



## Kaya Kütlelerinin Ayrışmaya Göre Sınıflandırılmasında Yeni Yaklaşım ve Uygulaması

*New Approach for Classification of Rock Masses According to Weathering and its Application*

**SAMET BERBER**<sup>1</sup> Orcid: 0000-0002-8747-9346

**NURCİHAN CERYAN**<sup>2</sup> Orcid: 0000-0002-1657-1102

**ŞENER CERYAN**<sup>1</sup> Orcid: 0000-0002-1927-6985

<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Balıkesir

<sup>2</sup>Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Balıkesir

Geliş (received): 01/12/2024

Kabul (Accepted): 06/01/2025

### ÖZ

Bu çalışmada, kaya kütlelerinin ayrışma derecesini belirlemek için yeni bir sayısal yaklaşım önerildi. Bu yeni yaklaşımı oluşturmak için Kaya Mühendislik Sistemi (RES) kullanılmıştır. RES doğal sistemi etkileyen parametrelerin karşılıklı etkileşimini gösteren etkileşim matrisinin oluşturulması esasına dayanır. Bu çalışmada kaya kütlelerinin ayrışma durumunu tanımlamak ve derecelendirmek için kurulan etkileşim matrisinde kullanılan parametreler; kaya malzemesi ayrışma durumu (P1), kaya ve toprağın oranı (P2), süreksizlik yüzeyinin ayrışma durumu (P3), kaya kütlesi yapısının korunması (P4), süreksizlik sıklığı (P5) ve süreksizlik yüzey malzemesinin ayrışma derinliğidir (P6). Ağırlık faktörü P1 için 2.8368, P2 için 2.2855, P3 için 2.7356, P4 için 1.497, P5 için 3.4042 ve P6 için 1.1032 olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada kaya kütleleri için geliştirilen ayrışmaya sınıflandırılması Gümüşhane-Giresun yolu kazılarında yüzeylenen volkanik kayalara uygulanmıştır. Bu çalışmada elde edilen Kaya Kütle Ayrışma Puanı (Wres) ile Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), tek eksenli, basınç dayanımı ( $\sigma_{cm}$ ) ve deformasyon modülü ( $E_m$ ) arasında anlamlı istatistiksel ilişki olduğu ve Wres kullanılarak GSI,  $\sigma_{cm}$  ve  $E_m$ 'nin güvenilirlikle tahmin edilebileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Ayrışma sınıflandırması, Kaya Kütleleri, Kaya Mühendislik Sistemi, Volkanik kayalar

\*Samet Berber, sametberber@balikesir.edu.tr

DOI: 10.70054/geosound.1594479

## **ABSTRACT**

*In this study, a new numerical approach was proposed to determine the weathering degree of rock masses. Rock Engineering System (RES) was used to create this new approach. RES is based on the creation of an interaction matrix that shows the interaction of the parameters affecting the natural system. In this study, the parameters used in the interaction matrix established to define and grade the weathering state of rock masses are; rock material weathering state (P1), rock and soil ratio (P2), weathering state of discontinuity surface (P3), preservation of rock mass structure (P4), discontinuity frequency (P5) and weathering depth of discontinuity surface material (P6). The weight factor was obtained as 2.8368 for P1, 2.2855 for P2, 2.7356 for P3, 1.497 for P4, 3.4042 for P5 and 1.1032 for P6. In this study, the weathering classification developed for rock masses was applied to volcanic rocks exposed in the Gümüşhane-Giresun road excavations. In this study, it was observed that there was a significant statistical relationship between the Rock Mass Weathering Score (Wres) obtained and the Geological Strength Index (GSI), uniaxial, compressive strength ( $\sigma_{cm}$ ) and deformation modulus ( $E_m$ ), and that GSI,  $\sigma_{cm}$  and  $E_m$  could be estimated reliably using Wres.*

