

## Kaya Kütleli Deformasyon Modülünün Farklı Yöntemlerle Belirlenmesi

### *Determination of Rock Mass Deformation Modulus by Different Methods*

KADİR KARAMAN<sup>1\*</sup>, FERDİ CİHANGİR<sup>1</sup>, SERKAN DEMİREL<sup>2</sup>, AYHAN KESİMAL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Müh. Bölümü, Trabzon

<sup>2</sup>NVS İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti., Trabzon

Geliş (received) : 05 Mayıs (May) 2014

Kabul (accepted) : 11 Aralık (December) 2014

#### ÖZ

Birçok tasarım parametresi arasında kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü ( $E_m$ ) kaya mühendisliği projelerinin başarıyla yürütülmesinde ve tasarımında hayati öneme sahip olan önemli bir parametredir. Ancak, yerinde testler zaman alıcı ve pahalı hatta bazı durumlarda yapılması imkânsız olabilmektedir. Bu sınırlandırmalar, araştırmacıları deformasyon modülünü daha düşük fiyatla kolay bir şekilde diğer kaya kütle özelliklerine (RQD, RMR, Q) dayanarak dolaylı olarak tahmininde ampirik eşitlik geliştirmesine zorlamıştır. Bu çalışmada da kaya kütleleri için ampirik bir eşitlik önerilmiştir. Bu amaca yönelik olarak, bir tünel güzergâhının otuz yedi farklı noktasındaki volkanik, tortul ve metamorfik kaya kütleleri üzerinde çalışılmıştır. Karşılaştırmak amacıyla, literatürde önerilmiş olan altı farklı ampirik eşitlik yardımıyla  $E_m$  değerleri hesaplanmıştır. Çoklu karşılaştırma ANOVA testleri ayrıca önerilen ve diğer eşitlikler arasında yapılmıştır. ANOVA analizleri bu çalışmada üretilen eşitliğin kaya kütlelerinin  $E_m$  değerlerinin belirlenmesinde güvenle kullanılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Deformasyon modülü, nokta yükleme indeksi, RMR, RQD, Q

#### ABSTRACT

Among the many design properties, the deformation modulus ( $E_m$ ) of in-situ rock mass is a crucial parameter and has a vital importance for the design and successful execution of rock engineering projects. However, in-situ tests are time-consuming, expensive and, in some cases, even impossible to carry out. This constraint forced the investigators to develop an empirical equation for indirect estimation of the deformation modulus of rock masses based on other rock mass properties that can be easily determined at low cost such as RQD, RMR, Q, etc. In this study an empirical equation was proposed for tested rock masses. For these purposes, volcanic, sedimentary and metamorphic rock masses were studied at different thirty seven points along a tunnel alignment. For comparison,  $E_m$  was calculated from six other empirical equations recommended in the literature. Multiple comparison tests (ANOVA) were also performed among the new relation and other empirical equations. Based on the ANOVA analyses, the  $E_m$  of a rock mass can be estimated from the proposed equation reliably.

**Keywords:** Deformation modulus, point load index, RMR, RQD, Q

\* K. Karaman  
e-posta: kadir.karaman@ktu.edu.tr

## GİRİŞ

Yeryüzünde çeşitli amaçlara yönelik olarak tasarlanan büyük mühendislik yapılarının yanı sıra, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde giderek artmakta olan enerji, ulaşım, yerleşim ve alt yapı gibi gereksinimlerin karşılanabilmesi için yeraltı yapıları da hızla çoğalmakta ve boyut olarak büyümektedir. Ancak, baraj, tünel, köprü ayağı, bina vb. gibi mühendislik proje çalışmaları incelendiğinde tünel inşaatlarında diğerlerine oranla bilinmeyenlerin sayısı oldukça fazladır. Bu nedenle araştırmacılar, çeşitli araştırma yöntemlerinden yararlanarak bu bilinmeyenlerin sayısını asgariye indirmeye çalışmaktadırlar.

Görgül (kaya kütlesi sınıflama sistemleri) ve sayısal yöntemler tünel gibi yeraltı mühendislik yapılarının tasarlanmasında yaygın olarak kullanılan iki önemli araçtır. Günümüzde açılmakta olan tünellerin birçoğunda kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bu sistemler, yaklaşık 70 yıl öncesinden (Terzaghi, 1946) başlayarak günümüze kadar geliştirilmiş, buna paralel olarak ortaya birçok yeni sınıflama sistemleri konmuş ve çeşitli projelerde uygulanmıştır. Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden Kaya Kütle Puanlaması (RMR) ve Kaya Kütle Kalitesi (Q), bir çok araştırmacı tarafından yüzlerce tünelde başarı ile uygulanmış ve evrensel düzeyde kabul görmüştür (Bieniawski, 1973; Barton vd., 1974; Bieniawski, 1989; Barton, 2002; Ramamurthy, 2004; Sarı ve Paşamehmetoğlu, 2004; Basarir vd., 2005; Gürocak, 2011; Kaya vd., 2011). Bu sistemler, tünellerin daha ekonomik, daha az riskle ve daha kısa sürede açılmasına büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır. Ancak, kaya kütlesi sınıflama sistemleri tünellerin ilk inşa aşaması süresince çok kullanışlı olmasına rağmen, bu sistemler, tünel etrafındaki gerilme dağılımlarını, destek performansını ve deformasyonunun hesaplanmasını sağlamamaktadır (Geniş vd., 2007). Yeraltı projelerinin daha ekonomik ve emniyetli bir şekilde yürütülebilmesi, sayısal analizlerin görgül yöntemlerle birlikte değerlendirilmesiyle gerçekleşmektedir.

Sayısal analizlerin girdi parametrelerinden biri kaya kütlelerinin deformasyon modülü ( $E_m$ )'dür.  $E_m$ , kaya kütlelerinin yenilme öncesindeki mekanik davranışını en iyi temsil eden bir parametre

olmasından dolayı, birçok tasarım parametresi arasında kaya mühendislik projelerinin başarıyla gerçekleştirilmesinde çok önemli bir yere sahiptir.  $E_m$  ayrıca yeraltı açıklığı etrafında izlenen deformasyonların yorumlanmasında, tahkimat ve nihai tünel kaplama tasarımında kullanılmaktadır (Hoek ve Diederichs, 2006). Ancak bu parametrenin arazide tayini hem çok zor hem de pahalıdır (Aksoy vd., 2012). Ayrıca, arazide yapılan deneyler, kaya kütlelerinin deformasyonları hakkında doğrudan bilgi vermesine karşın, Bieniawski (1973) tarafından belirtildiği gibi yerinde yapılan testlere tek başına güvenilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Shen vd., 2012). Palmström ve Singh (2001) ise yerinde yapılan deneylerin ekipmandan ve patlatma etkisinden dolayı ölçüm hatalarına yol açtığı, bu nedenle kaya kütlelerinin iyi bir şekilde değerlendirilmesi ve uygun dolaylı yöntemin/eşitliğin birçok durumda yerinde deneylere göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle,  $E_m$  parametresinin pratik yoldan tahminine yönelik literatürde araştırmacılar tarafından bir çok ampirik eşitlikler önerilmiştir (Bieniawski, 1978; Serafim ve Pereira, 1983; Aydan vd., 1997; Hoek ve Brown, 1997; Read vd., 1999; Palmström ve Singh, 2001; Barton, 2002; Zhang ve Einstein, 2004). Bazı araştırmacılar da (Hashemi vd., 2010; Shen vd., 2012; Aksoy vd., 2012; Khabbazi vd., 2013) literatürde  $E_m$  tahmini için önerilen eşitlikleri kendi bulgularıyla kıyaslamışlardır. Gürocak (2011) ise farklı ampirik eşitlikler ile (9-10 eşitlik) tahmin ettiği  $E_m$  değerlerinin ortalamasını alarak sayısal analizlerde kullanmıştır.

$E_m$  tahminine yönelik eşitliklerin oluşturulmasında çoğunlukla kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden daha az oranda da indeks deneylerden yararlanılmıştır. Örneğin RMR'den elde edilen eşitlikler birçok araştırmacı tarafından kullanılmış ve  $E_m$  tahmininde güvenilirliği konusunda övgü ile bahsedilmiştir (Nejati vd., 2014). Palmström ve Singh (2001)  $E_m$  tahmininde en sık RMR sisteminin kullanıldığını ifade etmişlerdir. Khabbazi vd. (2013) test edilen parametreler (tek eksenli basınç dayanımı, ultrasonik dalga hızı) arasında deformasyon modülü ile en iyi ilişkiyi RMR verdiğini belirtmişlerdir. Ancak özellikle güzergâh belirleme çalışmalarında ve projelerin ilk aşamasında kaya kütlelerinden temsili örnek almada

yaşanan güçlüklerden veya problemlili kaya ortamlarından (piroklastik, sık eklemli, vb.) dolayı RMR sınıflamasında ve bazı  $E_m$  eşitliklerinde kullanılan tek eksenli basınç dayanımı (UCS) gibi yüksek kaliteli karot gerektiren deneylerin yapılması mümkün olmamaktadır (Kaya, 2012; Karaman ve Kesimal, 2013). Bu çalışmanın amacı, projelerin ilk aşamasında araştırmacılar için  $E_m$  parametresinin belirlenmesine yönelik pratik bir eşitlik önermek ve doğrulamasını istatistik yöntemlerle yapmaktır.

