



Maden galerilerinde farklı kaya kütle sınıflama sistemleri ile durabilite analizi uygulaması: Yahyalı/Kayseri Pb-Zn ocağı örneği

Application of durability analysis with different rock mass classification systems in mine galleries: A case study of Yahyalı/Kayseri Pb-Zn quarry

Ahmet Teymen^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Bu çalışma Yahyalı/Kayseri bölgesinde kurulu bulunan bir yer altı Kurşun-Çinko (Pb-Zn) ocağının ana nakliyat galerisinde gerçekleştirilen Kaya Kütle Karakterizasyonu ile ilgili saha ve laboratuvar çalışmalarını kapsamaktadır. Kaya malzemesi ve kaya kütlesi üzerinde yapılan detaylı çalışmalarla Kaya Kütle Puanlaması (RMR), Kaya Kütle Kalitesi (Q) ve Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) sistemleri ilgili tüm parametreler hesaplanarak duraylılık analizi yapılmıştır. Sonuçlar kireçtaşı formasyonu içerisinde açılan ana galerinin mevcut kesiti dikkate alındığında gerek duyulan bölümlerde lokal tahkimat uygulaması yapılması koşuluyla genel olarak tahkimatsız uzun yıllar ayakta kalabileceğini göstermiştir. Ancak madenlerin dinamik yapılar olduğu ve üretimle birlikte sürekli değişim geçirdikleri unutulmamalıdır. Kaya kütle koşulları, denetimsiz patlatma gibi mühendislik hataları ile değişebilecektir. Kullanılan kaya kütle sınıflama sistemleri ile her ne kadar bu sonuca varılmış olsa da, ani kaya kütle kalitesi değişimlerinin olabileceği lokasyonlarda (özellikle cevher zonları, fay zonu, erime boşluğu) ve tehlike arz eden yerlerde tahkimat uygulamasına mutlaka devam edilmelidir ve sürekli olarak denetlenmelidir.

Anahtar kelimeler: Kaya kütle sınıflaması, RQD, RMR, Q, GSI

1 Giriş

Yeryüzünde çeşitli amaçlara yönelik olarak tasarlanan büyük mühendislik yapılarının yanı sıra, giderek artan alt yapı, ulaşım, yerleşim ve enerji gibi gereksinimlerin karşılanabilmesi için yeraltı yapıları da hızla çoğalmakta ve boyut olarak büyümektedir [1]. Dünya genelinde madencilik başta olmak üzere, ulaştırma, hidroelektrik santral gibi çeşitli mühendislik projelerinde farklı amaçlarla yeraltı açıklığı kazıları yapılmaktadır. Ulaştırma amaçlı yapılan yeraltı kazılarının önemli bir bölümü metro, karayolu ve demiryolu tünelleri için yapılmakta iken madencilik alanında yapılan yer altı kazıları nakliyat, havalandırma için açılan desandre ve galerilerdedir. Tünel yâda galeri açma çalışmaları temel olarak kazı ve tahkimat aşamalarından oluşmaktadır. Proje aşamasında iken en uygun kazı ve tahkimat sisteminin tasarımının yapılması kritik öneme sahiptir. Bu tür mühendislik projelerinin uygulanacağı kaya kütlelerinin

Abstract

This study covers field and laboratory studies on Rock Mass Characterization carried out in the main gallery of an underground Lead-Zinc (Pb-Zn) quarry located in the Yahyalı/Kayseri region. With detailed studies on rock material and rock mass, stability analysis was carried out by calculating all relevant parameters of Rock Mass Rating (RMR), Rock Mass Quality (Q) and, Geological Strength Index (GSI) systems. The results have shown that, considering the existing section of the main gallery opened within the limestone formation, it can generally survive for many years without support, provided that local support is applied in the necessary sections. However, it should not be forgotten that mines are dynamic structures and constantly change with operation. Rock mass conditions may change with engineering errors such as uncontrolled blasting. Although this conclusion has been reached with the rock mass classification systems used, the application of support must be continued and constantly inspected in locations where sudden rock mass quality changes may occur (especially ore zones, fault zones, melting gaps) and in places that pose danger.

Keywords: Rock mass classification, RQD, RMR, Q, GSI

özelliklerinin en doğru şekilde tanımlanması kazısı sırasında oluşabilecek olası duraysızlık problemlerinin önüne geçilmesini sağlayacaktır. Dolayısı ile proje maliyetleri olumlu yönde etkilenecektir.

Yeraltı kazılarında temel amaç kazı sonrası ortaya çıkan deformasyonları mümkün olduğunca engellemek ya da kontrol altında tutabilmektir. Kendini tutabilen kaya kütlelerinde tahkimat ihtiyacı olmamasına rağmen kendini tutamayan kaya kütlelerinde deformasyonu engellemek için tahkimat sistemleri kullanılmaktadır [2]. Zayıf zeminlerde açılan tünel ya da galerilerde yaşanan en büyük sorun uzun dönemde oluşacak olan deformasyonlardır [3]. Bu tür yapılar kazı ve tahkimatın ardından ilk etapta stabil olsa dahi uzun dönemde sıkışmaya bağlı olarak tahkimat sistemlerinde yenilmeler meydana gelmektedir [4]. Bu temel problem destek sistemleri belirlenirken rijit bir tahkimat sisteminin ya

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ateymen@ohu.edu.tr (A. Teymen)

Geliş / Received: 16.10.2023 Kabul / Accepted: 25.11.2023 Yayınlanma / Published: 15.01.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1376707

da deformasyonlara müsaade eden esnek bir destek sisteminin seçilmesini önemli hale getirmektedir [5].

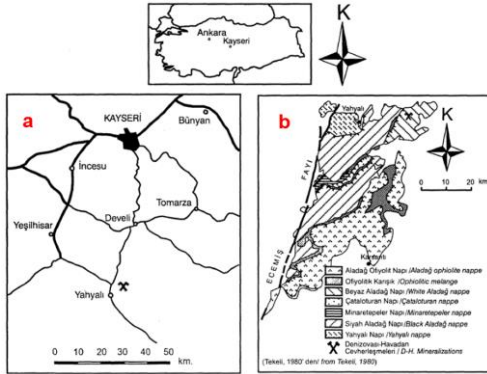
Kaya kütle sınıflama sistemleri özellikle tünel projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Terzaghi'nin [6] öncülük ettiği bu sistemler günümüze kadar daha da geliştirilmiş ve birçok projede başarıyla uygulanmıştır. Bahsi geçen bu kaya kütle sınıflama sistemlerinin en çok kabul gören ve uygulama alanı bulanları; RMR, Q, GSI ve Kaya Kütle İndeksi (RMI) gibi sınıflama sistemleridir. Sınıflama sistemlerinde kaya kütlelerinin özelliklerine bağlı olarak tahkimat tasarım önerileri de sunulmaktadır.

Bu çalışmada, Kayseri İli, Yahyalı İlçesi, Göynük mevkiinde kurulu bulunan bir Yeraltı *Pb-Zn* madeninde kireçtaşı formasyonu içerisinde açılmış galeride inceleme ve ölçümler yapılarak tahkimsiz olarak geçilen bölümlerin sağlamlığı ve stabilitesinin incelenmesi, elde edilen bulgular ve hesaplamalara göre bahsi geçen bu bölümlerin tahkimsiz (desteksiz) olarak geçilmesinde sakınca olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Galeri hattı boyunca kaya kütle sınıflandırma sistemleri için uygun bulunan yüzleklere RMR, Q ve GSI sınıflama sistemleri uygulanmıştır.

2 Coğrafi konum, jeoloji ve depremsellik

2.1 Coğrafi konum

Bu çalışma kapsamında incelenen yeraltı *Pb-Zn* ocağı, Kayseri İli, Yahyalı İlçesi'nin yaklaşık 8 km kuzeydoğusunda bulunan Göynük mevkiinde yer almaktadır (Şekil 1a). Çalışma alanı topografik özellikleri itibari ile ulaşım ve madencilik faaliyetleri bakımından oldukça uygun durumdadır. Alanda dik eğimler, aşırı yükseklik değişiklikleri gibi unsurlar bulunmamaktadır.



Şekil 1. a) Çalışma alanına ait coğrafi konumu gösteren yerbulduru haritası b) Aladağlar'ın yapısal haritası

2.2 Jeoloji

Yahyalı yöresindeki madencilik faaliyetleri, Aladağlar'ın en kuzey-kuzeydoğu kesimindeki Zamantı *Pb-Zn* provensinde yer alır ve çok eski tarihlerde başlamıştır. Yörede, aktif madencilik faaliyetlerinin devam ettiği ya da bir dönem sürdürüldüğü tüm işletmelerde "Roma" olarak bilinen ve kılavuz olarak yararlanılan eski galeriler mevcuttur. Zamantı bölgesi Orta Toros Kuşağında yer alan karbonatlı kayaçlarının *K-KD* kesimini oluşturur. Çok geniş bir zaman aralığını temsil eden kayaç grupları ve bünyesinde

barındırdığı çok sayıdaki *Pb-Zn* cevherleşmesi ile araştırmacıların uzun zamandır ilgilendiği bir çalışma bölgesidir.

