

Hoek-Brown görgül yenilme ölçütüne ilişkin değişiklik önerileri ve benlerin uygulanabilirliği

Suggested modifications to the empirical Hoek-Brown failure criterion and their applicability

Reşat ULUSAY, Harun SÖNMEZ

OZ

Sık aralıklı süreksizlikler¹ içeren kaya kütlelerinin dayanımlarının laboratuvarında tayininde kullanılacak örneklerin temsil edici olabilmesi amacıyla, klasik örnek boyutlarının dışına çıkılarak, çok büyük örneklere gereksinim duyulmaktadır. Ancak, bu tür kaya kütlelerinde metre boyutunda örnek alımı mümkün olmayıp, bu boyuttaki örneklerin yerleştirileceği çok büyük deney hücrelerinin geliştirilmesi, de göçtür. Bu güçlük, 80'li yıllardan bu yana kullanılan Hoek-Brown görgül yenilme ölçülüyle aşmaya çalışılmaktadır. Zayıf kaya kütlelerine uygulanmasında, ortaya çıkan bazı sınırlamalardan dolayı, önerildiği 1980'den günümüze değin ölçüt, yaratıcıları tarafından pek çok kez değişikliğe uğramıştır. 1994'e kadar Jeomekanik Sınıflama Sisteminden belirlenen RMR değerini esas alan ölçüte, 1994'ten sonra doğrudan RMR'ın kullanılması yerine, yine RMR değerinden belirlenen Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index-GSI) dahil edilmiştir. Ölçütün 1997 yılındaki son versiyonunda; RMR'dan bağımsız ve herhangi bir kaya kütlesi parametresi için sayısal değer esas alınmaksızın, sadece kaya kütlelerinin görsel olarak tanımlanmasına dayalı bir GSI Sınıflama Sistemi'nin kullanımına geçilmiştir. Güncel GSI Sınıflama Sistemi'nde, GSI değerleri kaya kütlelerinin, görünümüne ve tanımlanmasına göre belirlenmekte ve bu uygulama genel olarak subjektif bir değerlendirmeye yol açmaktadır. GSI sistemi ile ilgili tartışmaya açık diğer bir husus, ise, yenilme ölçütünün son versiyonunda, örselenmiş, ve örselenmemiş kaya kütlelerinin mühendislik parametrelerinin belirlenmesine yönelik bir kılavuzun mevcut olmayışıdır. Ölçütün son versiyonunun desteklediği herhangi bir araştırmanın bulunmayışı da, güncel GSI sisteminin güvenilirliği ve/veya performansı hakkında yorum yapılmasını olanaksız kılmaktadır. Bu yazıda, GSI sistemine ait yukarıda değinilen belirsizlikler dikkate alınarak, öncelikle GSI değerlerinin daha gerçekçi şekilde ve kolaylıkla tayin edilebilen kaya kütlesi parametrelerine: bağlı olarak hesaplanması amacıyla yazarlar tarafından önerilen değişiklikler ve bunlarla ilgili puanlama parametreleri sunulmuştur. Ayrıca, kaya kütlesi parametreleri üzerinde kazı yöntemine bağlı olarak ortaya çıkan örselenmenin etkisini dikkate alan bir yöntem önerilmiştir. GSI'in yazarlar¹, tarafından, modifiye edilmiş bu son hali, Türkiye'den seçilmiş sık eklemlili kaya kütlelerinde² açılmış şevler ile- pasa yığınlarında meydana gelmiş duraysızlıkların geriye dönük analizlerinde kullanılarak, önerilen sistemin ve yöntemin performansı sulanmıştır. Analizler, önerilere göre hesaplanmış GSI değerlerinin kullanılması ve örselenme etkisinin yenilme ölçütüne dahil edilmesi halinde gerçekçi sonuçların elde edilebileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Geriye dönük analiz, Hoek-Brown yenilme ölçütü, Jeolojik Dayanım indeksi,, Kaya kütleleri,, Pasa yığını, Şev duraylılığı...

EXTENDED SUMMARY

The strength of a rock material- is determined in the laboratory on representative standard samples. In the case of a closely jointed rock mass it is not possible to obtain a sample with suitable dimensions to represent the whole rock mass. Since 1980, the empirical **Hoek-Brown failure criterion** (Hoek and Brown, 1980) began to be used to overcome the difficulties in **laboratory shear strength determination of jointed rock masses**. The empirical failure criterion was used in conjunction with the Geomechanics Classification **System-RMR** (Bieniawski, 1989) until 1994. However, due to the limitations in the **RMR classification scheme** particularly for very poor quality rock masses and for unrealistic rating adjustments for discontinuity orientation in slopes, the feature criterion has been modified over the years. Recently, the originators of the criterion introduced a new index, called **Geological Strength index (GSI)**, into the criterion. The GSI is based upon the visual impression on the rock mass structure and consists of twenty codes to identify each rock mass **category** and to estimate the **GSI value** (Hoek and Brown, 1997).

Because rock mass classification requires **time** consuming procedures and has some limitations, the existing GSI system seems a more **practical parameter for the** determination of the strength of jointed rock masses from field observations. However, the system is lack of measurable and more representative parameters, and **related interval limits** or ratings for describing the structure and surface conditions of **discontinuities**. This situation results in subjective assessments on the determination of the **GSI value**: In other words, it is possible to estimate different GSI values for the same rock mass by different persons. The other important problem of the criterion is the use of undisturbed and disturbed rock mass categories for determining the parameters in the criterion, for which clear guide lines are lacking. It is also noted that the data supporting of the revisions have not been published. These uncertainties make it difficult to judge their validity and performance.

In order to provide a more quantitative **basis for evaluating** GSI values, the authors of this paper suggested some modifications by introducing easily measurable rock mass parameters with ratings and/or intervals. For the purpose, two terms, namely Structure Rating (SR) based on volumetric joint count and- Surface Condition Rating (SCR) from, the **input parameters** are introduced into the GSI system, and the **modified** GSI chart is established. In the latest version of the **failure criterion** (Hoek and Brown, 1997; Hoek et al., 1998) average **undisturbed in-situ conditions** are considered to estimate the **GSI** without application of any adjustment due to any disturbance effect, such as Masting. Method of excavation, major planes of weakness or change in stress are considered, as local features influencing the **rock mass at a particular location**. Therefore, the influence of such factors should be compensated, and necessary adjustments should be taken into consideration.

In this study, a method was proposed to assess the influence of disturbance on rock constants due to method of excavation as discussed in detail by Sönmez, and Ulusay (1999), The **modifications** and the method suggested have been applied to **well studied five slope instabilities from** Turkey to check the **validity and performance** of the modifications and the methodology of parameter estimation, Four cases were selected from the slopes excavated in heavily jointed rock masses and one from spoil piles in a strip coal mine. The application of the suggested modifications and the method examined by the back analysis of the failures indicated that the use of GSI value determined from the suggested modified chart and consideration of disturbance effect **confirmed the limit** equilibrium condition for the investigated failed slopes. The back analysis results from a spoil pile instability **revealed** that spoil pile materials consisting of **blocky** and angular rock pieces with small amount of fines could be categorized as a disintegrated rock mass in the GSI system and the criterion seemed to be applied to spoil materials. However, future applications of the suggested modifications onto failure case studies both from surface and underground excavations may provide a better tool for more precise guidelines and to check the **performance** of the equations of the criterion.

Key Words: Back analysis, Hoek-Brown failure criterion. Geological Strength index, Rock mass, Spoil pile, Slope stability.

