınıflandırma parametrelerinin nispi önemini ölçmek için yapılan ilk sınıflandırma sistemidir. Bieniawski (1989) tarafından önerilen Kaya Kütle Puanlama (RMR) ve Barton vd. (1974) tarafından önerilen Kaya Kütle Kalitesi (Q) sistemleri birbirlerinden bağımsız olarak geliştirilmişlerdir.

Bu sınıflama sistemlerinin ikisi de kaya bulunu ve püskürtme beton gibi modern tünel güçlendirme yöntemlerinin seçimini sağlayacak niceliksel veriler sağlamaktadırlar. Kaya Kütle İndeksi (RMi) sınıflama sistemi Palmström tarafından 1995 yılında, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ise ilk defa Hoek vd. (1995) tarafından önerilmiştir. Q, RMR, RMi ve GSI sistemleri zaman içinde revize edilerek günümüzdeki şeklini almışlardır.

Ayrıca, destek tipinin kazı sırasında belirlenmesinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) sistemi de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu metotta diğer sistemler gibi kesin önerilmiş destek elemanları yerine kullanılması gereken destek elemanlarının türü belirtilmiş olup, destek elemanı sistematigi uygulayıcılar tarafından belirlenmektedir.

2. Tünelcilikte Destek Sistemlerinin Görgül Olarak Belirlenmesi

Tünelcilikte ön destek sistemlerinin belirlenmesinde temeli puanlama metoduna dayanan RMR, Q ve RMi sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sınıflamalarda puanlamalar genel olarak kaya malzemesinin mekanik özellikleri, süreksizliklerin özellikleri ve su durumuna göre yapılmakta ve elde edilen sonuca göre ön destek sistemi belirlenmektedir. Yaygın olarak kullanılan bu sistemlerinin avantajları yanında dezavantajları da vardır.

Bu görgül sınıflama sistemlerinin avantajları maddeler halinde sıralanacak olursa:

- Kaya kütleleri sınıflandırılırken, girilen veriler sistematik olarak tanımlandığından saha araştırmalarının kalitesi daha da artmaktadır.
- Bu sınıflamalarda nicel bir değerlendirme yapıldığından kişisel değerlendirmelere kıyasla daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.
- Sınıflandırma, her kaya kütlelerinin kilit parametreleri için bir kontrol listesi oluşturmaktadır. Diğer bir deyişle, kaya kütlelerinin tanımlanması sürecini yönlendirmektedir.
- Sınıflandırma, tasarım amaçlı nicel bilgilerle sonuçlanmakta ve bir proje üzerinde daha iyi mühendislik kararı ve etkili iletişim imkânı sağlamaktadır (Bieniawski, 1993).
- Nicel bir sınıflandırma, belirli bir projede sağlıklı mühendislik yargısı için uygun ve etkili iletişim sağlamaya yardımcı olmaktadır (Hoek, 2007).
- Kaya kütlelerinin kalitesi ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler kaya kütlelerinin deformasyon, dayanım veya şişme özelliklerini belirlemek ve tahmin etmek için de kullanılabilirlerdir.

Dezavantajları bakımından ele alındığında;

- Tek bir sınıflama sisteminden elde edilen sonuçların diğer sistemler ile karşılaştırmadan kullanılması, analitik ve gözlemsel tasarım metodlarını göz ardı etmekte ve projedeki olası duraylılık problemlerini önleyememektir.
- Kaya kütleleri sınıflama sistemlerinin, üzerinde geliştirildikleri veri tabanından kaynaklanan sınırlamaların tam olarak anlaşılmasından önce kullanılması durumunda güvenilir sonuçlar elde edilememektedir (Bieniawski, 1993).
- Elde edilen sonuçlarının yanlış değerlendirilmesi veya kullanılması gerçekçi

olmayan destek seçiminin yapılmasına neden olabilmektedir.

- Sınıflandırma sistemlerinin yardımıyla belirlenen destek sisteminin gerçekçiliğinin, uygulamaya geçilmeden önce test edilememesi zorluklara veya duraylılık problemlerine yol açabilmektedir.
- Kaya kütle sınıflama sistemleri tarafından önerilen destek elemanlarına (püskürtme beton, kaya bulonu, vb) ait teknik özelliklerin (püskürtme beton dayanımı, kaya bulonu çapı ve dayanımı) tanımlanmamış olması nedeniyle tasarım sırasında güçlüklerle karşılaşabilmektedir.

Ön destek tasarımının uygulama aşamasındaki güvenilirliği, son yıllarda sıklıkla kullanılan sayısal analizler yardımıyla test edilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalarda (Geniş vd., 2007; Gürocak vd., 2007; Gürocak, 2011; Kaya vd., 2011; Kaya ve Bulut, 2013, Kanık vd., 2015; Yalçın vd., 2016, Kaya ve Sayın, 2017) RMR, Q ve R_{Mi} gibi görgül sınıflamalar ve sayısal analizler birlikte kullanılmış ve destek tasarımında ampirik ve sayısal yöntemlerin bütünleştirilmesinin önemi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Görgül olarak belirlenen ön destek sistemlerinin güvenilirliğinin sayısal yöntemler ile analiz edilmesi, daha gerçekçi destek sistemlerinin belirlenebilmesine imkân tanımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, görgül sistemler tarafından önerilen püskürtme beton dayanımının derinlikle olan ilişkisini ortaya koymaktır. Nitekim görgül sistemler destek sistemi olarak püskürtme betonu önermekte ancak uygulanacak püskürtme betonun dayanımı hakkında herhangi bir öneride bulunmamaktadır. Bu nedenle, uygulama sırasında genellikle 30 MPa dayanıma sahip püskürtme beton kullanılmaktadır. Ancak, duraylılığı sağlamak amacıyla artan kazı derinliği ile birlikte püskürtme beton dayanımının da artırılması gerekliliği düşünüldüğünde, kazı derinliği ile püskürtme beton dayanımı arasındaki ilişkinin önemli olduğunu söylemek mümkündür.