2.2.1 Bölgesel jeoloji

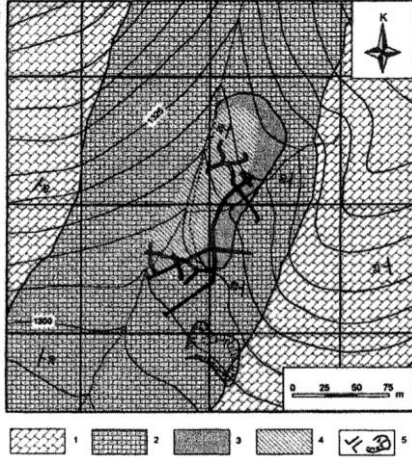
Zamantı provensini ve yakın çevresinde ilk detaylı çalışmalarda yöredeki karbonatlı kayaçlardan Paleozoyik yaşlı olanlar "Siyah Aladağ", Mesozoyik yaşlı olanlar "Beyaz Aladağ" olarak tanımlanmıştır [7]. Yahyalı ilçesinin doğusunda yapılan bir çalışmada Kambriyen'den Lütésiyen sonuna kadar yörede genellikle sıg, sıcak, litoral-sublitoral ortam koşullarının hâkim olduğu ve bölgenin duraysız bir şelf özelliği gösterdiği belirtilmiştir [8]. Yahyalı Napı, Aladağlar yöresi ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğunda kabul gören tektonostratigrafik sınıflamadaki [9] Nap dizinlerinin en altında yer alır ve düşük dereceli metamorfizma izleri taşıyan Üst Devoniyen Permiyen yaş aralığında birimlerden oluşur. Siyah Aladağ Napı karbonatlı ve kırıntılı kayaçlar içermektedir (Üst Devoniyen-Orta Triyas yaş aralığında). Aladağlar'da sıg kıta içi basen Üst Paleozoyik boyunca, resif ve resif gerisi ortam gelişimi ise Triyas-Alt Kretase boyunca oluşmuştur [10]. Şekil 1b'de, geniş bir yayımlı Siyah Aladağ Nap dizininin kuzey kesiminde yer alan Göynük *Pb-Zn* cevherleşmesi görülmektedir. Cevherleşme yakınlarında bu Napa ait kireçtaşları, kireçtaşları ile uyumlu olarak yer yer silttaşı, marn ve çamurtaşı seviyeleri içeren kireçtaşları ile bu litolojileri uyumsuz şekilde örten genç volkanitler gözlenmektedir.

2.2.2 Maden jeolojisi

Göynük bölgesindeki *Pb-Zn* cevherleşmesi yakınlarında karbonatlı, yer yer de kırıntılı kayaçlar ve tüfler yer alır (Şekil 2). Siyah Aladağ olarak tanımlanan kayaç grubu, kısmen siyaha yakın gri-koyu gri renkli, 10-80 cm arasında değişen tabaka kalınlığına sahip ve taban seviyelerinde çört ara katkıları olan ve kısmen dolomitik özellikler taşıyan fosilli kireçtaşlarıdır. Fosil bulguları bu kireçtaşlarının Üst Permiyen yaşlı olduğunu göstermiştir ve üzerinde yer alan ve kahverengi, kirli sarı-açık tonları taşıyan marn, silttaşı ve çamurtaşı seviyeleri içeren kireçtaşları ise Alt-Orta Triyas yaşlıdır. Erciyes volkanizmasının son ürünleri, bu birimlerin üzerinde yer almaktadır. Cevher kütleleri düzenli bir geometrik şekle sahip değildir ve Alt-Orta Triyas yaşlı litolojiler ile Üst Permiyen yaşlı kireçtaşlarının dokunağında yer alır. Bu özellik, ana galeri girişinin güneydoğu kesiminde cevher üretim faaliyetinin sürdürüldüğü çeşitli katlarda da izlenebilmektedir. Cevherleşmede yer yer küçük ölçekli faylanmalar gözlenmektedir ve bunlar cevherleşme sonrası yöredeki naplanma olayları ile ilişkili tektonik ürünlerdir. Cevher-yan kayaç dokunaklarında herhangi bir alterasyon izi yoktur, yani cevherleşmede tektonizma kontrolü söz konusu değildir.

Yan kayaçlarla uyumlu ve lamine bir içyapıya sahip olan cevherleşme çoğunlukla karbonatlı minerallerden oluşmaktadır. Ayrıca yan kayaç ile uyumlu olacak şekilde kalınlığı birkaç mm'den birkaç cm'ye kadar değişen, zaman zaman 10-12 cm'ye kadar ulaşan galenitli seviyeler de mevcuttur. Yeraltı üretim faaliyetleri, *B-KB* yönünde dalımlı olarak cevherleşmenin senklinal kanadına uyumlu şekilde

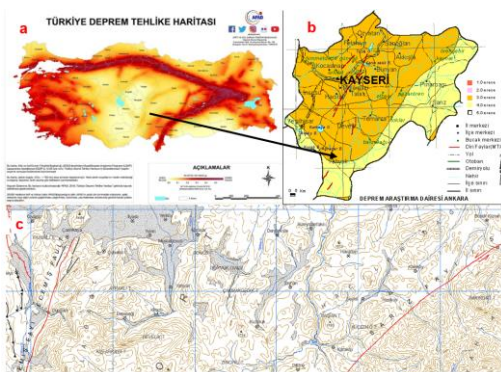
sürdürülmektedir. Göynük *Pb-Zn* cevherleşmesi tipik bir “Alpin Tipi Karbonat Yankayaçlı *Pb-Zn* cevherleşmesi” olup, oluşumunu takiben zaman içerisinde karbonatlaşmıştır [11].



Şekil 2. Göynük cevherleşmesinin detaylı jeolojik haritası. (1. Üst Permiyen kireçtaşları, 2. Alt-Orta Triyas kireçtaşları ve kırıntılıları, 3. Tüf, 4. Cevherleşme, 5. Galeri ve yarma)

2.3 Depremsellik

Şekil 3'te güncel Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası ve Kayseri İli Deprem Haritası verilmiştir. Bu haritalara göre genel olarak Kayseri İl'inin ve proje alanının yer aldığı Yahyalı İlçesi'nin bir bölümünün 3. derece bir kısmının ise 4. derece deprem kuşağında yer aldığı görülmektedir. Türkiye Deprem Haritası, MTA tarafından 2014 yılında güncellenmiş diri fay haritası ve proje alanının da bulunduğu NJ 36-8 paftası incelendiğinde, 1900 yılından günümüze kadar yüzey faylanması oluşturmuş nitelikte diri fay/faylar tespit edilememiştir. Proje alanının yer aldığı Göynük Yöresi'nin doğusundaki Sarız Fayı ve batısındaki Ecemiş Fayları ise Holosen'de (11000 yıl) yüzey faylanması oluşturmuş fay niteliğindedirler.



Şekil 3. a) Türkiye Deprem Tehlike Haritası **b)** Kayseri İli diri fay haritası **c)** MTA NJ 36-8 paftası (2014)

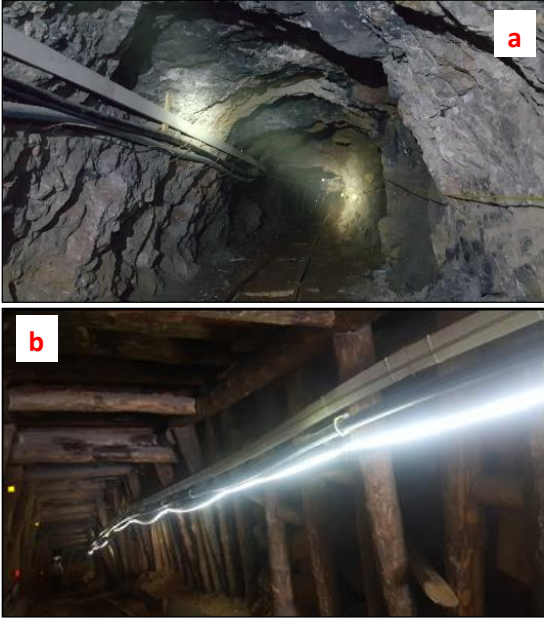
Bölge her iki faya eşit uzaklıkta yer almaktadır. Proje alanı civarında sismik hareketlenme olasılığının düşük olması, madencilik çalışmalarının daha sağlıklı yürütülebilmesi, çalışma alanında oluşturulan

galeri/desandre/fere gibi mühendislik yapılarının duraylılığını koruması açısından avantaj sağlamaktadır.