### **JEOLJİ, LABORATUVAR ve ARAZİ ÇALIŞMALARI**

Çalışma sahası, Trabzon ili Çaykara ilçesi merkezinin güneyinde yer almaktadır. İnceleme alanı jeolojik olarak Doğu Pontid Tektonik Ünitesi'nin (Ketin, 1966) kuzey doğusunda yer almakta ve sahada Mesozoyik ve Senozoyik dönemine ait toleyitik ve kalk-alkalen kayalar gözlenmektedir. Mesozoyik dönemi, Liyas yaşlı volkanitler ile başlar ve Üst Jura–Alt Kretase yaşlı karbonatlar ile devam eder. Üst Kretase döneminde yoğun bir volkanik aktivite görülür. Liyas'ta başlayıp Üst Kretase sonlarına kadar devam eden volkanik faaliyetler denizaltı volkanizması şeklinde olup çökel ara katkılarla birlikte istiflenme gösterirler. Paleosen sonlarında orojenezle birlikte granodiyorit yerleşimi gelişmiştir. Senozoyik döneminde ise eski alüvyon, yeni alüvyon ve yamaç molozları oluşmuştur. Tünel güzergâhı boyunca yeşilimsi gri renkli bazalt, az ayrışmış bazalt, orta derecede ayrışmış dasitik tüf, dasit, siyah renkli, az ayrışmış kireçtaşı, siyah renkli, sert, az ayrışmış bazalt, çok ayrışmış dasit-riyodasit yeşilimsi mor-gri renkli, orta derecede ayrışmış dasit-riyodasit ve epidotlu metabazalt gözlenmiştir.

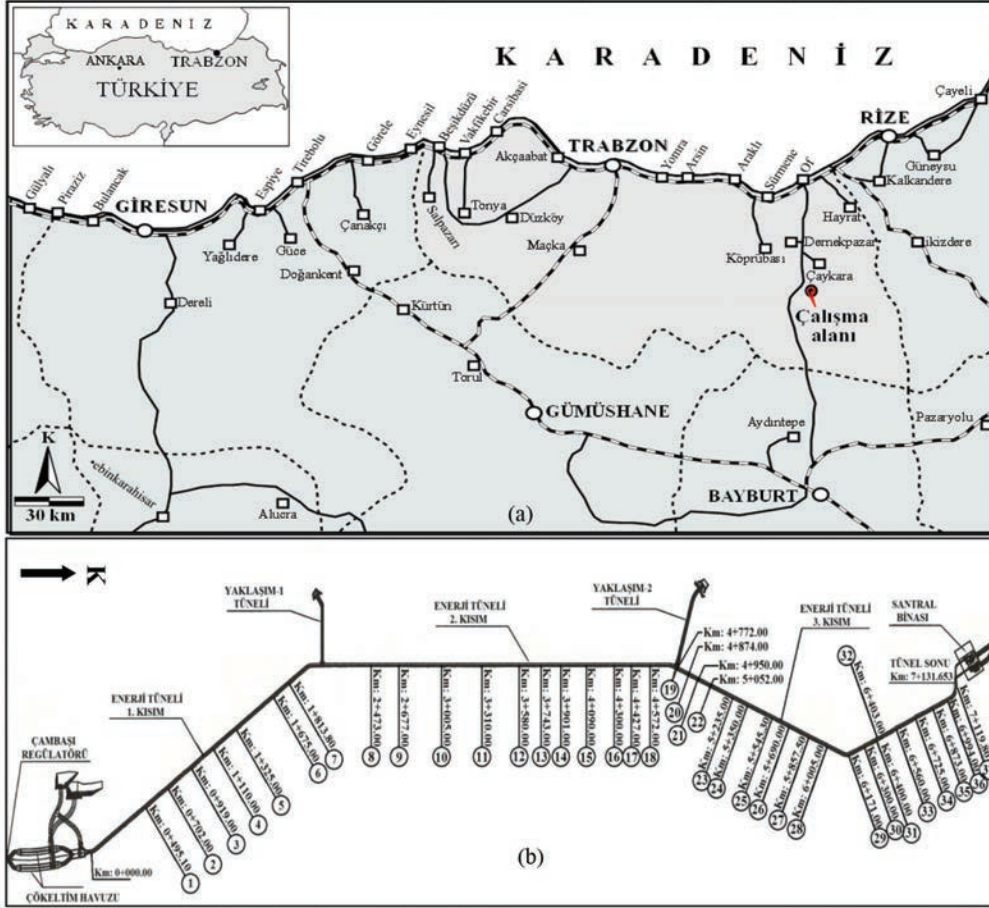
Bu çalışmada, çalışılan tünel güzergâhının 37 farklı farklı örnekleme noktasından (Şekil 1) kaya blokları (24 volkanik, 8 metamorfik ve 5 tortul kayaç) laboratuvara getirilmiştir. ISRM (2007) tarafından önerildiği gibi karot örneklerinin alınabilmesi için, arazide her blok örneğinin makroskopik incelemeleri yapılarak çatlak, kırık ve ayrışma içeren örnekler alınmamıştır. Laboratuvarda karot alma ve düzeltme makineleri deney örneklerinin hazırlanması için kullanılmıştır.

Laboratuvarda yapılan indeks deneyler ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmıştır.

Kaya malzemelerine ait tek eksenli basınç ve deformabilite değerleri aynı deney ile elde edilmiştir. Deformabilite (elastisite modülü) değerlerini elde etmek için UCS deneyinde kullanılan karot örneklerinin eksen ve çapına paralel strain gage'ler yapıştırılarak deney esnasında kayada oluşacak deformasyonlar hassas bir şekilde ölçülmüştür. Tek eksenli deformabilite deneyinde Kyowa deney aleti ile kaya malzemelerinin elastisite modülleri ( $E$ ) belirlenmiştir. Deneylerde boy/çap (L/D) oranı 2.5 olan NX (54.7 mm) çaplı karot örnekleri kullanılmıştır. Her bir örnekleme noktası için 5 toplam 185 adet karot örnekleri kullanılmıştır. Deneyler, 300 ton kapasiteli bilgisayar kontrollü makine ile yükleme hızı 0.75 MPa/s arasında olacak şekilde uygulanmıştır.

Nokta yükleme deneylerinde (eksenel yöntem) ise L/D oranı 0.5–0.55 arasında olan karot örnekleri kullanılmıştır. Deneylerde, dijital nokta yükleme deney aleti kullanılmış olup, belirlenen nokta yükü dayanım değerleri ( $I_p$ ) değerleri referans çapa ( $D=50$  mm) göre düzeltilerek  $I_{s(50)}$  elde edilmiştir.

Örneklemenin yapıldığı noktalarda süreksizliklerin mühendislik özelliklerine yönelik çalışmalar ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmıştır. Süreksizliklerin durumu Brunton marka jeolog pusulasıyla, süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü Barton pürüzlülük tarağıyla, süreksizlik ara uzaklığı ve açıklığı şerit metre ve dijital kumpas ile belirlenmiştir. Geniş bir alanda kaya kütesinin incelenmesine ve süreksizliklerden doğrudan ölçüm alınmasına olanak kılan bir yöntem olan hat etüdü yöntemi çalışılan kazı aynalarında kullanılmıştır. Ulusay ve Sönmez (2007) tarafından önerildiği gibi hat etütlerinde yapay kırıklar dik katli bir şekilde ayırtlanmış ve değerlendirilmeye alınmamıştır. Patlatma veya mekanik kazı sonucu gelişmiş kırıklar, genellikle küçük (devamlılıkları az), pürüzlü, düzensiz, temiz ve gelişigüzel bir yönelime sahip olma gibi özellikleri ile doğal süreksizliklerden farklı olmaktadır. Arazi ve laboratuvar çalışmalarına ait bazı görüntüler Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası (a) ve tünel güzergâhındaki örnekleme lokasyonları (b)  
Figure 1. Location map of the study area (a) and sampling locations of tunnel route (b)

Kaya kalite göstergesi (RQD), ilk olarak Deere (1964) tarafından sondajdan alınan karot boylarından yararlanılarak temel kayaların kalitesini ifade etmek için tanımlanmıştır. RQD, karotlu sondajlarla saptanabileceği gibi, kaya yüzlelerinden, yarma, shaft, galeri ve tünel duvarlarından yararlanılarak da saptanabilmektedir. Bu çalışmada jeoteknik birimler için her bir tünel aynasında birbirine dik yönde iki farklı RQD değerleri hesaplanarak ortalaması alınmıştır. İnceleme alanında sistematik süreksizliklerin yanı sıra düzensiz süreksizliklerin de zaman zaman gözlenmiş olması nedeniyle RQD'yi belirlemek için Priest ve Hudson (1976) tarafından önerilen Eşitlik 1'den yararlanılmıştır.

$$RQD = 100 e^{(-0.1\lambda)}(0.1\lambda + 1) \quad (1)$$

Burada;  $\lambda$ : 1 metre uzunluğundaki ölçüm hattını kesen ortalama süreksizlik sayısıdır.