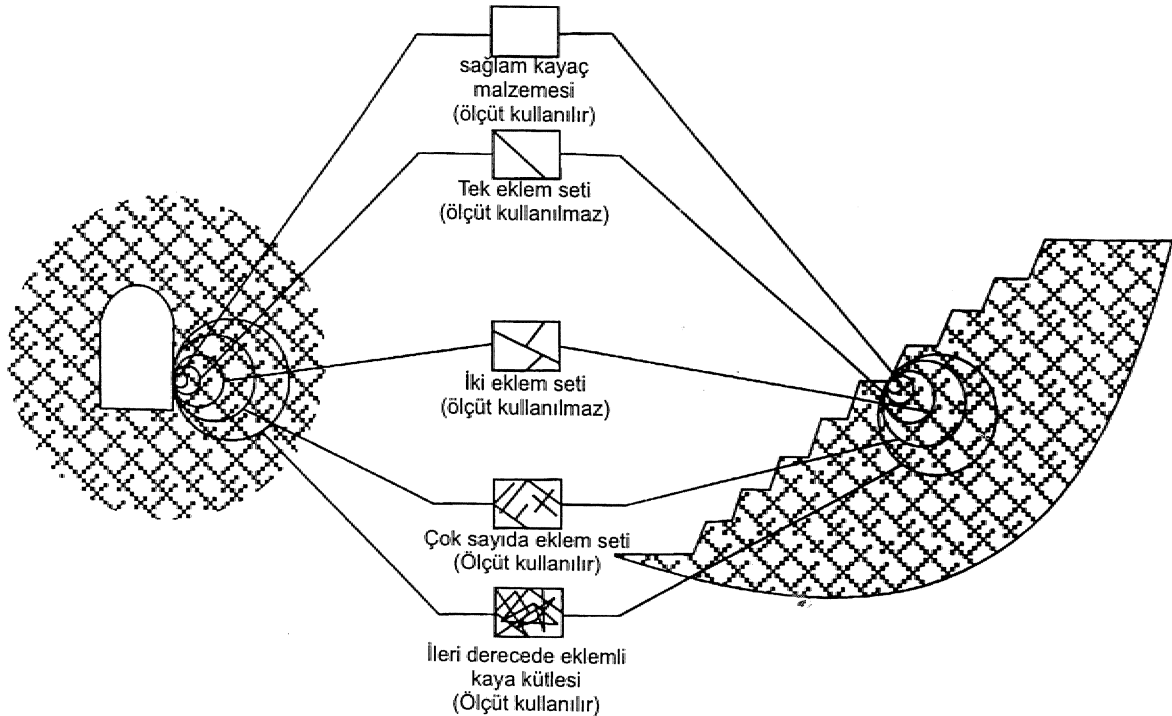
GİRİŞ

Doğal malzemelerin dayanım parametreleri..., bu malzemelerden alınmış temsil edici büyüklükteki, örneklerin, laboratuvarında standartlara uygun şekilde test edilmesiyle belirlenir,. Ancak, sık eklemli kaya kütlelerinden, sağlam kaya malzemesi ile birlikte süreksizlik sistemlerini de içerecek büyüklükte ve metre boyutuna varan örneklerin alınması genellikle mümkün değildir (Şekil 1). Yeterli büyüklükte örnek alındığı varsayılrsa bile, laboratuvar ölçeğinde bu büyüklükteki bir örneği test edebilecek hücre ve ekipman geliştirilmemiştir. Eklemli kaya kütlelerinin makaslama dayanımının laboratuvarında tayininde karşılaşılan bu güçlük, 80li yıllardan sonra Bieniawski (1989) tarafından önerilen Jeomekanik Kaya Kütleli Sınıflama Puanı RMR'ı da bir girdi parametresi olarak kabul eden, Hoek-Brown görgül yenilme- ölçütüyle (Hoek-Brown, 1980)'aşılmaya çalışılmaktadır.


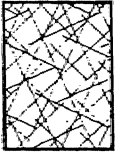


RMR sınıflama sisteminin özellikle zayıf ve çok zayıf kaya kütleleri için içerdiği sınırlamalar ve bu sistemin özellikle şevlerdeki süreksizliklerin yöneli-

mi için. önerdiği, gerçekçi olmayan düzeltme faktörleri..., Hoek-Brown yenilme ölçütünde de günümüze değin bazı değişikliklerin yapılmasını gerekli kılmıştır. Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünün yazarların, yaptığı çalışmaya (Sönmez ve Ulusay, 1999) kadar geçen, dönemdeki, gelişimi (geçirdiği değişiklikler) Çizelge 1'de özetlenmiştir., 1994' e kadar RMR puanıyla birlikte kullanılan bu ölçüte Hoek. (1994), RMR'ın yerine Jeolojik Dayanım indeksi (GSI) 'ni dahil etmiştir. Başlangıçta., RMR değeri kullanılarak hesaplanan GSI, daha sonra Hoek ve Brown (1997)' tarafından önerildiği biçimde ve kaya kütlelerinin görsel tanımlanmasını esas alacak şekilde düzenlenmiş bir GSI sınıflama abağından (Şekil 2) belirlenmeye başlanmıştır. Bu sınıflama sisteminde- kaya kütleleri, kayacın içerdiği süreksizliklerin neden olduğu blokların durumuna ve süreksizlik, yüzeylerinin koşullarına bağlı olarak 20 farklı sınıfa ayrılmaktadır.

'RMR sınıflaması, ayrıntıları Sönmez; vd. (1998) tarafından tartışılan bazı sınırlamaları ve zaman alıcı işlemleri, gerektirmektedir. Bu nedenle., GSI Sınıfla-



Şekil 1 Sağlam kayaç malzemesinden ileri derecede eklemli kaya kütlelerine geçiş ve örnek boyutundaki artış (Hoek 1988'dcn).

JEOLJİK DAYANIM İNDEKSİ		SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULU				
YAPI		AZALAN YÜZEY KALİTESİ →				
	BLOKLU - 3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklulu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya küttesi	80 B/Çİ	B/İ	B/O	B/Z	B/ÇZ
	ÇOK BLOKLU - Dört veya daha fazla sayıda süreksizlik setlerinin keşimesiyle oluşmuş çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren kısmen örselenmiş kaya küttesi	70 ÇB/Çİ	ÇB/İ	ÇB/O	ÇB/Z	ÇB/ÇZ
	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ -Birbirini kesen çok sayıda süreksizliklerin oluşturduğu köşeli bloklar içeren kıvrılmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya küttesi	60 BÖ/Çİ	BÖ/İ	BÖ/O	BÖ/Z	BÖ/ÇZ
	PARÇALANMIŞ -Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının karışımından oluşan, zayıf derecede kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya küttesi	50 P/Çİ	P/İ	P/O	P/Z	P/ÇZ
		40				
		30				
		20				
		10				

Şekil 2. Güncel GSI sınıflama sistemi (Hoek ve Brown., 1997'de verilen Çizim 3 ve 4'den düzenlenmiştir).