3 Çalışma alanında yapılan genel değerlendirme ve gözlemler

Göynük bölgesi yeraltı *Pb-Zn* ocağı siyah kireçtaşı formasyonu içerisinde yer almaktadır ve bu formasyon tüm desandre ve galeri uzunluğu boyunca hakim durumdadır. Ocak girişi (desandre başlangıcı) 1300m, desandre tabanı 1230m kotunda yer almaktadır. 165m uzunluğa sahip desandre yaklaşık 26-27° eğime sahiptir. Desandre yaklaşık 30 yıl önce 2.0m X 2.0m (taban genişliği X yüksekliği) ebatlarında açılmıştır. Yakın zamanda başlayan madencilik faaliyetleri ile desandrenin boyutları 2.5m X 2.5m olacak şekilde genişletilmiştir. Kesit genişletme çalışmalarını takiben desandrenin ilk bölümleri oldukça özenli bir şekilde tahkim edilmiş ve ilk 18 metrelik bölümde beton tahkimat uygulaması gerçekleştirilmiştir. Beton bölümden sonra yaklaşık 33 m boyunca devam eden ahşap kasa tahkimat uygulaması yapılmıştır. Desandre boyunca kesintisiz olarak tahkimat uygulanan en uzun bölüm burasıdır. Bu bölümde tahkimat 0.3-0.5 m aralıklarla çintili kasa uygulaması şeklindedir. Aralarda fırça üst kısımlarda kama uygulaması yapılmıştır. İlave olarak 4 metrelik sarmalar kullanılarak kasa tahkimat güçlendirilmiştir. Bilindiği gibi tahkimat sistemleri, yeraltında tavandan veya yan duvarlardan gelen kavlak, akma veya gerilmelerden dolayı meydana gelebilecek göçmeleri önlemek amacıyla yapıldığından amaca uygun bir tahkimat sistemi uygulanmalıdır. Bu bölümde uygulanan tahkimat aralığının oldukça yeterli olduğu, iç kısma takviye olarak uygulanan 4 metrelik sarma uygulaması ile hem tavanda hem de yanlarda oluşabilecek gerilme ve yüklere karşı oldukça dirençli hale getirildiği tespit edilmiştir. Desandrede 33 metrelik kasa tahkimat uygulamasını takip eden 28 metrelik kısım tahkimatsız geçilmiştir. Bu tahkimatsız bölümden sonra sırasıyla; 7 metrelik tahkimatlı bölüm, 22 metrelik tahkimatsız bölüm, 7 metrelik tahkimatlı bölüm gelmektedir. Tahkimat uygulaması yapılan bu bölümden desandre tabanına kadar olan bölüm tahkimatsız olarak geçilmiştir. Desandre uzunluğu boyunca tahkimatlı ve tahkimatsız olarak geçilen bölümler Şekil 4'te görülmektedir. 7 metrelik tahkimat uygulaması yapılan bölümler killi limonit dolguların gözlemlendiği küçük ölçekli kırık/fay gözlemlenen bölümlerdir. Bu bölümler işletme mühendisleri tarafından tespit edilmiş ve yine onların nezaretinde tahkim edilerek güçlendirilmiştir. Yapılan tahkimat çalışmaları oluşabilecek yükleri karşılayacak niteliktedir. Tavan bölümü kamalarla kapatılarak muhtemel blok/parça kaya düşmesinin önüne geçilmiştir. Desandre ile galeriyi bağlayan kavşak noktasından 6-7 metre ileride “Fere” çalışması yapılmaktadır. Toplam 120 metre olarak planlanan Fere'de 75. metrede çalışmalar devam etmektedir. İkinci acil çıkış ve havalandırma amacıyla kullanılması düşünülen Fere 45° eğimli olarak sürülmektedir.

Desandre ile birlikte 30 yıl önce yürütülen madencilik çalışmaları için açılmış olan galeri yaklaşık 100 metre uzunluğundadır ve mühendisler tarafından genişletilmiş yeni ebatları 2.2m X 2.5m'dir.



Şekil 4. Desandre uzunluğu boyunca a) tahkimatsız ve b) tahkimatlı olarak geçilen bölümler

Galerinin kavşaktan itibaren 45 metrelik bölümünde tahkimat uygulaması yapılmıştır. Bir metre aralıklı kasa tahkimat uygulamasının yapıldığı tespit edilen bu bölümde teknik elemanlar tarafından gerekli görülen bölümlerde (yanlardan baskı olduğu durumlarda) kilit sarma tahkimat ile takviye edildiği tespit edilmiştir. Bu bölümden itibaren galeri sonuna kadar olan bölüm tahkimatsız geçilmiştir. Tahkimatsız geçilen bu bölümde herhangi bir üretim çalışması yoktur. Galerinin sonunda cevherleşmenin başladığı bölümde birkaç noktada yatay dilimler şeklinde üretim noktaları mevcuttur. Bu bölümlerde oldukça yoğun bir tahkimat uygulaması göze çarpmaktadır. Bu bölümde uygulanan kasa tahkimatın aralığı 0.7m-1.0m arasındadır. Kullanılan tahkimat direklerinin çapları oldukça geniştir. Hâlihazır durumda çalışma sahası içerisindeki ana galeri eksenini *K63B* yönündedir ve *GD* yönünden *KB* yönüne doğru açılmıştır. Desandre eksenine ise *K60D* yönündedir ve *GB* yönünden *KD* yönüne doğru açılmıştır. Eksenini *K22D* olacak şekilde bir başyukarı sürülmesi de planlanmaktadır. 165 metre uzunluğundaki mevcut desandrenin devam ettirilerek 300 metreye uzatılması planlanmaktadır. Desandre tamamlandıktan sonra mevcut galeriden 59 metre alt kotta eksenini *K77B* olan ikinci bir galeri açılarak cevherleşmenin yoğun olduğu bölüme ulaşılması planlanmaktadır. Bu aşamadan sonra “aşağıdan yukarıya ilerletimli, yatay dilimli, dolgulu” yöntemle üretime geçilecektir. Aşınmış ve eskimiş tahkimatlar düzenli olarak değiştirilmektedir. Tahkimat işlemi yapılmadan önce teleskobik direklerle baskı kontrol altına alınıp daha sonra değiştirilecek tahkimatın hemen yanına kasa atılarak tahkimat işlemi gerçekleştirilmektedir.

4 Yerinde ve laboratuvarında yapılan test/ölçümler

Kaya kütlelerinin en doğru şekilde karakterize edilmesi, tünel, galeri ve şev gibi mühendislik çalışmalarını yürütürken tasarım, kazı yöntemi ve destek türünün

belirlenmesinde hayati öneme sahiptir. Kaya kütlelerinin davranışı bu tür projelerin güvenliği ve bütçesini doğrudan etkilemektedir. Günümüze kadar çok sayıda kaya kütle sınıflama sistemi geliştirilmiştir [12]. Bu çalışma kapsamında en çok bilinen ve uygulanan yöntemlerden RMR [13, 14], Q [15, 16] ve GSI [17-20] sınıflama sistemlerinin en güncel versiyonları kullanılmıştır. RMR, Q ve GSI sınıflama sistemlerinde girdi olarak kullanılacak parametrelerin bir bölümü laboratuvar testleri ile belirlenirken önemli bir bölümü ise yerinde yapılan ölçüm ve gözlemlerle belirlenmiştir. Yöntemlerden ilki olan Jeomekanik kaya kütle sınıflaması ilk defa Bieniawski [13] tarafından geliştirilmiş ve son olarak 1989’da [14] değişikliklere uğramıştır. Sistem uygulanırken kaya kütlelerinin yapısal olarak alt birimlere ayrılması ve ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekir. Kaya kütlelerinin mühendislik verilerinin tespitine yarayan bu yöntem, yer altı inşaatları, tüneller, şev yamaçları için uygun kaya destek sistemlerinin seçiminde kullanılmaktadır. Sistem altı temel parametre üzerine kurgulanmıştır.

- Kayanın tek eksenli basınç dayanımı (UCS) veya nokta yük dayanım indeksi ($I_{s(50)}$)
- RQD kaya niteliği-göstergesi (%)
- Yer altı suyu koşulları
- Süreksizlik aralığı
- Süreksizlik durumu (devamlılık, ayrışma/bozunma, pürüzlülük, dolgu ve açıklık)
- Süreksizlik yönelimi (doğrultusu ve eğimi)

Kaya kalitesi, RMR olarak adlandırılan ve 0 ile 100 arasında değişen puanlardan oluşan bir kavramla sayısallaştırılır. İlk adım, projenin çeşidinden bağımsız olarak kaya kütlelerinin niteliği hakkında genel bir değerlendirme yapmaktır (ilk beş parametre). Daha sonra yapılan bu değerlendirmeler projenin uygulandığı alanın doğrultu ve eğim yönlerine göre düzeltilir (tünel, şev ya da temel). Düzeltmelerden sonra elde edilen derecelere göre kayaların sınıflandırılması ve bu sınıfların yorumlanması yapılır.

RQD karot kalitesinin temel göstergesidir ve kaya kalitesi sınıflaması yaparken zaman zaman tek başına kullanılır. Ancak çatlak karakteri, kaya dayanımı ve çevre faktörleri gibi parametreleri de dikkate alabilmek için çoğu zamanda bu parametrelerle birlikte kullanılır. RQD, sondaj karotları yardımıyla kaya kütle kalitesinin niceliksel olarak kestirilebilmesi için geliştirilmiştir [21]. RQD, on (10) santimetreden uzun sağlam karotların toplam karot uzunluğuna oranı olarak tanımlanabilir. Kireçtaşı birimini kesen sondaj logundan, birime ait RQD değeri hesaplanmış ve % 93 olarak bulunmuştur (Şekil 5). Buna göre formasyon “oldukça sağlam zemin” sınıfına girmektedir. Kaya malzemesinin RQD değeri olan % 93 değerinin RMR puan değeri 18.5’tir. Karot örnekleri kesme-düzeltme makinesi yardımı ile boyutlandırılmış, yüzeyleri pürüzsüzleştirilerek birbirine paralel hale getirilmiştir. Numunelerin standartlara göre gerçekleştirilen testleri sonucunda belirlenen ortalama birim hacim ağırlık (γ), UCS ve $I_{s(50)}$ değerleri Tablo 1’de verilmiştir [22].