Bu çalışmada RMR'nin güncel versiyonu ( $RMR_{99}$ ) kullanılmıştır. RMR puanı, kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı, kaya kalite göstergesi (% RQD), süreksizlik aralığı, süreksizlik ve yeraltı suyu durumuna bağlı olarak hesaplanmaktadır. Daha hassas puanlama yapmak amacıyla tek eksenli basınç dayanımı, % RQD ve süreksizlik ara uzaklığı parametreleri için RMR sisteminin son versiyonunda belirtilen parametre-puan grafikleri kullanılmıştır. Q sınıflama sistemi için RQD, eklem takım sayısı ( $J_n$ ), eklem pürüzlülük sayısı ( $J_p$ ), eklem alterasyon sayısı ( $J_a$ ), eklem suyu azaltma faktörü ( $J_w$ ) ve gerilme azaltma faktörü (SRF) belirlenmiştir. RMR ve Q puanlamasında kullanılan ayrıntılı parametre ve çizelgelere bu çalışmada yer verilememiş olup, bu konuda literatürden yararlanılabilir (Bieniawski, 1989; Barton, 2002; Ulusay ve Sönmez, 2007). Deneylerde kullanılan kayaç





Şekil 2. Arazi ve laboratuvar çalışmaları  
Figure 2. Field and laboratory studies

isimleri, örnek noktalarına karşılık gelen tünel doğrultusu ve ortalama değerler Çizelge 1'de yer almaktadır.

## BULGULAR ve TARTIŞMA

### RMR ve Q Arasındaki İlişki

RMR ve Q sistemlerin arasındaki korelasyonu kullanarak birinden diğerini tahmin etmek mümkündür (Laderian ve Abaspoor, 2012). Bu

amaca yönelik olarak literatürde çeşitli eşitlikler önerilmiştir (Bieniawski, 1976; Kaiser ve Gale, 1985; Abad vd., 1983; Barton, 1995; Tuğrul, 1998). Literatürde araştırmacıların büyük çoğunluğu RMR ve Q arasında aşağıdaki logaritmik denklem biçiminde eşitlikler önermişlerdir (Eşitlik 2).

$$RMR = A \ln(Q) + B \quad (2)$$

A ve B sırasıyla 5–15 ve 35–60 arasında değişen katsayıdır (Zhang, 2004). Araştırmacılar

Çizelge 1. Örnek yerleri ve deney sonuçları  
 Table 1. Test locations and related properties of rock material/masses

Örnek Kodu	Tünel km'si	Doğrultu	Litoloji	$E_i$ (GPa)	% RQD	$I_s_{(50)}$	$RMR_{89}$	Q
1	0+495.10	K35B	Bazalt	86.25±8.7	83±2.1	9.95±2.4	74.7	14.76
2	0+702.00	K35B	Metabazalt	73.5±4.1	83±2.1	8.61±1.6	73.5	14.76
3	0+919.00	K35B	Metabazalt	72.5±3.8	83±2.1	3.79±0.7	55.5	14.76
4	1+110.00	K35B	Metabazalt	58.5±1.9	84±0.0	7.8±1.7	72.9	14.93
5	1+325.00	K35B	Metabazalt	35.0±2.7	83±2.1	7.1±1.2	72.3	14.76
6	1+675.00	K35B	Bazalt	71.5±2.4	76±2.1	5.32±0.9	64.5	7.6
7	1+813.80	K35B	Bazalt	74.8±3.4	76±2.1	6.47±1.1	55.9	7.6
8	2+473.00	K-G	Bazalt	93.7±4.6	84±0.0	8.09±1.4	68.4	14.93
9	2+677.00	K-G	Metabazalt	66.5±3.9	79±2.8	6.14±0.3	69.2	14.04
10	3+005.00	K-G	Metabazalt	59.0±4.6	83±2.1	8.76±1.6	70.8	14.76
11	3+310.00	K-G	Metabazalt	31.5±1.4	76±2.1	4.9±0.6	60.4	7.6
12	3+580.00	K-G	Metabazalt	26.0±4.7	79±2.8	4.97±1.0	67	10.53
13	3+743.00	K-G	Bazalt	15.5±2.5	79±2.8	5.35±1.2	55.5	10.53
14	3+901.00	K-G	Bazalt	11.5±0.4	79±2.8	2.76±0.2	48	10.53
15	4+090.00	K-G	Dasit	20.0±4.6	76±2.1	3.77±0.7	49.9	7.6
16	4+300.00	K-G	Bazalt	51.0±6.5	76±2.1	4.14±1.8	52	7.6
17	4+427.00	K-G	Dasit	20.0±1.5	70±5.7	3.42±0.9	50.8	3.5
18	4+572.00	K-G	Dasit	20.0±1.4	83±2.1	3.87±0.1	67.6	14.76
19	4+772.00	K23D	Dasit	45.2±3.2	79±2.8	3.61±0.7	54.8	4.68
20	4+874.00	K23D	Dasit	19.5±2.4	76±2.1	3.44±0.3	64.1	7.6
21	4+950.00	K23D	Kireçtaşı	78.5±6.8	81±0.0	5.56±0.5	65.9	10.8
22	5+052.00	K23D	Kireçtaşı	32.5±1.6	67±4.9	5.2±0.7	43.2	2.23
23	5+235.00	K23D	Bazalt	71.5±7	83±2.1	6.67±1.2	69.8	14.76
24	5+350.00	K23D	Kireçtaşı	54.5±8.7	79±2.8	5.6±0.2	56.7	10.53
25	5+545.30	K23D	Kireçtaşı	62.5±4.6	76±2.1	5.19±0.3	61.7	10.13
26	5+690.00	K23D	Bazalt	17±3.4	83±2.1	4.91±0.8	53.1	11.06
27	5+857.50	K23D	Volkanik breş	15.5±3.5	70±5.7	2.13±0.3	57.1	7
28	6+005.00	K23D	Kireçtaşı	26.5±3.2	79±2.8	5.69±0.4	65.8	10.53
29	6+171.00	K6B	Bazalt+dasit	41±4.9	76±2.1	6.11±0.4	56	10.13
30	6+300.00	K25B	Bazalt	74±4.7	76±2.1	6.58±1.2	50.2	7.6
31	6+400.00	K25B	Dasit	18.5±3.4	79±2.8	3.31±1.1	51.1	10.53
32	6+403.00	K25B	Dasit	17±2.1	83±2.1	3.3±0.5	51.5	11.07
33	6+560.00	K25B	Bazalt	58.5±6.4	83±2.1	6.42±1.8	69.5	11.07
34	6+725.00	K25B	Dasit	36.5±4.2	76±2.1	6.76±0.2	59.5	7.6
35	6+873.00	K25B	Dasit	21±1.4	76±2.1	4.24±0.4	51.7	7.6
36	6+994.00	K25B	Dasit	63.5±3.4	79±2.8	5.02±1.4	69.2	10.53
37	7+119.80	D-B	Dasit	37.1±3.2	70±5.7	4.27±1.1	58.9	1.75

tarafından Q sisteminden RMR puanını belirlemeye yönelik önerilen ve bu çalışma kapsamında kullanılan ampirik eşitlikler Çizelge 2’de verilmiştir. Bu çalışma kapsamında RMR ve Q arasında orta derecede ( $r = 0.57$ ) pozitif logaritmik bir ilişki gözlenmiştir (Şekil 3a). RMR ve Q sistemi arasında pozitif bir ilişki gözlenmesinin nedeni her iki sistemin benzer kaya kütle özelliklerini girdi parametresi olarak kullanmasından kaynaklanmaktadır (Laderian ve Abaspoor, 2012). Ulusay ve Sönmez (2007) ise kaya malzemesinin dayanımı ve gerilme için yapılan değerlendirmenin her iki sistemde oldukça farklı olduğunu belirtmişlerdir. RMR ve Q arasında çok yüksek bir ilişki elde edilememesinin nedeni iki sistem arasındaki girdi parametrelerinin değerlendirmesindeki farklılıktan kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen ampirik eşitlik ile karşılaştırmada kullanılan eşitliklere (Çizelge 2) bakıldığında, Eşitlik 2’de belirtilen A ve B katsayıları ile örtüştüğü anlaşılmaktadır. Çizelge 2’deki eşitlikler ile bu çalışmada elde edilen eşitlik Q sisteminden RMR tahmini açısından karşılaştırılmıştır (Şekil 3b). Barton (1995) ve Tuğrul (1998) tarafından önerilen eşitlikler sırasıyla en yüksek ve en düşük RMR değerlerini vermiştir. Bieniawski (1976), Abad vd. (1983) ve Kumar vd. (2004) tarafından önerilen eşitlikler ile bu çalışmada geliştirilen eşitliğin nispeten yakın RMR değerleri verdiği görülmüştür (Şekil 3b).

### **Kaya Kütleleri Deformasyon Modülünün Belirlenmesi**

Kaya kütlelerinin deformasyon modülü ( $E_m$ ), mühendislik jeolojisi uygulamalarının tasarımında (sayısal analiz vb.) kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Clerici (1993) deformasyon modülünün ampirik eşitlikler ile tahmin edilmesi için iki seçenek sunmuştur; a) “eşitlikte kullanılan parametreler düşük maliyetle ve kolay ulaşılabılır olmalı”, b) “eşitliklere literatürde yaygın olarak yer verilmeli” (Kayabaşı vd., 2003). Bu çalışmada kullanılan eşitlikler bu kurala uymaktadır. Araştırmacılar tarafından  $E_m$  parametresini pratik yoldan belirlemeye yönelik önerilen ampirik eşitlikler Çizelge 3’te, bu eşitliklerden bir kısmı kullanılarak hesap edilen her bir örnekleme noktasına ait deformasyon modülü değerleri ise

Çizelge 4’te verilmiştir. Literatürde deformasyon modülünün belirlenmesine yönelik araştırmacılar oldukça çok sayıda ampirik eşitlik önermişlerdir. Ancak karşılaştırma grafiklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için daha az eşitliğe yer verilebilmiştir.