Günümüze kadar püskürtme beton tasarımı konusunda farklı araştırmacılar tarafından yapılmış bir çok çalışma bulunmaktadır (Wood vd., 1993; Kirsten, 1992; Beauprè vd., 2005; Badr ve Brooks, 2008; Patel vd., 2012; Barros vd., 2014; NIOSH, 2014; Zhang, 2014; Mohajerani vd., 2015; Badr, 2016). Bu çalışmalar genel olarak püskürtme betonun tasarımı ve dayanımının artırılması konusundadır. Artan kazı derinliği ile püskürtme betonun dayanımının ne kadar olması

gerektiği konusunda yapılmış herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, kazı derinliğinin püskürtme beton dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sayısal analizlerden yararlanılmış ve bu etki ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, en yaygın olarak kullanılan görgül yöntemlerden birisi olan RMR₈₉ sistemine ait kaya sınıfları dikkate alınmıştır.

Görgül bir kaya kütle sınıflama sistemi olan RMR Sınıflama Sistemi, ilk kez 1972-1973 yılları arasında yapılan çalışmalar sonucunda Bieniawski (1973) tarafından geliştirilmiştir. Sınıflamaya ait parametreler ve bu parametrelere ait puanların belirlenmesi konusunda yine Bieniawski tarafından 1989 yılında yapılan öneriler ile modifiye edilen RMR sınıflaması (RMR₈₉), son olarak 2014 yılında yapılan değişiklikler (Celada vd., 2014) ile son halini almıştır. Yaygın olarak kullanılması ve kabul edilmiş olması sebebiyle bu çalışmada RMR sisteminin 1989 versiyonu tercih edilmiştir.

RMR₁₄'ün önerilmesinden önce uzunca bir süre kullanılan RMR₈₉ sistemi aşağıdaki girdi parametrelerini kullanmaktadır;

- Kayacın tek eksenli basınç dayanımı veya nokta yükü dayanım indeksi,
- Kaya kalitesi göstergesi (% RQD)
- Süreksizlik ara uzaklığı
- Süreksizliklerin durumu (devamlılık, açıklık, pürüzlülük, dolgu ve bozunma)
- Yeraltı suyu durumu

RMR₇₃ versiyonunda dayanım, RQD ve süreksizlik ara uzaklığı için yapılan değerlendirmeler aralıkların sınır değerlerini de kapsamaktaydı ve bu durum uygulamada hatalara sebep olmaktadır. Bu üç parametrenin daha hassas puanlanabilmesi için Bieniawski (1989), ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerini esas alınarak çeşitli abaklar geliştirilmiştir.

RMR₈₉'a göre kaya kütlelerinin temel RMR puanı belirlendikten sonra süreksizlik düzeltmeleri yapıp nihai RMR puanı elde edilmektedir. Daha sonra düzeltilmiş RMR puanı ile kaya sınıfı ve ön destek önerileri Tablo 1'den belirlenmektedir.

3. Sayısal Modellemeler

Bu çalışmada, analiz modelleri oluşturulurken Sonlu Elemanlar Yönteminden (FEM) yararlanılmıştır.

Tablo 1. RMR₈₉ sistemine göre kaya kütle sınıfları için önerilen birincil destekler (Bieniawski, 1989).

BİRİNCİL DESTEK				
Kaya Kütle Sınıfı	Kazı	Kaya sapmaları * (10 m genişlikteki tünel için uzunluk)	Püskürtme beton	Çelik destek
I	Tam kesit, 3 m ilerleme.	Bir miktar kaya saplaması haricinde genellikle destek gerektirmez.		
II	Tam kesit, 1.0-1.5 m ilerleme, tam kazı destek. Aynaya 20 m mesafede	Kemerin her 2-3 m' sinde yer yer saplama, tel kafeslerle 2-2.5 m aralıklı.	Gerektiğinde tavan kemerinde 50 mm.	Gerekmez
III	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme. Tavandan 1.5-3 m ilerleme. Tam kazı destek. Aynaya 10 m mesafeye kadar gerekli.	3-4 m uzunlukta sistematik saplamalar, kemerde tel kafesli duvarlar ve kemerde 1.5-2 m aralıklı.	Tavan kemerinde 50-100 mm ve yan duvarlarda 30 mm.	Gerekmez
IV	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme. Tavandan 1.0-1.5 m ilerleme. Kazıya uygun şekilde aynaya 10 m mesafeye kadar, gerekli destek.	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1-1.5 m aralıklı, 4-5 m uzunlukta sistematik saplama.	Tavan kemerinde 100-150 mm ve yan duvarlarda 100 mm.	Gereken yerde 1.5 m aralıklı yer yer hafif traversler.
V	Tavan ve tabanda birlikte ilerleme. Tavandan 0.5-1 m ilerleme, kazıyla birlikte destek yerleştirilmeli. Patlamadan hemen sonra püskürtme beton uygulanmalı.	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1-1.5 m aralıklı, 5 m uzunlukta sistematik saplama.	Tavan kemerinde 150-200 mm, yan duvarlarda 150 mm, aynada 50 mm.	Çelik iksalı, 0.75 m aralıklı orta-ağır traversler.

Bu yöntemin temeli, karmaşık bir problemi basit ve küçük parçalara bölerek çözme esasına dayanmaktadır. Böylece, kesin sonuçtan ziyade yaklaşık bir sonuç elde edilebilmekte ve elde edilen yaklaşık sonucun üzerinde çalışarak kesin bir sonuç elde etmek mümkün olmaktadır. Rocscience (2011) tarafından geliştirilmiş olan Phase² v8.0 (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) bilgisayar programı kullanılarak geliştirilen modellemelerde 6 düğümlü üçgen sonlu elemanlar kullanılmış ve tünelin 5 katı genişliğinde bir kaya ortamı oluşturulmuştur. Modellemeler, 10 m genişliğinde, 7 metre yüksekliğinde, tek tüp, at nalı kesitindeki zayıf, orta ve iyi kaliteli kaya sınıfındaki kaya kütleleri için RMR₈₉ sisteminin önerdiği ön destek sistemleri için farklı derinliklerde yapılmıştır (Şekil 1).