Tablo 1. Pb-Zn Ocağının kireçtaşı birimi örneklerinin γ , UCS ve I_s değerleri

No	γ Birim hacim ağırlık (gr/cm^3)	$I_{s(50)}$ Nokta yük dayanımı (MPa)	UCS Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	Kaya Sınıfı
1	2.74	3.24	71.6	R4
2	2.67	3.50	100.8	R5
3	2.70	4.36	85.2	R4
4	2.71	3.40	92.0	R4
5	2.69	2.60	99.7	R4
6	2.68	2.63	93.2	R4
Ortalama	2.70 ± 0.025	3.29 ± 0.65	90.4 ± 10.9	R4



Şekil 5. İşletmenin karotlu sondaj arşivinden bir görsel

Siyah kireçtaşı birimlerin ortalama γ değeri $2.7 gr/cm^3$, $I_{s(50)}$ dayanımı 3.29 MPa ve UCS değeri 90.4 MPa olarak tespit edilmiştir. Ortalama test sonuçlarının kaya dayanım mühendislik sınıflamasına göre [23] genel bir değerlendirilmesi yapıldığında R4 “dayanımlı kaya” kategorisinin üst sınırında yer aldığı görülmektedir. Kaya malzemesinin 90.4 MPa’lık UCS değerinin RMR puanı 9’dur.

Yeraltı projelerinde suyun varlığı kaya kütesinin davranışında oldukça etkili olabilmektedir. Proje kapsamında herhangi bir pilot tünel ya da araştırma galerisi varsa galeri/tünel içine gelen su miktarını veya çatlak suyu basıncını doğrudan ölçerek RMR puanını kolayca belirlemek mümkün olabilmektedir. Su geliminin belirlenebilmesi için kuyu loğları ve sondaj karotlarından da faydalanılabilir. Bu çalışmada kazı aynalarında gözlem yapılmış ve bu gözlemleri dikkate alan su sızıntısıyla ilgili tanımlamalardan yararlanılmıştır [22]. Süreksizliklerin su durumu analiz edildiğinde “süreksizlik yüzeyi kuru ve sızıntı yok”, esas olarak ana yapıda dolgunsuz süreksizlikler için “süreksizlik yüzeyi kuru, suyun aktığına ilişkin bir gösterge yok” sınıflarının geçerli olduğu belirlenmiştir. Genel olarak desandre ve galeri yüzeyinde yapılan gözlemlere göre herhangi bir su akışı gözlemlenmemiştir ve “tamamen kuru” koşullar geçerlidir (RMR puan değeri 15).

Süreksizlik aralığı, bir süreksizlik takımını oluşturan süreksizlikler arasındaki dik mesafedir [22]. Süreksizlik aralığı, sondaj karotlarından belirlenebildiği gibi, mostrada süreksizlik doğrultusuna dik yönde serilen şerit metre uzunluğunda gözlenebilen süreksizliklerin sayılması ile de belirlenebilir. Ölçüm hattı veya sondaj eksenini boyunca iki süreksizlik arasındaki uzaklık “görünür ara uzaklık” olarak tanımlanır. Süreksizlik aralıklarını belirlemek amacıyla

galeride “Hat Etüdü Yöntemi” ile ölçümler yapılmıştır. Galeride yapılan ölçümler galeri eksenine dik yönde, galeri tavanından tabanına doğru 200cm’lik üç farklı hatta şerit metre yardımıyla yapılmıştır (Şekil 6a). Galerideki süreksizlik setinin neredeyse galeri tabanına paralel seyretmesi sebebiyle ölçümler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerin ortalamalarına göre ara uzaklıklar 1. hat için 153 mm (9 adet süreksizlik); 2. hat için 191 mm (8 adet süreksizlik) ve 3. hat için 278 mm (5 adet süreksizlik) olarak belirlenmiştir. Üç hattın 207 mm (0.207 m)’lik ortalaması ile bu kaya biriminin “orta derecede ara uzaklıklı” sınıfında olduğu saptanmıştır [22]. Süreksizlik ara uzaklığı puanı ana galeri için 8 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Hat etüdü yöntemi ile ölçüm hattı boyunca süreksizlik aralığının tayini



Şekil 7. Şerit metre ile süreksizlik devamlılığı ölçümleri

Değerlendirme sırasında süreksizlik aralığına ek olarak süreksizlik durumu da dikkate alınır. Süreksizliklerin devamlılığı, kohezyon görülmeyen alanların toplam çatlak alanına oranıdır [22]. Süreksizliklerin devamlılığı galeri

içerisindeki süreksizliklerin izleri ölçülerek tespit edilmiştir (Şekil 7). Yapılan çok sayıdaki ölçümlerin ortalama değerlerine göre süreksizliklerin devamlılığının “orta derecede devamlılık” kategorisinde yer aldığı saptanmıştır. Orta derecede devamlılık sınıfındaki süreksizliğin RMR puanı 2’dir.

Açıklık, bir süreksizliğin karşılıklı iki yüzeyinin arasındaki dik mesafedir. Bu bölüm boş olabileceği gibi herhangi bir dolgu maddesi veya su ile doldurulmuş olabilmektedir [22]. Bu tanımdan hareketle galeri uzunluğu boyunca dijital kumpas ile çok sayıda ölçüm yapılmıştır. Elde edilen ortalama açıklık değeri 4.69 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 8). Galerideki kireçtaşı birimleri içerisinde gelişmiş süreksizliklerin açıklığı ISRM [22] ölçütlerine göre değerlendirildiğinde “boşluklu yapılar-orta derecede geniş ve 2.5-10.0 mm” kategorisinin genel durumu yansıttığı saptanmıştır. Buna göre söz konusu alanda yer alan süreksizlikler için RMR puanı 1’dir. Süreksizliklerin büyük bölümü “dolgunsuz” olmasına karşın, nadiren “kapalı-sert” dolgulu olanları da mevcuttur.



Şekil 8. Dijital kumpas yardımı ile Süreksizlik Açıklığı ölçümleri

Dalgallılık ve pürüzlülük sırasıyla, süreksizlik yüzeyinin büyük ölçekte (m boyutunda) ve küçük ölçekte (cm boyutunda) düzlemsellikten sapmasının bir ölçüsüdür [22]. Önerilen değişik yöntemler arasından Barton ve Choubey [24] pürüzlülük profilleri ile süreksizlik yüzeylerinden gözlemlenen değerler karşılaştırılarak JRC (süreksizliklerin pürüzlülük değeri) belirlenmiştir. Bu çalışmada, galerinin içinden geçtiği kireçtaşı formasyonunda JRC değerleri 10-12 puan aralığındadır. Süreksizlikler “pürüzlü” sınıfında olup aynı zamanda yer yer “dalgalı ve basamaklı” bir yapı da göstermektedir. Bu veriler ışığında yerinde yapılan değerlendirmeye göre pürüzlülük sayısı için genel olarak “pürüzlü” sınıfı ve 5 puanının en gerçekçi değer olduğu saptanmıştır. Galeri uzunluğu boyunca yapılan gözlem ve incelemelerde süreksizliklerin dolgu durumunun çeşitlilik arz ettiği görülmüştür. Dolgunsuz kısmen kapalı sayılabilecek süreksizlikler olmakla beraber en uygun değerlendirmenin “yumuşak dolgu < 5 mm” olabileceği değerlendirilmiştir. Dolgu gözlemlenen süreksizliklerde demir oksit sıvanmaları mevcuttur ve genel olarak sert ve kaynaşmış nitelikte değildir. Bu değerlendirmeden hareketle dolgu için RMR puanı 2 olarak belirlenmiştir.

Süreksizlik yüzeylerinin bozunma durumunu belirlemek için saha çalışmaları sırasında kullanılacak bozunma

sınıflaması ölçütleri önerilmiştir [22]. Yerinde yapılan incelemelerde kayacın dayanımı ve temel özellikleri değerlendirildiğinde, söz konusu lokasyonda yer alan kayacın jeolog çekici ile yirmiden (20) fazla darbe ile kırılabilirdiği saptanmıştır. ISRM [22]’ye göre ana kayaç (kireçtaşı) “bozunmamış (taze) kaya” sınıfına girmektedir. Kayacın süreksizlik düzlemleri incelendiğinde, süreksizlik düzlemlerinde renk değişimleri gözlenmektedir. Jeolog çekici ile 4-5 darbe vurulduğunda kayaç eklem yüzeyinden kırılabilmekte, ya da çentik/çatlaklar oluşabilmektedir. Tüm bu değerlendirmeler göz önüne alındığında süreksizliklerin “bozunmamış - sağlam kaya (R4)” sınıfında olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 9a).



Şekil 9. a) Jeolog çekici yardımıyla kayaç dayanımının yerinde tespitine yönelik çalışmalar, b) Sağlam kaya ve eklem düzlemleri üzerinde Schmidt çekici ile yapılan ölçüm çalışmaları

Galeri ve desandrenin kavşak noktasında sağlam kaya ve süreksizlik düzlemleri üzerinde Schmidt çekici ile ölçüm çalışmaları yapılmıştır (Şekil 9b). Yukarıda bahsedilen kaya bozunma sınıflamaları tamamen gözlemlenilen oluşturluklarından zaman zaman öznel değerlendirmeler söz konusu olabilmekte ve aynı süreksizlik yüzeyi için farklı yorumlar yapılabilmektedir. Bozunma derecesi ile ilgili bu tür hataların giderebilmesi için aşağıda verilen sayısal indeks tanımlanmıştır [23].

$$W_c = R_f / R_w \quad (1)$$

Bu çalışmada, galeride yüzeyleyen kireçtaşı birimi için yapılan bozunma katsayısı (W_c) hesaplamasında taze kayanın Schmidt çekici sekme sertlik değeri (R_f) olarak 42.4; eklem düzlemi için Schmidt çekici sekme sertlik değeri (R_w) olarak 37.6 ortalama değerleri kullanılmıştır. Sahada yapılan bu deneyin sonuçları kullanılarak kayacın bozunma derecesi ($W_c=1.13$) “az bozunmuş” olarak belirlenmiştir. Bu

değerlendirmelerden hareketle RMR puanı 5 olarak belirlenmiştir [23].

