

KAYA KÜTLELERİ ÜZERİNDEKİ SİĞ TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ HESAP CETVELİ KULLANIM KILAVUZU

Aralık - 2021

ÖNEMLİ NOT:

Kaya Kütleleri Üzerindeki Sığ Temellerin Taşıma Gücü Hesap Cetveli Kullanım Kılavuzu'na ait telif hakları, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu gereğince TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odasına ait olup, izin almaksızın içeriğinde herhangi bir değişiklik yapılamaz. Hesap cetveli JMO logolu olarak kullanılmak kaydıyla ticari olmayıp ücretsiz olarak herkesin kullanımına açık ve internette erişilebilir durumdadır. Ancak Oda logosunun hesap cetvelinden çıkarılarak kullanılmasının tespit edilmesi durumunda 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanun gereğince ilgili kişi hakkında gerekli hukuki yollara başvurulur.

JMO, bu Excel dosyasının kullanımıyla ilgili hiçbir sorumluluk kabul etmez. JMO'nun üyelerine yardımcı olmak amacıyla hazırlanmıştır. Kullanıcılar bu tablodan elde edilen sonuçları el hesaplamaları ile doğrulamalıdır.

İçindekiler

• Kaya Kütleleri Üzerindeki Sığ Temellerin Taşıma Gücü Hesap Cetveli	1
• Kaya Kütleleri Üzerindeki Sığ Temellerin Taşıma Gücü Hesap Cetvelinde Kullanılan Parametreler	2
• Hoek-Brown Görgül Yenilme Ölçütü Girdi ve Çıktı Parametreleri	4
• Laboratuvar Verisi Girdisi ve Çıktısı	19
• Türetilmiş (Hesaplanan) Parametreler	23
• Taşıma Gücü Hesap Yöntemleri	38
• Hoek - Brown Yenilme Ölçütünü Esas Alan Yöntem (Wyllie, 1992 Yöntemi)	39
• Taşıma Gücü Kapasitesi Faktörleriyle Bell Çözümü.....	41
• Eurocode 7'ye göre Elle Çözüm	43
• Açıklamalar	48
• Metin İçerisinde Kullanılan Terimler	49
• Referanslar	51

KAYA KÜTLELERİ ÜZERİNDEKİ SIĞ TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ HESAP CETVELİ v.1 *jmoDATA* (Statik Durum İçin)

Kaya kütleleri üzerindeki siğ temellerin taşıma gücü, pek çok bilimsel araştırmaya göre çeşitli yöntemlerle (deneysel, analitik ve sayısal) hesaplanabilmektedir. Literatürdeki kaya kütlelerinin taşıma gücü metodolojileri viyadük ayağı, baraj gövdesi, gökdelen altı kazıkları gibi çok büyük gerilmeler için ihtiyaç duyulmuş ve geliştirilmiştir. Sektördeki meslektaşlarımızın çoğunlukla çalıştıkları orta boy (3-8 kat) yapılar için MPa düzeyindeki taşıma güçleri bu anlamda anlamsız kalabilir. Böylesi karmaşık ve Mühendislik jeolojisi uzmanlığı gerektiren bir konuyu bir Excel sayfasına sığdırmak elbette istenen bir durum değildir. Farklı kaya kütleleri, farklı süreksizlik özellikleri, farklı proje ve yükleme koşulları için farklı yöntemlerin tanımlanması gerekmektedir. Kullanıcıların yalnızca kaya kütleleri üzerindeki siğ temellerin taşıma gücü hesap cetveli Excel sayfasını paylaşarak işin teorisini, metodolojisini bilmeden veri girme alışkanlığının doğuracağı kötü sonuçlardan kaçınmaları önemle tavsiye edilir.

Bu çalışmada kaya kütleleri üzerindeki siğ temellerin taşıma gücü, farklı araştırmacılar tarafından önerilen ve literatürde yaygın olarak kullanılan üç farklı taşıma gücü hesap yöntemi ile verilmiştir. Bu yöntemlerden ikisi teorik biri ampirik çözümleri içerir. Bu kapsamda kaya kütlelerinde Hoek-Brown yenilme ölçütünü esas alan Genel Taşıma Gücü denklemleri ve Eurocode 7'de Taşıma Gücü grafikleri kullanım kılavuzunda yer almaktadır. Bu çalışmayla farklı yöntemlerin verildiği Ms Excel ile hazırlanan hesap cetveliyle, kaya kütleleri üzerindeki siğ temellerin taşıma gücünün değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Kullanıcıların bu değerlendirmeyi yaparken genel kabul görmüş başka bir yöntemle de sonucu test etmeleri önerilir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY-2018'de;

“Kayalar için en az **tek eksenli sıkışma mukavemeti q_u** , **Jeolojik Mukavemet İndisi (GSI)** değerleri vb. kaya kütle sınıflandırma parametreleri kullanılarak uygun mukavemet parametreleri belirlenecektir (16.3.5).”

ifadesi yer almakta olup, belirtilen hususlar da dikkate alınarak “**Kaya Kütleleri Üzerindeki Siğ Temellerin Taşıma Gücü Hesabı**” için Microsoft Excel programı kullanılarak ***jmoData*** adında hesap cetveli hazırlanmıştır. *jmoData*, genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme kriterinin son versiyonuna dayanarak, kaya kütle dayanımı parametrelerinin belirlenmesi için bir yazılım programıdır. Yazılan programın (*jmoData*) tek bir ana ekran üzerinde gösterimiyle yukarıda bahsi geçen hesaplama yöntemlerinin kolay anlaşılabilir ve karşılaştırmalı olarak kullanılabilir olması amaçlanmıştır. Aynı zamanda değişimlerin etkileşimli olarak (*interaktif olarak*) gözlemlenmesi sağlanmıştır.

Kaya kütlelerinde temel boyut ve sistemini oturma seviyesi de kontrol etmektedir bu nedenle taşıma gücü değerlendirmesinde ek olarak oturmalarında hesaplanması gerekmektedir. Çalışmada bu hesaplamalar yer almamaktadır kullanıcılar bırakılmıştır.

Not: Kullanıcıların belli aralıklarla JMO'nun Web sitesinden hazırlanan bu programla ilgili güncellemeleri ve değişiklikleri izlemeleri tavsiye olunur (<http://jmo.org.tr>>JeoVeri>Hesaplama Programları).

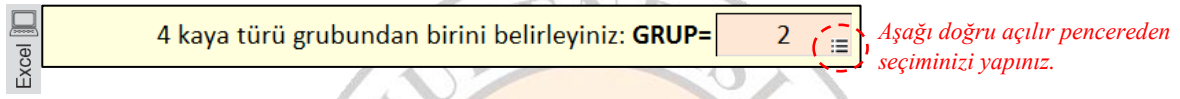
KAYA KÜTLELERİ ÜZERİNDEKİ SİĞ TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ HESAP CETVELİNDE KULLANILAN PARAMETRELER

Aşağıda Excel hesap cetvelinde kullanılan veriler sırasıyla detaylı olarak açıklanmaktadır.

1- Proje Bilgileri, Temel Veri Girişi ve Seçim Yapma

PROGRAM VERİ GİRİŞİNDE ONDALIK SAYILARI YAZARKEN SAYI AYIRACI OLARAK NOKTA VEYA VİRGÜL HASSASİYETİNE DİKKAT EDİLMELİDİR.

TURUNCU RENKLİ KUTUCUKLARDA, KULLANICIDAN VERİ GİRİŞİ VEYA SEÇİM YAPMASI (☰ Seçim ikonu) İSTENMEKTEDİR. SARI RENKLİ KUTUCUKLAR İSE KORUMALIDIR.



KULLANICILAR İMLEÇ İLE KUTUCUĞU İŞARETLEYEREK VEYA İŞARETÇİ İMLECİ BAŞLIKLAR ÜZERİNE GETİREREK KUTUCUKLA İLGİLİ VERİLEN AÇIKLAMAYI (☰) GÖREBİLİRLER.

KULLANICILAR PROGRAMDAKİ MAKROYU KULLANABİLMEK İÇİN MICROSOFT OFFICE 2016 EXCEL'DE MAKRO AYARLARINI AÇMALIDIR.

- **Antet Bölümü;**

Programda proje bilgileri ve hesaplamalar için deney bölgesinin karakteristik özelliklerinin ve bölgeden alınan verilerin girilmesini gerekli kılan parametreler yer almaktadır.

Proje Adı: Taşıma gücü hesabının uygulandığı "*Projenin adı*" yazılacaktır.

Ada No: Taşıma gücü hesabının uygulandığı yerin "*Ada no*" su yazılacaktır.

Parsel No: Taşıma gücü hesabının uygulandığı yerin "*Parsel no*" su yazılacaktır.

Parsel Sorgu: Kullanıcılar imleci bu kutucuğun üzerine getirdiklerinde el işareti belirir ve tıkladıklarında <https://parselsorgu.tkgm.gov.tr> web sitesine ulaşarak ilgili sitenin arayüzünde parsel ile ilgili istenen bilgileri girerek çalışılan parsel sınırlarını harita üzerinde görebilirler.

***Koordinatlar:** Ada ve parsel numarası belirlenmiş yerin orta nokta koordinatlarıdır. "x" ve "y" kutucuklarına *Datum*'da belirtilen koordinat referans sistemine uygun olarak yazılacaktır.

*** Kullanıcılar koordinat bilgilerini girmek zorunda değildir.**

Datum: “x” ve “y” olarak verilen koordinatların, hangi koordinat referans sistemine ait olduğunu gösterir.

Kot: Taşıma gücü hesabı yapılacak parselde metre (m) cinsinden ortalama yükseklik yazılacaktır.

Temel Tabanı Altında Etki Derinliği İçindeki Kayaç Tipi ve Özellikleri:

Temel tabanı altında temel etki derinliği içerisinde yer alan kaya kütlesinin özellikleri kısaca tanımlanır.

Not 1: Programda veri girişleri yalnızca açık turuncu renkli hücrelere yapılmalıdır. Taşıma gücü ile ilgili formülasyonlar otomatik olarak hesaplanacaktır. ☰ ikonlu turuncu renkli hücrelerde ise aşağı doğru açılır pencereden* seçim yapılacaktır. Sarı renkli hücreler korumalıdır. Değiştirmeye çalışmayınız.

Not 2: Taşıma gücü eşitlikleri ile ilgili parametrelerin büyük çoğunluğu Duncan C. Wyllie adlı yazarın "Foundations on Rock", 1992 ve 1999 baskısı yayınlarından alınmıştır.


***Açılır Pencere:** Fare ile veri girişi yapılan kutucuğu seçtiğinizde kutucuğun sağ alt köşesinde beliren aşağı yönlü küçük ok tuşuna (▼) tıkladığınızda açılan menüden seçim yapmanızı sağlar.