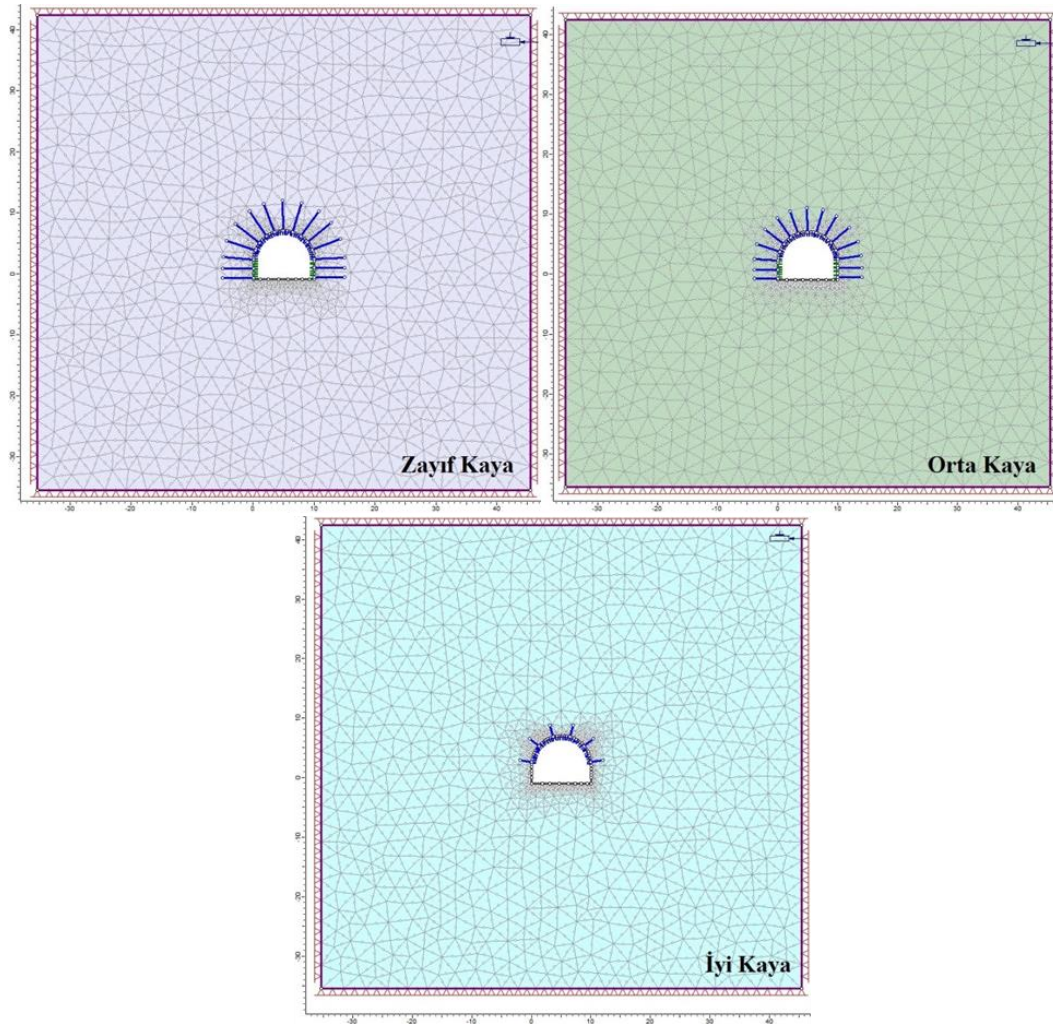
Buradaki amaç, kazıdan sonra uygulanan püskürtme betonun yenilmeden işlevini sürdürebilmesi için değişen derinliklerde hangi dayanıma sahip olması gerektiğinin belirlenebilmesidir. Analizlerde, maksimum toplam yer değiştirme (U_t) ve plastik zon kalınlığındaki (T_{pl}) değişimler dikkate alınmış ve 10 m örtü kalınlığından başlayıp farklı kaya sınıfları için 550 m derinliğe kadar yapılmıştır. Her bir derinlikte zayıf ve orta kaliteli kayalar için beton dayanımının hem 30 MPa hem de 40 MPa olduğu, iyi kaya için ise beton dayanımının 20 MPa, 30 MPa ve 40 MPa olduğu durumlara göre sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal analizlerde, derinlik arttıkça zayıf ve orta kayada püskürtme beton dayanımının yetersiz kalma olasılığının yüksek olmasından dolayı duraysızlık durumunda beton dayanımı 40 MPa' ya yükseltılarak yeni analizler yapılmıştır. 30 MPa'lık püskürtme beton

dayanımının iyi kaya için belli bir derinliğe kadar gereğinden yüksek olabilmesi olasılığından dolayı 20 MPa dayanımlı püskürtme beton kullanılarak analizler yapılmıştır. 30 MPa dayanıma sahip püskürtme betonun referans değer olarak alınmasının sebebi ise, bu değer için yapılan çalışmalar (Celada vd., 2014) ve teknik şartnamelerde (KGM, 1997) istenen püskürtme beton dayanımı olarak kabul edilmesidir.

3.1. Farklı Kaya Sınıfları ve Derinlikler için Yapılan Sayısal Modellemeler

Modellemeler yapılırken, kaya türü olarak magmatik kaya ve RMR₈₉ sistemine göre zayıf (IV), orta (III) ve iyi (II) kaya sınıfına ait kaya kütleleri seçilmiştir. Sadece Zayıf, Orta ve İyi kaliteli kaya sınıflarının seçilmesinin sebebi, Çok İyi kaliteli kaya kütlelerinde püskürtme betonun destekten ziyade emniyet için kullanılması, Çok Zayıf kaliteli kaya kütlelerinde ise çelik iksa desteğinin ön planda olması ve püskürtme betonun ikinci planda kaldığının düşünülmesidir.

Sayısal analizlerde girdi parametresi olarak kullanılacak veriler ise fay ve kıvrım içermeyen (fay ve kıvrımlanma olan bölgelerdeki değişken gerilme dağılımlarını göz ardı etmek amacıyla), bloklu ve çok bloklu kayaların Hoek-Brown sabitleri, GSI değerleri, Poisson oranları, kaya malzemesinin ve kaya kütlelerinin deformasyon modülleri Hoek vd. (1995) tarafından verilen ve RocLab (Rocscience, 2006) programı yardımıyla hesaplanan değerler kullanılarak belirlenmiştir. Birim hacim ağırlıklar (γ) her bir kaya kütle için 26 kN/m³, tek eksenli sıkışma dayanımı değeri (σ_c) ise her bir kaya sınıfı için ortalama değerler olarak kabul edilmiştir.