**Keywords:** *Weathering classification, Rock Mass, Rock Engineering System; Volcanic rock*

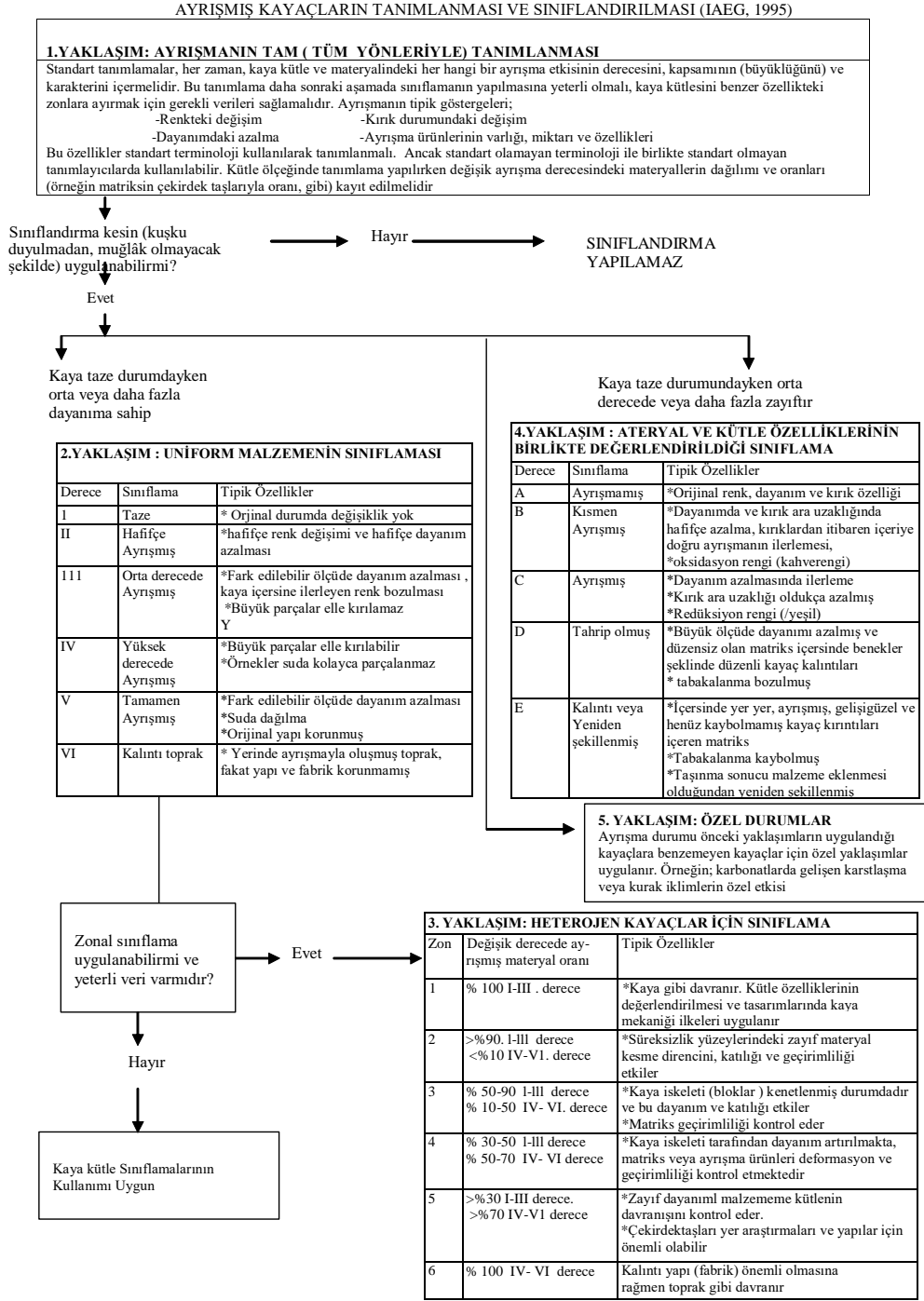
## **1. GİRİŞ**

Kayanın mühendislik davranışı yalnızca gerilme durumuna ve geçmişine değil, aynı zamanda kayanın ayrışma nedeniyle fiziksel ve kimyasal değişimine de bağlıdır (Ceryan vd., 2021). Bu nedenle, jeoteknik mühendislerinin ayrışma sırasındaki değişimleri sayısal olarak tahmin etmeleri önemlidir. Bir kayanın toprağa dönüşme sürecindeki çeşitli aşamalar tanınabilir ve ayrışmış kayaların mühendislik sınıflandırmalarının temelini oluşturmak için kullanılabilir (IAEG 1995). Ayrışmış kayaçların tanımlanması ve sınıflandırılması, mühendislik özelliklerindeki değişiklikleri elde etmek için gereklidir. Sınıflandırmadaki ilk adım, sınıflandırma amacıyla ilgili kayaçların parametrelerini belirlemek ve kayacı bu parametrelere ve özelliklere göre tanımlamaktır (Ceryan, 2012). Ayrışmış kaya kütesinin sınıflandırma sistemleri hakkında esas olarak iki yaklaşım vardır. Bunlardan biri nitel ayrışma sistemidir. Nitel ayrışma sistemleri, esas olarak jeolojik özelliklerin görsel tanımına, indeks özelliklerine ve sahada da uygulanabilen temel mekanik teste dayanmaktadır (Ceryan, 2012). Ayrıca,

kayaçların mühendislik özellikleri nitel sınıflandırmalar tarafından bir aralıkta tahmin edilebilir. Ancak, her bir ayrışma derecesi için tahmin edilen mühendislik özelliklerinin bu aralığı, sınıf sınırlarında diğer sınıfın aralığıyla örtüşebilir (Ceryan vd., 2008). Ayrıca nitel ayrışma sınıflandırmaları, kayacın ayrışma derecesi ile mühendislik özellikleri arasında sayısal ilişkilerin kurulmasına izin vermemektedir. Nitel ayrışma sınıflandırmasının diğer bir dezavantajı, bu sistemlerde kullanılan özelliklerin öznel (kullanıcıya bağlı) olması ve her ayrışma derecesi için birbirinden farklı özelliklerin kullanılmasıdır (Ceryan vd., 2008).

Günümüzde literatürde nitel sınıflandırma sistemleri arasında en yaygın kullanılan ayrışma sınıflandırma sistemi IAEG (1995) tarafından önerilmiştir (Şekil 1). Ayrışmış kayaçlar için diğer sınıflandırma sistemi türü sayısal (nicel) sistemdir. Price (1995) tarafından önerilen kaya kütlelerini ayrışma durumuna göre puanlama sistemi sayısal sistem için bir örnektir (Çizelge 1, Çizelge 2). Price (1995) geliştirdiği sistemde kaya malzemesi ayrışma durumunu ve süreksizliğin ayrışma durumunu puanlamış ve bu puanların toplamından da kaya kütlesi ayrışma puanı elde etmiştir. Price (1995) kaya malzemesi ayrışma durumunu puanlarken, ayrışmamış kaya malzemesi, rengi bozulmuş kaya malzemesi ve jeoteknik anlamda toprak malzemesinin oranını dikkate almıştır. Süreksizliklerin ayrışma durumu puanlanırken süreksizlik yüzeyindeki ayrışmamış kısım, yüzeyi boyanmış kısım, ayrışma derinliği > pürüzlülük olan kısım ve jeoteknik anlamda topraktaki kalıntı süreksizliklerin oranları dikkate alınmıştır. Çizelge 2’de Price (1995) puanlama sisteminde toplam puanlara göre ayrışma sınıfları ve bu sınıflardaki kayaçlarda rastlanılacak mühendislik problemleri verilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, kaya kütleleri için sayısal bir ayrışma sisteminin geliştirilmesidir. Bu sistem Kaya Mühendislik Sistemi (Hudson, 1992) kullanılarak elde edilmiştir. Kaya kütlelerinin ayrışma puanını bulabilmek için kurulan etkileşim matrisinde kullanılan parametreler kaya malzemesi ayrışma durumu, kaya ve toprağın oranı, süreksizlik yüzeyinin ayrışma durumu, kaya kütlesi yapısının korunması, süreksizlik sıklığı ve süreksizlik yüzey malzemesinin ayrışma derinliğidir. Bu çalışmada geliştirilen kaya kütlesi ayrışma sınıflandırması Gümüşhane-Giresun karayolunun Kürtün-Torul ilçesi arasındaki yol şevlerinde (Şekil 2) yüzeylenen volkanik kayaçlara uygulanmıştır.



Şekil 1. IAEG (1995) tarafından önerilen kayaçların ayrışmaya göre tanımlama ve sınıflandırma yaklaşımı

Figure 1. The approach to the identification and classification of rocks according to weathering proposed by IAEG (1995).

Çizelge 1. Price (1995) tarafından geliştirilen kaya kütleleri için ayrışma sınıflandırmasında puanlama

Table 1. Scoring for weathering classification of rock masses developed by Price (1995)

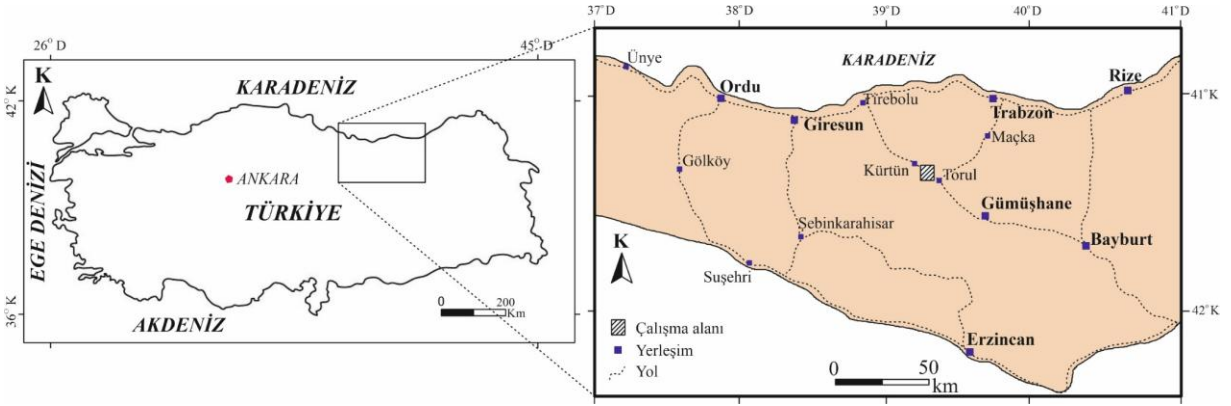
Kaya malzemesi için puanlama				
Oran	Taze	Renk değiştirmiş. Dayanım kaybı var	Ufalanabilir (ve renk değiştirmiş). Dayanım kaybı önemli miktarda. Jeoteknik anlamda toprak	
±4 / 4	40	0	0	
±3 / 4	30	5	5	
±2/4	20	10	10	
±1 / 4	10	15	15	
0	0	20	20	
Mağmatik kayalardaki kırıklar için puanlama				Tüm kayalardaki tüm süreksizlikler için puanlama
Oran	Ayrışmamış	Yüzey boyanmış	Kaya malzemesi ayrışma derinliği> yüzey pürüzlülüğü	Jeoteknik anlamda topraklardaki kalıntı süreksizliklerin oranı (*)
±4/4	40	0	0	-20
±3/4	30	5	5	-15
±2/4	20	10	10	-10
±1/	10	15	15	-5
0	0	20	20	0
Tortul ve başkalaşım kayalarındaki kırıklar için puanlama				
Oran	Ayrışmamış	Yüzey boyanmış veya çözülmeye yeniden şekillendirilmiş	Kaya malzemesi ayrışma derinliği> yüzey pürüzlülüğü veya yüzey çözülmeye pürüzlülüğünden daha fazla ayrılmış	
±4/4	40	0	0	
±3/4	30	5	5	
±2/4	20	10	10	
±1/	10	15	15	
0	0	20	20	
Tabaka ve foliasyon düzlemleri için puanlama				
Oran	Ayrışmamış	Yüzey boyanmış veya çözülmeye yeniden şekillendirilmiş	Kaya malzemesi ayrışma derinliği> yüzey pürüzlülüğü veya yüzey çözülmeye pürüzlülüğünden daha fazla ayrılmış	
±4/4	40	0	0	
±3/4	30	5	5	
±2/4	20	10	10	
±1/	10	15	15	
0	0	20	20	