2- Sonuç Bölümü (Çözüm Yöntemleri)

Bu bölümde yer alan hesaplamalar büyük oranda Excel hesap tablosunda “Hoek-Brown yenilme ölçütü girdi/çıktı parametreleri” bölümünde turuncu renkli kutucuklarda yapılan seçimler veya girilen veriler göz önüne alınarak otomatik olarak gerçekleştirilir. Turuncu renkli kutucuklu hücreler dışındaki hücreler korumalıdır. Lütfen değiştirmeye çalışmayınız.

Taşıma gücü yöntemlerinde yöntemin adı ve bunlarla ilgili parametre bilgileri üç ayrı çerçeve içinde verilmiştir.

Tabloda, farklı araştırmacılar tarafından hazırlanan ve literatürde yaygın olarak kullanılan taşıma gücü hesap yöntemleriyle ilgili formülün içerisindeki parametreler programda belli bir sıra gözetilerek verilmiştir. Kullanıcılar bunlar ile ilgili ayrıntılı bilgiye kullanım kılavuzu'ndan ulaşabilirler.

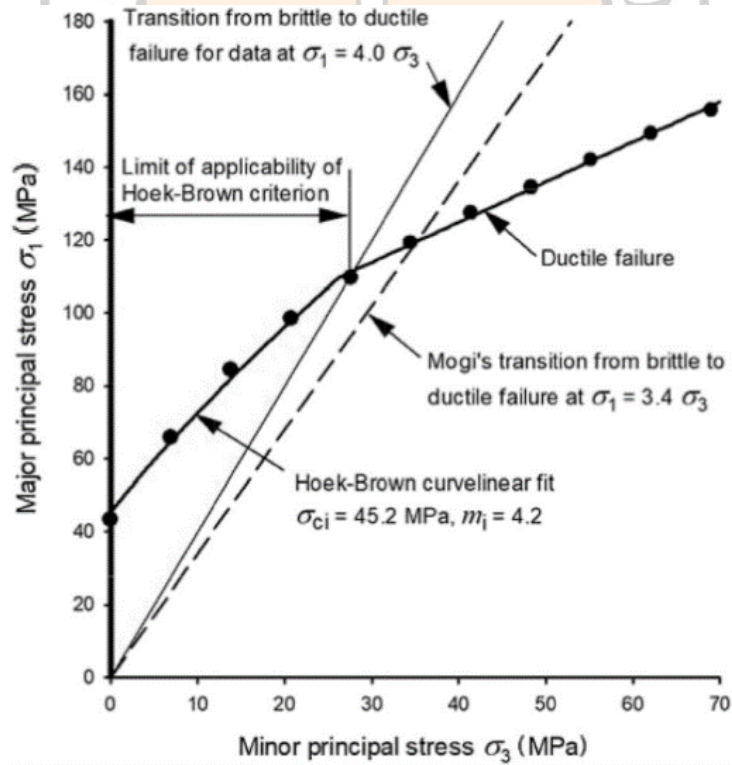
Yorum Kutusu: Bu Program, kullanılan denklemlerdeki parametreler ile ilgili açıklamalar, veri tabloları vb. dahil olmak üzere çok çeşitli bilgiler içeren çok sayıda "yorum kutusu" içerir. Yorum kutusunun varlığı hücrenin sağ köşesinde yer alan  ikonu ile gösterilir. Bu yorum kutusunun içeriğini görüntülemek için yalnızca işaret imlecini istenen hücreye getirip bekleyiniz.

Hoek-Brown Görgül Yenilme Ölçütü Girdi ve Çıktı Parametreleri

Hoek-Brown (HB) Görgül Yenilme Ölçütü, E. Hoek ve E. T. Brown tarafından masif veya ileri derecede eklemli homojen ve izotrop kaya kütlelerinin makaslama dayanımlarının tahmini amacıyla geliştirilmiştir. Kaya kütlelerinin makaslama dayanımının kestiriminde programın sol kenarı veri girişi için ve kaya kütleleri üzerindeki sığ temellerin taşıma gücü hesabı ile ilgili eşitliklerde kullanılan çıktı parametrelerini görüntülemek için kullanılır. Giriş verilerini değiştirmek için işaret imleci ile "+" ve "-" tuşlarına basabilir veya hücreye doğrudan değer girebilirsiniz. Her değişiklikte tüm çıktı verileri hemen yeniden hesaplanır ve yenilme zarfı grafikleri yeniden çizilir. Bu özellik, kaya kütlesi parametrelerinin değişikliklerinin yenilme zarflarının şekli ve hesaplanan çıktı değerleri üzerindeki etkisini etkileşimli olarak (*interaktif olarak*) gözlemlemenizi sağlar.

Hoek-Brown uygulama aralığı (E. Hoek, E.T. Brown GSI-2018):

Aşağıdaki şekil kriterin uygulanabilirlik aralığının yaklaşık $\sigma_1=4.0 \cdot \sigma_3$ 'te makaslama sünek kırılmaya geçişle belirlendiğini göstermektedir. Mogi (1966), çok çeşitli kaya türlerinde kesmeden sünek yenilmeye geçişini araştırmış ve ortalama geçişin $\sigma_1=3.4 \cdot \sigma_3$ ile tanımlandığını bulmuştur. Bu, sağlam kaya numunelerinin üç eksenli testi için maksimum çevre basıncı için faydalı bir kılavuzdur.



Girdi Parametrelerinin Tahmini/Belirlenmesi:


Bu bölüm geliştirilmiş Hoek-Brown (HB) görgül yenilme ölçütü parametrelerini belirlemek için kullanır ve bu parametrelere bağlı olarak Hoek-Brown sabitleri (m_b , s ve a) belirlenir:

Program (**jmoData**), aşağıdaki parametreleri girdi olarak kullanır:

- Kaya malzemesi tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_{ci})
- Jeolojik dayanım indeksi (GSI)
- Kaya malzemesi sabiti (m_i) ve
- Örselenme faktörü (D)

Yukarıda giriş işlemi gerçekleştirilen parametreler yardımıyla program tarafından, bir kaya kütlesi için geliştirilmiş Hoek-Brown yenilme zarfının oluşturulması için gerekli olan aşağıdaki Hoek-Brown boyutsuz malzeme sabitleri ortaya konur:

- a (Kaya kütlesi sabiti)
- s (Kaya kütlesi sabiti)
- m_b (Bloklu kaya kütlesi sabiti)

m_i , GSI ve D program içine yerleştirilen grafiklerden ve tablolardan kayacın tipine ve jeolojik koşullara bağlı olarak belirlenebilmektedir. Bu grafiklere ve tablolara, turuncu renkli giriş parametresi düzenleme kutularının her birinin yanında bulunan seçici düğmesi () ile erişilebilir.



GSI parametresine ait seçici düğmesi

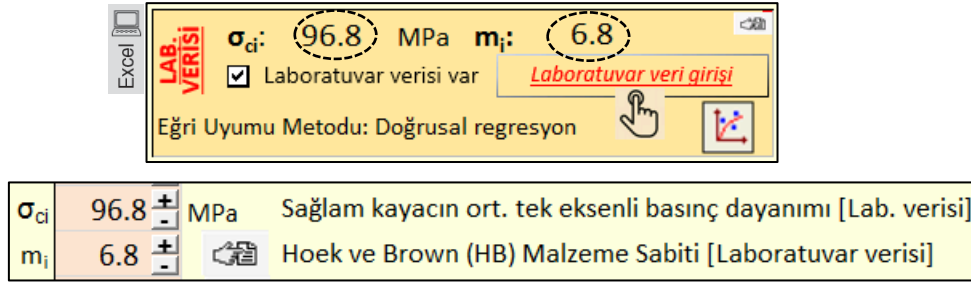
"Seçici" düğmesinin üzerine geldiğinizde (imleç ile üzerine gelip bekleyiniz işaretlemeyiniz), kullanıcının istenen parametre için uygun bir değer belirlemesine olanak tanıyan bir tablo veya grafik görünecektir. Kullanıcı bir değer seçtiğinde, bu değeri ilgili veri giriş kutucuğuna yazacak ve program hesaplaması etkileşimli olarak (*interaktif olarak*) gerçekleştirilecektir.

σ_{ci} (Sigci): Sağlam kayacın ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı/*Unconfined Compressive Strength of Intact Rock*

Kullanıcı bu veriyi sağlam kayaca ait laboratuvar verisinden (örneğin üç eksenli deneyler) veya mevcut abakları kullanarak iki ayrı şekilde elde edebilir.

Kaya malzemesi dayanımının laboratuvar deneyleri ile ortaya konması önceliklidir. Kullanıcının elinde laboratuvar verisi varsa bu verinin kullanılması önemle tavsiye olunur. Yoksa kayacın türü için tahmin yapılır. Program laboratuvar verisi kullanıldığında bunu belirtir (**lab. verisi**). Örneğin "Laboratuvar verisi var" kutusu işaretli ve σ_{ci} değeri silinmemiş ise kullanıcılar bu veriyi alarak kullanabilirler. Laboratuvar verisinin olduğu yerdeki σ_{ci} değerini sildiğinizde veri girişi

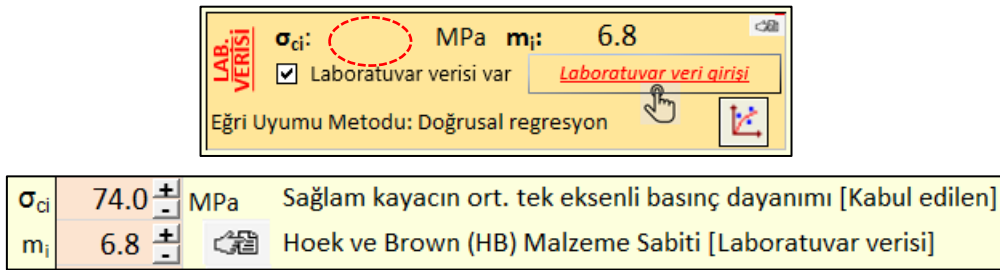
bölümündeki σ_{ci} kutucuğuna kendi değerini girmeniz gerekir. Bu durumda σ_{ci} satırında veri tipi "Lab. verisi" yerine "**kabul edilen**" olarak ifade edilir.



σ_{ci}	96.8	MPa	Sağlam kayacın ort. tek eksenli basınç dayanımı [Lab. verisi]
m_i	6.8		Hoek ve Brown (HB) Malzeme Sabiti [Laboratuvar verisi]

Hoek-Brown sınıflandırma parametreleri için girdi olarak Laboratuvar verisi kullanılmış örnekler

Kullanıcı laboratuvar verisini kullanmak istemediğinde kullanmak istemediği verinin birini veya her ikisini (σ_{ci} ve m_i) birden Laboratuvar verisi kutusundan silmelidir.



σ_{ci}	74.0	MPa	Sağlam kayacın ort. tek eksenli basınç dayanımı [Kabul edilen]
m_i	6.8		Hoek ve Brown (HB) Malzeme Sabiti [Laboratuvar verisi]

Hoek-Brown sınıflandırma parametreleri için girdi olarak m_i laboratuvar verisi kullanılmış σ_{ci} değeri ise kullanıcı tarafından belirlenmiş örnek gösterim.