Şekil 1. Zayıf, Orta ve İyi kalitedeki kaya kütleleri için oluşturulan modeller.

GSI, m_b , s , a için artık değerler Cai vd. (2007) tarafından önerilen eşitlikler ile belirlenmiştir.

$$GSI_r = GSI \cdot e^{-0.0134GSI} \quad (1)$$

$$m_{br} = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI_r - 100}{28}\right)} \quad (2)$$

$$s_r = e^{\left(\frac{GSI_r - 100}{9}\right)} \quad (3)$$

$$a_r = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI_r/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4)$$

Tüm kaya kütle özellikleri ve sayısal analizlerde kullanılan girdi parametreleri ve bu parametrelere ait değerler Tablo 2’de verilmiştir. Ayrıca, kullanılan destek elemanlarının teknik özellikleri de Tablo 3’ de sunulmuştur.

Tünel kazı kotundaki düşey (σ_v) ve yatay (σ_h), gerilmeler, her derinlik için ayrı olarak hesaplanmıştır. Düşey gerilme (σ_v) değerleri, Fenner (1938) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_v = \gamma \cdot H \quad (5)$$

Bu eşitlikte;

γ : Birim hacim ağırlık (kN/m^3),
 H : Örtü kalınlığı (m) dir.

Yatay gerilme (σ_h) ise çok değişken ve belirlenmesi zor olan bir parametredir. Yatay gerilmeyi belirleyebilmek için Sheorey vd. (2001) tarafından önerilen eşitlikten yararlanılmıştır.

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v + \frac{\beta E_m G}{1-\nu} (H+1000) \quad (6)$$

Bu eşitlikte;

β : Doğrusal termal genişleme katsayısı ($8 \times 10^{-6}/^\circ C$),

G : Jeotermal gradyan ($0.024 \text{ } ^\circ C/m$),

ν : Poisson oranı,

H : Örtü Kalınlığı (m)

E_m : Kaya kütlelerinin deformasyon modülü (GPa).

İlk aşamada, sayısal analizler Zayıf, Orta ve İyi kaliteli kaya sınıfları için desteksiz duruma

göreyapılmıştır. Daha sonra RMR₈₉ tarafından önerilen ve Tablo 1’de verilen destek sistemleri seçilmiş ve her 10 m’de bir sayısal analizler yapılmıştır. Ancak, sayısal analizlerde, belli bir derinlikten sonra birbirlerine yakın değerler elde edildiğinden dolayı 10 m örtü kalınlığından başlayıp sırasıyla 50 m ve katlarına karşılık gelen derinlikler için yapılmıştır.

Tablo 2. Sayısal analizlerde kullanılan girdi parametreleri

	Zayıf Kaya	Orta Kaya	İyi Kaya
σ_v , MPa	0.26-13.78	0.26-11.7	0.26-11.7
σ_h , MPa	0.08-3.89	0.1-4.55	0.09-3.91
σ_{ci} , MPa	30	75	150
E_i , GPa	12000	27500	55000
ν	0.28	0.25	0.22
γ , kN/m ³	26	26	26
E_m , GPa	7000	14000	32000
GSI	43	55	70
m_i	18	20	25
m_b	2.351	4.009	8.563
m_{br}	1.199	1.439	1.8701
s	0.0018	0.0067	0.0357
s_r	0.00022	0.00028	0.00031
a	0.509	0.504	0.501
a_r	0.533	0.529	0.527

Yapılan sayısal analizlerin sonuçlarına göre, püskürtme beton dayanımı 30 MPa olarak alındığında Zayıf kaliteli kaya sınıfı için 200 m’den sonra püskürtme betonda yenilmeler ortaya çıkmaktadır (Şekil 2, Tablo 4). Orta kaliteli kaya

sınıfı için ise 30 MPa dayanımlı püskürtme betonlu destek sistemi 310 m derinlikte, İyi kaya sınıfında ise 450 m derinlikte yenilmeye başlamıştır (Şekil 2, Tablo 5 ve 6).

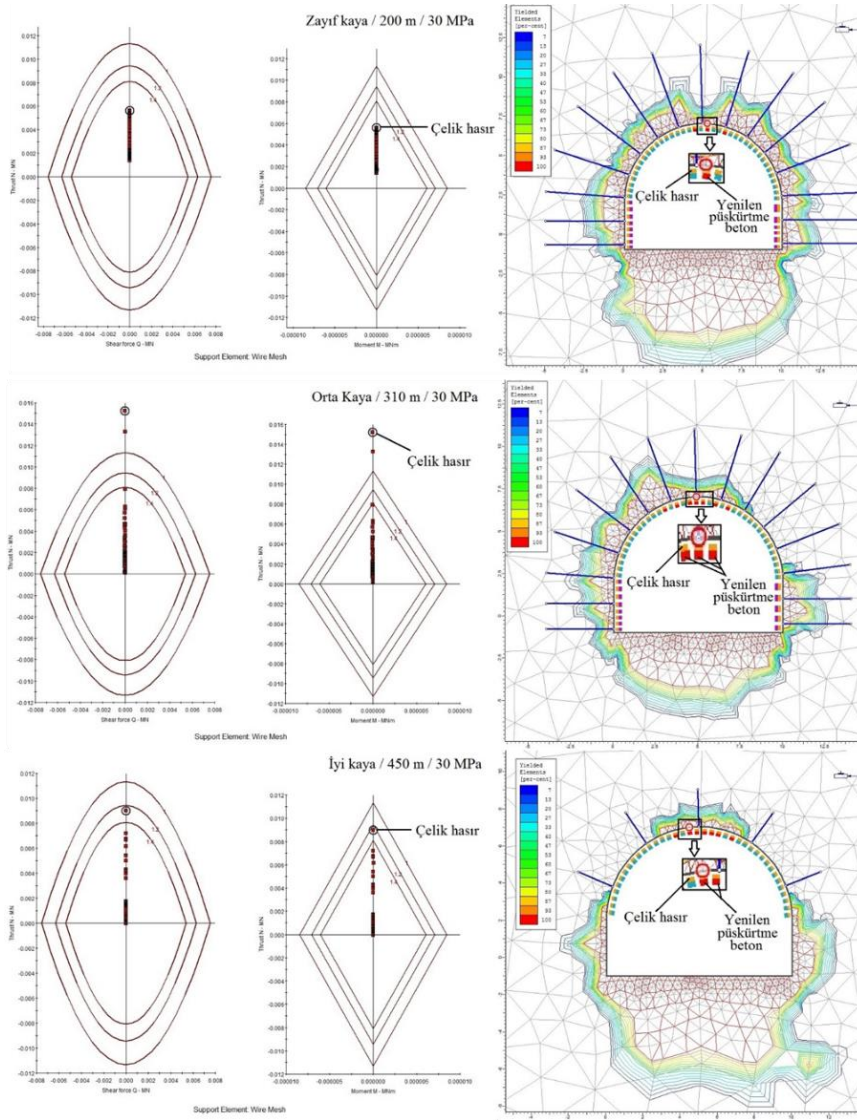
Zayıf kaliteli kaya sınıfında püskürtme beton dayanımının 40 MPa olarak alınması durumunda, püskürtme betondaki yenilmeler 260 m’den itibaren başlamaktadır. Orta kaliteli kaya sınıfında püskürtme betondaki yenilmeler 420 m’den sonra, iyi kaliteli kaya sınıfında ise 530 m’den sonra başlamaktadır (Şekil 3, Tablo 4, 5 ve 6).