(\*: renk değiştirmiş ve ufalanabilir kaya malzemesi oranı  $\frac{3}{4}$  den fazla ise uygulanır)

Çizelge 2. Price (1995) puanlama sisteminde toplam puanlara göre ayrışma sınıfları ve bu sınıflardaki kayaçlarda rastlanılacak mühendislik problemleri

Table 2. Price (1995) grading system classifies weathering classes according to total scores and engineering problems encountered in rocks in these classes.

Sınıf	Puan ve Tanım	Tortul Kayaçlar	Kireçtaşı
A	Puan: >100 Fıilen ayrışmamış	Kaya malzemesi ve süreksizlik özelliklerine bağlı olarak mühendislik problemleri. Ayrışma etkisi yok	Kaya malzemesi ve süreksizlik özelliklerine bağlı olarak mühendislik problemleri. Ayrışma etkisi yok
B	Puan: 100-50 Önemli derecede ayrışmış	Eklem ve tabaka düzlemlerindeki dayanımın azalmasına bağlı olarak şev, tünel ve temellerde problemler	Eklem ve tabaka düzlemlerindeki açılma geçirimsizliğinin ve süreksizlik yüzeyleri dayanım azalmasındaki en önemli parametredir (Yeraltı kazıları için). Patlatmayla yapılan kazılarda problem
C	Puan: 50-20 Şiddetli derecede ayrışmış	Taşıma gücünde büyük miktarda azalma. Şev duraylılığı kalıntı topraktaki gibi ele alınır. Tünel için zayıf kaya koşulları	Kaya kütlelerinde erime boşlukları. Bütün mühendislik çalışmaları için problem. Yersel çökme problemleri
D2	Puan: 20-0 Kalıntı süreksizlikler içermeyen jeoteknik anlamda toprak	Ayrışmış kaya malzemesi jeoteknik anlamda toprak olarak ele alınmaktadır. Mühendislik problemlerinde zemin parametreleri gibi dizayn edilir.	Kalıntı toprak orijinal kayaktan oldukça farklı, yüksek demir ve kil içeriği
D1	Puan: 0-(-20) Kalıntı süreksizlikler içeren jeoteknik anlamda toprak	Ayrışmış kaya malzemesi jeoteknik anlamda toprak olarak ele alınmaktadır. Mühendislik problemlerinde zemin parametreleri gibi dizayn edilir. Ancak kalıntı süreksizlik şev duraysızlığında olumsuzluk oluşturur.	Kristalli kireçtaşlarına uygulama yok. Oldukça yumuşamış (zayıflamış) kalsilutit ve kalsiarenitlerde karbonatlı çamur ile birlikte kalıntı süreksizlikler. Bütün mühendislik çalışmaları için problem.



Şekil 2. Çalışma alanı yer bulduru haritası

Figure 2. The location map of the study area

Bu çalışmada öncelikle söz konusu kaya kütle yüzeylenmeleri litolojik özellikler, ayrışma durumu ve süreksizlik sıklığı dikkate alınarak homojen birimlere (jeoteknik birimlere) ayrılmıştır (Şekil 3). Her bir jeoteknik birim ayrı ayrı sınıflandırılmıştır. Söz konusu jeoteknik birimlerin mekanik özellikleri Hoek-Brown yenilme ölçütü (Hoke vd., 2002) ile elde edilmiştir. Daha sonra, RES sistemi kullanılarak elde edilen kaya kütle ayrışma puanı (Wres) Price'ın puanlama sistemi (Price, 1995) ve IAEG tarafından önerilen nitel ayrışma sınıflandırması (IAEG, 1995) ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Wres ile jeoteknik birimlerin mühendislik özellikleri arasındaki ilişki araştırılmıştır.



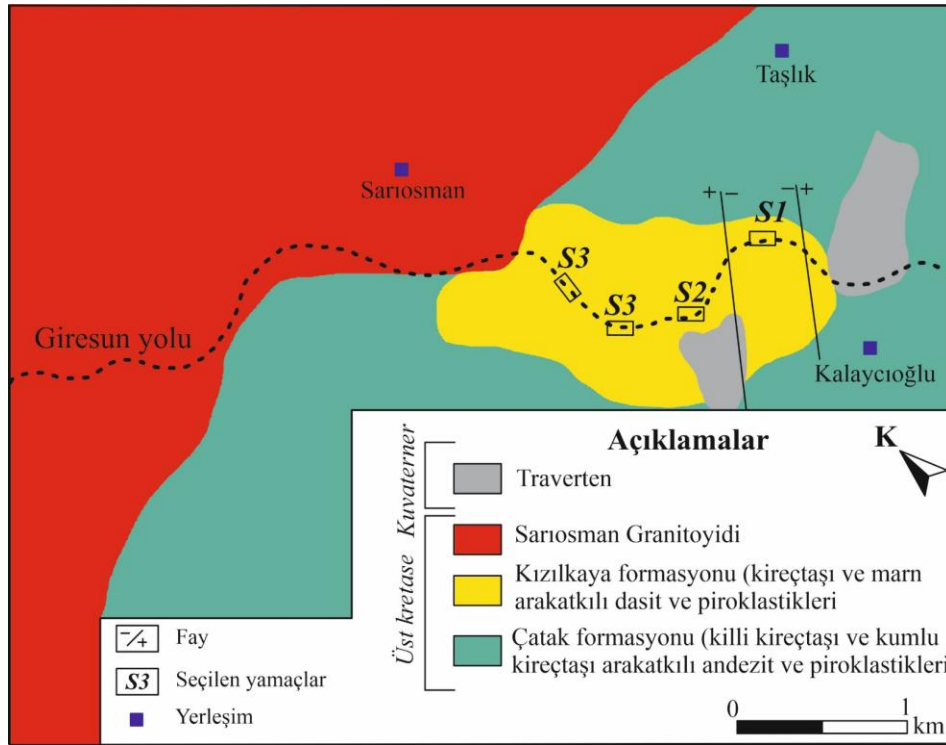
Şekil 3. Gümüşhane-Giresun yol kazı şevlerinde ayrıtlanan bazı jeoteknik birimler; a) 3. jeoteknik birim, b) 5. jeoteknik birim, c) 11. jeoteknik birim

Figure 3. Some geotechnical units distinguished in the Gümüşhane-Giresun road excavation slopes; a) 3rd geotechnical unit, b) 5th geotechnical unit, c) 11th geotechnical unit

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1 Jeolojik Özellikler

Çalışma alanında en eski kayalar, Turoniyen-Santoniyen yaşlı koyu kırmızı renkli killi kireçtaşı, kumlu kireçtaşı ara katkılı andezit ve piroklastikleridir (Ceryan, 2010) (Şekil 4). Çatak formasyonu olarak adlandırılan bu birim üzerine kireçtaşı ve marn ara katkılı Turoniyen-Santoniyen yaşlı dasit ve piroklastiklerinden oluşan Kızılkaya formasyonu gelmektedir. Kampaniyen-Maastrichtiyen yaşlı Sarıosman Granitoyidi bu iki formasyonu da kesmiştir (Ceryan, 2010). Kuvaterner yaşlı Traverten çalışma sahasındaki tüm birimlerin üzerine gelmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışma alanı jeoloji haritası