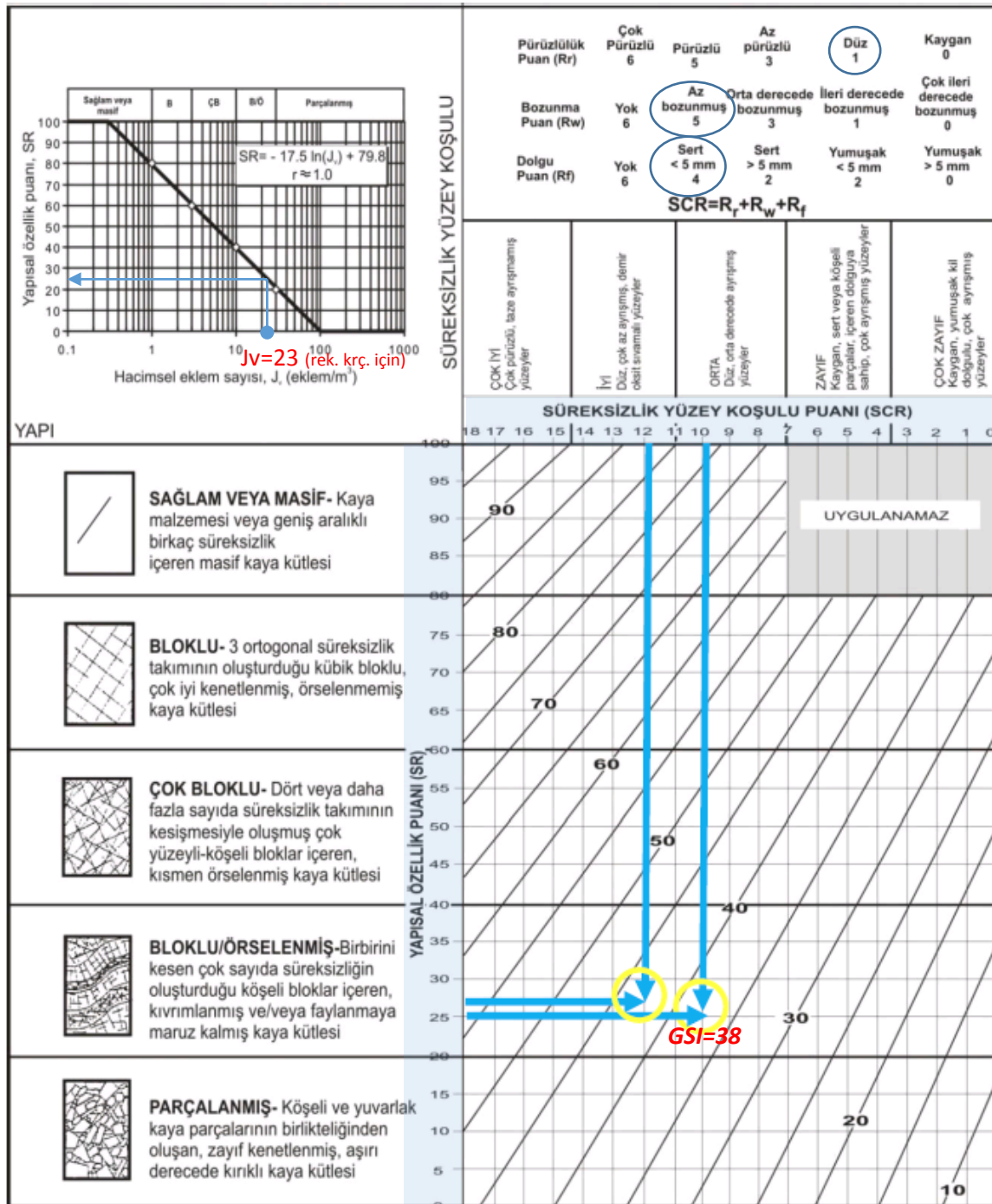
GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi / Geological Strength Index

Hoek vd. (1995) tarafından ilk kez tanımlanan Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), Hoek-Brown görgül yenilme ölçütüne girdi parametresi olması için kaya kütlesi ve süreksizliklere ait arazi gözlemlerinden yararlanarak kaya kütlesinin sınıflandırılması esasına dayanır. Buna göre, kaya kütlesi için belirlenen GSI puanı yardımıyla kaya kütlelerinin kütle sabitleri ile dayanım ve deformasyon özellikleri ampirik olarak belirlenebilmektedir.

Bu parametre zamanla farklı araştırmacılar tarafından geliştirilerek belirlenmeye çalışılmıştır. Kullanıcılar GSI parametresinin belirlenmesi amacıyla bu çalışmalarını kullanabilirler. Örneğin kaya kütlesi sınıfları için önerilen kaya kütlesinin yapısını ve süreksizlik yüzey koşullarını esas alarak GSI puanı belirlenebilir. II. Yöntemde GSI grafiğindeki süreksizlik yüzey koşulunun ve kaya kütlesi yapısının doğrudan ve duraylı bir şekilde tayini amacıyla ölçülebilen ve tanımlanabilen "Yapısal Özellik Puanı (SR)" ve "Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı (SCR)" olarak tanımlanan bir puanlama sistemi kullanılabilir. Bir diğer yöntemde GSI grafiğinde Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı (JCond₈₉) ve Kaya Kalite Göstergesi (RQD) ile GSI değeri grafikten daha duyarlı ve ölçülebilen bir değer olarak elde edilebilir.

Programda GSI değeri aşağıda verilen Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif sınıflama abağı kullanılarak belirlenebilir. İncelenen kaya kütlesine ait GSI puanının

saptanmasında; önerilen abaktan kaya kütesinin hacimsel eklem sayısına (J_v) bağlı olarak düşey eksende yer alan “Yapısal Özellik Puanı (SR)” belirlenir. Yatay eksende bulunan “Süreksizlik Yüzey Koşulu (SCR)” puanı yine GSI abağının sağ üst köşesindeki aynı abak üzerinde sunulan süreksizliklere ait pürüzlülük, bozunma ve dolgu özelliklerine atanan puanlar yardımıyla elde edilmektedir. Yatay ve düşey eksenler için belirlenen bu değerler çakıştırılarak birbirleriyle kesiştikleri yerdeki GSI değer eksenlerine bağlı olarak incelenen kaya kütesine ait GSI puanı (değeri) tayin edilmektedir.



Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen niceliksel GSI sınıflama sistemi abağı

Birim	RQD (%)	J _v	SR	SCR	GSI
Rek. Kireçtaşı	39	23	25	R _r = 1, R _w = 5, R _f = 4, SCR = 10	38
Kalkışist	42	22	26	R _r = 3, R _w = 5, R _f = 4, SCR = 12	43

Sönmez ve Ulusay tarafından önerilen GSI sınıflama sistemi abağında kalkışist ve kireçtaşı kaya kütleli örneğinin değerlendirilmesi (Özdemir, O., 2018)

Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen niceliksel GSI abağında, yapısal özellik puanı (SR)'nin belirlenmesi amacıyla hacimsel eklem sayısı (J_v) önerilmiştir. Hacimsel eklem sayısı (J_v) aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilmektedir. Buna göre GSI puanını hesaplamada kullanılan yapısal özellik puanı (SR) abak üzerindeki grafikten kestirilebileceği gibi, eşitlik 4.16 yardımıyla da saptanabilmektedir.

Hacimsel eklem sayısı kaya kütlelerinde hat etüdü yardımıyla belirlenerek J_v hesaplanmaktadır. Ancak zayıf ve sık eklemli kaya kütlelerinde eklem takımlarının belirlenmesi zordur. Bu tür kaya kütlelerinde birbirine dik üç yönde (x,y,z) eklem sayıları belirlenerek J_v hesaplanmaktadır.

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{S_i} \right) \quad (4.15)$$

Burada; n: gözlenen her bir eklem takımı için ölçüm hattı boyunca sayılan süreksizliklerin sayısı, S_i: gözlenen her bir eklem takımına dik yönde seçilmiş ölçüm hattının uzunluğudur.

$$SR = -17,5 \cdot \ln(J_v) + 79,8 \quad (4.16)$$

J_v: Hacimsel eklem sayısı

SR: Yapısal özellik puanı

J_v parametresi aralıkları ile blok boyutları tanımlanabilmektedir.

ISRM Tanımları	J _v (eklem/m ³)	GSI için Önerilen Tanımlar
Çok büyük bloklar	<1	Bloklu (B)
Büyük Bloklar	1-3	
Orta Boyutlu Bloklar	3-10	Çok Bloklu (ÇB)
Küçük Bloklar	10-30	Bloklu/Örselenmiş (B/Ö)
Çok Küçük Bloklar	30-60	Parçalanmış (P)
Parçalanmış/Ufalanmış	>60	

Blok boyutu tanımlamaları ve J_v parametresi aralıkları

Süreksizlik yüzey koşulunun tanımlanması amacıyla RMR Sınıflama Sistemi'nin dolgu, bozunma ve pürüzlülükle ilgili olarak önerdiği tanımlamalar ve Bieniawski (1989) tarafından bu parametrelere verilen puanlar kullanılmış olup, Süreksizlik Yüzey Koşulu için 0 ile 18 arasında değişen puanlar atanmıştır.

Süreksizlik Yüzey Koşulu (SCR) puanı,

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (4.17)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır. Burada sırasıyla; R_r süreksizlik pürüzlülük puanını, R_w bozunma puanını ve R_f dolgu puanını ifade etmekte olup, 0'dan 6'ya kadar olan puanlamalar aşağıdaki tabloda sunulan tanımlamalara göre yapılabilmektedir.