Çizelge 1. Hoek-Brown yenilme ölçütünün bu çalışmaya değin geçirdiği tarihsel gelişim (Hoek ve Brown, 1997 ile Hoek vd., 1998'den düzenlenmiştir)

Kaynak	Kapsam	Eşitlikler
Hoek ve Brown (1990)	ince tane içermeyen ileri derecede eklemli kaya kütleleri için orijinal yenilme ölçütü : Mohr dairesi, Balmer (1952) tarafından yayımlanan yöntemle hesaplanmış çok sayıda $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ veri çiftinin, istatistiksel olarak değerlendirilmesiyle elde edilmiştir. σ_1 ve σ_3 yenilme anındaki asal ve tali efektif gerilimler olup, a. kaya kütlelerinin çekilme dayanımı m ve malzeme-sabitleri, σ_1 ve T efektif normal ve makaslama gerilimleridir.	$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{m \cdot \sigma_3}{2} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right)^n$ $\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{m \cdot \sigma_3}{2} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right)^n$ $\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{m \cdot \sigma_3}{2} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right)^n$
Hoek (1983)	Anizotropik yenilme ve Mohr dairesi için çözümleme konularında Dr. J. W. Bray ile yapılan, değerlendirmeye göre öngörülen düzenleme sonucu ince tane içermeyen ileri derecede eklemli kaya kütleleri için orijinal yenilme ölçütü.	$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{m \cdot \sigma_3}{2} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right)^n$ $T = (\text{Cotf } i - \text{Cos} \langle i \rangle) n_i G_{ci} / 8$ $S_i = \arctan \left\{ \frac{1}{\sqrt{4 \text{hoos}^2 - 1}} \right\}$ $O = (90 + \arctan C_i / i - IJ / SJ)$ $h = 1 + (16(m \cdot G_n + s \cdot T c_i) / (3m^2 \sigma_{ci}))$
Hoek ve Brown (1988)	Yenilme- ölçütü, Hoek (1983) tarafından önerildiği gibi olmakla birlikte, aşağıdaki bazı düzenlemeleri içermektedir yeraltı suyu puanı için 10 değerinin sabit alındığı ve süreksizlik yönelim düzeltmesi için 0 değerinin verildiği modifiye edilmiş RMR puanı (Bieniawski, 1989) ile m ve s kaya kütleleri arasındaki ilişkilerin ilave edilmesi, kütleli detbrmasyon modülü E'nin tahmin edilmesiyle birlikte örselenmiş ve örselenmemiş kaya kütleleri arasındaki farklılığın ayırtlanması.	<p>Örselenmiş kaya, kütleleri:</p> $m_i / n_{ij} = \exp((RMR - 100) / 1.4)$ <p>Örselenmemiş veya 'kenetlenmiş' kaya kütleleri:</p> $n_i / m_i = \exp((RMR - 100) / 28)$ $s = \exp((RMR - 100) / 9)$ $P_i = \exp(-RMR \cdot 0.0001)$ <p>m_i ve n_{ij} sırasıyla kırıklı ve sağlam kayaç için öneri. İmiş tir.</p>
Hoek vd. (1992)	İleri derecede eklemli kaya kütlelerinin çekilme dayanımına sahip olmadığı dikkate alınarak, ölçüt modifiye edilmiştir: normal ve makaslama gerilimi veri çiftlerinin hesaplanması için Balmer'in yöntemi kullanılmıştır.	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m \cdot \sigma_3 / \sigma_{ci})^n$ $\sigma_1 = \sigma_3 + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right)^n$ $T = (\langle J_n - O_3 \rangle \text{ İddi } f d \ddot{u} 3)$ $dG \setminus dG_3 = 1 + a_{iiib} (a \hat{a} / dci)^{1 * m^{11}}$
Hoek (1994) Hoek vd. (1995)	Yöntem, hem orta kaliteli, hem de çok zayıf kaliteli kaya kütleleri için modifiye edilerek geliştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü önerilmiştir. Bu amaçla: RMR sınıflama sisteminde çok düşük kaliteli kayalara ilgili olarak karşılaşılan güçlüklerin aşılması için ölçüte Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ilave edilmiş; örselenmiş ve örselenmemiş kaya kütleleri için daha önce önerilen ayırflama ölçütünden vazgeçilecek bu amaçla GSI değerlerinin azaltılması yoluna gidilmiştir.	$\sigma_1 = \sigma_3 + a_{ci} (m \cdot \sigma_3 / \sigma_{ci} + s)^n$ <p>GSI > 25 için</p> $m_i / m_j = \exp((GSI - 100) / 28)$ $s = \exp((GSI - 100) / 9)$ <p>a = 0.5</p> <p>GSI < 25 için</p> $s = 0$ $a = 0.65 - GSI / 200$
Hoek ve Brown (1997)	Yenilme ölçütü, Hoek (1994) ve Hoek vd. (1995)'nin önerdiği şekliyle kalmakla birlikte, kayacın yapısal özellikleri ve süreksizlik yüzey koşullarını temel alan gözleme: dayalı bir GSI' a bağı geliştirilerek ölçüte ilave edilmiştir.	Hoek (1994)'deki gibi
Hoek vd. (1998)	Ölçüt, Hoek ve Brown (1997)'un önerdiği ana ilkelerini korumakla birlikte, laminalı, foliasyonlu, kırıklı ve makaslanmış türdeki zayıf ve bloklu yapı göstermeyen kaya kütlelerinin de tanımlanması amacıyla GSI sistemine "foliasyonlu-laminalı" kaya. kütleli başlıklı bir sınıf daha eklenmiştir.	Hoek (1994)"deki gibi

ma Sistemi, kaya kütlelerinin dayanımının belirlenmesinde yararlanılan çok daha pratik bir girdi parametresi olarak gözükmektedir. Görsel ve sübjektif bir değerlendirmeye dayanan güncel GSI abağındaki kaya kütleleri sınıflarının alabileceği. GSI değerleri geniş, bir dağılım, .aralığı sergilemektedir (Şekil 2). Örneğin, bloklu ve çok iyi (B/Çİ) süreksizlik koşuluna sahip kaya kütleleri, sınıfı için abaktan 63 ile 85 arasında değişen GSI değerleri elde edilmektedir. Bu durumda, *[güncel GSI abağını kullanarak daha hassas bir GSI değeri nasıl elde edilebilir?]* sorusuna yanıt aratılması gerekmektedir. Hoek (1998), jeolojik ortamın bu denli duyarlı bir değerlendirmeye açık olmadığını ve tek bir GSI değeriyle kaya kütlelerini tanımlamanın pek gerçekçi olamayacağını ifade ederek, bu soruyu yanıtlamaya çalışmış ve ayrıca tek eksenli sıkışma dayanımının, sağlam kaya malzemesine ait sabitlerin, ve GSF'nin normal dağılım gösterdiğini belirtmiştir. Ancak, normal dağılımla ifade edilecek GSI değerlerinin, güncel GSI abağından nasıl belirleneceği sorusu ise yanıtızsız kalmaktadır. Ayrıca, güncel GSI abağının kullanımının sadece uygulayıcının deneyimine dayanan bir değerlendirmeye yol açacağı, dolayısıyla bu abaktan belirlenen GSI değerlerinin kişiden kişiye değişiklik gösterebileceği de kaçınılmazdır.

Ölçütün son versiyonunda. (Hoek ve Brown, 1997; Hoek, 1998), patlatmaya bağlı olarak kaya kütlelerinde meydana gelecek örselenmenin nasıl ifade edileceği yönünde net bir açıklama da bulunmamaktadır. Sönmez vd. (1998), değişik kaya kütlelerinde açılmış üç farklı şevde duraysızlıkların geriye dönük analizini yapmışlar ve Hoek-Brown yenilme ölçütünün RMR puanıyla birlikte örselenmiş kaya kütleleri için uygulanabilir olduğunu belirlemişlerdir. Hoek ve Brown (1997), kaya kütlelerinde patlatmaya bağlı olarak gelişecek örselenmenin, kaya kütlelerinin örselenmeden önceki GSI değerini ortalama 10 puan civarında düşüreceğini belirtmişler ve bu etkinin, dikkate alınması için, Şekil 2'deki abaktan yapısal özelliklere ve yüzey koşullarına göre saptanan GSI değerinin aynı kolonda bir satır aşağı, inilerek tekrar belirlenmesini önermişlerdir. Ancak Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından yapılan hesaplamalar, GSI abağındaki bu bir satırlık oynamanın kaya kütlelerinin, tek ek-

senli sıkışma dayanımını % 70 oranında etkileyeceğini göstermiştir. Patlatma açısından dikkate alınması, gereken diğer bir husus ise, patlatmanın şiddetine bağlı olarak örselenmenin etkisinin de değişiklik göstereceğidir. Bu değerlendirmelerin ışığında, örselenme etkisinin Hoek ve Brown (1997)'in önerdiği şekilde değerlendirilmesinin tartışmalı olacağı görülmektedir. Ayrıca, örselenme etkisi için Hoek ve Brown (1997) tarafından önerilen bu yaklaşımın, uygulamadan seçilmiş yerüstü ve yeraltı kazılarında sınıdına ilişkin bir çalışma da bulunmaktadır.