Figure 4. The geological map of the study area

## 2.2 Kaya Mühendisliği Sistemi ve kaya kütleleri için nicel sınıflandırma sisteminin oluşturulması

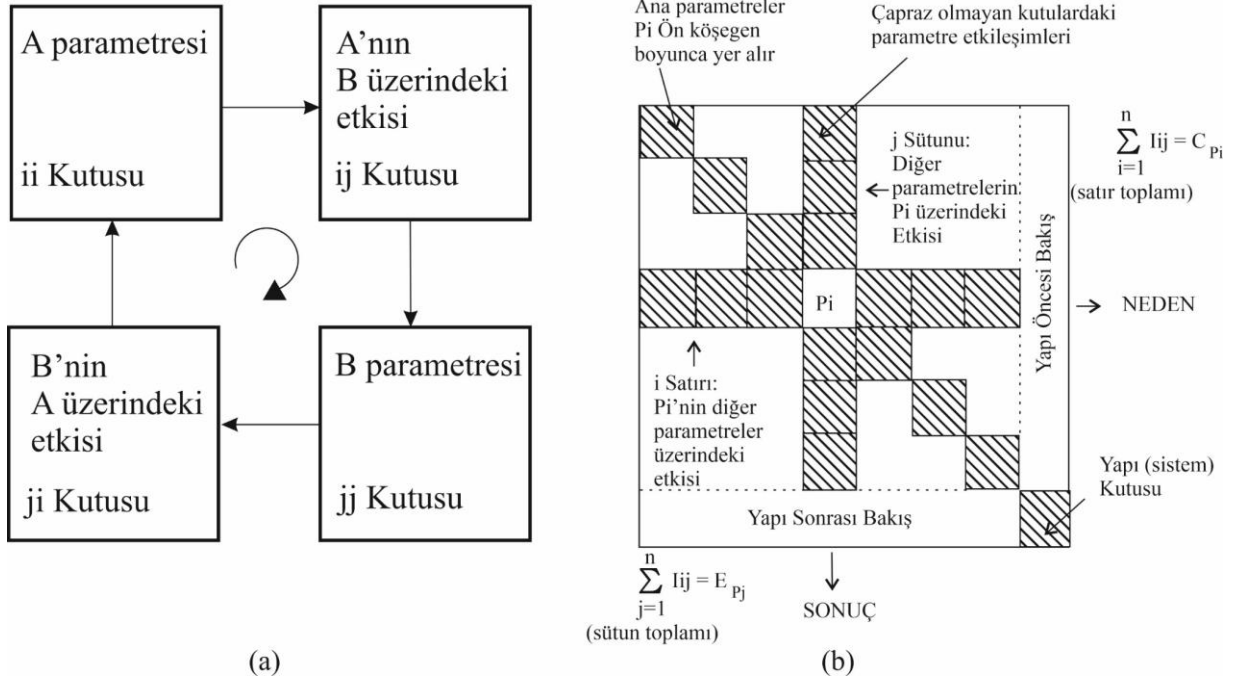
Bazı parametrelerin herhangi bir doğal sistem üzerinde diğerlerinden daha büyük bir etkiye sahip olabileceği bilinmektedir. Parametrelerin diğer parametrelerden etkilenebilirliği ve etkileyebilme derecesini ölçme yaklaşımı, Hudson (1992) tarafından sayısallaştırılmıştır. Bu sayısallaştırma işlemi (kaya mühendislik sistemi, RES), seçilen her bir parametrenin bir matrisin (etkileşim matrisinin) köşelerinde gösterilmesi ve her parametrenin sistemi etkileme şiddeti ve sistemden etkilenme derecesini kodlayarak elde edilmiştir. RES birçok doğal sistemlerde parametrelerin etkileşimini anlamak, sistemi tanımlamak için, dolayısıyla da birçok mühendislik çalışmalarında kullanılmıştır (Faramarzi vd., 2013; Huang vd., 2013; Rafiee vd., 2016; Ahmad vd., 2021; Vianello vd., 2023; Fattahi ve Ghaedi, 2024; Golmohammadi ve Bidgoli, 2024).

Etkileşim matrisinin kurulmasında ilk işlem doğal sistemi etkileyecek parametrelerin seçimidir. Bu çalışmada, kaya kütlelerin ayrışma derecesini sayısal olarak tanımlamak için altı parametre seçilmiştir. Bu parametrelerden ilki (P1) kaya malzemesi ayrışma durumudur. Kaya malzemesinde ayrışma derecesi arttıkça kayacın tek eksenli basınç dayanımı (ve sertliği) azalmaktadır (Koca ve Kıncal, 2016). Bu çalışmada bu azalmayı ifade etmek için sağlam, ayrışmamış kaya malzemesinde ölçülen Schmidt çekici geri tepme sayısının seçilen kaya malzemesinde ölçülen geri tepme sayısına oranı ( $R_f/R_w$  oranı) (Gökçeoğlu ve Aksoy, 2000) dikkate alınmıştır. İkinci parametre (P2) ayrışma zonundaki kaya ve toprağın (mühendislik açıdan toprak) oranıdır. Bu oran kaya kütlelerinin niteliksel ayrışma sınıflandırmalarında en çok kullanılan parametrelerinden biridir (Örn. Little, 1969; IAEG, 1995; Ceryan ve Ceryan, 2008). Ayrışma ilerledikçe, kaya toprağa dönüştükçe kaya oranı azalmakta toprak oranı artmaktadır. Süreksizlik yüzeyinin ayrışma durumu etkileşim matrisini oluşturmak için seçilen üçüncü parametredir (P3). Ayrışma ilerledikçe süreksizlik yüzey malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ve sertliği azalacaktır (Ceryan vd., 2016). Bu parametreyi tanımlamak için de sağlam kaya malzemesindeki Schmidt çekici geri tepme sayısının süreksizlik yüzeyindeki geri tepme sayısına oranı (Gökçeoğlu ve Aksoy, 2000) dikkate alınmıştır. Bu oran ayrışma ilerledikçe artmaktadır. Ayrışma ilerledikçe (kaya kütleleri toprağa dönüştükçe) kaya kütle

yapısı da değişmekte, giderek kaybolmaktadır. Nitel ayrışma sınıflandırmalarının çoğunda kullanılan kaya kütlesi yapısının korunması parametresi (P4) (IAEG, 1995; Ceryan ve Ceryan, 2008) bu çalışmada da dikkate alınmıştır. Süreksizlik yüzeyindeki zayıf malzemenin (dolgunun, ayrıışmış yüzey malzemesinin) kalınlığı süreksizliklerin kayma dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Süreksizliklerin kayma dayanımını etkileyen bir diğer önemli faktör süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğüdür. Ayrışma ilerledikçe süreksizlik yüzeyindeki ayrışma derinliği ve ayrıışmış kayadan oluşan dolgu kalınlığı artmakta ve bu duruma bağlı olarak süreksizliklerin kayma dayanımı azalmaktadır (Ceryan vd., 2016). Bu nedenle bu çalışmada süreksizlik yüzey malzemesinde ayrışma derinliği (P5) bir parametre olarak dikkate alınmış ve bu derinlik süreksizlik yüzeyi pürüzlülüğünün genliği ile karşılaştırılmıştır. Kaya kütlesinde süreksizlik sıklığı artıka yüzey ve yeraltı suları daha çok kaya yüzeyi ile temas etmekte ve ayrışma daha çok ilerlemektedir. Öte yandan ayrışma ilerledikçe kaya kütlesinde yeni kırıklar oluşmakta süreksizlik sıklığı artmaktadır. Bu nedenle kaya kütlesinin ayrışma durumunu tanımlamak için süreksizlik sıklığı parametresi (P6) dikkate alınmıştır. Bu çalışmada süreksizlik sıklığı hacimsel eklem sayısı ile ifade edilmiştir.