Pürüzlülük (Rr)	Çok Pürüzlü	Pürüzlü	Az Pürüzlü	Düz	Kaygan
Puan	6	5	3	1	0
Bozunma (Rw)	Yok	Az Bozunmuş	Orta Derecede Bozunmuş	İleri Derecede Bozunmuş	Çok İleri Derecede Bozunmuş
Puan	6	5	3	1	0
Dolgu (Rf)	Yok	Sert < 5 mm	Sert > 5 mm	Yumuşak < 5 mm	Yumuşak > 5 mm
Puan	6	4	2	2	0

Süreksizlik yüzey koşulu puanları (SCR)

Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen niceliksel GSI sınıflama abağının yanı sıra, kaya kütleleri için Jeolojik Dayanım İndeksinin belirlenebilmesi amacıyla Hoek vd. (2013) tarafından önerilen aşağıdaki niceliksel sınıflama abağı da kullanılabilir. Söz konusu abakta bloklu, çok bloklu, bloklu-örselenmiş ve parçalanmış olmak üzere dört farklı kaya kütle sınıfı için GSI puanlarının belirlenmesinde Hoek vd. (2013) tarafından önerilen niceliksel GSI sınıflama abağında kaya kütlelerinin bloklu olma özelliğinin niceliksel olarak ortaya konabilmesi için RQD değerlerinin kullanımı önerilmektedir. Öte yandan, süreksizliklerin niceliksel tanımı için ise Bieniawski (1989) tarafından RMR sistemi için önerilen “Süreksizlik Koşulu ($JCon_{89}$)” puanlaması kullanılmaktadır. Buna göre Hoek vd. (2013) kantitatif (sayısal) GSI abağında yatay eksen 0 ile 45 arasında ölçeklendirilmiş ve kaya kütlelerindeki süreksizliklerin durumu $1.5 * JCon_{89}$ eşitliği ile ifade edilmiştir. RMR sınıflamasında süreksizlik koşulu puanlamasının 0 ile 30 arasında değiştiği düşünülürse, GSI abağındaki en büyük yatay eksen değerinin 45 olacağı görülecektir. Bunun yanı sıra, abaktaki düşey eksen de 0 ile 40 arasında değişen aralıkta ölçeklendirilmiş olup, kaya kütleleri bloklu durumunu $RQD/2$ eşitliği ile sınıflamaya yansıtılmaktadır. Kaya kütlelerine ait GSI puanı, Hoek vd. (2013) tarafından önerilen yatay ve düşey eksen puanlarının toplamı olarak da aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilmektedir.

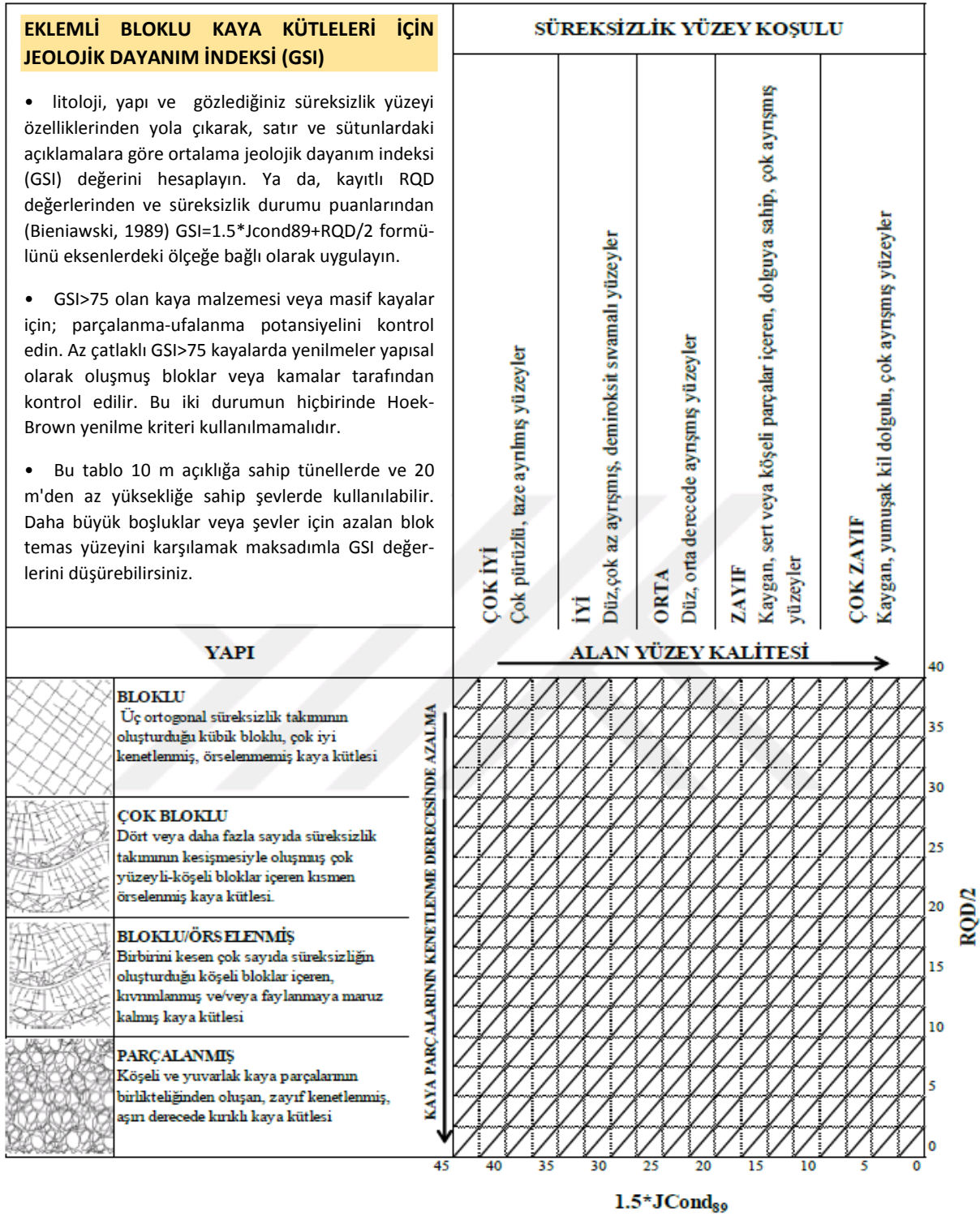
$$GSI = 1.5 * Jcon_{89} + RQD/2$$

Burada; RQD: kaya kalite göstergesi (%) ve $JCon_{89}$: RMR sisteminin Bieniawski, 1989 versiyonundaki toplam süreksizlik durumu puanıdır (Devamlılık+Açıklık+Pürüzlülük+Dolgu+Bozunma puanları).

$$JCon_{89} = 35 Jr/Ja / (1 + Jr/Ja)$$

Burada; Jr: Eklem pürüzlülük sayısı, Ja: Eklem yüzeyi bozunma sayısı

Not: Hazırlanan bu metinde kaya mekaniğinde yer alan terimlerin kullanılması prensip olarak benimsenmiş ve metin sonunda bu terimler verilmiştir.



m_i : Hoek ve Brown (HB) Malzeme Sabiti / The Intact Rock Parameter

Hoek-Brown (HB) yenilme ölçütü sağlam/masif kaya malzemesi için önerilmiş olan en önemli ölçütlerden birisidir ve m_i sabiti ölçütün önemli bir parçasıdır. m_i yenilme zarfının genel eğimini kontrol etmektedir. Kayacın dokusu önem arz eder. Taneli ve iri kristalli kayalarda yüksek seçilmelidir. Hoek-Brown yenilme ölçütünde farklı kaya malzemeleri için m_i sabiti çizelgede önerilen değerlerden, üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden ya da görgül çalışmalardan

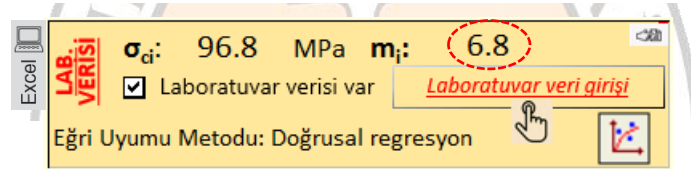
belirlenebilmektedir. m_i sabitinin kaya örneğinin mineralojisine, bileşimine ve tane boyutuna hassas olduğu da unutulmamalıdır (Hoek ve diğ., 2002).

Öte yandan, Hoek ve Brown (2019), m_i sabitini kaya kırılabilirliğinin bir göstergesi olarak tanımlamış ve aşağıdaki ilişkiyi önermiştir. σ_{ci}/σ_t oranının (tek eksenli sıkışma dayanımı/çekme dayanımı) genellikle kaya kırılabilirliğinin bir göstergesi olarak ifade edildiğine ve daha yüksek oranın daha yüksek kırılabilirliğe karşılık geldiğine dikkat edin (Andreev, 1995).

$$R=0.981 m_i + 7$$

burada R, kırılabilirlik oranıdır (σ_{ci}/σ_t) ve m_i , H-B malzeme sabitidir.

Programda ilgili kutucuğa 1 ila 50 arasında bir değer giriniz. Laboratuvar verisi varsa laboratuvar verisi kullanılması şiddetle tavsiye olunur. Yoksa kullanıcının ilgili tablodan kayacın türü için tahmin yapması gerekir. Program, laboratuvar verisi kullanıldığında bunu açıklama şeklinde belirtir (lab. verisi). “Laboratuvar verisi var” kutusu işaretli ve m_i değeri silinmemiş ise veri seçimi ifade edilir. “Laboratuvar verisi” kutusundaki m_i değerini sildiğinizde (mevcut test verisi yoksa) m_i kutucuğuna kendi değerini girmeniz gerekir (programda “kabul edilen” olarak ifade edilir).



Laboratuvar verilerinden hesaplanan σ_{ci} ve m_i değerleri

σ_{ci} ve m_i 'nin üç eksenli basınç deneyleri ile elde edilmesi sırasında anlamlı sonuçlar elde edilebilmesi için, Hoek ve Brown laboratuvar üç eksenli basınç deneylerinde $0 < \sigma_3 < (0.5 * \sigma_{ci})$ aralığının dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Tipik m_i değerleri aralığı, yumuşak ve sünek kayalar için yaklaşık 5, çok sert kırılabilir kayalar için 35'e kadar çıkabilir. Bu nedenle, bu aralığı kapsayacak şekilde program'da $1 < m_i < 50$ aralığı belirlenmiştir.

m_i sabitleri, en küçük kareler regresyon yöntemi yardımıyla üç eksenli deney verileri kullanılarak hesaplanabilmektedir. İlk olarak Denklem (1) yeniden düzenlenmiş ve buna göre aşağıdaki parametreler hesaplanmıştır.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + \sigma_{ci}^2)^{1/2}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + \sigma_{ci}^2$$

$$y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2$$

$$x = \sigma_3$$

$$y = m_i \sigma_{ci} x + \sigma_{ci}^2$$

$$\sigma_{ci}^2 = \frac{\sum y}{n} - \frac{[\sum xy - (\sum x \sum y/n)] \sum x}{\sum x^2 - ((\sum x)^2/n)}$$

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{ci}} - \frac{[\sum xy - (\sum x \sum y/n)]}{\sum x^2 - ((\sum x)^2/n)}$$

$$R^2 = \frac{[\sum xy - (\sum x \sum y/n)]^2}{[\sum x^2 - ((\sum x)^2/n)][\sum y^2 - ((\sum y)^2/n)]}$$

m_i parametresinin tahmini için başka bir yöntem de deneysel modellerdir. Tek eksenli sıkışma dayanımının çekme dayanımına oranı (R), farklı araştırmacılar tarafından m_i parametresinin tahmini amacıyla kullanılmıştır (Hoek ve Brown, 1980; Mostyn ve Douglas, 2000; Cai, 2010; Sari, 2010; Richards ve Read, 2011; Oku ve Richards, 2014).