Püskürtme betonda meydana gelen yenilmeler kırmızı renk ile gösterilmiş olan bölgelerde meydana gelmektedir. Yenilen bölgelerde çelik hasırların güvenlik katsayılarının destek kapasite diyagramlarında 1 in üstünde olması, yenilmelerin püskürtme beton dayanımının yetersizliğinden kaynaklandığını göstermektedir (Şekil 2 ve 3). Destek kapasite diyagramlarında daire içine alınmış olan destek elemanları, tünel kesitinde daire içine alınmış yenilen püskürtme betonla birlikte hareket eden çelik hasırı temsil etmektedir.

Ayrıca İyi kaliteli kaya sınıfında sığ derinliklerde 30 MPa püskürtme beton dayanımının fazla olabileceği düşünülerek 20 MPa dayanımlı püskürtme beton için de sayısal analizler yapılmış ve sonuç olarak püskürtme betondaki yenilmelerin 410 m’den sonra başladığı görülmüştür (Şekil 4). Tablo 7’de verilen değerlere bakıldığında, gerek plastik zon kalınlıkları gerekse toplam yer değiştirme değerlerinde yenilme olan derinliğe kadar bir farklılık olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla, İyi kaliteli kaya sınıfı için yaklaşık 410 metre derinliğe kadar 20 MPa’lık püskürtme beton dayanımı yeterli olmaktadır.

Tablo 3. Sayısal analizlerde kullanılan destek elemanlarının karakteristik özellikleri

Özellikler	Püskürtme beton	Kaya bulonu	Çelik hasır
Elastisite modülü, (GPa)	30	200	200
Poisson oranı,	0.2	-	0.35
Tek eksenli basınç dayanımı, (MPa)	30	-	500
Artık tek eksenli basınç dayanımı, (MPa)	3.0	-	-
Çekme dayanımı, (MPa)	-	-	500
Artık dayanımı, (MPa)	-	-	-
Çekme kapasitesi (MN)	-	0.2	-
Artık Çekme kapasitesi (MN)	-	0.02	-
Tür	-	Ø20 mm SN	Ø6.5 / 150x150 mm



Şekil 2. 30 MPa’lık püskürtme betonda çelik hasır destek kapasitesi grafikleri ve plastik zon yayılımı (1-1.2-1.4 güvenlik katsayıları ile belirlenmiş çelik hasırın güvenlik zarflardır.)

Tablo 4. Zayıf kaliteli kaya kütlesi için sayısal analizlerden elde edilen T_{pl} ve U_t değerleri

ZAYIF KAYA	Desteksiz				30 MPa dayanımlı püskürtme beton için				40 MPa dayanımlı püskürtme beton için			
	Tavan		Duvar		Tavan		Duvar		Tavan		Duvar	
Derinlik (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)
10	1.92	0.00078	1.565	0.000975	0	0.0007	1.375	0.000975	0	0.00063	1.34	0.000975
50	2.31	0.00135	1.81	0.00165	0	0.0012	1.71	0.0015	0	0.00105	2.37	0.0015
100	3.48	0.0035	3.36	0.00375	1.51	0.0024	2.67	0.0036	1.41	0.002	2.61	0.0036
150	6.05	0.0068	3.84	0.0068	2.99	0.004	2.82	0.0064	2.28	0.0032	2.61	0.0064
200	6.22	0.0105	3.43	0.0105	3.08	0.0054	2.54	0.0081	2.85	0.0045	2.54	0.0081
250	7.78	0.0135	3.61	0.0135	5.73	0.009	2.58	0.0105	2.99	0.006	2.37	0.009
300	7.81	0.016	3.65	0.016	6.85	0.012	2.61	0.014	4.75	0.01	2.59	0.012
350	7.85	0.02	4.1	0.02	7.05	0.014	2.68	0.016	6.92	0.015	2.64	0.0175
400	8.67	0.024	4.58	0.024	8.67	0.021	2.78	0.021	8.51	0.018	2.64	0.021
450	9.64	0.03	3.78	0.027	9.64	0.0245	2.78	0.0245	8.76	0.021	2.64	0.024

Tablo 5. Orta kaliteli kaya kütlesi için sayısal analizlerden elde edilen T_{pl} ve U_t değerleri