Kaya kütlesinin ayrışma durumunu belirlemek için parametreler seçildikten sonra bu parametrelerin karşılıklı etkileşimini puanlamak için etkileşim matrisi kurulmuştur. Yaklaşımın genel karakteristiği kavramsal olarak Şekil 5a'da gösterilmiştir (Hudson, 1992; Ceryan ve Ceryan, 2008). Daha önce anlatılan parametrelerin etkileşimini anlamak için, “faktörlerden birindeki değişimin diğerlerinde nasıl değişikliklere yol açabileceği” sistematik bir şekilde araştırılmıştır. Bu parametre etkileşimleri, parametrelerin kare bir matrisin ana köşegeni boyunca listelendiği ve etkileşimlerin Şekil 5b'de verildiği gibi matrisin köşegen dışı kutularında dikkate alındığı bir matris gösterimi (Hudson, 1992) kullanılarak gösterilmiştir. Ana parametreler,  $P_i$ , Şekil 5b'de vurgulandığı gibi, köşegen boyunca verilir. Matrisin yapısından anlaşılacağı gibi,  $P_i$ 'den geçen satırdaki değerler  $P_i$ 'nin sistemdeki diğer tüm parametreler üzerindeki etkisini temsil etmektedir. Öte yandan,  $P_i$ 'ye kadar olan sütundaki değerler, diğer parametrelerin, yani sistemin geri kalanının  $P_i$  üzerindeki etkisini temsil eder. Matris yaklaşık olarak kodlandıktan sonra, her satırın ve her sütunun toplamı bulunmaktadır. Satır toplamı her bir parametrenin diğer parametreler üzerindeki etkisi, sütun toplamı her bir parametrenin diğer parametrelerden (sistemden) etkilenmesini gösterir. Başka anlatımla satır

değerlerinin toplamı 'neden' (C) ve sütun terimlerinin toplamı 'sonuç' (E) olarak belirlenir. Etkileşimlerin farklı şiddetlerini ölçmek için bir kodlama yöntemi oluşturulmuştur (Hudson, 1992; Ceryan ve Ceryan, 2008).



Şekil 5. 2x2 etkileşim matrisi (a) ve her bir parametrenin yer aldığı satır ve sütundaki kodlama değerlerinin toplamıyla, neden ve sonuç değerlerinin oluşması (b) (Hudson 1992).

Figure 5. 2x2 interaction matrix (a) and the formation of cause and effect values by summing the coding values in the row and column of each parameter (b) (Hudson 1992).

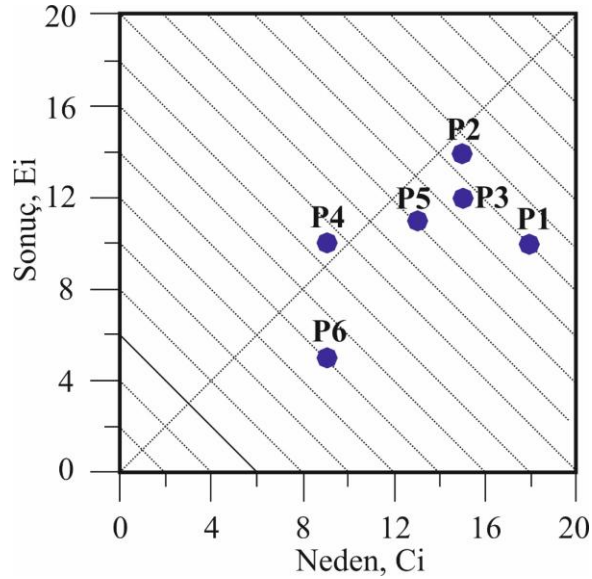
Etkileşim matrisi geliştirilirken, genel matris kodlama yöntemi kullanılır. Bu çalışmada parametrelerin etkileşimi için sıfırdan dörde kadar değişen beş kategori vardır ve bunlar sırasıyla 'hiç', 'zayıf', 'orta', 'güçlü' ve 'kritik' etkileşimlere karşılık gelir (Çizelge 3). Bu çalışmada kaya kütlelerinin ayrışma durumunu tanımlamak için geliştirilen etkileşim matrisi Çizelge 3'te verilmiştir. Neden-sonuç grafiği, bir projedeki her parametrenin rolünü anlamak için faydalıdır ve bir mühendislik projesinin karar aşamasında kullanılabilir. Şekil 6'da, çalışma alanındaki kaya kütlelerinin ayrışma durumunun tanımlanmasında en etkili parametrelerinin kaya malzemesi ayrışma durumu ve süreksizlik sıklığı olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. Kaya kütlelerinin ayrışma durumunu tanımlamak için oluşturulan etkileşim matrisi

Table 3. Interaction matrix created to define the weathering status of rock masses

	Ci						
<b>P1</b>	5	4	3	2	1	3	18
4	<b>P2</b>	3	2	2	1	3	15
2	3	<b>P3</b>	1	4	1	4	15
1	2	1	<b>P4</b>	1	1	3	9
2	3	3	2	<b>P5</b>	1	2	13
1	1	1	"	2	<b>P6</b>	2	9
0	0	0	0	0	0	<b>P7</b>	0
Ei	10	14	12	10	11	5	17

(P1: Kaya malzemesi ayrışma durumu, P2: Kaya ve toprağın oranı, P3: Süreksizlik yüzeyinin ayrışma durumu, P4: Kaya kütlelerinin yapısı, P5: Süreksizlik yüzey malzemesinin ayrışma derinliği, P6. Süreksizlik sıklığı ve P7: Ayrışma derecesi, C. Neden, E: Sonuç)



Şekil 6. Neden-sonuç ilişkisi

Figure 6. Cause-effect relationship

Çizelge 4. Önerilen ayrışma sınıflandırmasını oluşturmak için kullanılan parametrelerin tanımı ve puanlaması

Table 4. Description and scoring of the parameters used to create the proposed weathering classification

<b>Kaya malzemesi ayrışma durumu (P1) ve süreksizlik yüzeyinin ayrışma durumu (P3)</b>			<b>Kaya-toprak oranı (P2)</b>		
Wc ( $R_f/R_w$ )	Tanımlama	Puan	Kaya oranı (%)	Puan	
<1.1	Ayrışmamış	1	>90	1	
1.1-1.5	Az ayrışmış	3	90-70	2	
1.5-2.0	Orta derecede ayrışmış	5	70-50	4	
>2.0	Yüksek derecede ayrışmış	7	50-30	6	
			30-10	8	
			<10	9	
<b>Kaya kütlesi yapısı (P4)</b>			<b>Puan</b>		
Bloklar birbirine sıkıca bağlıdır			1		
Bloklar köşelidir ve birbirine bağlıdır.			2		
Kaya kütle yapısı korunmuştur. Ancak bloklar birbirinden ayrılma eğilimindedir			4		
Çekirdek taşları kırılmaya başlamıştır Kaya kütle iskeleti hala korunmuştur			6		
Toprak gibi davranabilir ancak kalıntı kayaç doku önemli olabilir. Zayıf malzeme (Toprak) oranı kaya kütleinin davranışını kontrol eder.			8		
Kaya kütle yapısı korunmamıştır			9		
<b>Süreksizlik yüzey malzemesinin ayrışma derinliği (P5)</b>			<b>Süreksizlik sıklığı (P6)</b>		
Süreksizlik yüzey malzemesi ayrışma derinliğinin pürüzlülük genliği ile karşılaştırılması	Derece		Jv	Tanım	Derece
	e		<1	Büyük	1
			1-3	Bloklu	3
Süreksizlik yüzey malzemesi ayrışma derinliğinin > pürüzlülük	1		3-10	Çok Bloklu	5
Süreksizlik yüzey malzemesi ayrışma derinliğinin = pürüzlülük	3		10-30	Bloklu/Bozulmuş	7
Süreksizlik yüzey malzemesi ayrışma derinliğinin < pürüzlülük	5		>30	Parçalanmış	9
			(Jv: Hacimsel eklem sayısı)		