Öte yandan, bir dizi araştırmacı m_i sabitini tahmin etmek için tek eksenli sıkışma dayanımını ve çekme dayanımını kullanmıştır (Shen ve Karakus, 2014; Vászrhelyi vd., 2016; Arshadnejad ve Nick, 2016; Wang ve Shen, 2017; Arshadnejad, 2018). Bunlar arasında Arshadnejad ve Nick (2016), daha önce yayınlanmış verileri derleyerek yukarıdan aşağıya sırasıyla mağmatik, sedimanter ve metamorfik kayalar için aşağıda verilen denklemleri önermişlerdir:

$$m_i = e \left[1.2 \left(\frac{\sigma_{ci} - 2\sigma_t}{\sigma_t} \right)^{0.30} \right]$$

$$m_i = e \left[1.3 \left(\frac{\sigma_{ci} - 2.5\sigma_t}{\sigma_t} \right)^{0.26} \right]$$

$$m_i = e \left[1.3 \left(\frac{\sigma_{ci} - 1.5\sigma_t}{\sigma_t} \right)^{0.28} \right]$$

Formüllerde σ_t , kaya malzemesinin çekme dayanımı, σ_{ci} ise tek eksenli sıkışma dayanımını göstermektedir.

m_i değerinin belirlenebilmesi için mevcut üç eksenli deney verisi yoksa Hoek (1990) [Hoek E. Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. Int. J. Rock Mech. Mining Sci. 1990;27:227-9] beş farklı kaya türü için yaklaşık m_i değerlerini aşağıdaki şekilde belirtmiştir:

- (a)** İyi gelişmiş kristal yapısına sahip karbonatlı kayalar (dolomit, kireçtaşı ve mermer) için $m_i \approx 7$;
- (b)** İyi pekişmiş killi kayalar (çamurtaşı, silttaşı şeyl ve sleyt) için $m_i \approx 10$;
- (c)** Sağlam kristallere ve zayıf bağlı kristal yapısına (kumtaşı ve kuvarsit) sahip kumlu kayalar için $m_i \approx 15$;
- (d)** İnce taneli, çok mineralli, magmatik kristalin kayalar (andezit, dolerit, diyabaz ve riyolit vb.) için $m_i \approx 17$;
- (e)** İri taneli, çok mineralli, magmatik ve metamorfik kayalar (amfibolit, gabro, gnays, granit ve kuvars-diyorit vb.) için $m_i \approx 25$.

Öte yandan, m_i değeri Rocscience Inc. tarafından hazırlanan RocData yazılımında (Rocscience Inc., 2020) aşağıdaki tablolarda farklı kaya türleri için sunulan değerler arasından seçilebilir.

Sedimanter Kayaçlar	Mağmatik Kayaçlar	Metamorfik Kayaçlar
Anhidrit 12 ± 2	Aglomera 19 ± 3	Amfibolit 26 ± 6
Breş 19 ± 5	Andezit 25 ± 5	Gnays 28 ± 5
Tebeşir 7 ± 2	Bazalt 25 ± 5	Hornfels 19 ± 4
Kiltaşı 4 ± 2		Mermer 9 ± 3
Konglomera 21 ± 3	Dasit 25 ± 3	Metakumtaşı 19 ± 3
Kristalli kireçtaşı 12 ± 3	Diyabaz 15 ± 5	Migmatit 29 ± 3
Dolomit 9 ± 3	Diyorit 25 ± 5	Fillit 7 ± 3
Grovak 18 ± 3	Dolorit 16 ± 5	Kuarsit 20 ± 3
Jips 8 ± 2	Gabro 27 ± 3	Şist 12 ± 3
Marn 7 ± 2	Granit 32 ± 3	Sleyt 7 ± 4
Mikritik kireçtaşı 9 ± 2	Granodiyorit 29 ± 3	
Kumtaşı 17 ± 4	Norit 20 ± 5	
Şeyl 6 ± 2	Obsidyen 19 ± 3	
Silttaşı 7 ± 2	Peridodit 25 ± 5	
Sparitik kireçtaşı 10 ± 2	Porfiri 20 ± 5	
	Riyolit 25 ± 5	
	Tüf 13 ± 5	

Hoek-Brown (HB) yenilme ölçütünde farklı kaya malzemeleri için m_i sabitinin çizelgede önerilen değerlerden seçilmesi (Rocscience Inc., RocData).

Kaya Türü	Sınıf	Grup	Doku			
			İri	Orta	İnce	Çok ince
SEDİMANTER	Kırıntılı		Konglomeralar (21±3) Breşler (19±5)	Kumtaşları 17±4	Silttaşları 7±2 Grovaclar (18±3)	Kiltaşları 4±2 Şeyller (6±2) Marnlar (7±2)
		Kırıntısız	Karbonatlar	Kristalin kireçtaşı (12±3)	Sparitik kireçtaşları (10±2)	Mikritik kireçtaşları (9±2)
	Evaporitler			Jips 8±2	Anhidrit 12±2	
	Organik					Tebeşir 7±2
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer 9±3	Hornfels (19±4) Metakumtaşı (19±3)	Kuarsit 20±3	
	Az (Düşük) foliasyonlu		Migmatit (29±3)	Amfibolitler 26±6		
	Foliasyonlu		Gnays 28±5	Şistler 12±3	Fillitler 7±3	Sleytler 7±4
MAGMATİK	Plutonik	Açık renkli	Granit 32±3	Diyorit 25±5		
			Granodiyorit (29±3)			
		Koyu renkli	Gabro 27±3	Dolorit (16±5)		
	Norit 20±5					
	Hipabisal		Porfiriler (20±5)		Diyabaz (15±5)	Peridodit (25±5)
	Volkanik	Lav		Riyolit (25±5) Andezit 25±5	Dasit (25±3) Bazalt (25±5)	Obsidyen (19±3)
Piroklastik			Aglomera (19±3)	Breş (19±5)	Tüf (13±5)	

*Konglomeralar ve breşlerin m_i değerleri, bağlayıcı malzemenin özelliğine ve çimontalanma derecesine göre geniş bir aralığa sahip olup, kumtaşlarına benzer değerlerden ince taneli kayalara kadar değişen aralıklar sergileyebilirler

** Bu değerler, tabakalanmaya veya foliasyona dik yönde test edilmiş kaya malzemesi örnekleri içindir.

Eğer zayıflık düzlemi boyunca yenilme meydana gelirse, m_i değeri önemli ölçüde farklılık gösterir

*** Parantez içindeki değerler tahminidir.

Deney verisi olmadığı durumda sağlam kaya malzemesi türlerine göre en son önerilmiş m_i sabiti değerleri (Hoek, 2007)


Kaynak: Hoek, E., Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, 2 (2), 4-16,1995

D: Örselenme Faktörü / The Disturbance Factor




D, kaya kütlesi örselenme faktörüdür ve patlatma hasarı veya gerilme yumuşamasına maruz kalan kaya kütlelerinin örselenme derecesidir. Örselenmemiş kaya kütleleri için 0'dan başlayarak, çok örselenmiş kayalarda 1'e kadar değişen aralıkta değerler alır (0≤D≤1).



Programda kaya kütlelerinin örselenme faktörü için ilgili kutucuğa 0 ile 1 (dahil) arasında bir değer girilir. "0" bozulmamış, "1" değeri ise örselenmenin en çok olduğu değeri ifade etmektedir.

Kaya kütleleri içinde açılan yüzeysel temel kazılarında mekanik kazı yöntemi uygulanacağı için örselenme faktörü olarak $D=0$ değerini girebilirsiniz. Derin kazı yapıldığında ise zemin üzerinden ciddi bir yük kalkacağı için mekanik kazı yapılsa bile durum değişecektir. Taşıma gücü hesaplamalarında kullanılacak kütle parametreleri (m_b , s , a) bu şekilde hesap edilmiştir.

D değeri yerleşik grafiklerden ve tablodan kazı tipine ve jeolojik koşullara bağlı olarak uygun şekilde belirlenebilmektedir. Programda bu grafiklere ve tablolara, turuncu renkli giriş parametresi düzenleme kutularının yanında bulunan seçici düğmesi () seçilerek erişilebilir. "Seç" düğmesini seçtiğinizde, kullanıcının istenen parametre için uygun bir değer belirlemesini sağlayan bir tablo veya grafik görünür. İletişim kutusundan bir değer seçildiğinde, değer kullanıcı tarafından giriş verileri alanına yüklenir ve hesaplaması otomatik olarak yapılır.

Şevlerde ve Tünellerde 2 ayrı örselenme faktörü vardır. Şevlerde yük kalktığı için örselenme faktörü yüksektir. Unutulmaması gereken bir husus ise örselenme faktörünün tünel kazısından 0,5 – 2,0 m (maksimum 3 metre) arası mesafe için kullanılması gerektiği ana kaya kütlelerine uygulanmaması gerektiğidir.

Kaya kütlelerinin görünümü	Kaya kütlelerinin tanımı - Örselenme Durumu	D için önerilen değer
<p>-TÜNEL-</p> 	Yüksek kaliteli denetimli patlatma veya tünel açma makinesiyle yapılan kazı tüneli çevreleyen kaya kütlelerinde en düşük derecede örselenmeye neden olur.	D = 0
	Düşük kaliteli kaya kütlelerinde (patlatma yapılmamış) mekanik olarak veya elle yapılan kazı, tüneli çevreleyen kaya kütlelerinde en düşük derecede örselenmeye neden olur. Sıkışan zemin sorunu önemli derecede taban kabarmasına yol açar ve soldaki fotoğraftaki gibi geçici bir taban betonu dökülmediği takdirde önemli düzeyde örselenme olur.	D = 0 D = 0.5 Taban betonu (invert) yok
	Çok kötü kaliteli patlatma sert kaya tünellerinde çevre kayasının 2-3 m içine nüfuz edecek şekilde şiddetli yerel hasara neden olur.	D = 0.8

<p align="center">-ŞEVLER-</p> 	<p>İnşaat mühendisliğiyle ilgili şev kazılarında küçük ölçekli patlatma kaya kütlelerinde orta derecede hasara neden olur; özellikle denetimli patlatma yapılırsa kaya kütlelerinin görünümü soldaki fotoğraftaki gibidir. Bununla birlikte, gerilme rahatlaması da bir miktar örselenme yaratır.</p>	<p>D = 0.7 İyi patlatma</p> <p>D= 1.0 Kötü (zayıf) patlatma</p>
	<p>Çok uzun açık işletme şevleri, üretim amaçlı aşırı patlatmadan ve örtü kazısı nedeniyle oluşan gerilme azalımından dolayı önemli düzeyde örselenmeye maruz kalırlar. Daha yumuşak bazı kayalarda kazı işlemi ripperleme ve dozer ile yapılabilir ve bu durumda şevin maruz kalacağı örselenmenin derecesi daha düşük olur.</p>	<p>D= 1.0 Üretim patlatması</p> <p>D = 0.7 Mekanik kazı</p>

Örselenme faktörü D'nin tahmini için kılavuz tablo (Hoek, vd., 2002; Hoek, 2007)

Hoek vd. 2002'de küçük ölçekli patlatmalar için D=0.7 olarak verilirken Hoek vd. 2018'de D=0.5 şeklinde verilmiştir.