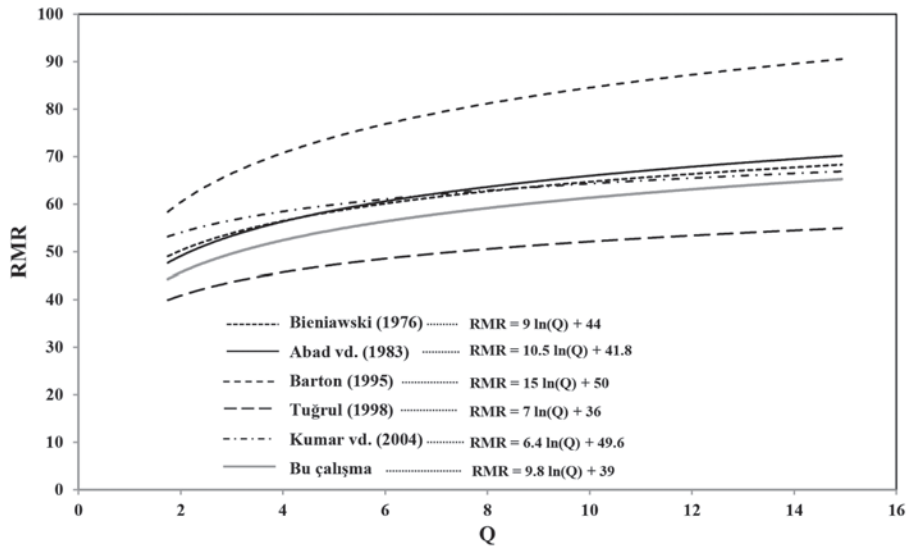
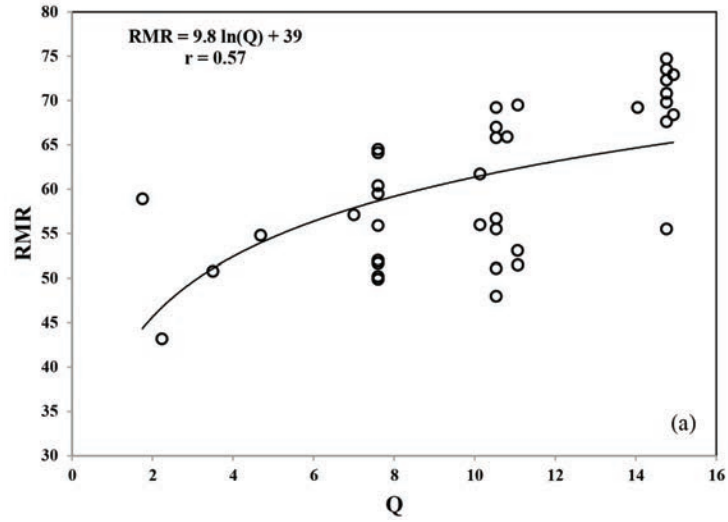
Literatürde  $E_m$  parametresini tahmin etmek için üretilen eşitliklerin çoğu kaya kütle sınıflama sistemlerinden (RMR, Q, R<sub>Mi</sub> vb.) oluşmaktadır. Farklı olarak  $E_m$  parametresini tahmin etmek için; Kayabaşı vd. (2003) ayrışma derecesi, RQD ve kaya malzemesine ait elastisite modülü parametrelerini içeren bir eşitlik önermiştir. Gökçeoğlu vd. (2003) ise bu parametrelere ilave olarak tek eksenli basınç dayanım (UCS) değerini de eşitliğe ilave etmiştir. Zhang ve Einstein (2004) ise sadece RQD ve  $E_i$  parametrelerini içeren bir eşitlik geliştirmiştir. Eşitliklere bakıldığında süreksizlik parametreleri ile birlikte kaya malzemesinin dayanım özellikleri ve/veya deformasyon özellikleri  $E_m$  parametresinin tahmininde kullanılmıştır.

Khabbazi vd. (2013) Süreksizlik özellikleri ve kaya dayanımı kaya kütlelerinin deformasyonuna en çok etki eden iki unsur olduklarını belirtmişlerdir. Bu çalışmada üretilen eşitlik hem süreksizlik özellikleri (RQD) hem de kaya dayanımını ( $Is_{(50)}$ ) içermektedir. Kayaçların UCS ile  $E_i$  parametreleri arasında pozitif bir ilişki olduğu bilinmektedir (Ocak, 2008). Ayrıca,  $Is_{(50)}$  ile UCS arasında benzer bir ilişki mevcut olup literatürde bu konuda oldukça çok çalışma bulunmaktadır (Singh vd., 2012; Karaman ve Kesimal, 2013; Karaman vd., 2014). Dolayısıyla  $Is_{(50)}$  ile  $E_i$  arasında da benzer bir ilişki olduğu düşünülmüştür. Ayrıca, nokta yükü indisi değişim aralığı ile çalışma sahasında yapılan gözlem ve analizler neticesinde elde edilen RQD aralık değerleri birlikte değerlendirilmiştir. Bu noktadan hareketle, diğer deneylere (UCS ve  $E_i$ ) göre elde edilmesi çok daha kolay ve ucuz olan  $Is_{(50)}$  parametresinin RQD ile birlikte  $E_m$  tahmininde kullanımı üzerinde bir eşitlik üretilmiştir (Eşitlik 3). Oluşan grafik eğrisi, literatürdeki bazı önemli eşitliklerle kıyaslanarak araştırmacıları (literatürdeki eşitliklerden türetilen  $E_m$  ortalamalarına göre) kısmen güvenli tarafta bırakacak şekilde optimize edilmiştir. Çoklu istatistiksel karşılaştırma (One way ANOVA) ile de eğrinin kullanılabilirliği teyit edilmiştir.

Çizelge 2. RMR ve Q arasındaki ilişki

Table 2. The relationship between RMR and Q

Araştırmacı	Eşitlik
Bieniawski (1976)	$RMR = 9 \ln Q + 44$
Abad vd. (1983)	$RMR = 10.5 \ln Q + 41.8$
Barton (1995)	$RMR = 15 \ln Q + 50$
Tuğrul (1998)	$RMR = 7 \ln Q + 36$
Kumar vd. (2004)	$RMR = 6.4 \ln Q + 49.6$



Şekil 3. RMR ve Q arasındaki ilişki (a) ve RMR tahmininde önceki çalışmalarla önerilen eşitliğin karşılaştırılması (b)  
Figure 3. The relationship between RMR and Q (a) and the comparison of proposed equation with previous studies for the estimation of RMR (b)



Çizelge 3. Deformasyon modülü tahmininde kullanılan bazı ampirik eşitlikler  
 Table 3. Some empirical equations used for estimation of deformation modulus

Araştırmacı	Eşitlik	Not
*Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$ (GPa)	RMR > 50
*Serafim ve Pereira (1983)	$E_m = 10^{((RMR-10)/40)}$ (GPa)	RMR ≤ 50
*Aydan vd. (1997)	$E_m = 0.0097 RMR^{3.54}$ (MPa)	
*Read vd. (1999)	$E_m = 0.1 (RMR/10)^3$ (GPa)	
*Barton (2002)	$E_m = 10 Q_c^{1/3}$ , $Q_c = Q UCS/100$	
Kaya başı vd. (2003)	$E_m = 0.135 \left[ \frac{E_i(1 + \frac{RQD}{100})}{WD} \right]^{1.1811}$ (GPa)	
Gökçeoğlu vd. (2003)	$E_m = 0.001 \left[ \frac{(E_i/\sigma_{ci})(1 + \frac{RQD}{100})}{WD} \right]^{1.5528}$ (GPa)	
*Zhang ve Einstein (2004)	$E_m = (10^{0.0186 RQD - 1.91}) E_i$ (GPa)	
Ramamurthy (2004)	$E_m = E_i e^{-0.0035[5(100-RMR)]}$ (GPa)	
Ramamurthy (2004)	$E_m = E_i e^{-0.0035[250(1-0.3 \log Q)]}$ (GPa)	
Sönmez vd. (2006)	$E_m = E_i 10^{[(RMR-100)(100-RMR)/4000] \exp(-RMR/100)}$	
Chun vd. (2006)	$E_m = 0.3228 e^{(0.0485 RMR)}$ (GPa)	
Işık vd. (2008)	$E_m = 6.7 RMR - 103.06$ (MPa)	RMR ≥ 27
Khabbazi vd. (2013)	$E_m = 9E-7 RMR^{3.868}$	

\*: Bu çalışmada kullanılan eşitlikler,  $\sigma_{ci}$  : Kaya malzemesine ait tek eksenli basınç dayanımı

$$E_m = I_{s(50)} \times 10^{(0.01 * RQD - 0.25)} \quad (3)$$

Bu eşitlik ile  $E_m$  değerleri çalışma sahasındaki kaya kütleleri için en düşük 6.0 en yüksek 37.8 GPa olarak bulunmuştur (Çizelge 4). RQD ve  $I_{s(50)}$ 'nin en düşük ve en yüksek değerleri dikkate alınarak geliştirilen eşitlik ile bulunan  $E_m$ ' literatürle uyumlu çıkmaktadır ( $\approx 0.05-90$  GPa). En yüksek değer ( $\approx 90$  GPa) RQD'nin %100 ve  $I_{s(50)}$  değerinin ise >15 MPa olduğu durum için geçerlidir. Literatürdeki RQD ve  $I_{s(50)}$  değerlerine bakıldığında, üretilen eşitlik ile genellikle 50 GPa'dan daha düşük değerler elde edilmektedir. RQD'nin 0 olduğu durumda kaya kütlelerinin  $E_m$  içerebildiği bilinmektedir. Üretilen eşitlik ile RQD 0 olduğunda  $I_{s(50)}$  değerine bağlı olarak kaya kütlelerine yönelik  $E_m$  değeri 0 olmamakta ve çok düşük bir değer elde edilmektedir. Benzer durum Zhang ve Einstein (2004) eşitliği için

de söz konusudur. Literatürde UCS değerleri genellikle 0-200 MPa arasında  $E_i$  değerleri ise 0-90 GPa arasında değişmektedir. Kayaçların nokta yükü dayanım indeksi değerleri ( $I_{s(50)}$ ) ise genellikle 10 MPa'dan daha düşük, nadiren de bu değer üzerinde olduğu literatürden anlaşılmaktadır (Kahraman, 2001).  $I_{s(50)}$  değerlerinin genellikle 0-15 MPa gibi dar bir aralıkta değişmesi ve şekilsiz örnekler üzerinde de deneyin yapılabilmesi eşitlik geliştirme açısından bir avantaj olarak düşünülmüştür. Ayrıca  $I_{s(50)}$  parametresi sık eklemlili ve yüksek kaliteli karot alınımının zorlaştığı piroklastik kaya ortamlarda da belirlenebilmektedir.