(Rf: Ayrışmamış kaya malzemeleri için Shimidt çekiç geri tepme değeri, Rw: Ayrışmış kaya malzemesinin veya süreksizlik yüzeyi için Shimidt çekiç geri tepme değeri, Wc; ayrışma derecesi (Gökçeoğlu ve Aksoy, 2000))

Parametrelerin karşılıklı etkileşimleri tanımlanmasından sonra, gerçek parametre değerleri arazide ölçülmüştür ve bu ölçümlere göre puan atanmıştır. Bu tür verileri sağlamak için kapsamlı bir saha çalışması yürütüldü. İlgili parametreler hakkındaki veriler incelenen jeoteknik birimlerden toplandı ve ardından ölçülen parametre değerleri dikkate alınarak Çizelge 4'e göre puanlama yapıldı. İncelenen her jeoteknik birim için Çizelge 4'ten alınan parametre puanları Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 4'te ayrıca kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{ci}$ , MPa), hacimsel eklem sayısı (Jv), Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), Price sistemine göre kaya malzemesi durumu puanı (Rm), süreksizlik puanı (Rd) ve kaya kütlesi ayrışma puanı (Rw), IAEG'ye göre ayrışma derecesi tanımı (WD\*), kaya kütlesinin tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{cm}$ , MPa), ve deformasyon modülü ( $E_m$ , MPa) verilmiştir. Jeoteknik birimlerin basınç dayanımı ve deformasyon modülü Hoek-Brown yenilme ölçütü (Hoek vd., 2002) kullanılarak bulunmuştur (Eşitlikler 1-5).

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (1)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (3)$$

$$\sigma_{ci} \leq 1000 \text{ MPa için} \quad E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (4)$$

$$\sigma_{ci} > 1000 \text{ MPa için} \quad E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (5)$$

Çizelge 5. Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı, hacimsel çatlaklılık sayısı, Price sistemine göre puanlamalar, IAEG sistemine göre ayrışma derecesi, kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı ve deformasyon modülü, parametre puanları ve kaya kütlesi ayrışma puanı (Wres)

Table 5. Rock material uniaxial compressive strength, volumetric cracking number, scores according to Price system, degree of weathering according to IAEG system, rock mass uniaxial compressive strength and deformation modulus, parameter scores and rock mass weathering score (Wres)

SN	jnt	$\sigma_{ci}$	Jv	GSI	Rm	Rd	Rw	WD*	$\sigma_{cm}$	$E_m$	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	Wres
1	1	152	2.72	42	20	40	60	MW	1.11	3155	3	4	5	4	2	3	49.8
	2	184	6.04	57	65	60	125	F	7.98	9725	1	1	5	1	1	5	33.2
	3	171	3.91	62	60	50	110	SW	7.17	9976	3	2	5	2	1	5	42.6
	4	152	5.91	52	60	40	100	SW	2.69	5610	3	2	5	2	1	5	42.6
2	5	196	3.66	65	80	60	140	F	10.5	11857	1	1	3	1	1	5	27.7
	6	110	1.83	49	20	40	60	MW	1.51	4720	5	4	7	6	1	3	60.5
	7	86	24.85	33	20	20	40	HW	0.27	1759	7	8	7	6	5	7	96.5
	8	117	6.09	39	20	30	50	HW	0.64	2654	5	6	5	6	5	5	77
3	9	114	10.8	30	20	20	40	HW	0.26	1581	5	6	7	6	3	7	79.5
	10	133	2.83	53	35	40	75	MW	2.558	5942	5	4	5	4	3	3	58.9
	11	161	5.47	48	35	30	65	MW	2.01	4456	3	4	5	4	1	5	50.2
	12	163,1	4.72	49	35	40	75	MW	2.21	4720	3	4	5	4	1	5	50.2
	13	181,6	5.47	61	65	50	115	SW	6.92	9418	3	2	3	2	1	5	37.1
	14	163,1	5.48	58	35	50	85	MW	4.81	7924	3	4	5	2	1	5	47.2
4	15	103,7	4.97	35	20	30	50	HW	0.39	2108	5	8	7	6	5	5	87.1
	16	185,6	4.84	54	35	40	75	F	3.88	6295	1	1	3	1	1	5	27.7
	17	97	5.42	53	35	40	75	SW	1.87	5862	7	2	5	2	1	5	54
	18	138	3.43	68	60	50	110	SW	9.51	14092	3	2	5	2	1	5	42.6
	19	100	3.5	43	20	30	50	MW	0.79	3342	7	8	7	8	5	5	95.7
	20	114,1	4.44	39	20	20	40	MW	0.257	1581	5	8	7	8	5	5	90.1
	21	164	6.28	46	35	30	65	SW	1.7	3972	3	2	5	2	1	5	42.6
	22	119	8.05	39	20	30	50	MW	0.66	2654	3	4	5	6	1	5	53.2

Yukarıdaki eşitliklerde  $\sigma_{ci}$  kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı,  $s$  ve  $a$  kaya kütle yapısına bağlı katsayılar,  $GSI$  Jeolojik Dayanım İndeksi,  $D$  kaya kütlesi örselenme sayısı,  $\sigma_{cm}$  kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı ve  $E_m$  kaya kütlesi deformasyon modülüdür.

Jeoteknik birimlerin yüzeylendiği şevler kötü patlamayla açıldığı için örseleme sayısı  $D=0.7$  olarak alınmıştır.

Jeoteknik birimlerin ayrışma derecesini elde etmek için çeşitli her parametre için ağırlık faktörüne ( $a_i$ ) ihtiyaç vardır. Ağırlık faktörü aşağıdaki eşitlik (Hudson, 1992) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$a_i = \left( \frac{C_i + E_i}{\sum(C_i + E_i)} \times 100 \right) / (P_{max}) \quad (6)$$

Yukarıda verilen eşitlikte ( $C_i + E_i$ ) her bir parametrenin neden + sonuç değeridir, toplam ( $C_i + E_i$ ) etkileşim matrislerindeki P7 hariç tüm satır ve sütunların toplamıdır,  $P_{max}$  sahada ölçülen parametre değerine göre Çizelge 3'ten atanan maksimum puandır.

Ağırlık faktörü ( $a_i$ ) P1 için 2.8368, P2 için 2.2855, P3 için 2.7356, P4 için 1.497, P5 için 3.4042 ve P6 için 1.1032 olarak elde edilmiştir.

Her parametre için ağırlık faktörü hesaplandıktan sonra Kaya Kütlesi Ayrışma Puanı,  $W_{res}$ , Eşitlik 7 (Hudson, 1992) kullanılarak bulunmuştur (Çizelge 4).

$$W_{res} = \sum_1^6 a_i P_{ij} \quad (7)$$

Burada  $i$  indeksi parametreleri (1'den 6'ya kadar),  $j$  indeksi jeoteknik birimi ifade eder,  $a_i$  ağırlık faktörü ve  $P_{ij}$  parametrenin ölçülen değerleri dikkate alınarak Çizelge 4'e göre atanan puanlardır.  $W_{res}$ 'in mümkün olan maksimum değeri 100'dür.