Kaya kütlelerinin görünümü	Kaya kütlelerinin tanımlanması	D için önerilen değer
	<p>İnşaat mühendisliğindeki küçük ölçekli patlatmalar, patlatmanın özellikle fotoğrafın sol tarafındaki gibi kontrollü yapılması halinde, orta derecede kaya kütleleri örselenmesine yol açar. Ancak, gerilme rahatlaması da bir miktar örselenme oluşturur.</p>	<p>D = 0,5 İyi patlatma D = 1,0 Kötü patlatma</p>
	<p>Bazı yumuşak kayalarda kazı işlemi dozer ile sıyırma şeklinde yapılabilir; şevlerde oluşan zarar derecesi düşüktür.</p> <p>Çok büyük açık ocak şevleri kapsamlı üretim patlatmasından ve ayrıca örtünün kaldırılmasından dolayı önemli derecede örselenmeye maruz kalırlar.</p>	<p>D = 0,7 Mekanik kazı</p> <p>D = 1,0 Üretim patlatması</p>

Bunların yalnızca kılavuz bilgiler olduğunu ve kullanıcının verilen değerleri dikkatle uygulaması tavsiye edilir. Bununla birlikte, herhangi bir tasarım için gerçekçi bir başlangıç noktası sağlamak

için kullanılabilirler ve kazının gözlemlenen veya ölçülen performansının tahmin edilenden daha iyi olduğu sonucu ortaya çıkarsa, örselenme faktörü değeri azaltılabilir.

Patlatma Düzeltmesi (A_B)		Uygulanabilir Terim	Düzeltilme Katsayısı
1	Makineyle kazı	Hasarsız	1.0
2	Denetimli patlatma	Çok az hasar	0.94-0.97
3	İyi klasik patlatma	Orta derecede hasar	0.90-0.94
4	Kötü klasik patlatma	Şiddetli hasar	0.80-0.90

Başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme (A_w)		
Koşul		Düzeltilme Katsayısı
1	Zayıflık düzlemi yok	1.00
2	Sert dayklar	0.90
3	Yumuşak cevher zonları	0.85
4	Ana kaya/cevher dokanak zonları	0.80
5	Kıvrımlar	0.75
6	Fay zonları	0.70

Patlatma ve başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme katsayıları (Kendorski vd., 1983)

E_i : Kaya malzemesi statik elastisite modülü

Kaya kütesine ait deformasyon modülü (E_m) jeomekanik problemlerde önemli bir girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Ancak bu parametrenin arazi deneyleriyle yerinde belirlenmesi hem çok zor hem de çok maliyetlidir. Kaya malzemesiyle birlikte süreksizlikleri de içermesi nedeniyle, kaya kütlelerinden laboratuvarında deney yapılabilecek boyutlarda büyük örnekler alınamamaktadır. Bu sebeple çeşitli araştırmacılar tarafından kaya kütlelerinin deformasyon modülünü tahmin amacı ile literatürde birçok ampirik eşitlik önerilmiştir (Bieniawski, 1978; Serafim ve Pereira, 1983; Nicholson ve Bieniawski, 1990; Mitri, Edrissi ve Henning, 1994; Read, Richards ve Perrin, 1999; Hoek, Carranza-Torres ve Corkum, 2002).

Eklemlili kaya kütesinin elastisite modülünün (E_{tm}) belirlenmesi için kaya malzemesinin elastisite modülünün bilinmesi gerekir. Programda bu değer (E_i) kullanıcı tarafından girilmelidir. Programda sadece iki yöntem verilmiştir. Birincisi M_R modül oranı değeri biliniyorsa program tarafından hesaplanan ($M_R \cdot \sigma_{ci}$) değeri kullanıcı tarafından E_i kutucuğuna yazılabilir.

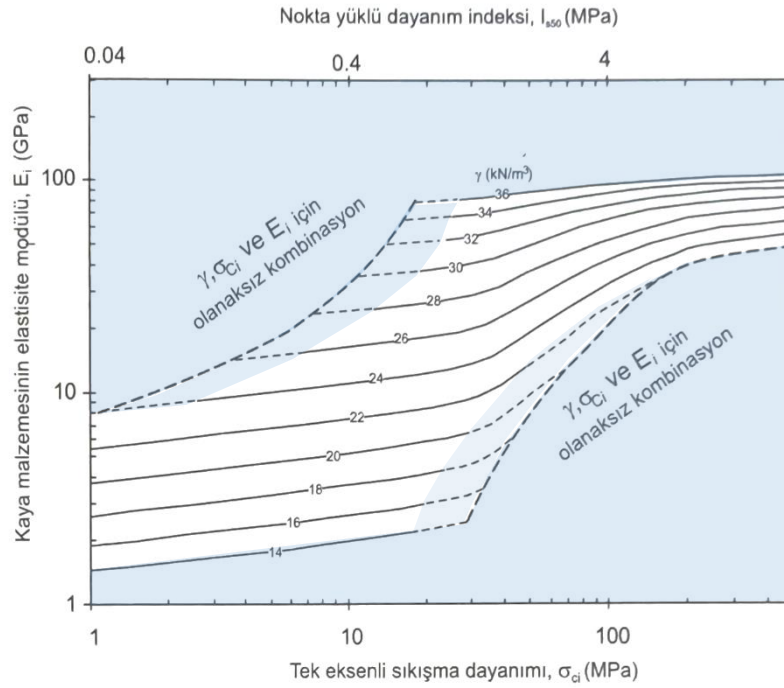
Excel	M_R	650	$E_i = 10400 \text{ MPa}$	$E_i = M_R \cdot \sigma_{ci}$
	[abaktan] E_i	10.5 GPa	[Sönmez ve diğ., 2006]	

M_R : Modül oranı

E_i : Kaya malzemesi elastisite modülü

[opsiyonel] E_i	10500	MPa	Kaya Malzemesi Elastisite Modülü
-------------------	-------	-----	----------------------------------

Bir diğer yöntem, Sönmez vd., 2006 tarafından verilen ilgili abaktan elde edilen E_i değeri (GPa) de buraya yazılabilir.



ANN (yapay sinir ağı) kullanılarak hazırlanan σ_{ci} ve γ 'ya bağlı olarak E_i 'nin belirlenmesinde kullanılan abak (Sönmez vd., 2006).

Yukarıdaki abak kayacın tek eksenli sıkışma dayanımı ve birim hacim ağırlık değerine bağlı olarak kayacın elastisite modülünü bulabilmek için (E_i 'in hesaplanması) kullanılabilir. Bu değeri "[opsiyonel] E_i " kutucuğuna yazmanız gerekir. Program yalnız bu kutucuğa yazılan E_i değerini hesaba dahil etmektedir.

[opsiyonel] E_i | 17000 MPa | Kaya malzemesi elastisite modülü

Kaynak: Sönmez, H., Nefeslioğlu, H. A., Gökçeoğlu, C., and Kayabaşı, A., 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, 2006.

Kullanıcılar hangi yöntemi kullanacaklar ise o yöntemin verisi kutucukta kalmalıdır. Diğer yöntemin verisini silmelidirler.

Bu değer (E_i) programdaki taşıma gücü hesap yöntemlerinde doğrudan kullanılmamaktadır. Kullanıcıların oturma değeri ve diğer amaçlar için örneğin sayısal hesaplamalar için (tünel ve şev stabilitesi çalışmalarında) kullanabilmesi amacıyla hazırlanmıştır.

Modül oranı M_R değerinin tablodan alınması:

Farklı kaya türleri için kaya malzemesi deformasyon modülünün (E_i) tahmini için kullanılacak modül oranı (M_R) değerleri aşağıdaki tabloda sunulmaktadır.

Sedimanter Kayaçlar	Mağmatik Kayaçlar	Metamorfik Kayaçlar
Anhidrit 350 ± 0	Aglomera 500 ± 100	Amfibolit 450 ± 50
Breş 290 ± 60	Andezit 400 ± 100	Gnays 525 ± 225
Tebeşir 1000 ± 0	Bazalt 350 ± 100	Hornfels 550 ± 150
Kiltaşı 250 ± 50	Breş 500 ± 0	Mermer 850 ± 150
Konglomera 350 ± 50	Dasit 400 ± 50	Metakumtaşı 250 ± 50
Kristalli kireçtaşı 500 ± 100	Diyabaz 325 ± 25	Migmatit 375 ± 25
Dolomit 425 ± 75	Diyorit 325 ± 25	Fillit 550 ± 250
Grovak 350 ± 0	Dolorit 350 ± 50	Kuarsit 375 ± 75
Jips 350 ± 0	Gabro 450 ± 50	Şist 675 ± 425
Marn 175 ± 25	Granit 425 ± 125	Sleyt 500 ± 100
Mikritik kireçtaşı 900 ± 100	Granodiyorit 425 ± 25	
Kumtaşı 275 ± 75	Norit 375 ± 25	
Şeyl 200 ± 50	Peridodit 275 ± 25	
Silttaşı 375 ± 25	Porfiri 400 ± 0	
Sparitik kireçtaşı 700 ± 100	Riyolit 400 ± 100	
	Tüf 300 ± 100	

M_R değerinin tahmini olarak alınması için referans tablo (Rocscience Inc., RocData v.5)

Laboratuvar Verisi Girdisi ve Çıktısı:

Üç eksenli laboratuvar deney verisi/Triaxial Test Data:



Sağlam kaya malzemesi üzerinde yapılan farklı yanal gerilme (σ_3) düzeylerinde uygulanan üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçlarıyla farklı regresyon yöntemlerini kullanarak kayaca ait ortalama σ_{ci} ve m_i değerleri belirlenebilmektedir. Program kullanıcılardan en uygun regresyon yöntemini kullanarak σ_{ci} ve m_i değerlerini belirlemesini önermektedir. Regresyon yöntemlerinden 3 tanesi (Modified Cuckoo, Levenberg-Marquardt, Simplex) Eğri Uyumu Metodu hücrelerinde verilmiş olup kullanıcılar farklı bir istatistiksel yöntemle hesaplama yaptılarsa bu yöntemin adının listede görünmesi için Excel'de E60 hücrelerine yazabilirler. Laboratuvar deney veri çiftlerinin belirtilen regresyon yöntemlerine göre değerlendirilmesi sonucu elde edilen σ_{ci} ve m_i değerleri oldukça farklı sonuçlar vermektedir. Program bu hesaplamayı yapmayı kullanıcıya bırakılmıştır.

Programa laboratuvar verileri, hazırlanan hesap tablosu kullanılarak doğrudan girilebilmektedir.

Kullanılan yöntem listedeki yöntemlerden farklı ise yöntemin adını Excel'de E60 hücrelerine yazınız. Yöntemin adı listede yer alacaktır.