Ampirik ilişkiler projelerin ilk aşamalarında ve özellikle verilerin sınırlı olduğu güzergâh belirleme çalışmalarında uygulanmaktadır (Khabbazi vd., 2013). Ancak, UCS ve  $E_i$  gibi yüksek kaliteli

Çizelge 4. Ampirik eşitlikler yardımıyla hesaplanan  $E_m$  değerleri  
 Table 4. Calculated values of  $E_m$  by means of empirical equations

Örnek kodu	Bu çalışma	Bieniawski (1978)	Serafim ve Pereira (1983)	Aydan vd. (1997)	Read vd. (1999)	Barton (2002)	Zhang ve Einstein (2004)
1	37.8	49.4	-	41.5	41.7	30.8	37.1
2	32.7	47	-	39.2	39.7	28.6	31.6
3	14.4	11	-	14.5	17.1	21.4	31.2
4	30.3	45.8	-	38.1	38.7	27.9	26.3
5	27.0	44.6	-	37.0	37.8	27.0	15.1
6	17.2	29	-	24.7	26.8	19.3	22.8
7	20.9	11.8	-	14.9	17.5	20.6	23.9
8	31.5	36.8	-	30.4	32.0	28.3	42.1
9	21.3	38.4	-	31.7	33.1	23.8	24.1
10	33.3	41.6	-	34.3	35.5	25.4	25.4
11	15.9	20.8	-	19.6	22.0	17.5	10.0
12	17.2	34	-	28.3	30.1	20.4	9.4
13	18.6	11	-	14.5	17.1	19.9	5.6
14	9.6	-	8.9	8.7	11.1	15.3	4.2
15	12.2	-	9.9	10.0	12.4	16.7	6.4
16	13.4	4	-	11.5	14.1	18.8	16.3
17	9.6	1.6	-	10.6	13.1	12.9	4.9
18	14.7	35.2	-	29.2	30.9	22.0	8.6
19	12.5	9.6	-	13.9	16.5	14.5	16.4
20	11.1	28.2	-	24.2	26.3	16.2	6.2
21	20.2	31.8	-	26.6	28.6	23.3	31.0
22	13.7	-	6.8	6.0	8.1	12.7	7.0
23	25.4	39.6	-	32.7	34.0	24.5	30.8
24	19.4	13.4	-	15.6	18.2	21.2	19.8
25	16.8	23.4	-	21.1	23.5	19.7	19.9
26	18.7	6.2	-	12.4	15.0	20.4	7.3
27	6.0	14.2	-	16.0	18.6	14.2	3.8
28	19.7	31.6	-	26.5	28.5	23.3	9.6
29	19.8	12	-	15.0	17.6	21.2	13.1
30	21.3	0.4	-	10.2	12.7	21.2	23.6
31	11.5	2.2	-	10.8	13.3	19.3	6.7
32	12.5	3	-	11.1	13.7	19.4	7.3
33	24.4	39	-	32.2	33.6	22.8	25.2
34	21.9	19	-	18.6	21.1	21.6	11.6
35	13.7	3.4	-	11.3	13.8	18.8	6.7
36	17.4	38.4	-	31.7	33.1	22.6	23.0
37	12.0	17.8	-	17.9	20.4	11.6	9.1

karot gerektiren deneyler yeraltı projelerinin ilk aşamalarında temsili örnek alınmadığından çoğunlukla yapılamamaktadır (Karaman ve Kesimal, 2013). Kaya (2012) Cankurtaran (Hopa-Artvin) tünel güzergâhını belirlemeye yönelik yaptığı doktora çalışmasında, kaya malzemelerinin tek eksenli basınç dayanımını  $I_{s(50)}$ 'den tahmin etmiştir. Karanlı (2009) yaptığı yüksek lisans çalışmasında Artvin bölgesindeki karayolu şevlerini duraylılık açısından incelediği çalışmasında tek eksenli basınç dayanımı parametresini Schmidt çekici deneyinden elde etmiştir.

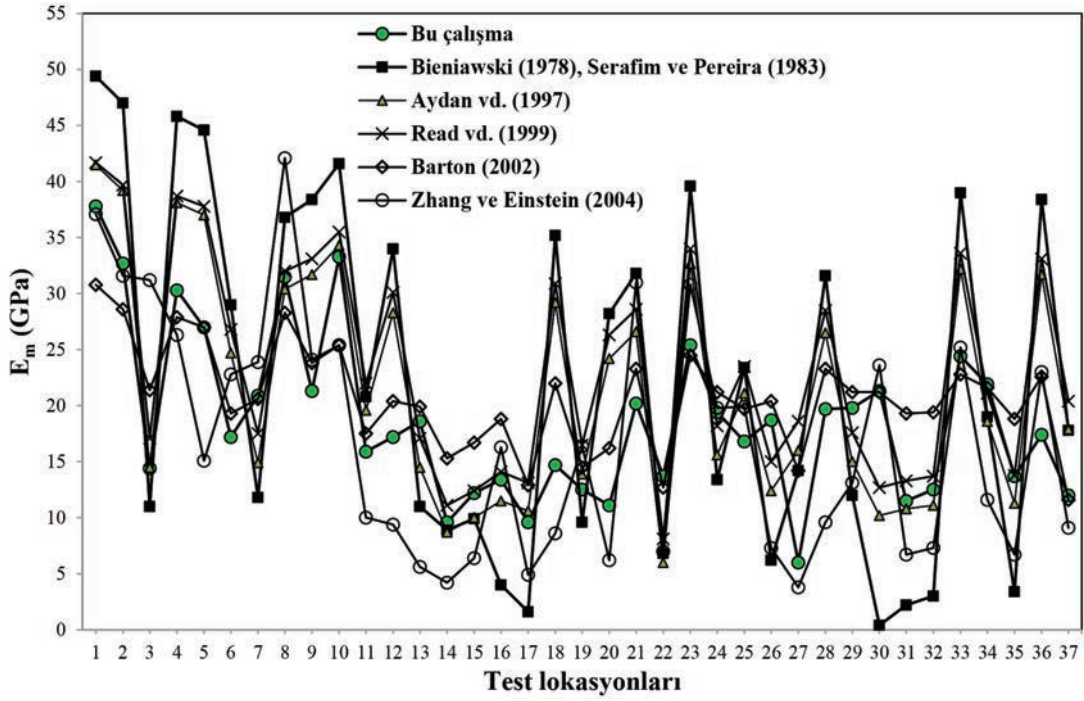
### **$E_m$ değerlerinin karşılaştırılması**

Çizelge 1'deki değerler kullanılarak 6 farklı araştırmacıya (Çizelge 3) göre çalışma sahasındaki kaya kütlelerinin deformasyon modülü ( $E_m$ ) değerleri belirlenmiştir (Çizelge 4). Çizelge 4 incelendiğinde  $E_m$  değerleri; Bieniawski (1978) eşitliği için en düşük 0.4 en yüksek 49.4 GPa, Aydan vd. (1997) eşitliği için en düşük 6 en yüksek 41.5 GPa, Read vd. (1999) eşitliği için en düşük 8.1 en yüksek 41.7 GPa, Barton (2002) eşitliği için en düşük 11.6 en yüksek 30.8 GPa ve Zhang ve Einstein (2004) eşitliği için en düşük 3.8 en yüksek 42.1 GPa olarak bulunmuştur. Bieniawski (1978) eşitliği RMR değerinin > 50 olduğu durumda geçerli iken, Serafim ve Pereira (1983) eşitliği ise RMR değerinin  $\leq 50$  olduğu durumda geçerli olmaktadır. Bu çalışmada kapsamında tünel güzergâhındaki 37 farklı noktadan üç jeoteknik birime ait RMR değerleri 50'nin altında olmuştur (Çizelge 1). Verilerde bir bütünlük sağlamak için Bieniawski (1978) ve Serafim ve Pereira (1983) eşitlikleri birlikte kullanılmıştır. Çalışma sahasındaki jeoteknik birimlerin RMR değerleri ise 43.2–74.7 arasında değişmiştir (Karaman vd., 2013).