### 2.3 Kaya Kütlesi Ayırışma Puanının Price ve IAEG ayırışma sınıflandırmalarıyla karşılaştırılması ve jeoteknik birimlerin mühendislik özellikleriyle ilişkisi

Bu çalışmada Kaya Kütlesi Ayırışma Puanı ( $W_{res}$ )  $>30$  olduğunda kaya kütlesi için “efektif olarak ayırışmamış”, 30-45 arasında olduğunda “az ayırışmış”, 45-65 arasında olduğunda “orta derecede ayırışmış”, 65-85 arasında olduğunda “yüksek derecede ayırışmış”, 85-95 arasında olduğunda “tamamen ayırışmış” ve  $<95$  olduğunda “kalıntı toprak” tanımı yapılmıştır (Şekil 7). Çalışmada önerilen yeni yaklaşımla elde edilen Kaya Kütlesi Ayırışma Puanı Derecesi,  $W_{res}$ , Price'ın sistemi (Price, 1995) ve IAEG sistemi (IAEG, 1995) ile karşılaştırılmıştır (Şekil 7 ve Eşitlik 8). IAEG sınıflamasına göre ayırışmamış jeoteknik birimlerin  $W_{res}$  puanı 0 ile 33 arasında az ayırışmışların  $W_{res}$  puanı 35 ile 52 arasında, orta derecede ayırılmışların  $W_{res}$  puanı 45 ile 65 arasında, yüksek derecede ayırışmışların puanı 65 ile 95 arasında değişmektedir. Eşitlik 8’de Price sistemiyle bulunan ayırışma puanı ( $R_w$ ) ile  $W_{res}$  arasında anlamlı istatistiksel ilişki olduğu ve Price ayırışma puanının  $W_{res}$  ile güvenilirlikle tahmin edilebileceği görülmektedir.

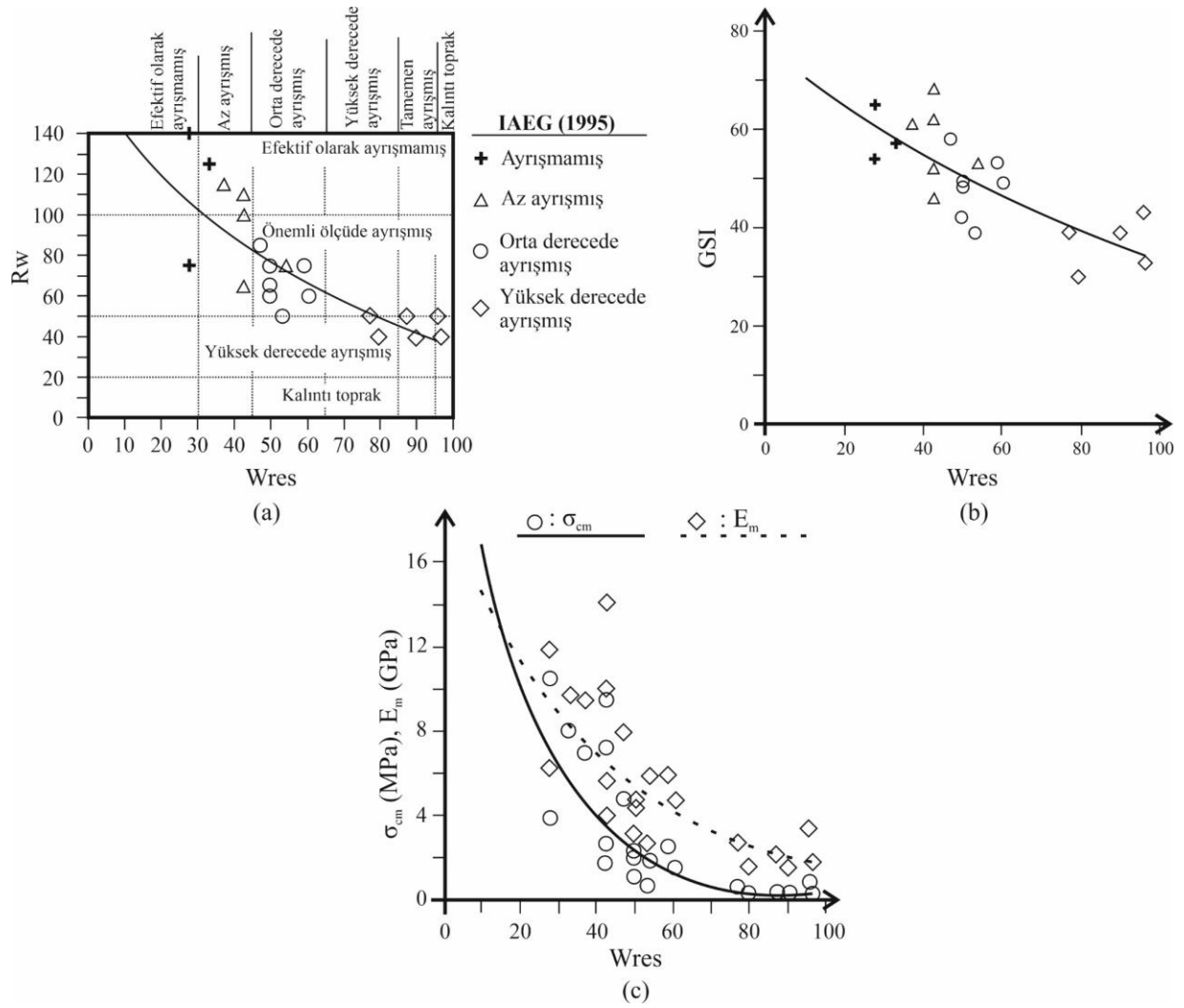
$$R_w = 163.79 e^{0.0115W_{res}} \quad (R^2=0.706) \quad (8)$$

Bu çalışmada, ayrıca jeoteknik birimler için elde edilen Kaya Kütle puanı ( $W_{res}$ ) ile jeoteknik birimlerin Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), tek eksenli, basınç dayanımı ( $\sigma_{cm}$ , MPa), deformasyon modülü ( $E_m$ , GPa) arasında istatistiksel ilişki aranmıştır (Eşitlik 9-11, Şekil 7). Eşitlikler 9-11 bu çalışmada elde edilen Kaya Kütle Ayırışma Puanı ( $W_{res}$ ) ile GSI,  $\sigma_{cm}$  ve  $E_m$  arasında anlamlı istatistiksel ilişki olduğunu ve incelenen jeoteknik birimlerde  $W_{res}$  kullanılarak GSI,  $\sigma_{cm}$  ve  $E_m$ ’nin güvenilirlikle tahmin edilebileceğini göstermektedir.

$$GSI = 76.36 e^{0.0083W_{res}} \quad (R^2=0.636) \quad (9)$$

$$\sigma_{cm} = 27.3 e^{-0.0483W_{res}} \quad (R^2=0.754) \quad (10)$$

$$E_m = 18.776 e^{-0.0248W_{res}} \quad (R^2=0.661) \quad (11)$$



Şekil 7. Jeoteknik birimlerin Kaya Kütlesi Ayrışma Puanı (Wres) ile IAEG sistemi ve Price sisteminin karşılaştırılması (a) Wres ile tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{cm}$ , MPa) (b) ve deformasyon modülü ( $E_m$ , GPa) (c) arasındaki ilişkiler. (Rw: Price sistemine göre elde edilen kaya kütlesi ayrışma puanı)