	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)
1	1.00	45.30
2	1.50	46.80
3	2.00	49.20
4	3.00	50.40
5	4.00	54.50
6	5.00	60.00
7	6.00	65.00

σ_3 : Yanal gerilim
 σ_1 : Eksenel gerilim

Üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden elde edilen eksenel ve yanal gerilme veri çiftleri (σ_1 - σ_3) için laboratuvar veri girişi menüsü

LAB VERİSİ σ_{ci} : 56.7 MPa m_i : 21.1

Laboratuvar verisi var Laboratuvar veri girişi

Eğri Uyumu Metodu: Doğrusal regresyon

Laboratuvar verisi kullanılarak hesaplanan σ_{ci} ve m_i değerleri

Veriler, iletişim kutusundaki tabloya veri çiftleri şeklinde doğrudan girilebildiği gibi panodan da yapıştırılabilir. Kullanıcılar laboratuvar verilerini girmek için “Laboratuvar veri girişi” kutusuna tıkladıktan () sonra ekrana “Laboratuvar verileri” penceresi gelecektir. Bu pencerede veri girişi yapılacak deney sayısını arttırma/eksiltme düğmelerine basarak belirledikten sonra σ_3 ve σ_1 veri çiftlerinin girişini yapınız. “Kaydet” butonuna basarak verileri kaydederek programdan çıkabilirsiniz. Kaydet butonuna basıldığında “Laboratuvar verisi var” kutucuğu işaretli hale gelecektir. “Laboratuvar verisi var” kutucuğundaki işareti (tiki) kaldırırsanız girilen bütün laboratuvar verileri silinecektir.

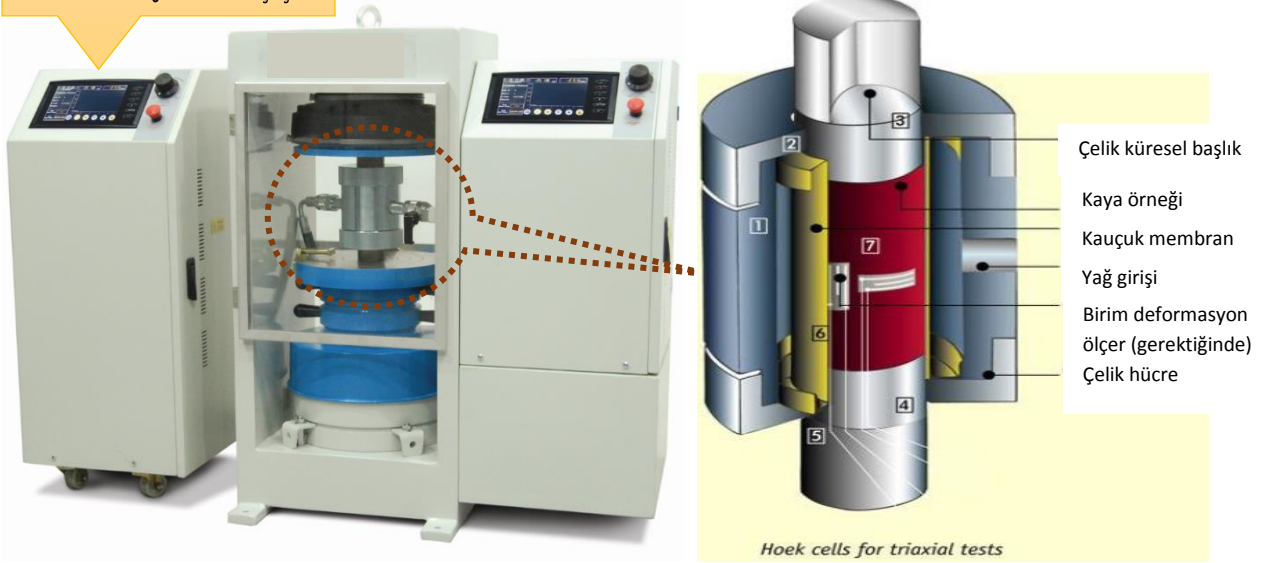
Hoek-Brown yenilme ölçütünün uygulanması için gerekli olan iki parametre sağlam kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_{ci}) ve sağlam kaya malzemesinin m_i katsayısıdır. İdeal olarak, bu iki parametre dikkatlice hazırlanmış en az 5 adet örnek üzerinde yapılan üç eksenli basınç dayanımı deneyleri ile belirlenmelidir. Testler, σ_3 çevre basıncı değeri 0’dan başlayarak tek eksenli sıkışma dayanımının yarısına kadar kademeli olarak arttırılarak sınırlayıcı bir gerilim aralığında yapılmalıdır. Analizde beş veri noktası analize dahil edilmelidir.

Kullanıcılarda bu tür laboratuvar test düzenekleri mevcutsa, üç eksenli laboratuvar test verilerinden σ_{ci} ve m_i değerlerinin elde edilmesi önerilir. Üç eksenli laboratuvar test düzenekleri mevcut değilse, σ_{ci} ve m_i değerleri, seçici düğmesi () kullanılarak farklı kaya malzemelerine göre seçilmesine olanak sağlayan tablolardan yaklaşık olarak tahmin edilebilir.

Aşağıda üç eksenli basınç dayanımı deney düzeneği ile ilgili Şekil(ler) bilgi amaçlı verilmiştir.

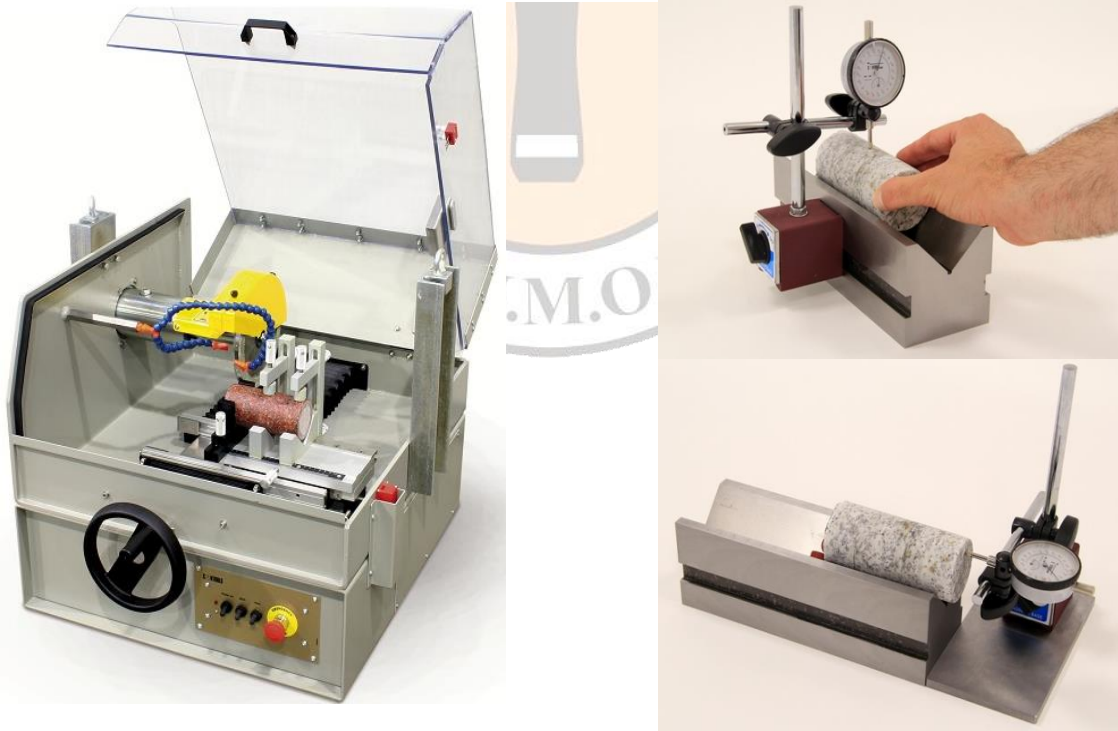
Genel Bilgi:

Otomatik basınç sistemi,
Hoek üç eksenli deney
hücrelerinde yanıl basınç için



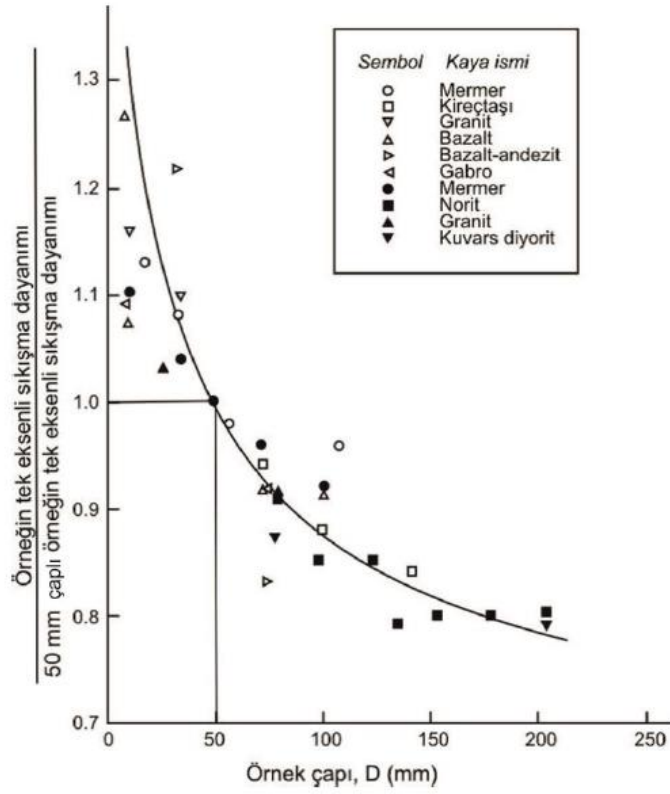
a) Hoek hücresi (NX çaplı karot için) b) Hücrenin iç yapısı (Hoek, 2007).

Üç eksenli basınç dayanımı deneyi için düşük hız ayarlı servo-kontrollü presin kullanılması tavsiye olunur (Özdemir, G)



Laboratuvar tipi karot kesme ve düzeltme makinası, b) TS EN ve ASTM standartlarında basınç uygulanacak yüzeylerin düzlükten sapması en fazla 0.05 mm, yan yüzün alt ve üst yüzeylere göre düzlükten sapması en fazla 0.5° olmalıdır (Özdemir, G).

Üç eksenli deneyler için kullanılacak kayaç örneklerinin boy çap oranı (2.5-3 aralığında) önemli olup deney sonuçlarını etkilemektedir. Kaya dayanımı üzerinde örnek boyutunun etkisi literatürde tartışılmakta örnek boyutunun artışı ile önemli oranda dayanım düşüşünün olduğu bilinmektedir. Ülkemizde çoğu jeoteknik etütlerde HQ gibi karotiyerlerle karot alınmaktadır (karot çapları 63 mm).