Diğer taraftan, Hoek vd. (1998), güncel GSI sınıflama, sistemine foliasyonlu veya lamina, içeren, ancak bloklu, bir yapı göstermeyen makaslanmış zayıf kayalar da dahil ederek, beşinci grup bir kaya kütleleri, daha önermişlerdir. Ancak Hoek (1994), görgül yenilme ölçütünün, homojen ve izotop olarak kabul edilebilirlikleri dikkate alınarak, sadece sağlam kayalar malzemesine veya ileri, derece eklemli kaya kütlelerine uygulanabileceğini, vurgulamaktadır. Bunun aksine, söz konusu foliasyonlu/laminallı ve makaslanmış kayaların dayanım ve defonnasyon karakteristikleri sık aralıklarla dizilmiş makaslama, ve kaygan foliasyon yüzeyleri, boyunca meydana gelen yerleşimler tarafından denetlenmektedir. Bu tür kaya kütlelerinin, izotrop ve homojen olmayan özellikleri dikkate alındığında, güncel GSI sistemine bu kayalar içeren yeni bir kaya kütleleri sınıfının dahil edilmesi gerçekçi görülmemektedir. Bu nedenle, bu çalışmada dört kaya kütleleri sınıfını içeren güncel GSI sistemi, irdelenmiştir.

Bu çalışmada, Hoek-Brown yenilme ölçütüne ilişkin olarak ayrıntısı -Sönmez, ve Ulusay (1999) tarafından verilen ve özetle yukarıda, değinilen belirsizliklerin, giderilmesine yönelik olarak güncel GSI sisteminde yapılan değişiklik önerileri ve örselenme etkisinin değerlendirilmesi için önerilen yöntem, ve yaklaşımlar¹ sunulmuştur. Bu amaçla, Türkiye'den seçilmiş ve üzerinde ayrıntılı olarak çalışılmış beş şev duraysızlığı geriye dönük analiz edilerek, önerilen, değişikliklerin ve yöntemin geçerliliği (performansı) sınıdınıştır.

JEOLJİK, DAYANIM İNDEKSİ (GSI) İÇİN ÖNERİLEN DEĞİŞİKLİKLER

Aynıntısı Hoek ve Brown (1997) tarafından verilen Hoek-Brown yenilme ölçülüne göre kaya kütlelerinin dayanımı, GSI değeri de kullanılarak, aşağıdaki eşitliklerden, tayin edilmektedir.

$$a = 0.3 + 0.04 (m_b \cdot \sigma_c / J_{ci} + s)^a \quad (1)$$

$$m_b = m_i \cdot \exp\left[\frac{3L_1 - L_0}{2.8 \cdot V_i}\right] \quad (2)$$

GSI > 25 için

$$s = \exp\left[\frac{GSI - 100}{100}\right] \quad (3)$$

$$a = 0.5 \quad (4)$$

GSI < 25 için.

$$s = 0 \quad (5)$$

$$a = 0.65 \quad (6)$$

Burada m_b , s ve a kaya kütlelerinin, m_i ise sağlam kaya malzemesinin sabitleridir. Yukarıdaki eşitliklerden de görüleceği üzere, GSI değerindeki küçük bir değişim, kaya kütlelerinin dayanımını doğrudan etkilemektedir. Şekil 2'de verilen abaktaki süreksizlik, yüzeyi koşulunun ve kaya kütle yapılarının ölçülebilir ve/veya tanımlanabilen kaya kütle parametreleri esas alınır daha duyarlı bir şekilde belirlenmesi amacıyla, yazarlar tarafından bir puanlama, sistemine geçilmesi gerekli görülmüştür. Bu amaçla, "Yapısal Özellik Puanı (SR)"¹¹ ve "Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı (SCR)" olarak tanımlanan iki parametrenin, sisteme dahil edilmesi önerilmiştir.

Güncel GSI abasında (Şekil 2) süreksizlik yüzeylerinin durumu; süreksizliklerin dolgu, bozunma ve pürüzlülük özelliklerine bağlı olarak; ÇOK İYİ (Çt), İYİ (I), ORTA (O), ZAYIF (Z) ve ÇOK ZAYIF (ÇZ) olmak üzere beş sınıfa ayrılarak, değerlendirilmektedir. Yazarlar ise, süreksizlik yüzey koşulunun tanımlanması amacıyla, RMR Sınıflama Sistemi'nin dolgu, bozunma ve pürüzlülükle ilgili olarak önerdiği tanımlama ve puanlamaları (Bieniawski, 1989) kullanmışlar ve 0 ile 18 arasında değişen Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanları (SCR) elde etmişlerdir. Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı,

$$SCR = R_p + R_w + R_f \quad (7)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada, R_p , R_w ve R_f sırasıyla pürüzlülük, bozunma ve dolgu puanları olup, bu puanlandırma, yazarların önerdiği ve Şekil 3'te verilen modifiye edilmiş GSI abasının sağ üst köşesindeki çizelge kullanılarak yapılmaktadır.

Blok büyüklüğü, kaya kütlelerinin, yapısının tanımlanmasında kullanılan çok önemli bir belirteçtir. Büyük blokların, oluşturduğu kaya kütleleri, küçük bloklardan oluşan kaya kütlelerine oranla daha az deforme olurlar. Diğer yandan, blok boyutu küçüldükçe şev kazılarında duraysızlık mekanizması süreksizlik denetimli duraysızlık mekanizmalarından (düzlemsel, kama ve devrilme türü kaymalar) kütleli (daireli) duraysızlık mekanizmasına doğru geçiş gösterir¹ (bkz. Şekil 1). Aynı şekilde, kaya kütlelerini oluşturan, blokların, şekli de kaya kütlelerinin davranışında, önemli rol oynar. Köşeli bloklar birbirlerine daha iyi keneüenebilirken, yuvarlaklaşmış bloklarda kenetlenme köşeli bloklara oranla daha az olacaktır.

• Süreksizliklerin sayısı, aralığı ve devamlılığı kaya kütlelerini oluşturan blokların büyüklüğünü ve şeklini denetleyen, parametrelerdir. Bir kaya kütlelerini bölen süreksizlik setlerinin aralığının düşük olması, blok boyutunun, da küçük olması anlamına gelir. GSI'nin hesaplanmasında kullanılan girdi parametrelerinin sayısının, azaltılarak pratiklik sağlanması açısından hem süreksizlik aralığını, hem de süreksizlik sayısını birlikte ifade eden hacimsel eklem sayısı (J_v), bu ça-

lişmada Yapısal özellik Puanı (SR) *mn belirlenmesi amacıyla önerilmiştir. Eklemlı kaya kütlesi ortamının J_v parametresi,

$$J_v = \frac{N_1 L_1 + N_2 L_2 + \dots + N_n L_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n} \quad (8a)$$

$$J_v = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (8b) \quad (8d)$$

eşitlikleriyle hesaplanabilir, Burada; S gerçek süreksizlik aralığı, N süreksizlik, hat etüdü, boyunca karşılaşılan süreksizliklerin sayısı, L süreksizlik, setine dik yönlü, etüt hattının uzunluğu, n ise eklem seti sayısıdır.