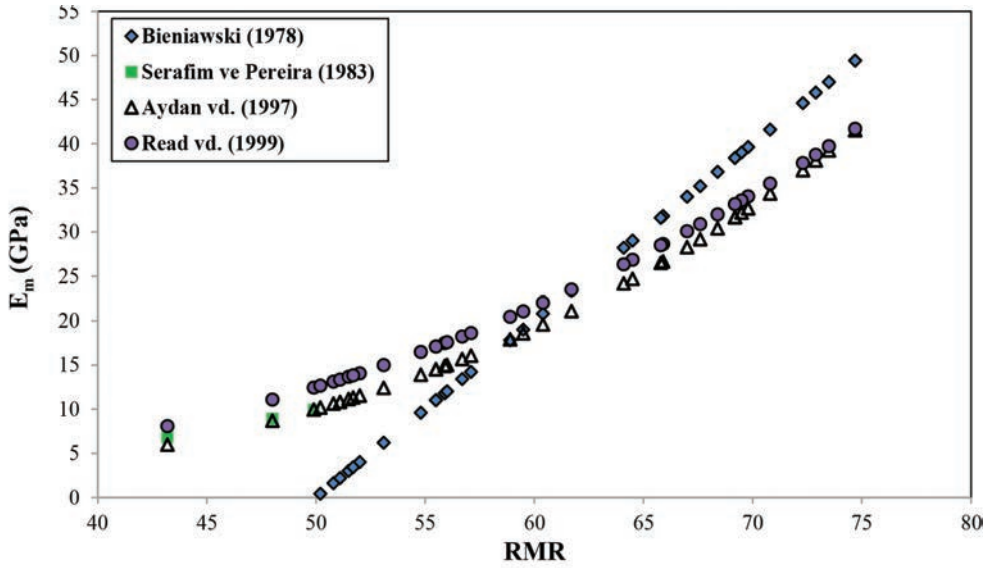
$E_m$  değerleri Şekil 4'te birlikte değerlendirilmiştir. Aynı örnekleme noktası için birbirinden oldukça farklı  $E_m$  değerlerinin elde edildiği görülmektedir. RMR sisteminden elde edilen eşitliklerin genelde aynı eğilimde olduğu anlaşılmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5'ten de anlaşılacağı gibi Bieniawski (1978) eşitliği diğerlerine nazaran kısmen farklı bir eğilim sunmaktadır. Aydan vd. (1997) ve Read vd. (1999) tarafından önerilen eşitlikler oldukça yakın  $E_m$  değerleri vermiştir.

Şekil 6'te bu çalışmadan üretilen eşitlik ile birbirine oldukça yakın  $E_m$  değerleri sunan iki eşitliğin (Aydan vd., 1997; Read vd., 1999) karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 6'ya göre önerilen eşitlik ile kısmen daha düşük  $E_m$  değerlerinin elde edildiği ve bu nedenle önerilen eşitliğin analizlerde araştırmacıları güvenli tarafta bırakabileceği düşünülmüştür.

Önerilen eşitlik yardımıyla bulunan  $E_m$  değerlerinin diğer eşitliklerden hesaplanan değerler ile benzerliği veya farkını test etmek için tek yönlü varyans analizi (Oneway ANOVA) yapılmıştır. Tek yönlü varyans analizi grup verilerinin normal dağılımı koşulunu öne sürdüğünden önce normallik testleri (normality tests) ile verilerin normal dağılıma uygunluğu test edilmiştir. Kaya kütlelerinin  $E_m$  değerleri Kolmogorov-Smirnov'a göre normal dağılım göstermiştir (önem düzeyi (Asymp. Sig.) > 0.05). Ayrıca, verilerin normal dağılımlarını gösteren histogram grafikleri Şekil 7'de yer almaktadır. Şekil 7 incelendiğinde bu çalışma ve Barton (2002) tarafından önerilen eşitliklere ait önem düzeyleri diğer eşitliklerden daha yüksek çıkmıştır. Tek yönlü varyans değerlerinin sonuçlarını incelemeyen önce varyansların homojenliği test edilmiştir. Grupların homojen olması için anlamlılık seviyesi (Sig.) > 0.05 olması gerekmektedir. Eğer bu teste göre anlamlılık seviyesi < 0.05 ise "Grup ortalamaları birbirinden önemli düzeyde farklıdır" veya "Grup ortalamalarından en az biri diğerlerinden farklıdır" yorumları yapılmaktadır (Özdamar, 2011). Bu teste göre verilerin homojen olmadığı (Levene testi  $F=20.009$ , anlamlılık seviyesi=0.000) anlaşılmıştır. Bu nedenle Tamhane's T2 post-hoc testi grupların benzer olup olmadığını kontrol etmek için kullanılmıştır (Çizelge 5). Hochberg ve Tamhane (1987), Tamhane's T2 ve Tamhane's T3 testlerinin tutucu ve dikkatli karşılaştırmalar yaptığını belirtmektedirler. Bu analizde anlamlılık seviyesi 1.000'e yaklaştıkça grupların benzerliğinin arttığı bilinmektedir. Anlamlılık seviyesi 1.000 olduğunda ise grupların birebir aynı olduğu anlamı çıkmaktadır. Bu çalışmada önerilen eşitlikle hesaplanan  $E_m$  değerleri ile diğer eşitliklerden elde edilen  $E_m$  değerleri arasında fark olmadığı (benzer oldukları) Tamhane's T2 testi ile anlaşılmıştır (anlamlılık seviyesi > 0.05). Çizelge 5 incelendiğinde grup



Şekil 4.  $E_m$  değerlerinin örnek noktasına göre değişimi  
Figure 4. Variations of  $E_m$  values according to the test locations

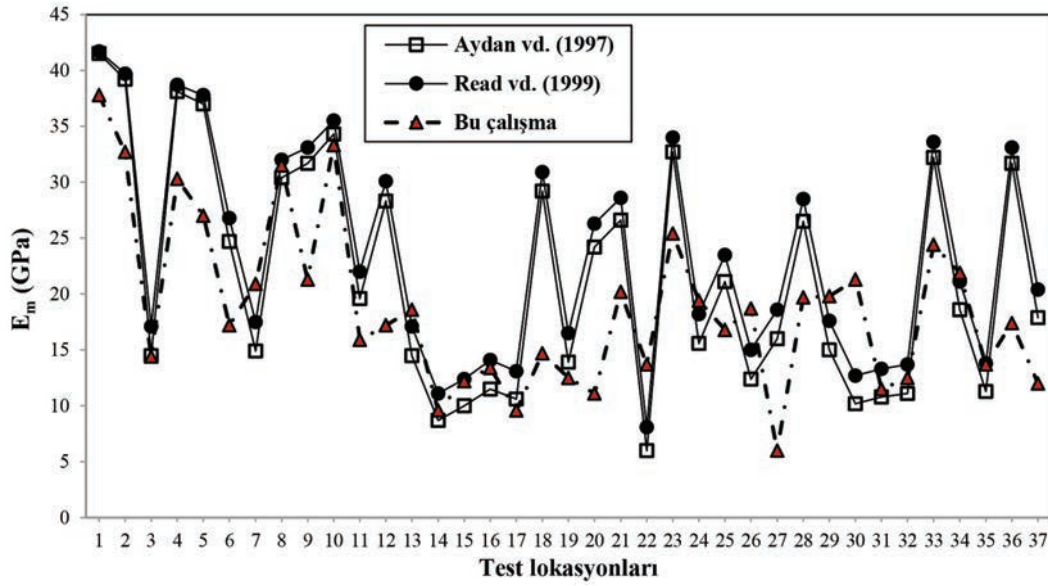


Şekil 5. RMR ile  $E_m$  arasındaki ilişki  
Figure 5. Relationship between RMR and  $E_m$

1 (bu çalışma) ile grup 6'nın (Zhang ve Einstein, 2004) diğer gruplara göre daha çok benzerlik gösterdiği görülmektedir. Kayaçların dayanımı arttıkça  $E_m$  ve  $I_{s(50)}$  değerleri artmaktadır. Ayrıca her iki eşitliğin (grup 1 ve grup 6) RQD parametresini içermesi, iki grup arasındaki benzerliği artırmış olabilmektedir. Grup 1'e en az

benzeyen ise anlamlılık seviyesine göre (0.289) grup 4 (Read vd., 1999) olmuştur. Ortalama farklılığı açısından grup 1'e en yakın gruplar; grup 5 (Barton, 2002) ve grup 6 (Zhang ve Einstein, 2004) olduğu ortaya çıkmıştır. Diğer gruplar kendi aralarında değerlendirildiğinde grup 4 (Read vd., 1999) ve grup 6 (Zhang ve Einstein,





Şekil 6.  $E_m$  değerlerinin karşılaştırılması  
Figure 6. Comparison of  $E_m$  values

2004) arasında fark olduğu anlaşılmaktadır. Ancak bu çalışmada grup 1 (önerilen eşitlik) ile diğer grupların benzerliği araştırılmıştır. Gruplara ait en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri gösteren grafik Şekil 8' de, buna ait sayısal bilgiler de Çizelge 6'da gösterilmiştir. Çizelge 5, 6 ve Şekil 8 incelendiğinde bu çalışmada üretilen eşitliğin ANOVA çoklu karşılaştırma analizlerine göre güvenilir olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca söz konusu eşitliğin diğerlerine göre ( $UCS$ ,  $E_i$  vb.) daha ucuz ve kolay elde edilebilen parametreleri ( $RQD$  ve  $Is_{(50)}$ ) içermesi, yüksek kaliteli karota ihtiyaç duymaması ve deneyin arazide yapılabilmesi gibi araştırmacıların işini kolaylaştırması bakımından oldukça önemli olduğu düşünülmüştür.