Süreksizliklerin yönelimi kaya davranışını etkileyebilmektedir. Bieniawski, uygun veya uygun olmayan yönelim pozisyonlarının uygun olup olmaması durumuna göre “*Temel RMR*” puanının (ilk beş parametre toplamı) düzeltme yapılarak kullanılmasını önermektedir. Burada uygun süreksizlik yönelimi için toplam puanda herhangi bir azaltma yapılmaz ancak süreksizlik pozisyonlarının uygun olmadığı tünel çalışmalarında en fazla yirmibeş (25) puana kadar azaltma yapılır. Süreksizlik takımlarının yönelimini sondaj çalışmalarıyla belirlemek mümkün değildir ancak bazı özel alet ve yöntemlerle belirlemek mümkün olabilir [25]. Süreksizlik yönelimi, düşey galeri ve şaftta bir kamera yardımıyla çıplak gözle tespit edilebilir. Cevherleşmenin yönelimi, açılan galeri ve oluşturulan yeraltı açıklıklarının geometrisini planlamada belirleyici olmaktadır. Bu bağlamda hali hazır durumda yeraltı açıklıklarının nihai yönelimi hesaplamalarda belirleyici olacaktır. Yeraltı işletme yöntemiyle üretim yapılan, *Pb-Zn* ocağında, birbiriyle bağlantılı desandre ve galerideki siyah kireçtaşı biriminde, jeolog pusulası ile yapılan doğrultu, eğim ve eğim yönü ölçümleri ile hâkim süreksizlik takımlarının yönelimleri belirlenmiştir (Şekil 10). Sahada yapılan gözlemler ve yapılan ölçümler neticesinde çalışma alanına hâkim bir (1) ana süreksizlik takımı belirlenmiştir.



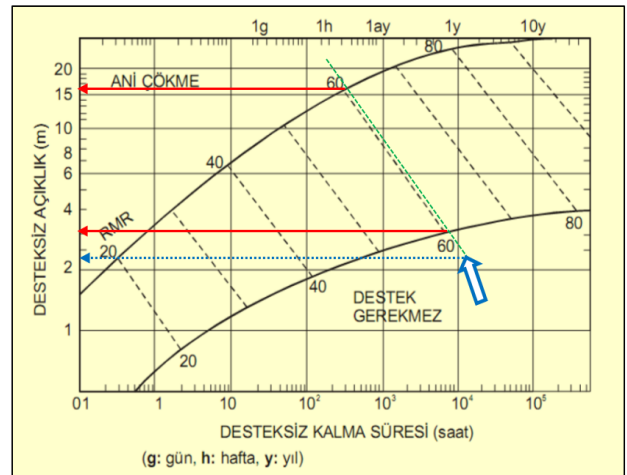
Şekil 10. Desandre ve galeride jeolog pusulası ile yapılan doğrultu, eğim ve eğim yönü ölçümleri.

Hâlihazır durumda ruhsat sahası içerisindeki Ana galeri eksenini *K63B* yönündedir ve *GD* yönünden *KB* yönüne doğru açılmıştır. Yapılan süreksizlik ölçümlerine göre; ana galerideki hâkim süreksizlik setinin yönelimi (*K38B/5°GB*) olarak belirlenmiştir. RMR sınıflamasının altıncı parametresi olan “*Süreksizlik Yönelimi Düzeltmesi*”, hâkim süreksizlik takımının doğrultusu ile galeri (tünel) gidişi arasındaki açı ve süreksizlik takımının eğimi esas alınarak belirlenir. Ana Galeride *K63B* yönündedir. Ana galeri, hâkim süreksizlik seti ile 25° açı yapmakta olup süreksizlik eğimi ortalama 5°’dir. Mevcut galeri gidişi (yönelimi) ile süreksizliklerin doğrultusu arasındaki açı ve süreksizliklerin eğimi değerlendirilerek “*Düzeltilmiş RMR*” puanının saptanması gerekir. Ana galeride süreksizlik takımının doğrultusu galeri eksenine neredeyse paralel durumdadır.

Tablo 2. Göynük ocağı ana nakliyat galerisinin RMR kaya sınıflama değerlendirmesi.

Ana Parametreler	Alt Parametreler	Değer	Puan
UCS		90.4 MPa	9.0
RQD Değeri		% 93	18.5
Yeraltı Suyu		Kuru	15.0
Süreksizlik Aralığı		207 mm	8.0
Süreksizlik Durumu	Süreksizlik Uzunluğu	3-10 m	2.0
	Süreksizlik Açıklığı	1-5 mm	1.0
	Pürüzlülük Durumu	Pürüzlü	5.0
	Dolgu Durumu	Yumuşak dolgu < 5mm	2.0
	Bozunma Durumu	Az Bozunmuş	5.0
Temel RMR puanı			65.5
Süreksizlik yöneliminin etkisi		Orta	-5
Düzeltilmiş RMR puanı			60.5

Eğim açısı itibarıyla “*Doğrultudan bağımsız eğim 0-20° arasında (Orta)*” en uygun kategori olarak belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında ana galeri için (-5 puan) düzeltme uygulanarak “*Düzeltilmiş RMR*” puanı belirlenmiştir. Yukarıda bahsi geçen parametreler ışığında Göynük ocağındaki galerinin RMR kaya sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi yapılmıştır. Ana nakliyat galerisinin gerekli bölümlerinde tahkimat önlemleri alınmakla birlikte tahkimatsız olan bölümler de mevcuttur. Ana galerinin tahkimatsız olarak stabil kalabileceği süre yaklaşık olarak hesaplanmaya çalışılmıştır. Arazide yapılan ölçümler, gözlemler ve laboratuvar testlerinin sonuçlarına göre Temel ve Düzeltilmiş RMR sistemi puanı hesaplanmıştır. RMR sınıflama sisteminde kaya kütlelerinde oluşturulacak yeraltı açıklıklarının belirli bir tavan genişliğine göre desteksiz durma sürelerinin tahmini amacıyla Şekil 11’de verilen grafik kullanılmaktadır. Mevcut koşullarda ana nakliyat galerisinin “*Düzeltilmiş RMR*” puanı 60.5 olarak hesaplanmıştır (Tablo 2). Ana nakliyat galerisini oluşturan kaya yapısının “*iyi kaya*” sınıfında yer aldığı ancak “*orta derecede sağlam kaya*” sınırında yer aldığı görülmektedir.



Şekil 11. RMR sınıflama sistemine göre yeraltındaki boşlukların tavan açıklığı ve desteksiz ayakta kalma süresi grafiği [15]

Bu kaya koşullarında 16m’den geniş açıklıklarda ani çökme gözlemlenebilecek iken, 3.5m’den daha küçük

açıklıklarda tahkimat uygulanmasına gerek yoktur. Ana galeri kesiti 2.2m X 2.5m olduğundan, gerekli görülen kısımlarda tahkimat yapılması koşuluyla tahkimatsız olarak stabil kalabileceği öngörülmektedir. Genel olarak masif yapı arz eden ana nakliyat galerisinde özellikle kısmi deformasyon gözlenen bölümlerde hâlihazırda tahkimat uygulaması yapılmış durumdadır. RMR sisteminin gerilme parametrelerinden yoksun olduğu söylenebilir. Bu sebeple çalışma alanında Q- sınıflama sistemi de kullanılmıştır. Q (Rock Mass Quality) veya Norveç Jeoteknik Enstitü Sınıflama (NGI) sistemi olarak bilinen bu sistem, Barton ve diğ. [15] tarafından geliştirilmiştir. İskandinav tünellerinde gerçekleştirilen 200'e yakın inceleme ve değerlendirmelerle oluşturulan Q-sisteminin kaya sınıflama sistemi konusundaki gelişmelere katkısı büyük olmuştur. Uzun yıllar ilk hali ile kullanıldıktan sonra, sistemin destek seçimlerine yönelik bölümü [16] ile "Kazı destek oranı" (ESR) ve "Gerilme azaltma faktörü" (SRF) değerleri revize edilmiştir [26]. Q-kaya kütlesi sınıflama sistemini belirten denklem aşağıda tanımlanmıştır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2)$$

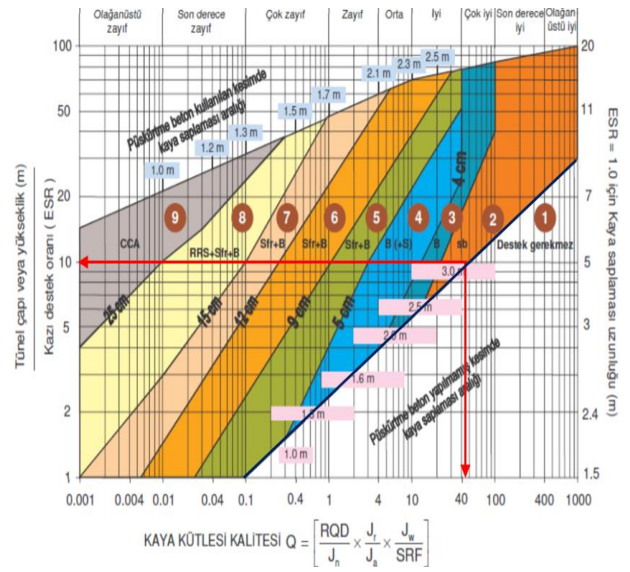
Burada; RQD, kaya kalite göstergesi; J_n , eklem takım numarası; J_r , eklem pürüzlülük numarası; J_a , eklem ayrışma numarası; J_w , eklem suyu azalım faktörü; SRF, gerilme azalım faktörü; RQD/ J_n , blok boyutunun ölçüsü; J_r/J_a , bloklar arasındaki kayma direnci ve J_w/SRF , aktif gerilmedir. Q-sınıflama sistemi değerinin hesaplanması için kullanılan altı parametre Tablo 3'te verilmiştir.