Sık aralıklı ve değışik yönlerde gelişmiş eklemler içeren aşırı derecede parçalanmış kaya kütlelerinde belirgin eklem setlerinin ayırtlanması oldukça güçtür. Homojen ve izotrop kabul edilebilecek bu tür kaya kütlesi ortamlarında, birbirine dik üç yönde (x, y ve z) yapılan hat etütlerinden belirlenen eklem sayılarının esas alınıp, J_v 'nin aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanması, yazarlar tarafından uygun ve pratik bir yaklaşım olarak önerilmiştir.

$$J_v = \frac{N_x L_x + N_y L_y + N_z L_z}{L_x + L_y + L_z} \quad (8c)$$

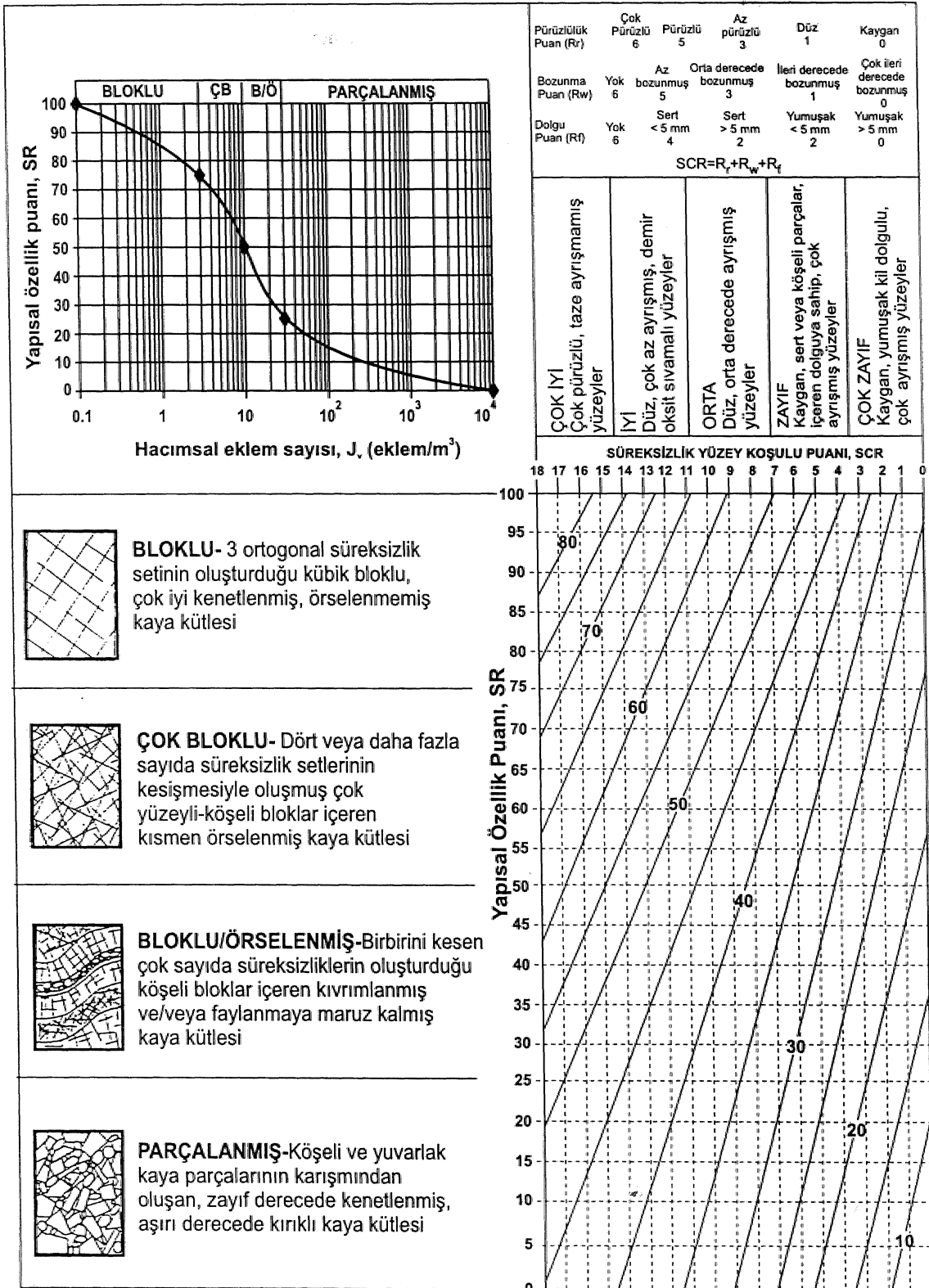
Burada, N_x , N_y ve N_z birbirine dik yönde ve L_x , L_y ve L_z uzunluğundaki üç hat boyunca karşılaşılan eklemlerin sayısıdır. Ancak, bir kaya kütlesi, mostrasında (aynasında) birbirine, dik yönde üç hat etütünün yapılması çoğu kez mümkün, olamayabilir. Bu husus ve ileri derecede eklemlı kaya kütlesi ortamlarının nisbeten homojen ve izotrop kabul edilebilecek özellikleri gözönüne alınarak, eşitlik 8c,

şeklinde düzenlenmiştir. Burada; N eklem, sayısı, L ise süreksizlik etüt hattının toplam uzunluğudur.

J_v parametresi için gereksinim duyulan sınır değerleri için ISRM (1981) tarafından önerilen aralıklar (Çizelge 2) esas alınmış ve ayrıntısı Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından verilen bir yaklaşımla Yapısal, özellik Puanı (SR) GSI sistemine uyarlanmıştır. Buna göre Yapısal özellik Puanı (SR), belirlenen J_v değeri için Şekil 3'tin. sol üst. köşesinde verilen grafikten, tayin edilmektedir. Böylelikle, Şekil 2'de verilen güncel GSI Sınıflama Sistemi, abağı, bu çalışmada önerilen. SR ve SCR parametrelerinin sisteme dahil edilmesiyle daha hassas ve uygulayıcıdan kaynaklanabilecek hatayı önemli ölçüde azaltacak şekilde modifiye edilmiştir. Bu düzenlemeye göre, Şekil 3'ün üst kısmında verilen grafikten ve çizelgeden belirlenecek olan SR ve SCR. puanlarının abaktaki kesim noktasından GSI değeri tayin edilebilmektedir.

Çizelge 2. Blok boyutu tanımlamaları ve J_v parametresi için ISRM (1981) tarafından ve bu çalışmada önerilen aralıklar.