ORTA KAYA	Desteksiz				30 MPa dayanımlı püskürtme beton için				40 MPa dayanımlı püskürtme beton için			
	Tavan		Duvar		Tavan		Duvar		Tavan		Duvar	
	Derinlik (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	
10	0	0.00044	0.76	0.00056	0	0.0004	0.39	0.00056	0	0.0004	0.36	0.00056
50	0	0.000585	1.26	0.000675	0	0.00054	0.82	0.000675	0	0.000495	0.75	0.000675
100	1.39	0.00124	1.37	0.00143	0	0.00108	2.15	0.00135	0	0.00099	2.15	0.00135
150	3.47	0.00275	2.59	0.003	0	0.0018	2.21	0.0022	0	0.0016	2.21	0.0022
200	2.71	0.003	2.15	0.0035	0.98	0.00225	2.28	0.00325	0.97	0.00225	2.28	0.00325
250	4.23	0.0049	2.49	0.00525	1.24	0.003	2.47	0.0042	0.98	0.0027	2.33	0.0039
300	4.29	0.00585	2.98	0.0063	2.71	0.004	2.49	0.0056	2.59	0.0036	2.41	0.0056
350	5.56	0.0078	3.03	0.0078	2.96	0.005	2.55	0.007	2.79	0.0045	2.47	0.007
400	5.79	0.00845	3.04	0.0091	3.41	0.006	2.81	0.0084	2.82	0.00495	2.53	0.0077
450	5.13	0.0091	3.11	0.0098	3.16	0.0077	2.98	0.0098	2.89	0.0064	2.72	0.0096

Tablo 6. İyi kaliteli kaya kütlesi için sayısal analizlerden elde edilen T_{pl} ve U_t değerleri

İYİ KAYA	Desteksiz				30 MPa dayanımlı püskürtme beton için				40 MPa dayanımlı püskürtme beton için			
	Tavan		Duvar		Tavan		Duvar		Tavan		Duvar	
	Derinlik (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	
10	0	0.00025	0	0.0003	0	0.00022	0	0.0003	0	0.0002	0	0.0003
50	0	0.00025	0	0.0003	0	0.00024	0	0.0003	0	0.00022	0	0.0003
100	0	0.000495	0	0.000585	0	0.00045	0	0.00059	0	0.00045	0	0.00059
150	0	0.00078	1.05	0.00091	0	0.000715	1.05	0.00091	0	0.00065	1.05	0.00091
200	0	0.00102	1.05	0.00119	0	0.000935	1.05	0.00119	0	0.000935	1.05	0.00119
250	0	0.0012	1.16	0.0015	0	0.0012	1.16	0.0015	0	0.00105	1.16	0.0015
300	0	0.0015	1.2	0.0018	0	0.00135	1.2	0.0018	0	0.00135	1.2	0.0018
350	0	0.00165	2.3	0.0021	0	0.00165	2.3	0.0021	0	0.0015	2.3	0.0021
400	1.39	0.00275	2.36	0.0033	0	0.002	2.36	0.0024	0	0.0018	2.3	0.0024
450	2.18	0.003	2.36	0.004	1.42	0.0033	2.36	0.0044	0	0.0024	2.3	0.0039
530									1.4	0.003	2.8	0.0039

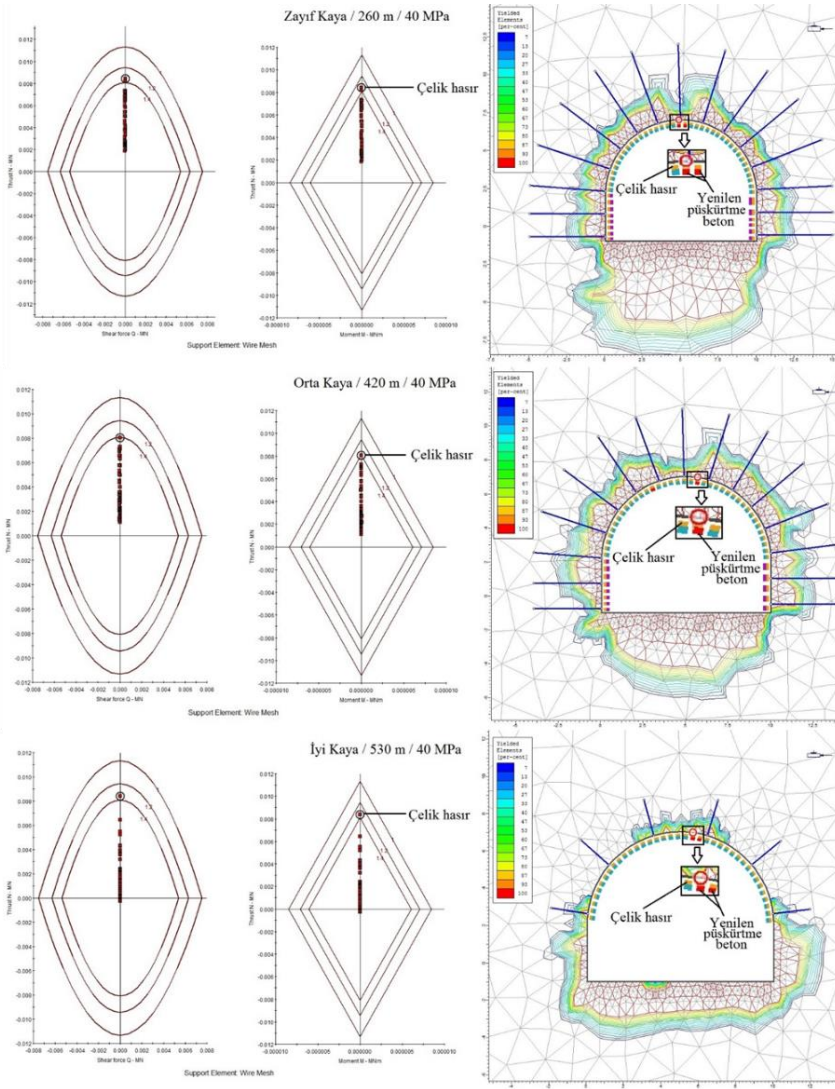
4. Sonuçlar

Püskürtme beton dayanımının derinlikle ilişkisini belirlemek amacıyla yapılan bu çalışmada, Zayıf, Orta ve İyi kaliteli kaya kütleleri seçilmiştir. Bu kaya sınıflarında sınıflarında püskürtme beton en etkili destek elemanı olmanadır RMR_{89} için çok zayıf kaliteli kayalarda çelik iksa desteğinin ön planda olması ve çok sağlam kaliteli kayalarda ise püskürtme betonun desteklemekten ziyade emniyet için uygulanmasından dolayı bu iki sınıf göz ardı edilmiştir.