Q-kaya kütlesi sınıflama sistemi değeri, bu parametreler kullanılarak Denklem (2)'den 46.5 olarak hesaplanmış olup, bu değere göre "çok iyi kaya" sınıfına girmektedir. Q-sistemine göre sınıflandırılan tünel/galeri kayalarında destek/tahkimat türünün saptanmasında "Eşdeğer Boyut" (De) değerinin bulunması gerekir. Eşdeğer boyut değeri, aşağıdaki denklemden yararlanılarak bulunur.

$$\text{Eşdeğer boyut (De)} = \frac{\text{En, çap veya yükseklik (m)}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}} \quad (3)$$

Denklemdaki ESR değeri, kazı türü, amacı ve derinliği (yüzeyden) ile ilgilidir. Bu değer yer altı açıklığının duraylı kalabilmesi için yerleştirilen destek sistemi üzerinde etkisi olan bir tür güvenlik katsayısıdır. Çalışma alanı kazı tipi olarak "C sınıfı" olduğundan ESR değeri 1.6 olarak belirlenmiştir. Grimstad ve Barton [16] tarafından modifiye

edilmiş tünel destek sistemi abağında 46.5 olan Q-değeri için De değeri 10 m olarak belirlenmiştir (Şekil 12). Bu değerler Denklem (3)'te yerine konulduğunda galeri için tahkimatsız olarak ayakta kalabilecek en, çap veya yükseklik 16 m olarak hesaplanmıştır. Destek kategorilerinde saplama uzunluklarına dair herhangi bir öneri yoktur. Saplama uzunlukları tavan ve duvar için sırasıyla Denklem (4) ve Denklem (5) kullanılarak hesaplanmıştır (2.20 m ve 2.23 m). En büyük desteksiz kazı genişliği ($B_{\text{max-desteksiz}}$) Denklem (6)'dan 14.86 m, kalıcı destek basıncı Denklem (7)'den 0.185 kg/cm^2 olarak hesaplanmıştır. Eklem takım sayısının 3'ten az olması durumunda kalıcı destek basıncı değeri Denklem (8)'e göre 0.107 kg/cm^2 'dir.



Şekil 12. Q-Kaya kütlesi sınıflama sistemi için modifiye edilmiş tünel destek sistemi abağı [16].

$$L = 2 + [(0.15 \times B) \div ESR] \quad (4)$$

$$L = 2 + [(0.15 \times H) \div ESR] \quad (5)$$

$$B_{\text{max-desteksiz}} = 2 \times ESR \times Q^{0.4} \quad (6)$$

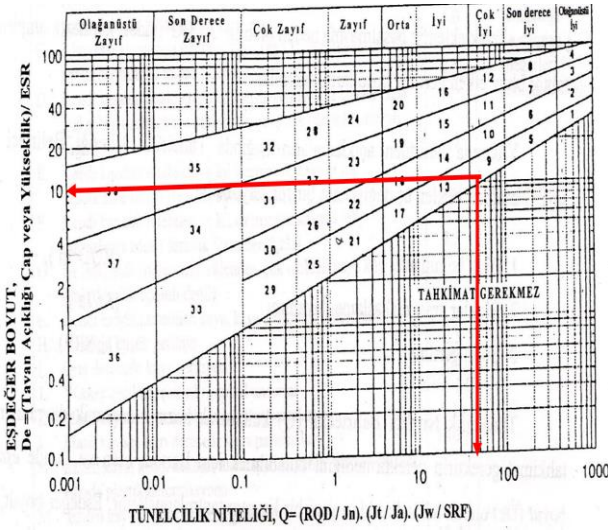
$$P_{\text{tavan}} = \frac{2 \times Q^{\frac{1}{3}}}{J_r} \quad (7)$$

$$P_{\text{tavan}} = \frac{2 \times J_n^{\frac{1}{2}} \times J_r^{-1} \times Q^{\frac{1}{3}}}{3} \quad (8)$$

Tablo 3. Kireçtaşı birimlerine ait Q-kaya kütlesi sınıflama sistemi puanlama tablosu

No	Parametreler	Sınıf	Tanımlama	Puan
1	RQD (Kaya Kalite Göstergesi)	E	Çok iyi (Mükemmel) % 93	93
2	J_n (Eklem takımı sayısı)	C	Bir eklem takımı-düzensiz eklemeler	3
3	J_r (Eklem pürüzlülük değeri)	B	Dalgah-pürüzlü	3
4	J_a (Eklem yüzeyi bozunma değeri)	C	Eklem cidarları az ayrışmış, yumuşamayan tipte kumlu parçacıklar, kilsiz ayrışmış kaya.	2
5	J_w (Eklem suyu azaltma faktörü)	A	Kuru kazı veya düşük su geliri	1
6	SRF (Gerilme azaltma faktörü)	J	Orta gerilme, gerilme koşulları elverişli	1

Burada; B, kazı genişliği (2.2m); H, kazı yüksekliği (2.5m); L, saplama uzunluğu; ESR, kazı destek oranı ve P_{tavan} , kalıcı destek basıncıdır. Kazı/tahkimat oranının, kullanım amacı ve süresi ile kabul edilebilir duraysızlık derecesine göre Q-sistemi için tahkimat şekli ve özelliklerinin özetlendiği tablodaki değerleri alması öngörülmüştür. Barton ve arkadaşlarının [15] hazırladığı ve sonra yeraltı kazılarında çelik lif destekli püskürtme betonun kullanımının artmasından dolayı güncellenen [16] abakta, Q ve De verileriyle projedeki destek kategorisi belirlenebilmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Yeraltı açıklıklarında kalıcı destek ve güçlendirme sistemlerinin tespiti için Q destek grafiği [16]

Kayaçlar küçük ölçekte dikkate alındıklarında kayaç malzemesi önem kazanırken, ölçek büyüdükçe sağlam kayaç malzemesinden eklemli kayaç kütlelerine geçiş söz

konusudur. Bu nedenle çok sayıda süreksizlik içeren kaya kütlelerinin davranışını kayaç malzemesi ile birlikte süreksizlikler denetler. Bu nedenle, çatlaklı kaya kütlelerinin dayanımını belirlemek amacıyla Hoek ve Brown [27] tarafından ampirik bir yöntem (Görgül yenilme ölçütü) ortaya konulmuştur. Bu yöntem daha sonra geliştirilerek GSI kavramı ortaya çıkmıştır [28]. Homojen ve izotrop kaya kütlelerinin dayanımlarının bir ifadesi olan Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünde başlangıçta RMR puanları kullanılarak kaya kütle sabitleri (m_b , s ve a) belirlenirken, 1995 yılından sonra sisteme GSI kavramı eklenmiştir. Başlangıçta RMR ve Q-sınıflaması puanları ile ilişkilendirilirken, GSI daha sonraki yıllarda tek başına bir sınıflama sistemi olarak kullanılmaya da başlanmıştır [20].

Palmström [29-31] tarafından tanımlanan hacimsel eklem sayısı (J_v), birim hacimdeki yani 1 m^3 'teki çatlak sayısını göstermektedir ve Denklem (9)'la bulunmaktadır. Burada; N_n , gözlenen her bir eklem seti için ölçüm hattı boyunca sayılan süreksizliklerin sayısı, L_n , gözlenen her bir eklem setine dik yönde seçilmiş ölçüm hattının uzunluğudur. Ana galeride saptanan eklem takımlarının şerit metre yardımıyla yapılan ölçümlerinden ortalama J_v değeri 11 adet/m^3 olarak hesaplanmıştır. Kayaç hacimsel eklem sayısı parametresi açısından "orta büyüklükteki bloklar" sınıfındadır [22]. Palmström [29, 31]'e göre de J_v tanımı "orta derecede düşük" olup, kaya "orta derecede eklemli" sınıfına girmektedir.