ISMR (1981)'in tanınılan	J_v (eMen/tn ³)	GSI için önerilen tanımlar (bu çalışma)
Çok büyük bloklar		BLOKLU (B)
Büyük Bloklar	1-3	
Orta boyutlu bloklar ¹	3-10	ÇOK BLOKLU (ÇB)
Küçük bloklar	10-30	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ (B/Ö)
Çok küçük bloklar	30-60	
Parçalanmış/Ufalanmış	>60	PARÇALANMIŞ



Şekil 3. Modifiye edilmiş GSI sınıflama sistemi (Sönmez ve Ulusay, 1999)

ÖRSELENME ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI İÇİN ÖNERİLEN YAKLAŞIMLAR

Uygulanan kazı yöntemi (ekskavatörle kazı, patlatma, vb.)» makaslama zoolarının varlığı ve teknik girişim sırasında gerilini alanında meydana gelen değişimler gibi yerel etkiler, kaya kütlelesine dayanımını azaltmaktadır (Kendorsky vd.,*1983; Laubscher,1990; Romana, 1993). Patlatma ile yapılan kazılarda, doğal süreksizliklerin açıklıkları artmakta, aynı zamanda patlatma, sırasında, gelişen çatlaklarla (yapay kırıklar) kaya kütlesi, doğal durumuna oranla daha zayıf bir özellik kazanmaktadır. Sönmez vd. (1998), örselenmiş kaya kütlesi koşulunu dikkate alarak, RMR puanlarını ve yenilme ölçütünün 1988: versiyonunu (Hoek ve Brown, 1988) kullanarak duraysızlığa maruz kalmış şevler için yaptıkları geriye dönük analizlerde, örselenmenin etkisini yansıtan bir azaltma faktörünün analizlerde dikkate alınmasını incelenen yenilmiş kaya kütleleri, için duraysızlık koşulunu, sağladığını göstermişlerdir. Yenilme ölçütünün. 1994'den. önceki versiyonunda malzeme sabitleri olan m_b ve s 'in hesaplanması için örselenmiş ve örselenmemiş kaya kütleleri için. iki farklı eşitlik kullanılmaktaydı. Ancak, ölçütün 200 versiyonunda (Hoek-Brown, 1997) m_b ve s sabitlerinin 2 ve 3 numaralı eşitliklerden hesaplanması ve örselenme etkisinin, ise, kazı. aynasında, yapılacak gözlemlerle tayin edilecek GSI değerine göre değerlendirilmesi önerilmiştir. Bu öneride uygulanan, kazı yönteminin, yaratacağı örselenmenin kütleyi hangi ölçüde etkileyeceği kestirilememekte, dolayısıyla bu belirsizlik güncel GSI sistemi, açısından diğer bir sınırlama, olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, örselenme etkisinin dikkate alınması amacıyla dört farklı yaklaşım önerilmiş ve bunlar, Türkiye'nin değişik bölgelerindeki, farklı kaya kütleleri içerisinde gelişmiş şev duraysızlıklarının geriye dönük analizlerinde kullanılarak sınırlanmıştır. Örselenme faktörü (d_f) için., incelenen her kaya ortamında uygulanan kazı yöntemi (ekskavatörle kazı, patlatma vb.) dikkate alınarak., bu kazı yöntemleri için ayrıntısı Kendorski vd. (1983) tarafından verilen ve 1 ile 0.8 arasında değişen değerler kullanılmıştır., .Analizlerde dikkate alınan, yaklaşımlar sırasıyla aşağıda verilmiştir,

1. Yaklaşım: Kaya kütlelesinin makaslama dayanımı, örselenme etkisi için herhangi bir düzeltme yapılmadan.» 2- ve 3 nolu eşitlikler kullanılarak belirlenmiş olup, geriye dönük analizlerde de bu veriler esas alınarak yapılmıştır

2. Yaklaşım: Kazı yöntemine bağlı olarak d_f 'den küçük bir değerle ifade edilen örselenme, faktörü (d_f) GSI değeri ile çarpılmış ve azaltılmış (indirgenmiş) bu GSI değeri 2 ve 3 numaralı eşitliklerde kullanılarak geriye dönük analizlerde gerçekleştirilmiştir.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad (9a)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{200}\right) \quad (9b)$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (9c)$$

3. Yaklaşım: incelenen her duraysızlık için geçerli olan örselenme türü dikkate alınarak seçilen, örselenme faktörü, değerleri (d_f), 2 ve 3 numaralı eşitliklerin paydalanyla çarpılarak hesaplanan kaya kütlelesine sabitleri., m_b ve s parametreleri, geriye dönük analizlerde kullanılmıştır.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 \cdot d_f}\right) \quad (10a)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{200 \cdot d_f}\right) \quad (10b)$$

4. Yaklaşım: Yöntemin 1994 versiyonuna kadar (Hoek, 1994), kaya kütlelesine sabitleri. m_b ve s hesaplanırken. 2 ve 3 numaralı eşitliklerin paydasında örselenme

lenmemiş ve örselenmiş kaya kütlesi koşullarında sırasıyla, n_b için 28 ve 14, s için ise 9 ve 6 değerleri kullanılmaktaydı (Çizelge 1). Ancak ta üst ve alt limit değerleri, arasında kalan ve farklı örselenme derecelerini de yansıtan azaltma faktörlerinin kullanılmasının daha gerçekçi olacağı dikkate alınarak, 2 ve 3- numaralı eşitliklerin paydalarının söz konusu alt ve üst sınır değerlerinin arasında değişmesi, gerektiği düşünülmüştür. Bu amaçla söz konusu iki eşitliğin, paydasına b_m ve b_s gibi iki katsayı eklenerek eşitlikler aşağıdaki gibi yeniden düzenlenmiştir.

$$n_b = m \exp \left(\frac{GSI - 100}{b_m} \right) \quad (U)$$

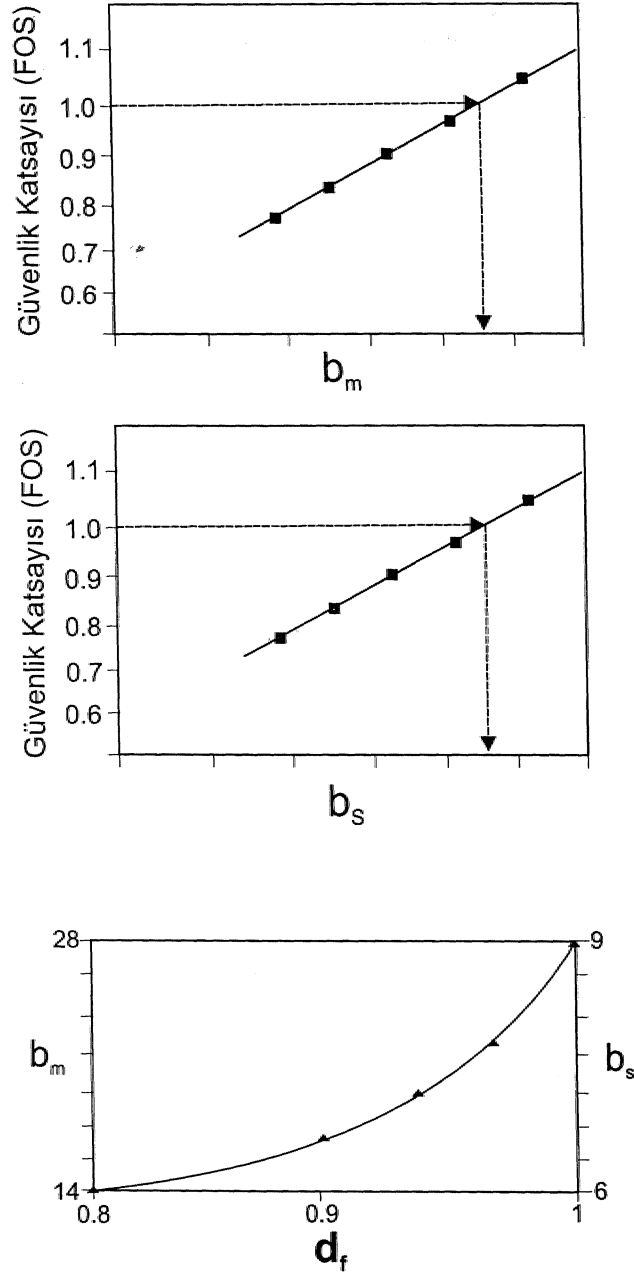
$$s = \frac{\exp(GSI - 100)}{b_s} \quad (12)$$