## SONUÇLAR

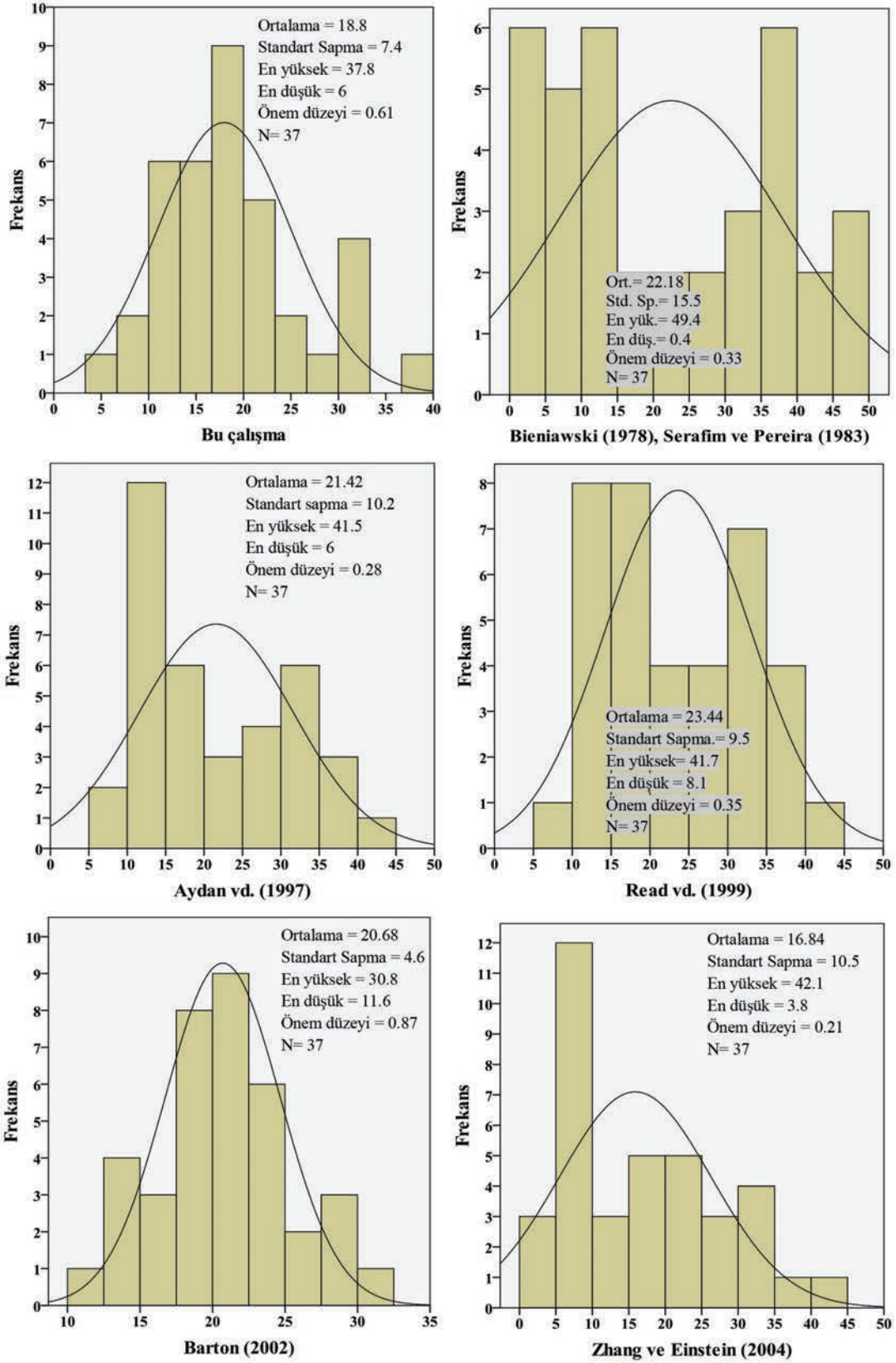
Bu çalışmada 7132 metre uzunluğa sahip bir tünel güzergâhının 37 farklı aynasında süreksizlik özellikleri RMR ve Q sınıflaması için belirlenmiştir. Aynı noktalardan alınan kaya blokları laboratuvara getirilerek karot örnekleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Yapılan deney ve ölçümlerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1) RMR ve Q kaya kütlesi sınıflama sisteminden,  $RQD$  ve  $E_i$  parametrelerinden literatürde önerildiği şekliyle  $E_m$  değerleri bulunmuştur.  $E_m$

değerleri; Bieniawski (1978) eşitliği için en düşük 0.4 en yüksek 49.4 GPa, Aydan vd. (1997) eşitliği için en düşük 6.0 en yüksek 41.5 GPa, Read vd. (1999) eşitliği için en düşük 8.1 en yüksek 41.7 GPa, Barton (2002) eşitliği için en düşük 11.6 en yüksek 30.8 GPa ve Zhang ve Einstein (2004) eşitliği için en düşük 3.8 en yüksek 42.1 GPa olarak bulunmuştur.

2) Bu çalışma kapsamında literatürdeki diğer eşitliklere göre uygulaması daha kolay olan,  $E_m$  değerlerinin pratik olarak belirlemeye yönelik bir eşitlik üretilmiştir. Önerilen eşitliğin daha ucuz ve kolay elde edilebilen parametreleri ( $RQD$  ve  $Is_{(50)}$ ) içermesi, yüksek kaliteli karota ihtiyaç duymaması ve deneyin arazide yapılabilmesi gibi araştırmacıların işini kolaylaştırması bakımından oldukça önemli olduğu düşünülmüştür.  $E_m$  değerleri; söz konusu eşitlik için en düşük 6 en yüksek 37.8 GPa olarak bulunmuştur.

3) Bu çalışmada önerilen ve daha önce önerilmiş eşitlikler ANOVA çoklu karşılaştırma analizleri ile karşılaştırılmıştır. ANOVA analizleri bu çalışmada üretilen eşitliğin kaya kütlelerinin  $E_m$  değerlerinin belirlenmesinde güvenle kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak unutulmamalıdır ki; ampirik eşitlikleri tek başına kullanmak yerine farklı parametreleri içeren eşitlikler ile birlikte kullanmak ve bulguları

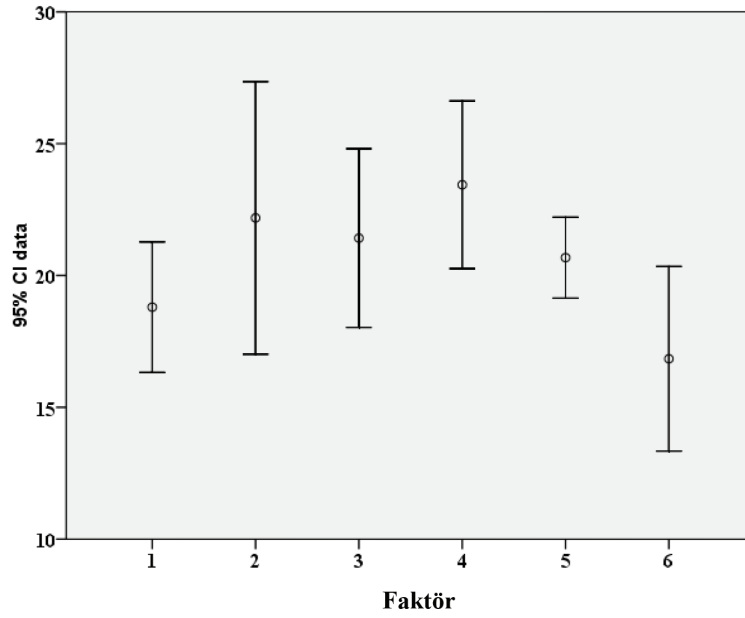


Şekil 7. Deformasyon modülü değerlerinin histogram grafikleri  
Figure 7. Histogram charts of deformation modulus values

Çizelge 5. Grupların çoklu karşılaştırması (ANOVA Tamhane's T2 testi)  
Table 5. Multiple comparison of groups (ANOVA Tamhane's T2 test)

(I) Faktör/ Grup	(J) Faktör/ Grup	Ortalama farklılığı (I-J)	Standart hata	Anlamlılık seviyesi	95% Güven aralığı	
					Alt sınıf	Üst sınır
1	2	-3.3838	2.8259	0.983	-12.058	5.290
	3	-2.6189	2.0688	0.971	-8.903	3.666
	4	-4.6405	1.9868	0.289	-10.669	1.388
	5	-1.8784	1.4359	0.962	-6.256	2.499
	6	1.9595	2.1145	0.999	-4.468	8.387

1: Bu çalışma, 2: Bieniawski (1978), Serafim ve Pereira (1983), 3: Aydan vd. (1997), 4: Read vd. (1999),  
5: Barton (2002), 6: Zhang ve Einstein (2004).



Şekil 8. Farklı metotlardan elde edilen E<sub>m</sub> değerlerine ait ortalamaların karşılaştırılması  
Figure 8. Comparison of the mean values of E<sub>m</sub> obtained from different methods

Çizelge 6. Grupların istatistiksel değerleri  
Table 6. Statistical values of the groups

Gruplar	N	Ortalama	Standart sapma	Standart hata	En düşük E <sub>m</sub> , GPa	En yüksek E <sub>m</sub> , GPa
1	37	18.800	7.4210	1.2200	6.0	37.8
2	37	22.184	15.5050	2.5490	0.4	49.4
3	37	21.419	10.1627	1.6707	6.0	41.5
4	37	23.441	9.5381	1.5681	8.1	41.7
5	37	20.678	4.6060	0.7572	11.6	30.8
6	37	16.841	10.5056	1.7271	3.8	42.1
Toplam	222	20.560	10.2957	0.6910	0.4	49.4

N: Veri sayısı, 1: Bu çalışma, 2: Bieniawski (1978), Serafim ve Pereira (1983), 3: Aydan vd. (1997), 4: Read vd. (1999), 5: Barton (2002), 6: Zhang ve Einstein (2004).

arazi gözlemleri ile birlikte değerlendirmek, araştırmacıları daha doğru bir sonuca götürecektir. Önerilen eşitlik kaya kütlelerine ait deformasyon modülü hakkında bir fikir vereceğinden ön analizlerde ve güzergâh belirleme çalışmalarında kullanımı önerilmiştir.