Figure 7. Comparison of IAEG system and Price system with Rock Mass Weathering Score (Wres) of geotechnical units (a) Relationships between Wres (b) and uniaxial compressive strength ( $\sigma_{cm}$ , MPa) and deformation modulus ( $E_m$ , GPa) (c) (Rw: The weathering rating of rock mass according to Price system)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, nitel ayrışma sistemlerinin eksikliğini gidermek için nicel (sayısal) bir ayrışma sistemi önerilmiştir. Bunun için Kaya Mühendislik Sistemi (RES) kullanılmıştır. AHP gibi çok değişkenli bazı yöntemler parametrelerin puanlamasına dayanmaktadır. Ancak söz konusu yöntemler parametrelerin önemine göre puanlama yaparken parametrelerin arasındaki etkileşimi dikkate almazlar. Kaya Mühendislik Sistemi bu yöntemlerden farklı olarak parametreler arasındaki etkileşimi dikkate aldığından tercih edilmiştir. Sayısal ayrışma derecesini tanımlamak için kurulan etkileşim matrisinde, kaya malzemelerinin ve süreksizlik yüzey malzemelerinin ayrışma durumu (P1, P3), ayrışma zonundaki kaya ve toprağın oranı (P2), kaya kütle yapısının korunması (P4), süreksizlik yüzeyindeki kaya malzemesinin ayrışma derinliği (P5) ve süreksizlik sıklığı (P6) girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Bu parametreler arazide kolayca ölçülebilir ve puanlanabilir. Ayrıca bu parametreler ayrışmayla değişen özelliklerle ilgili olup ayrılmış kayaçların tanımlanmasında ve sınıflandırılmasında sıkça kullanılan kaya ve süreksizlik özellikleridir. Neden-sonuç diyagramına göre, çalışma alanındaki kaya kütlesi ayrışma durumunun tanımlanmasında en önemli faktörler, kaya malzemesindeki ayrışma durumu ve süreksizlik sıklığıdır. Daha az etkileşimli parametreler ise kaya ve zemin oranı ve süreksizlik yüzeyinin ayrışma durumudur. Ağırlık faktörü P1 için 2.8368, P2 için 2.2855, P3 için 2.7356, P4 için 1.497, P5 için 3.4042 ve P6 için 1.1032 olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada önerilen Kaya Kütlesi Ayrışma Puanı (Wres) kullanılarak, incelenen jeoteknik birimlerinin GSI değerleri, tek eksenli basınç dayanımı ve deformasyon özelliklerinin yüksek güvenilirlikle ve hızlı bir şekilde tahmin edilebileceği görülmüştür.

IAEG (1995)'te önerilen ayrılmış kayaçların tanımlanması ve sınıflandırma yaklaşımı Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Gurubu'nun (IAEG) farklı ülkelerden çok sayıda araştırmacının bilgi birikimi ve deneyimleri toplanarak oluşturulmuş ve bu yüzden literatürde geniş kabul görmüştür. Bu nedenle bu çalışmada etkileşim matrisi kullanılarak elde edilen Kaya Kütlesi Ayrışma puanı IAEG (1995) sistemi ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Kaya Kütlesi Ayrışma puanı sayısal bir sistem olan Price (1995) sistemi ile de karşılaştırılmış olup önerilen sistemin Price (1995) sistemi ve IAEG (1995) sistemi ile uyumlu olduğu görülmüştür. IAEG

(1995) sistemi nitel bir sistem olup kaya kütlelerinin mühendislik özellikleriyle sayısal ilişki kuramamaktadır. Öte yandan Price (1995) sistemi sayısal bir sistem olmasına rağmen genellikle kireçtaşı, marn ve kil taşı gibi tortul kayalara uygulanmaktadır. Kaya kütlelerinin ayrışma durumunu tanımlamak için bu çalışmada geliştirilen sistem tüm kayalara uygulanabilir. Ayrıca Kaya Kütleli Ayrışma Puanı (Wres) sayısal bir değer olup kaya kütlelerinin mühendislik özellikleriyle Wres arasında istatistiksel ilişkiler kurulabilir ve Wres kullanılarak kaya kütleli mühendislik özellikleri tahmin edilebilir. Ayrıca bu çalışmada önerilen puanlama sistemi kolayca ve aynı şekilde uygulanabilir.

Bu çalışmada önerilen Kaya Kütleli Ayrışma puanı sistemi değişik arazilerdeki kaya kütleleri içinde uygulanmalı ve geçerliliği test edilmelidir.

## **KATKI BELİRTME**

Makalenin gelişmesine katkı sağlayan hakemlere teşekkür ederiz.

## **KAYNAKLAR**

- Ahmad, M., Tang, X., Ahmad, F., Hadzima-Nyarko, M., Nawaz, A., & Farooq, A., 2021. Elucidation of seismic soil liquefaction significant factors. In Earthquakes-From Tectonics to Buildings. IntechOpen
- Ceryan, S., Tudes, S. and Ceryan N., 2008. A new quantitative weathering classification for igneous rocks, Environmental Geology, 55, 1319-1336
- Ceryan, N. and Ceryan, S., 2008. An application of interaction matrix method for slope failure susceptibility zoning: Dogankent settlement area (Giresun, NE Turkey), Bulletin of Engineering Geology and Environment, 67,375-385
- Ceryan, N., 2010. Relationships between Excavatability of Rocks and GSI: An Example Study from the Rock Masses Exposed Along Gumushane-Giresun (NE Turkey) Motonvay. 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, 27-30 September 2010 Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, p.1-6

- Ceryan, S., 2012. Weathering Indices for Assessment of Weathering Effect and Classification of Weathered Rocks: A Case Study from NE Turkey. Earth Sciences (Editor: Imran A. Dar), ISBN 978-953-307-861-8, InTech Publication, p.19-44
- Ceryan, S., Berber, S., Ceryan N., 2016. The Effects of Weathering State on the Shear Strength of Discontinuity A Case Study on the Weathered Granitic Rock Joints NE Turkey. 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences, 9, 2353-2362
- Ceryan, N., Özkat, E. C., Korkmaz, C. N., Ceryan, S., 2021. Machine learning models to estimate the elastic modulus of weathered magmatic rocks. Environmental Earth Sciences(80), 1-24
- Famarzi, F., Mansouri, H., & Farsangi, M. E., 2013. A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 60, 82-94
- Fattahi, H., & Ghaedi, H., 2024. Improving Accuracy in Shallow Foundation Settlement Prediction Using Rock Engineering System Method. Indian Geotechnical Journal, 1-13
- Gokceoglu, C., Aksoy, H., 2000. New approaches to the characterization of clay-bearing, densely jointed and weak rock masses". Engineering Geology, 58, 1-23
- Golmohammadi, S., & Bidgoli, M. N., 2024. Development of Rock Engineering System-Based Models for Tunneling Progress Analysis and Evaluation: Case Study of Tailrace Tunnel of Azad Power Plant Project. International Journal of Geotechnical and Geological Engineering, 18(2), 47-52
- Hoek, E., Carranza-Tore, C. and Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion -2002 Edition". In: Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium, Vol 1, Toronto, Canada, pp 267–273
- Huang, R., Huang, J., Ju, N., & Li, Y., 2013. Automated tunnel rock classification using rock engineering systems. Engineering geology, 156, 20-27
- Hudson, J.A., 1992. Rock engineering systems: theory and practice. Ellis Horwood, Chichester
- IAEG, 1995. The description and classification of weathered for engineering purposes". Geological Society Engineering Group Working, Party Report. Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 207-242.

- Koca, M. Y., Kınca, C., 2016. The relationships between the rock material properties and weathering grades of andesitic rocks around A degrees zmir, Turkey Bulletin Of Engineering Geology And The Environment, cilt.75, sa.2, ss.709-734
- Little, A.L., 1969. The engineering classification of residual tropical soils, Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engr., Mexico, Vol. I, 1-10.
- Price, D. G., 1995. Weathering and Weathering Processes”, Quarterly Journal Engineering Geology, 28, 234-252
- Rafiee, R., Ataei, M., KhaloKakaie, R., Jalali, S. E., & Sereshki, F., 2016. A fuzzy rock engineering system to assess rock mass cavability in block caving mines. Neural Computing and Applications, 27, 2083-2094
- Vianello, D., Vagnon, F., Bonetto, S., & Mosca, P., 2023. Debris flow susceptibility mapping using the Rock Engineering System (RES) method: a case study. Landslides, 20(4), 735-756