Bu yaklaşımda, örselenmenin derecesine bağlı olarak, n_b ile ilgili 11 numaralı eşitliğin, paydasının 14'den 28'e, s 'e ait 12 numaralı eşitliğin paydasının ise 6'dan, 9'a kadar değişen değerler alabilmesi öngörülmüştür, örselenme faktörü (d_r) ile bu değişimin ifade edilebilmesi için kazı yöntemine bağlı olarak değişik örselenme derecelerine sahip kaya kütlelerinde gelişmiş dört şev duraysızlığının geriye dönük analizi yapılmıştır. Bu analizlerde- m , ve s parametrelerine ilişkin eşitliklerin paydalarına 5 farklı değer (n için 28 ile 14; s için 9 ile 6 arasında değişen b_m ve b_s değerleri) atanarak güvenlik, katsayıları (FOS) hesaplanmıştır. Daha sonra,, hesaplanan güvenlik katsayılarına karşılık b_m ve b_s grafikleri çizilerek duraysızlık koşulunu (FOS=1) sağlayan b_m ve b_s değerleri bu grafiklerden belirlenmiştir. Son aşamada, geriye dönük analizlerden seçilen düzeltme- faktörüne (d_r) karşılık elde edilen b_m ve b_s veri çiftlerine- ilave olarak, örselenmemiş kaya kütlesi koşulu için (d_{pi}) $b_m=28$ ve $b_s=9$, ileri derecede örselenmiş, kaya kütlesi (pasa malzemesi) koşulu ($d_{pö.8}$) için ise, $b_m=14$ ve $b_s=6$ veri çiftleri de bu verilere- eklenerek $d_r b_m/b_s$ grafiği çizilmiştir (Şekil 4).

YENİLME ÖLÇÜTÜYLE İLGİLİ DEĞİŞİKLİK ÖNERİLERİNİN SINANMASI

Malzeme ve Yöntem.

Yukarıdaki bölümlerde- kısaca tartışılan, değişiklik, önerilerinin sinanması amacıyla, kaya. kütlesi özellikleri ile duraysızlık, koşulları ve mekanizmaları ayrıntılı olarak araştırılmış üç linyit açık işletmesi (Ulusay, 1991; Sönmez vd, 1998; Ulusay vd., 1998) ile bir bant açık işletmesindeki (Ulusay ve Yücel, 1989) ocak şevlerinde- ve bir linyit işletmesindeki. pasaya yığınlarında (Ulusay vd., 1995 a ve b, 1996) meydana gelmiş şev duraysızlıklarından yararlanılmıştır (Şekil 5). Söz konusu kaya kütlelerinin ve pasaya malzemesinin özelliklerine ilişkin ayrıntılar Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından, tartışılmış olup, bu özelliklere ve GSI sistemi için yapılan değişik önerilerine göre Şekil 3'teki abaktan belirlenen parametreler, incelenen, tüm duraysızlıklar için Çizelge 3'te özet olarak, verilmiştir. İncelenen şev duraysızlıklarına ilişkin duraysızlık. öncesini ve sonrasını temsil eden kesitler Şekil 6 ve 7'de görülmektedir. Eskihisar linyit işletmesindeki şev duraysızlığı, şev tepesinin gerisindeki geçici bir pasaya. yığından kaynaklanan yükün etkisiyle gelişmiş bir duraysızlıktır (Ulusay, 1991). Bu duraysızlığın geriye dönük analizinde, pasaya yükünün kayan kütle üzerindeki etkisi» ayrıntısı- Sönmez vd. (1998) tarafından açıklanan ve Şekil 8'de verilen modele uygun şekilde dikkate alınmıştır. Göynük-Himmetoğlu işletmesinde ileri derecede eklemli mam kaya kütlelerinde gelişen duraysızlık, dairesel şekilde başlayıp tabakalaşma düzlemi boyunca devanı eden, birleşik bir yenilme yüzeyi üzerinde gelişmiştir. Bu duraysızlığın Ulusay vd., (1998) tarafından yapılan geriye dönük, analizi sonucunda,, hareket sırasında, kayma yüzeyinin bir bölümünü oluşturan tabakalanma düzlemlerinin makaslama dayanımının artık değerlere ($c_r=L4$ kPa,, $\phi=12^\circ$) doğru azaldığı belirlenmiş ve bu değerler bu çalışmada da. esas alınmıştır. Geriye dönük analizler, HOBRSPLP isimli bir bilgisayar programıyla (Sönmez vd., 1998) gerçekleştirilmiş ve program bu çalışmada yapılan önerileri ve- yaklaşımları da. içerecek şekilde yeniden düzenlenmiştir.



Şekil 4. Hoek-Brown eşitlikleri için, önerilen değişikliklerin sınanmasında kullanılan 4 numaralı yaklaşımın aşamalarını gösteren grafikler.

Yazarlar, örtü kayacının kazılarak başka, bir alana dökülmesiyle oluşturulan pasa yığınlarının, fazla miktarda ince tane içermemeleri koşulunda, köşeli ve yuvarlak kaya bloklarından oluşan, ve kenetlenme derecesi zayıf, aşın derecede kırıldı kaya kütleleri, ola-

rak da değerlendirilebilecekleri görüşündedirler. Bu yaklaşımdan hareketle,, pasa malzemelerinin makaslama, dayanımlarının tayini amacıyla, Hoek-Brown yenilme ölçütünün, dolayısıyla GSI kavramının kullanılması öngörülmüştür. Bu yaklaşımın da sınanma-

Çizelge 3., İncelenen kaya kütleleri ve pasa malzemesi için modifiye edilmiş GSI sınıflamasında kullanılan parametreler

Parametre	Eskitisar	Başkoyak	Kısrakdere	Himmetoğlu	Eskitisar (pasa yığını)
^a Süreksizlik aralığı (m.)	$S_1=0.71$, $S_2=tX82$ $S_3=1.26$, $S_4=0.65$	$S_{v,y}=0.04$	$S_1=0.75$, $S_2=1.07$ $S_3=0.13$, $S_4=0.4$	$S_p0.37$, $S_2=0.65$ $S_b=0.11$	$C-S^{\wedge}O.OSS$, $S_3=0.081$ $S_2=0.083$
Süreksizliklerin Düz yu/eyler f 11, a/ yil/ey koşulları (puanlan) dolgu <5 mm S 2)	dü7-kay^an yüzeyler (1), ileri derecede bozunmuş (1), yumuşak dolgu<5 mm (2)	düz yü/eykr (1), ar bwnmus (51, yumuşak dolgu <5 mm (2)	kaygan yüzeyler (0), orta derecede bozunmuş (3), yumuşak dolgu <5 mm (2)	diz yüzeyler (1), az- orta derecede bozunmuş (4), yumuşak dolgu <5 mm (2)	
J_v	6.14	15635	12.5	13.3	1773
SR	63	0	42	35	4
SCR	8	4	8	5	7
^b GSI	43	16	37	27.5	26
^d t_f	0.94	0.97	0.90	0.97	0.80