$$J_v = \frac{N_1}{L_1} + \frac{N_2}{L_2} + \frac{N_3}{L_3} + \dots + \frac{N_n}{L_n} \quad (9)$$

$$SR = -17.5 \times \ln(J_v) + 79.8 \quad (10)$$

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (11)$$

Tablo 4. GSI parametresinin hesabında kullanılan parametreler ve puan değerleri

Parametre	Açıklama	Formül/çalışık	Gözlem/tespit	Puan
RQD (%)	Kaya kalite göstergesi	-	Karot sandığı ölçümler	93
D_F	Patlatma hasarı ve gerilme gevşemesinden kaynaklı örselenme faktörü	-	Kontrollü patlatma	0.2
m_i	Kaya türüne bağlı malzeme katsayısı (kaya malzemesi)	-	Sparitik Kireçtaşı	10
σ_3	Yenilme anındaki en küçük yanıl (minör) asal gerilme	-	Saha gözlemi	0
σ_c	Sağlam kaya malzemesi basınç dayanımı (MPa)	-	Tablo 1	90.4
J_v	Kaya kütle hacimsel çatlak sayısı (adet/ m^3)	Denklem (9)	-	11
SR	Yapısal özellik puanı	Denklem (10)	-	37.8
SCR	Süreksizlik yüzey koşulu puanı	Denklem (11)	Saha gözlemi	13
GSI	Jeolojik dayanım indeksi	-	Şekil 14	50
m_b	İndirgenmiş malzeme katsayısı (yerinde kaya kütle)	$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D_F}\right)$	-	1.38
s	Kaya türüne bağlı sabit	$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D_F}\right)$	-	0.003
a	Kaya türüne bağlı sabit	$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{GSI/15} - e^{-20/3})$	-	0.506
σ_1	Yenilme anındaki en büyük düşey asal gerilme-kaya kütle yerinde basınç dayanımı (MPa)	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s\right)^a$	-	4.45
E_m	Deformasyon modülü (GPa)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	-	9.51
c	Kohezyon (MPa)	-	-	21.5
ϕ	İçsel sürtünme açısı (derece)	-	-	39.2°

Patlatma hasarı ve gerilme gevşemesinden kaynaklı örselenme faktörü (D_F) başarılı ve kontrollü bir patlatma uygulaması yapıldığından "0.2" olarak hesaba katılmıştır. Ana galeri uzunluğu boyunca hakim formasyon spartik kireçtaşıdır. Bu sebeple kaya türüne bağlı malzeme katsayısı (kaya malzemesi) değerleri " $m_1=10$ " olarak hesaba katılmıştır. Sahada yapılan gözlemlere göre galeri yan duvarlarında herhangi bir deformasyon-sıkışma izine rastlanmadığından yenilme anındaki en küçük yanal (minör) asal gerilme değerleri " $\sigma_3=0$ " olarak alınmıştır. Yapısal özellik puanı (SR) Denklem (10)'a göre hesaplanmıştır. Buna göre ana galerinin SR değerinin puanı 37.8'dir. Süreksizlik yüzey koşulu puanı (SCR), Şekil 14'teki abakta verilen ve süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğü (R_r : pürüzlü: 5 puan), süreksizlik yüzeyinin bozunma durumu (R_w : bozunmamış: 6 puan) ve süreksizlikteki dolgunun (R_f : yumuşak dolgu < 5 mm: 2 puan) durumundan elde edilen puanların toplamı ile Denklem (11)'e göre hesaplanmaktadır. Buna göre SCR değeri "13" olarak belirlenmiştir.

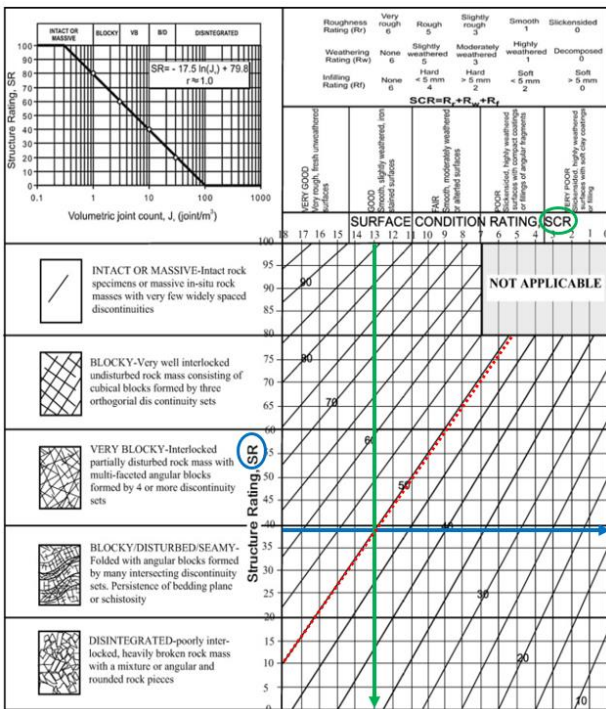
Göynük Pb-Zn ocağında yapılan gözlemler ve laboratuvarında yapılan karotlu sondajlardan elde edilen dayanım ve süreksizlik ölçümlerine göre Tablo 4'te sunulan veriler yardımıyla kireçtaşı birimlerin yaklaşık GSI puanları Şekil 14'te verilen abak yardımıyla belirlenmiştir. GSI puanı belirlenirken SR ve SCR değerlerinin kesiştiği nokta esas alınmıştır. Mevcut koşullara ana galerinin GSI puanı 50 "bloklü-örselenmiş" olarak bulunmuştur ancak "çok bloklü" kaya sınıfının sınırında yer almaktadır. Elde edilen bu değerler, tektonik faaliyetler sonucunda yer yer kırıklı bir yapı arz eden ancak geniş ve sağlam bloklar sunan kireçtaşlarının tahkimatsız olarak ayakta kalabilme kabiliyetini sınırlayacak niteliktedir.

İşletmede uygulanacak patlama uygulamalarının "kötü denetimli" koşullarda gerçekleşmesi halinde kaya kütlelerinin tamamen "bloklü-örselenmiş" kaya sınıfında yer alma ihtimali söz konusu olabilecektir. GSI, kaya kütle dayanımındaki azalmayı farklı jeolojik koşullara göre kestiren bir yaklaşım sağlar. Jeolojik dayanım indeksi sistemi, eklemlili kaya kütlelerinin dayanımının sağlam kaya parçasının özellikleri ve farklı gerilme koşullarında bu parçaların hareket serbestlikleri, sağlam parçaların geometrik şekli ve parçaları birbirinden ayıran yüzeylerin durumu ile kontrol edildiği prensibine dayanmaktadır. Altere olmuş ve bozunmuş malzemeler ile çevrelenmiş yuvarlak parçalar içeren kaya parçalarının temiz-kaba süreksizlik yüzeyleri içeren köşeli kaya parçaları içeren kaya kütlelerinden daha zayıf kaya kütleleri oluşturacağı çok açıktır.

Kaya kütleleri sınıflaması sistemlerinin kullanımları önemli tasarım kolaylıkları sağlarken süreksizlik geometrisinin tanımlanmasındaki belirsizlikler gibi nedenler ile önemli değerlendirme hataları riskleri taşıdıkları unutulmamalıdır. Bu sebeple kesin bir rakam dikkate almaktansa belirli bir aralığın daha gerçekçi bir yaklaşım sağlayacağı bilinmelidir. Ayrıca, patlatma ile kazı yapılan kaya kütleleri gibi kazı nedeni ile oluşan çatlakların kaya kütleleri sınıflama sistemleri değerlendirmelerinde göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

5 Genel değerlendirme ve sonuçlar

Detaylı olarak incelenen parametrelere göre ocakları oluşturan kaya yapısının genel itibarıyla dayanımlı kayalardan oluştuğu görülmektedir. Karotların makro olarak incelenmesi yapıldığında genel olarak masif bir yapı arz ettiği, belirgin süreksizlik, deformasyon ve alterasyon izlerinin olmadığı belirlenmiştir. Basınç dayanımı ya da RQD gibi parametreler kayaya hakkında oldukça önemli bilgiler sağlasa da mühendislik projelerinde kaya kütlelerini bir bütün olarak değerlendirmek doğruya en yakın sonuçları vermektedir. Ocakta tercih edilen tahkimat sistemi genel olarak ağaç (kasa) tahkimattir. Altere olan bölümlerde ve şistli kayalar/cevher sınırlarında 0.5m ile 1.0m arasında değişen aralıklarla tahkimat uygulaması yapılmıştır. Cevher üretim yerlerinde küçük ölçekli kırık/faylanma olan bölgelerde tamamen tahkimat uygulandığı görülmektedir (süren kama kasa tahkimatı). İhtiyaç duyulan bölgelerde takviye uygulaması yapılmıştır. Kaya kütlelerinin dayanımında hidrojeolojik koşullar, süreksizliklerin detaylı özellikleri ve tektonizmanın etkileri oldukça önem arz etmektedir. Genel olarak küçük kesitlere sahip galerilerde yüksek su geliminin olmaması, belirgin süreksizlik takımlarının ve fayların olmaması gibi koşullarda rutin kontrollerin yapılması koşuluyla kaya kütlelerinin tahkimatsız olarak ayakta kalabilmesi mümkün olabilmektedir. Ancak altere olmuş kayaların, süreksizliklerin ve fay zonlarındaki cevherleşmenin başladığı bölgelerde mutlaka gerekli tahkimat önlemleri alınmalıdır. Genel olarak ana nakliyat galerileri ve üretim bölgelerinde yapılan tahkimat önlemleri yeterli görülmektedir. Ancak madenlerin dinamik yapılar olduğu ve üretimle birlikte sürekli değişim geçirdikleri



Şekil 14. Kantitatif GSI abağı [20]

unutulmamalıdır. Üretim için yapılan patlatmalar sonrasında özellikle kavlak taraması sürekli olarak yapılmalıdır. Gevşemiş ya da gevşeme ihtimali olan kaya blokları için ilave tahkimat önlemleri alınmalıdır. Mühendislerin gözetiminde gerekli görülen bölgelerde kasa, kasa altı sarma tahkimatı gibi uygulamaların devamlılığı sağlanmalıdır.