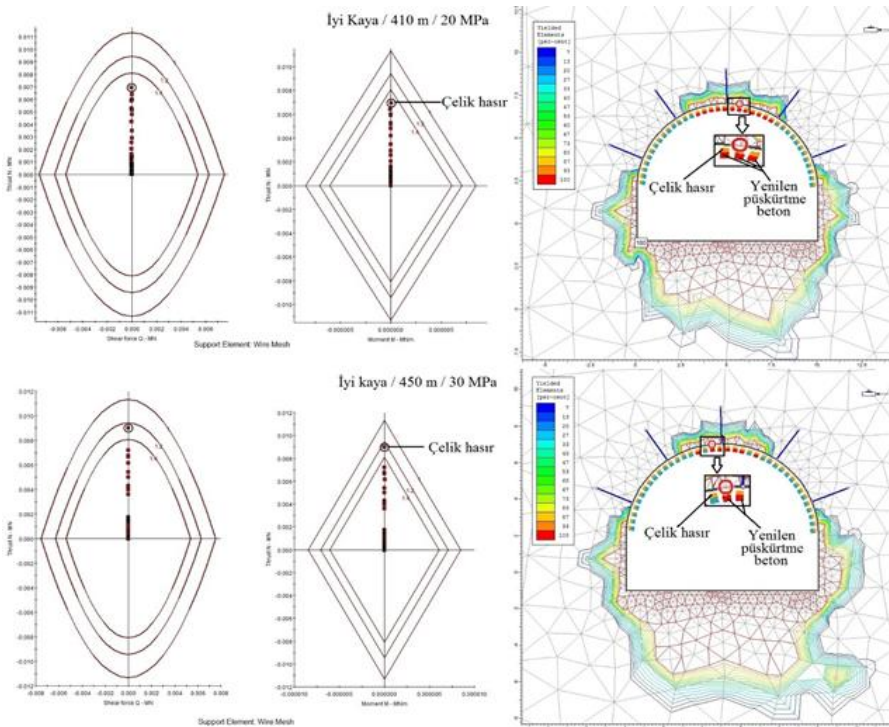
İyi kaliteli kaya kütleleri için yapılan analizlerde 30 MPa dayanımlı püskürtme beton 480 m örtü kalınlığına kadar yenilmeden desteklemeye devam etmektedir. Püskürtme beton dayanımı 40 MPa'a

çıkartıldığında 530 m örtü kalınlığına kadar bu destek sistemi duraylı kalabilmektedir. İyi kaliteli kaya sınıfı için ise 530 m örtü kalınlığından sonra bir alt kaya kütle sınıfının destek sistemini kullanmak yenilmelerin önüne geçmektedir. İyi kaliteli kaya için elde edilen diğer bir sonuç ise, püskürtme beton dayanımı 20 MPa değerine düşürüldüğünde 410 m örtü kalınlığına kadar destek sisteminde yenilme olmamasıdır.

Orta kaliteli kaya kütle sınıfı için yapılan analizlerde, 30 MPa dayanımlı püskürtme betonda, 310 m örtü kalınlığına kadar yenilme olmamış, beton dayanımı 40 MPa'a çıkartıldığında ise 420 m örtü kalınlığına kadar yenilmeden kalabilmiştir.



Şekil 3. 40 MPa'lık püskürtme betonda çelik hasır destek kapasitesi grafikleri ve plastik zon yayılımı (1-1.2-1.4, güvenlik katsayıları ile belirlenmiş çelik hasırın güvenlik zarflardır).



Şekil 4. 20 MPa'lık püskürtme betonda Çelik hasır destek kapasitesi grafikleri ve plastik zon yayılımı (1-1.2-1.4, güvenlik katsayıları ile belirlenmiş çelik hasırın güvenlik zarflardır).

Tablo 7. İyi kaliteli kaya sınıfında 20 MPa dayanımlı püskürtme betonun uygulanması durumunda sayısal analizlerden elde edilen T_{pl} ve U_t değerleri.

RMR (Good) 20 MPa	Tavan		Duvar	
	Derinlik (m)	T_{pl} (m)	U_t (m)	T_{pl} (m)
10 m	0	0.00022	0	0.00028
50 m	0	0.00024	0	0.0003
100 m	0	0.000495	0	0.000585
150 m	0	0.000715	1.05	0.00091
200 m	0	0.000935	1.05	0.00119
250 m	0	0.0012	1.16	0.0015
300 m	0	0.00135	1.2	0.0018
350 m	0	0.00165	2.3	0.0021
400 m	0	0.002	2.36	0.0024
410 m	1.52	0.0033	2.5	0.0044

Analizlerden elde edilen diğer bir sonuç ise 420 m örtü kalınlığından sonra beton dayanımını artırmak yerine kaya sınıfı bir derece daha düşürmek tünelin duraylılığı için yeterli olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yapılan analizlere göre, zayıf kaliteli kaya kütlelerine RMR_{89} destek sistemi 30 MPa'lık püskürtme beton dayanımı ile uygulandığında püskürtme betonda yenilmeler 200 m örtü kalınlığında başlarken, püskürtme beton dayanımı 40 MPa'a çıkartıldığında püskürtme beton 260 m örtü kalınlığında yenilmeye başlamıştır. Ayrıca, beton kalınlığını arttırmanın da bir çözüm olabileceği düşünülebilir ancak bu durumda yeni bir destek sistemi önerilmiş olacağından betonun yenildiği derinliklerin belirlenip beton dayanımını arttırma yolu seçilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, kazı derinliğinin artması ile birlikte, uygulanan destek sistemlerinin gözden geçirilmesi, destek elemanlarının dayanımlarının artırılması veya bir alt kaya sınıfına ait desteklerin kullanılması gerektiğini göstermektedir.

5. Kaynaklar

Badr, A., 2016. Statistical Analysis of the Variability in Shotcrete Strength, Global Journal of Researches in Engineering: E Civil And Structural Engineering, Volume 16, Issue 4.