^a Gerçek aralık: (eklemler için S_j, S<2, S₃,, tabakalarınma düzlemleri için

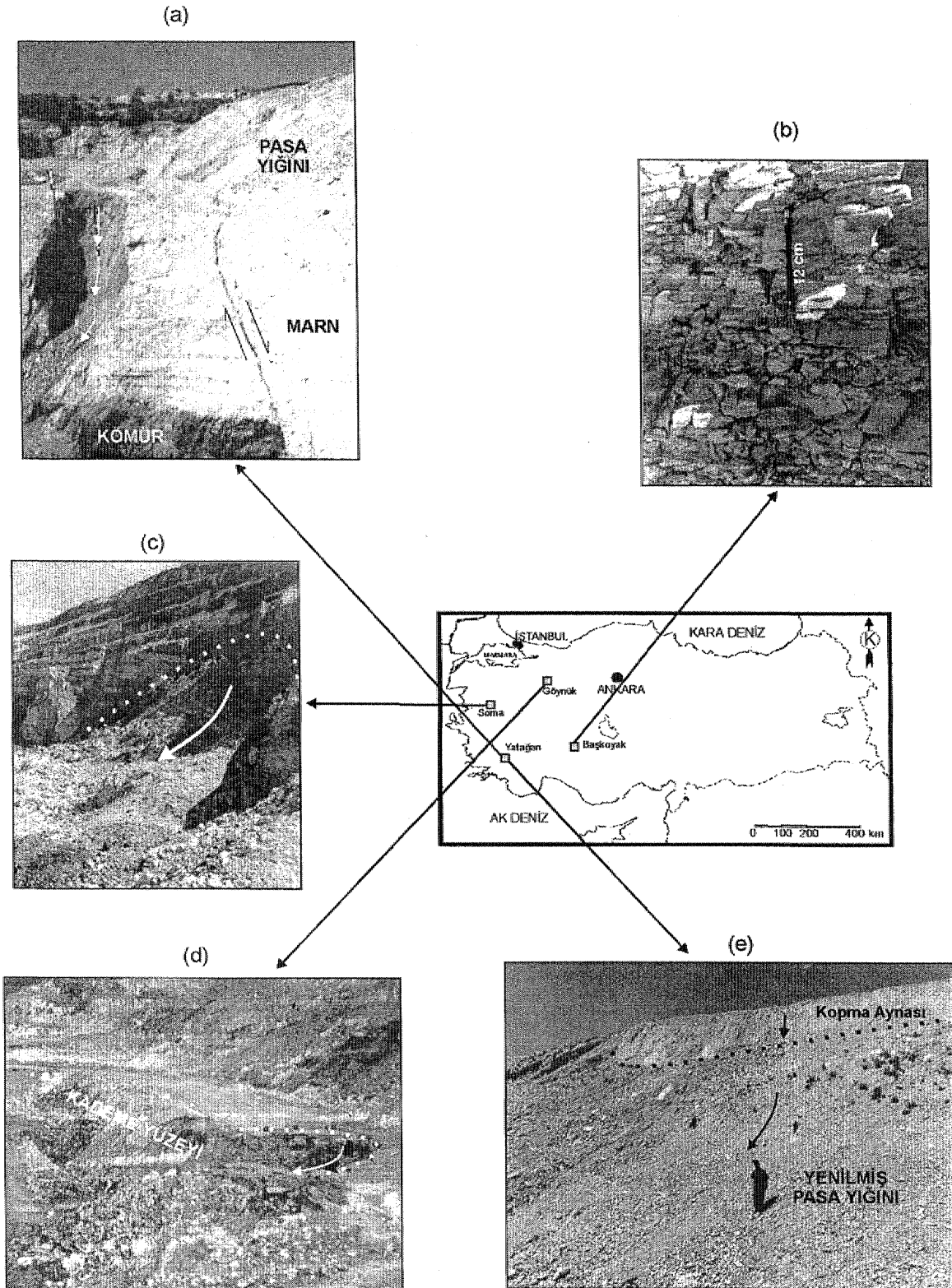
^b Şekil 3'deki modifiye edilmiş abaktan tayin, edilmiştir

^c x, y ve z eksenleri boyunca fotoanaliz/ yöntemiyle belirlenmiş

^d örselenme etkisi için azaltma faktörü

si amacıyla Eskihisar (Yatağan-Muğla) linyit işletmesinde dairesel yüzeyler boyunca gelişmiş pasa duraysızlıklarından (Şekil 5e ve 7) yararlanılmıştır. Malzeme özellikleri ve duraysızlık mekanizmaları Ulusay vd., (1995a ve b, 1996) tarafından incelenen bu pasa yığınları,, linyit horizonunun üzerinden kaldırılmış marnlardan oluşmaktadır. Bu nedenle, analizlerde aynı marnların tek eksenli sıkışma dayanımı ve niş parametresi için tayin edilmiş olan 4.15 MPa ve 9.87 değerleri (Ulusay, 1991) esas alınmıştır. Yerinde yapılan deneylerden pasa malzemesinin birim ağırlığı 14 kN/m³ olarak belirlenmiştir (Ulusay vd., 1995a). Pasa malzemesini oluşturan kay aç parçalarının yüzeyleri; az pürüzlü, az-orta derecede bozunmuş ve kalınlığı 5 mm'den küçük yumuşak dolgu içeren yüzeyler olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlar kullanılarak Şekil 3'ten SCR puanı (R_f=1, R_w=4 ve R_f=2) 7 olarak belirlenmiştir. Ancak,, pasa yığınları için süreksizlik seti gibi bir kavramın olmayışı hacimsel eklem sayısının (J_v) tayininde güçlük yaratmaktadır.. Bu güçlüğü "aşılması amacıyla, yığını oluşturan ortalama parça boyutunun pasa malzemesi için bir ortalama süreksizlik aralığı değerini temsil edebileceği kabul edilmiştir. Bu tür malzemeler için ortalama parça boyutunun birbirine dik yönlü üç ek-

sen boyunca belirlenmesi amacıyla, son yıllarda yaygın olarak kullanılan ve ekonomik ve hızlı bir yöntem olarak bilinen bilgisayar destekli fotoanaliz tekniğinden yararlanılmıştır (Franklin vd., 1988; Singh vd., 1991). Amaç doğrultusunda, duraysızlığa uğramış pasa yığınının yakınında aynı malzemedeki küçük, boyutlu yığınlar oluşturulmuş ve seçilmiş bir ölçek (çapı bilinen bir plaka) ile bir referans alan (ahşap karelaç ağı) yığınların üstüne konarak birbirine dik yönde fotoğraflar çekilmiştir (Şekil 9). x, y ve z yönlerinde çekilmiş görüntüler, bilgisayar ortamında sayısallaştırılarak 2 em ve daha büyük parçalar boyutlandırılmıştır. Daha sonra yapıları istatistiksel değerlendirmelerle, parça boyutu, diğer bir ifadeyle ortalama süreksizlik aralığı, x, y ve z yönlerinde sırasıyla, 0.085 m, 0.081 m ve 0.083 m olarak tayin edilmiştir. Bu değerler, 8e numaralı eşitlikte kullanılarak pasa kütlelerinin J_v değeri 1773, SR puanı ise 4 olarak belirlenmiş ve Şekil 3'ten pasa kütlesi için GSI 26 bulunmuştur. Yerinde kazılan malzemenin taşınım yığılmasıyla oluşan pasa yığınlarının örselenme derecesinin ileri düzeyde olacağı dikkate alınarak, örselenme faktörü için literatürde önerilen alt sınır değeri olan 0.8 seçilmiştir.



Şekil 5. Geriye dönük analizi yapılan şev duraysızlıklarının lokasyonları ve duraysızlıklardaki görüntüler: (a) Eskihisar (Yatağan) linyit açık işletmesi; (b) Başkoyak barit işletmesi; (c) Kısırkdere (Soma) linyit açık işletmesi; (d) Himmetoğlu (Göynük) linyit açık işletmesi; (e) Yatağan açık işletmesinde pasa şevi duraysızlığı..