Bu çalışma kapsamında kireçtaşı formasyonu içerisinde açılmış galeride inceleme ve ölçümler yapılarak tahkimatsız olarak geçilen bölümlerin sağlamlığı ve stabilitesinin incelenmesi, elde edilen bulgular ve hesaplamalara göre bahsi geçen bu bölümlerin desteksiz olarak geçilmesinde sakınca olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışmalardan aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir:

RMR sistemine göre yapılan hesaplamalara göre ana galerideki hâkim kaya biriminin “iyi kaya” sınıfında olduğu ancak “orta derecede sağlam kaya” sınırında yer aldığı görülmektedir. Ana galeride çok uzun süreli çalışmalarda tahkimat gerektirmeden durabilecek maksimum açıklık 3.5 m olarak hesaplanmıştır. Mevcut kaya kütlesi koşullarında 16 m’den geniş açıklıklarda ani çökme gözlenebilecektir. Ana galeri kesiti 2.2m X 2.5m olduğundan yer yer tahkimat gerektirmeden durabilmesinde bir sakınca bulunmamakla birlikte, gerekli görülen, risk saptanan ve tehlike arz eden yerlerde mutlaka tahkimat uygulanmalıdır.

Q-sistemine göre ana galerideki çok kısa süreli çalışmalarda tahkimat gerektirmeden durabilecek maksimum açıklığın 16 m olduğu hesaplanmıştır. Q-sistemine göre mevcut kaya kütlesi 9 nolu bölgede yani “tahkimat gerekmez” sınırındadır (Şekil 13). Yapılması olası mühendislik hataları ile (denetimsiz patlatma gibi) bu durum “9 numaralı” bölgeye rahatlıkla taşınabilecektir. Bu durumda gerdirmesiz noktasal kaya saplamaları (tavan ve duvar için 2.20m-2.23m uzunluğunda) kullanmak oldukça gerçekçi bir çözüm ortaya koyacaktır. İşletmede gerekli görülen yerlerde kasa tahkimat uygulaması yapıldığından kaya saplamalarına gerek kalmamaktadır. Uygulanan kasa tahkimatta özellikle tavan bölümler açıklık kalmayacak şekilde kamalarla kapatılmalıdır ve uygulanan tahkimat önlemlerinin titizlikle devamı sağlanmalıdır.

Analiz çalışmalarında üçüncü yöntem olarak GSI sınıflaması kullanılmıştır. Göynük Pb-Zn ocağında yapılan gözlemler ve laboratuvarında yapılan karotlu sondajlardan elde edilen dayanım ve süreksizlik ölçümlerine göre kireçtaşı birimlerin yaklaşık GSI puanı 50 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, tektonik faaliyetler sonucunda yer yer kırıklı bir yapı arz eden ancak geniş ve sağlam bloklar da sunan kireçtaşlarının tahkimatsız olarak ayakta kalabilme kabiliyetini sınırlar niteliktedir. İşletmede uygulanacak patlama uygulamalarında gerekli özenin gösterilmemesi halinde kaya kütlesinin tamamen “bloklu-örselenmiş” kaya sınıfına geçme ihtimali söz konusu olabilecektir. İşletmede patlatmalı kazı ile üretim yapıldığından, patlatma faaliyetlerinin tahkimat sistemleri ile açıklıkların göçmesine neden olmayacak şekilde ve gerekli emniyet tedbirleri alınarak yapılması zorunludur.

Çalışma alanında az sayıda küçük ölçekli kırık/fayların varlığı, süreksizliklerin, açıklık ve yönelimleri nedeniyle, yapılacak olan çalışmalarda ani kaya kütle kalitesi

değişimlerine sebebiyet verebilecek olmaları nedeniyle gerekli görülen lokasyonlarda (süreksizliklerin/çatlakların olduğu yerlerde, kavşak noktalarında, cevher zonlarında, fay zonlarında, erime boşluğu olan yerlerde) işletme tarafından uygun kazı ve tahkimat sistemleri uygulanmalıdır. Tahkimat yönergesine uygun olarak çalışılmalı, tahkimat kontrolü yapılmalı ve bozulmaya başlayan tahkimat unsurları değiştirilmelidir.

Açıklıkların çok uzun ve çok kısa süreli olarak tahkimat gerektirmeden stabil kalabilme durumu, kaya kütlesinin bütünsel duraylılığını ifade etmektedir. Kaya sınıflama sistemleri ile her ne kadar “tahkimatsız ayakta kalabilecek maksimum açıklık” değerleri bulursa da teknik personelin detaylı bir şekilde ocak içerisinde inceleme ve değerlendirmeler yapması, tahkimat çalışmalarında gerekli dikkat ve özenin gösterilmesi gerekmektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Dergi kaynakları

- [1] K. Karaman, F. Cihangir, S. Demirel, A. Kesimal, Kaya kütlesi deformasyon modülünün farklı yöntemlerle belirlenmesi. *Yerbilimleri*, 35(3), 141-168, 2014. <https://doi.org/10.17824/huyuamd.68314>.
- [2] A. Sakcalı, Pirinkayalar tüneli (Erzurum, Türkiye) giriş ve çıkış portallarının sayısal modellenmesi: örnek vaka çalışması. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(4), 1025-1039, 2021. <https://doi.org/10.36306/konjes.859345>.
- [3] E.B. Aygar, Evaluation of new Austrian tunnelling method applied to Bolu tunnel’s weak rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 541-546, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.12.011>.
- [4] C. O. Aksoy, K. Ogul, I. Topal, S. C. Ozer, V. Ozacar, E. Posluk, Numerical modeling of non-deformable support in swelling and squeezing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 52, 61-70, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.008>.
- [5] G. Barla, Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3), 294-303, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.003>.
- [6] K. Terzaghi, Rock Defects and Loads on Tunnel Supports. In: R.V. Proctor, T. White (eds), *Rock Tunnelling with Steel Support*, 1. Commercial Shearing Co., Youngstown, OH, 15-99, 1946.
- [7] M. M. Blumenthal, Toroslarda yüksek Aladağ silsilesinin coğrafyası, stratigrafisi ve tektoniği hakkında yeni etüdler. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Yayınları, Seri D, No: 6,136 s.*, 1952.
- [8] S. Metin, E. Göger, İ. Bingöl, O. Baydar, B. Erdoğan, Tufanbeyli dolayının Kambriyen ve Tersiyer kayaları. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 16, 82-100, 1973.
- [9] O. Tekeli, Toroslarda, Aladağların yapısal evrimi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 23(1),11-14, 1980.

- [10] O. Tekeli, A. Aksay, B. M. Urgan, A. Isik, Geology of the Aladag mountains. In International Symposium on the Geology of the Taurus Belt, Ankara-Turkey, Proceedings (Ed: O. Tekeli, and M.C. Göncüoğlu), 143-158, 1984.
- [11] O. Koptagel, A. Efe, F. Ceyhan, Göynük Pb-Zn cevherleşmesinin (Yahyalı-Kayseri) kökeni. Türkiye Jeoloji Bülteni, 41(2), 53-62, 1998.
- [12] R. Ulusay, H. Sönmez, Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, No: 60, Ankara. 2007.
- [13] Z. T. Bieniawski, Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese, 12, 335-343, 1973.
- [14] Z. T. Bieniawski, Engineering Rock Mass Classifications, Wiley, New York. pp 251, 1989.
- [15] N. Barton, R. Lien, J. J. R. M. Lunde, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6, 189-239, 1974. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>.
- [16] E. D. Grimstad, Updating the Q-system for NMT. In Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagemes, Oslo, Norwegian Concrete Association, 1993.
- [17] E. Hoek, E. T. Brown, Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and mining Sciences, 34(8), 1165-1186, 1997. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X).
- [18] E. Hoek, P. Marinos, M. Benissi, Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57, 151-160, 1998. <https://doi.org/10.1007/s100640050031>.
- [19] H. Sonmez, R. Ulusay, Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36(6), 743-760, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00043-1).
- [20] H. Sonmez, R. Ulusay, A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. Yerbilimleri, (26), 77-99, 2002.
- [21] D.U. Deere, Geological Consideration, In: K.G. Stagg, O.C. Zienkiewicz (Eds.), Rock Mechanics in Engineering Practice. Wiley, London, 1968.
- [22] ISRM, The Complete ISRM Suggested Methods Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006, Editors: R. Ulusay, J.A. Hudson, ISBN: 978-975-93675-4-1, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, p 613, 2007.
- [23] ISRM, Rock Characterization, Testing and Monitoring – Commission on Standardization Laboratory and field Results. Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks, Part 4, p:102-103, Pergamon, Oxford, 1981.
- [24] N. Barton, V. Choubey, The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, 10, 1-54, 1977. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>.
- [25] R.E. Goodman, Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, 1976.
- [26] N. Barton, E. Grimstad, The Q-system following twenty years of application in NMT support selection. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 32(5), 232A, 1995.
- [27] E. Hoek, E. T. Brown, Empirical strength criterion for rock masses. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106(9), 1013-1035, 1980. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001029>.
- [28] E. Hoek, P. K. Kaiser, W. F. Bawden, Support of Underground Excavations in Hard Rock, AA Balkema, Rotterdam. 1995.
- [29] A. Palmstrom, The volumetric joint count- a useful and simple measure of the degree of jointing. 4th Int. Congress IAEG, New Delhi, 221-228, 1982.
- [30] A. Palmstrom, Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. Proceedings International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, Sweden, 103- 110, 1985.
- [31] A. Palmstrom, RMI-a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. Journal of Rock Mechanics and Tunneling, Technique, India, L-2, 69- 108, 1996.