Badr, A., ve Brooks, J.J., 2008. "Rebound and Composition of in-Situ Polypropylene Fibre-Reinforced Shotcrete," 11th 6 Intl Conf Durability of Building Materials & Components, 11DBMC, Istanbul, Turkey, 11-14 May, Vol. 1, pp. 569-576.

Barton, N.R., Lien, R., and Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics, v. 6, p. 189-239.

Barros, J.A., Lourenço, L.A., Soltanzadeh, F. And Taheri, M. (2014) "Steel-fibre reinforced concrete for elements failing in bending and in shear," European Journal of Environmental and Civil Engineering, 31 18(1), pp.33-65.

Beauprè, D., Dufour, J.F., Hutter, J. ve Jolin, M., 2005. Variability of compressive Strength of Shotcrete in a Tunnel-Lining Project, Shotcrete, V. 5, No. 2, pp.22-25.

Bieniawski, Z.T., 1973, Engineering classification of jointed rock masses: Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, v. 15, p. 335-344.

Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, 251pp, New York.

Bieniawski, Z.T., 1993, Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends, In: Hudson, J.A., ed., Comprehensive Rock Engineering, Volume 3: Oxford, Pergamon Press, p. 553-573, New York.

- Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y. and Minami, M., 2007. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 4 (2), 247–265.
- Celada, B., Tardaguila, I., Varona, P., Rodriguez, A. and Bieniawski, Z.T., 2014. Innovating tunnel design by an improved experience-based RMR system. In: World Tunnel Congress, May 9th to 15th 2014, Iguassu Falls, Brazil.
- Deere, D.U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes, Rock Mech. Rock Eng. 1, 17–22.
- Fenner, R., 1938. Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdrucks, Glückauf, 74, 32, 681-695.
- Genis, M., Basarir, H., Ozarlan, A., Bilir, E. and Balaban, E., 2007. Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey. Engineering Geology, 92, 14–26.
- Gurocak, Z., Solanki, P. and Zaman, M.M., 2007. Empirical and numerical analyses of support requirements for a diversion tunnel at the Boztepe dam site, eastern Turkey. Engineering Geology. 91, 194–208.
- Gurocak, 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., Kaiser, P.K. ve Bawden, W.H., 1995. Support of Underground Excavations in Hard Rock. Rotterdam, Balkema
- Hoek, E., 2007, Practical rock engineering, RocScience.
- ISRM, (International Society for Rock Mechanics), 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring, Pergamon Press, London, 211 s.
- Kaya, A., Bulut, F., Alemdag, S., ve Sayın, A. (2011). Analysis of support requirements for a tunnel portal in weak rock: A case study in Turkey. Scientific Research and Essays, 6(31), 6566–6583.
- Kaya, A. ve Bulut, F. (2013). Stability analyses of tunnels excavated in weak rock masses using empirical and numerical methods, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 37(2), 103–116.
- Kaya, A., and Sayın, A. (2017) Engineering geological appraisal and preliminary support design for the Salarha Tunnel, Northeast Turkey. Bull Eng Geol Environ, DOI: 10.1007/s10064-017-1177-2
- Kanık, M., Gurocak, Z. and Alemdag, S., 2015. A comparison of support systems obtained from the RMR89 and RMR14 by numerical analyses: Macka Tunnel project, NE Turkey, Journal of African Earth Sciences, Volume 109, September 2015, 224–238.
- Kirsten, 1992. Comparative efficiency and ultimate strength of mesh- and fibre reinforced shotcrete as determined from full-scale bending tests, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Nov., 303-322.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü), 2013. NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Lauffer, H., 1958, Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau: Geology Bauwesen, v. 24, p. 46-51.
- Mohajerani, A., Rodrigues, D., Ricciuti, C., ve Wilson, C., 2015. Early-Age Strength Measurement of Shotcrete, Journal of Materials, Vol 2015, pp 1-10.
- NIOSH, 2014. Shotcrete design and installation compliance testing: early strength, load capacity, toughness, adhesion strength, and applied quality,” Martin et al. edit, National Institute for Occupational Safety and Health, Publication No. 2015-107, RI 9697.
- Palmström, A., 1995. RMI-a rock mass characterization system for rock engineering purposes. Ph.D. thesis, Univ. Of Oslo, Norway, 400 pp
- Patel, P.A., Desai, A.K., ve Desai, K.A., 2012. Evaluation of engineering properties for polypropylene fiber reinforced concrete, International Journal of Advanced Engineering Technology, 3(1), pp.42-45.

- Rocscience, 2006. Roclab bilgisayar programı, www.rocscience.com
- Rocscience Inc, 2011. Phase² v8.0 Finite Element Analysis for Excavations and Slopes, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Sheorey, P.R., Murali, M.G., Sinha, A., 2001. Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress. *Int. J. Rock Mech. Min.Sci.* 38 (1), pp 1211–1216.
- Stini, I., "Tunnelbaugeologie," Springer-Verlaa, Vienna, 1950, p 336.
- Terzaghi, K., 1946, Rock defects and loads on tunnel supports, in Proctor, R.V., and White, T.L., eds., *Rock tunneling with steel support*, Volume 1: Youngstown, Ohio, Commercial Shearing and Stamping Company p. 17-99.
- Wickham, G.E., Tiedemann, H. R. and Skinner, E. H., 1972, Support determination based on geologic predictions, In: Lane, K.S.a.G., L. A., ed., *North American Rapid Excavation and Tunneling Conference: Chicago*, New York: Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, p. 43-64.
- Wood, D.F., Banthia, N. ve Trottier, J-F, 1993. A comparative study of different steel fibres in shotcrete. In *Shotcrete for underground support VI*, Niagara Falls, 57- 66. New York: Am. Soc. Civ. Engrs
- Yalcin, E., Gurocak, Z., Ghabchi, R. ve Zaman, M, 2016. Numerical Analysis for a Realistic Support Design: Case Study of the Komurhan Tunnel in Eastern Turkey, *International Journal of Geomechanics*, Vol 16(3)
- Zhang, L. 2014, Variability of Compressive Strength of Shotcrete in a Tunnel-Lining Project. www.shotcrete.org