## KATKI BELİRTME

Yazarlar, bu çalışmanın yürütülmesine katkıda bulunan Enerjisa A.Ş.'ye ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Araştırma Fonuna (Proje no: 9706) teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

- Abad, J., Caleda, B., Chacon, E., Gutierrez, V., and Hidlgo, E., 1983. Application of geomechanical classification to predict the convergence of coal mine galleries and to design their supports. 5th International Society for Rock Mechanics Congress, Melbourne, 15-19.
- Aksoy, C.A., Geniş, M., Aldaş, G.U., Özacar, V., Özer, S.C., and Yılmaz, Ö., 2012. A comparative study of the determination of rock mass deformation modulus by using different empirical approaches. *Engineering Geology*, 131-132, 19-28.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., and Kawamoto, T., 1997. Assessment of rock mass strength for underground excavations. *Proceedings of the 36th US rock mechanics symposium*, New York, June/July, 777-786.
- Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics* 6, 189-239.
- Barton, N., 1995. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. Keynote Lecture, 8th Congress ISRM, Tokyo.
- Barton, N.R., 2002. Some New Q-value Correlations to Assist in Site Characterization and Tunnel Design. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences* 39 (2), 185-216.
- Basarir, H., Ozsan, A. and Karakus, M., 2005. Analysis of support requirements for a shallow diversion tunnel at Guledar dam site, Turkey. *Engineering Geology* 81(2), 131-145.
- Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Transactions of the South African Institute of Civil Engineers*, 15 (12), 335-344.
- Bieniawski, Z.T., 1976. Rock mass classification in rock engineering applications. *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*, South Africa, Balkema, Rotterdam, 97-106.
- Bieniawski, Z.T., 1978. Determining rock mass deformability, experience from case histories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15 (5), 237-247.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering rock mass classifications*, Wiley, New York, 251.
- Chun, B., Lee, Y., Seo, D., and Lim, B., 2006. Correlation of deformation modulus by PMT with RMR and rock mass condition. *Tunnelling and Underground Space Technol.*, 21 (3-4): 231-232.
- Clerici, A., 1993. Indirect determination of rock masses-case histories. L.M. Riberio e Sousa and N.F. Grossman, eds. *Proceedings of the Symposium EUROCK'93*. Rotterdam: AA Balkema, 509-517.
- Deere, D. U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1, 17-22.
- Geniş, M., Basarir, H., Ozarslan, A., Bilir, E. and Balaban, E., 2007. Engineering geological appraisal of the rockmasses and preliminary support design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey. *Engineering Geology*, 92, 14-26.
- Gürocak, Z., 2011. Analyses of stability and support design for a diversion tunnel at the Kapıkaya dam site, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70 (1), 41-52.
- Gökçeoğlu, C., Sönmez, H. and Kayabaşı, A., 2003. Predicting the deformation moduli of rock masses. *International*



- Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 40, 701-710.
- Hashemi, M., Moghaddas, S., and Ajalloeian, R., 2010. Application of rock mass characterization for determining the mechanical properties of rock mass: a comparative study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43, 305-320
- Hochberg, Y., and Tamhane, A.C., 1987. Multiple comparison procedures. New York: John Wiley & Sons press.
- Hoek, E., and Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 34 (8), 1165-1186.
- Hoek, E., and Diederichs, M.S., 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 43, 203-215.
- ISRM., 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring, E. T. Brown (ed.), Pergamon Press, London.
- ISRM., 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, Hudson (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods, International Society for Rock Mechanics. ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.
- Işık, N., S., Ulusay, R., and Doyuran, V., 2008. Deformation Modulus of Heavily Jointed-Sheared and Blocky Greywackes by Pressuremeter Tests: Numerical, Experimental and Empirical Assessments, *Engineering Geology*, 101, 269-282.
- Kahraman, S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 38, 981-994.
- Kaiser, T.K., and Gale, A.D., 1985. Evaluation of Cost and Empirical Support Design at B.C. Rail Tumbler Ridge Tunnels. *Canadian Tunnelling, Tunnelling Association of Canada*, Wiley, New York, 77-106.
- Karaman, K., and Kesimal, A., 2013. Evaluation of the influence of porosity on the Engineering properties of volcanic rocks from the Eastern Black Sea Region: NE Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 1-8 .
- Karaman, K., Kesimal, A., Kaya, A., and Demirel, S., 2013. Dolaylı yöntemlerle belirlenen kaya malzemesine ait tek eksenli basınç dayanımı parametresinin  $RMR_{89}$  puanı hesaplamalarında kullanılabilirliği, 3. Uluslararası Ulaşımında Yeraltı Kazıları Sempozyumu, 29-30 Kasım, İstanbul.
- Karaman, K., Kesimal, A., and Ersoy, H., 2014. A comparative assessment of indirect methods for estimating the uniaxial compressive and tensile strength of rocks. *Arabian Journal of Geosciences*, 1-11.
- Karslı, M., 2009. Arhavi-Hopa (Artvin) arasındaki karayolu şevlerinin duraylılık açısından incelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Kaya, A., Bulut, F., Alemdağ, S., and Sayın, A., 2011. Analysis of support requirements for a tunnel portal in weak rock: A case study from Turkey. *Scientific Research and Essays*, 6 (31), 6566-6583.
- Kaya, A., 2012. Cankurtaran (Hopa-Artvin) tünel güzergahının ve çevresinin jeoteknik açıdan incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 185 pp.
- Kayabaşı, A., Gokceoglu, C., and Ercanoglu, M., 2003. Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 40, 55-63.
- Ketin, İ., 1966. Tectonic units of Anatolia. *Bull. Mineral Research and Exploration Institute of Turkey*, 66, 22-34.
- Khabbazi, A., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R., and Cheshomi, A., 2013. Estimation of the rock mass deformation modulus using a rock classification system. *Geomechanics and Geoengineering: An international Journal*, 46-52, 8/1.

- Kumar, N., Samadhiya, N.K., Anbalagan, R., 2004. Application of rock mass classification system for tunneling in Himalaya, India Paper 3B 14, SINOROCK2004 Symposium. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 41 (3), 531.
- Nejati, H.R., Ghazvinian, A., Moosavi, S.A., and Sarfarazi, V., 2014. On the use of the RMR system for estimation of rock mass deformation modulus. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73 (2), 531-540.
- Laderian, A., and Abaspoor, M.A., 2012. The correlation between RMR and Q systems in parts of Iran. *Tunnelling Underground Space Technology*, 27, 149-158.
- Ocak, İ., 2008. Estimating the modulus of elasticity of the rock material from compressive strength and unit weight. *Journal of the South African Institute Mining and Metallurgy*, 108 (10), 621-626.
- Özdamar, K., 2011. Paket programlar ile istatistiksel veri analizi. Kaan Kitabevi, Eskişehir, 8. Baskı.
- Palmström, A., and Singh, R., 2001. The deformation modulus of rock masses-comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunnelling Underground Space Technology*, 16, 115-131.
- Priest, S., D. and Hudson, J.A., 1976. Discontinuity spacing in rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstracts*, 13, 135-148.
- Ramamurthy, T., 2004. A geo-engineering classification for rocks and rock masses. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 41, 89-101.
- Read, S.A.L., Richards, L.R., and Perrin, N.D., 1999. Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks, *Proc. 9th International Congress on Rock Mechanics*, Paris, 2, 655-660.
- Sarı, D., and Pasamehmetoglu, A.G., 2004. Proposed support design, Kaletepe tunnel, Turkey, *Engineering Geology*, 72, 201-216.
- Serafim, J.L., and Pereira, J.P., 1983. Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology Underground Construction*, Lisbon, Portugal, 1133-1144.
- Shen, J., Karakus, M., and Chaoshui, X., 2012. A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses. *Tunnelling Underground Space Technology*, 32, 245-250.
- Singh, T.N., Kainthola, A., and Venkatesh, A., 2012. Correlation between point load index and uniaxial compressive strength for different rock types. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45 (2), 259-264.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, H.A., and Kayabaşı, A., 2006. Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 224-235.
- Terzaghi, K., 1946. Rock Defects and Loads on Tunnel Support. In: Proctor, R. V., White T (eds), *Rock Tunnelling with Steel Support*, 1. Commercial Shearing Co., Youngstown, OH, 15-99.
- Tuğrul, A., 1998. The application of rock mass classification systems to underground excavation in weak limestone, Atatürk dam, Turkey. *Engineering Geology*, 50 (3-4), 337-345.
- Ulusay, R., and Sönmez, H., 2007. Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, 2. Baskı, Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara.
- Zhang, L., and Einstein, H.H., 2004. Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (2), 337-41.
- Zhang, L., 2004. *Drilled Shafts in Rock Analysis and Design*. A. A. Balkema Publishers, Taylor & Francis Group Plc., London, UK.