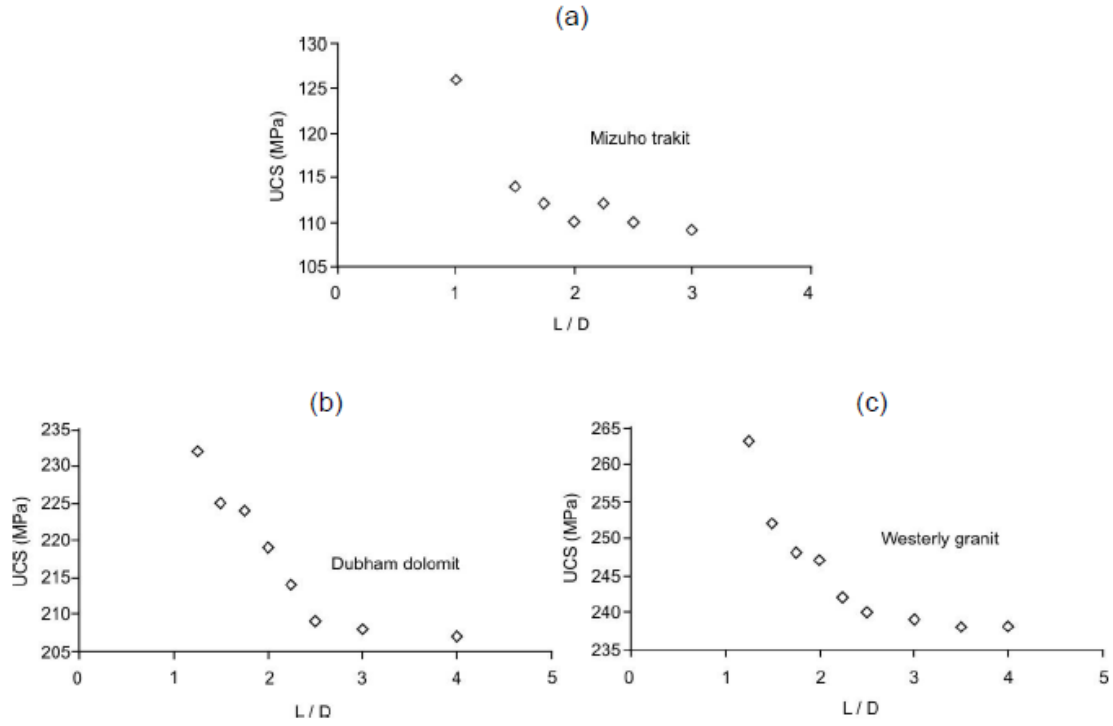
Boyut farklılığının kayanın dayanımı üzerindeki etkisi

$$\sigma_{cd} = \sigma_{c50} \left(\frac{50}{d} \right)^{0.18}$$

σ_{cd} : d mm çaplı bir kaya örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı

σ_{c50} : 50 mm çaplı bir kaya örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı

d : Deneyde kullanılan kaya örneğinin çapı (mm)



Mogi tarafından üç kaya örneği için belirlenen L/D-UCS ilişkisi

Türetilmiş (Hesaplanan) Parametreler:

Değişik amaçlar için yapılacak modellemelerde (Temeller, yeraltı kazıları ve şevlerin dizaynında), jeolojik ortamın kütle dayanımı ve deformasyonu parametrelerine gereksinim olmaktadır. Bu amaçla eklemli kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin tahmini için Hoek ve Brown görgül yenilme ölçütünün Hoek vd. (2002) tarafından önerilen yöntemin son düzenlemesine göre tanımlanmıştır.

Hoek ve Brown, çalışmalarının sonucunda en büyük ve en küçük efektif asal gerilmeler ile makaslama dayanımı arasındaki ilişkinin eğrisel olduğunu belirlemişler ve aşağıdaki yenilme ölçütünü önermişlerdir.

Kaya kütlesi için **genelleştirilmiş Hoek – Brown yenilme ölçütü** aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Burada sırasıyla σ'_1 ve σ'_3 en büyük (major) ve en küçük efektif asal gerilmeleri (minor), σ_{ci} kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımını, m_b boyutsuz kaya kütlesi sabiti, s ve a boyutsuz malzeme sabitleri, GSI jeolojik dayanım indeksini temsil etmektedir. İyi kenetlenmiş ve köşeli kaya parçalarından oluşan, iyi kaliteli kaya kütlelerinde eşitlikteki "a" değeri 0.5 alınabilir.

Hoek-Brown boyutsuz malzeme sabitleri (m_b , s ve a parametreleri):

Verilen bir dizi girdi parametresi (σ_{ci} , GSI, m_i ve D) için program, aşağıda belirtilen eşitlikleri kullanarak Genelleştirilmiş Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü parametrelerini (m_b , s ve a) hesaplar. Sonuçlar, aşağıda gösterildiği gibi görüntülenir.

Hoek-Brown parametreleri:

Girdi parametreleri	
GSI	40
σ_{ci}	96.8 MPa
m_i	6.8
D	0.1

Çıktı parametreleri (Hoek-Brown kaya kütle sabitleri)	
a	0.5118
s	0.00101
m_b	0.7127

Burada, m_b =kırıksız kaya için malzeme sabiti olan m_i 'nin aşağıdaki gibi ifade edilen azaltılmış değeridir:

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14 \cdot D}\right)}$$

Kaya kütlesi için s ve a sabitleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

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

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

Burada;

m_b : Kaya kütlesi için boyutsuz malzeme sabiti

m_i : Kırıksız kaya malzemesi için boyutsuz malzeme sabiti

GSI : Jeolojik dayanım indeksi

D : Kaya kütlesinin patlatma hasarı ve gerilme rahatlamasıyla maruz kaldığı örselenme derecesine bağlı bir faktördür. Örselenmemiş yerinde kaya kütleleri için 0'dan başlayarak, çok örselenmiş kayalarda 1'e kadar değişen bir faktör; D için uygun değerleri seçmeye dair klavuz bilgiler verilmiştir.

s ve a : Kaya kütlesinin özelliklerine bağlı olan sabitler

Elde edilen bu değerler ile kaya kütlesi kohezyon (c') ve sürtünme açısının (ϕ') tahmini ölçütün 2002 yılında geliştirilen versiyonunda önerilen aşağıdaki eşitlikler ile yapılabilmektedir.

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \text{ derece}$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}} \text{ kPa}$$

Bu eşitliklerde değerler yerlerine konulduğunda, kaya kütlelerinin parametreleri hesaplanmış olur. Burada; $\sigma'_{3n} = \sigma_{ci}/4$ olarak önerilmiştir.

Gerilim Analizleri:

Eşdeğer Mohr-Coulomb Parametreleri:

Hoek-Brown yenilme ölçütü parametrelerine (m_b , s ve a) ek olarak program, kaya kütleleri için her zaman eşdeğer Mohr-Coulomb parametrelerini (kohezyon ve sürtünme açısı) hesaplar. En uygun Mohr-Coulomb dayanım zarfı, kullanıcının çalışma yaptığı uygulamaya göre tanımlayabileceği bir gerilim aralığı üzerinden belirlenir. Bu durum yeraltı kazıları (örneğin tünellerin açılması) veya şev duraylılığı hesaplarında değişiklik gösterir. Ölçütün eklemeli kaya kütleleri içinde açılmış yapı temellerinde taşıma gücünün belirlenmesi konuları dışında şevlerin duraylılığı ve tünellerin açılması konularına ilişkin çalışmalarda kaya kütleleri parametrelerinin tahmininde kullanılabilmesi amacıyla "Gerilim Aralıkları" programa dahil edilmiştir.

Gerilim Aralıkları

Analiz Tipi: Genel

Lütfen sığ temeller için 'Genel' seçimini yapınız ve değer varsa siliniz! Bu seçenek yalnızca Genelleştirilmiş HB yenilme kriteri için kullanılabilir. Bu durumda σ_{3max} otomatik olarak $\sigma_{ci}/4$ 'e ayarlanacaktır.

Temel kazıları için "Genel" seçeneğinin işaretlenmesi

Gerilim Aralıkları

Uygulama: Şev Hşev: 25.0m Şev yüksekliğini giriniz.

$\alpha=45^\circ$ H=25m

Şev duraylılığı için "Şev" seçeneğinin işaretlenmesi

Gerilim Aralıkları

Uygulama: Tünel Hörtü: 50.0m Tünel derinliğini giriniz.

H=50m

Yeraltı kazıları için "Tünel" seçeneğinin işaretlenmesi ve 50.0 m'lik örtü yüksekliği değeri baz alınmıştır.

Eğrisel yenilme zarfına çizilen Mohr-Coulomb teğetine göre elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri aşağıda verilmiştir.

Eşdeğer MC Parametreleri

c	0.401	MPa
ϕ	49.6	derece

Hesaplanan eşdeğer Mohr-Coulomb makaslama dayanımı parametreleri

Kaya Kütleleri Parametrelerinin Hesaplanması/Rock-mass Parameters Calculation:

Yukarıda detaylarıyla açıklandığı gibi σ_{ci} , m_i ve GSI parametrelerinin tanımlanmasından sonraki adım, kaya kütlelerinin mekanik özelliklerini tahmin etmektir.

Program (*jmoData*), Hoek-Brown girdi parametreleri belirlendikten sonra kaya kütlesi için çekme dayanımı, tek eksenli sıkışma dayanımı, kütleli dayanım ve deformasyon modülü gibi kaya kütlesi parametrelerini de hesaplar.

Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü için aşağıdaki kaya kütlesi parametreleri hesaplanmıştır:

Kaya Kütle Parametreleri:					
σ_t :	-0.008	MPa			
σ_c :	0.3074	MPa	E_{rm} :	1275	MPa
σ_0 :	0.000	MPa	σ_{3max} :	3.00	MPa
σ_{cmass} :	1.67	MPa	σ_{3n} :	0.250	MPa
			Elastisite Modülü Tahmin Yöntemi: Generalized Hoek & Diederichs (2006)		

Seçim yapınız

Hesaplanan Hoek-Brown kaya kütlesi parametreleri

σ_t (Kaya kütlesi çekme dayanımı/Tensile strength):

Çekme dayanımı da şu şekildedir:

$$\sigma_t = -\frac{s \cdot \sigma_{ci}}{m_b} \text{ MPa}$$

Yukarıdaki eşitlik,

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Eşitliğindeki $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$ kabul edilerek elde edilmektedir (σ_t = iki eksenli çekme dayanımı). Bu durum iki eksenli çekmeyi temsil eder. Hoek, kırılğan malzemeler için tek eksenli çekme dayanımının iki eksenli çekme dayanımına eşit olduğunu ifade eder.

Ölçüt tarafından çekilme dayanımı için verilen eşitlik;

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{ci}}{2} \left(m_i - \sqrt{m_i^2 + 4s} \right) \text{ MPa}$$

bağntısında çekilme dayanımı işaret olarak negatif alınarak bulunabilir.

Normal ve makaslama gerilmeleri aşağıda verildiği gibi asal gerilmeler ile ilişkilidir ve aşağıdaki denklemlerle ifade edilir (Balmer, 1952).

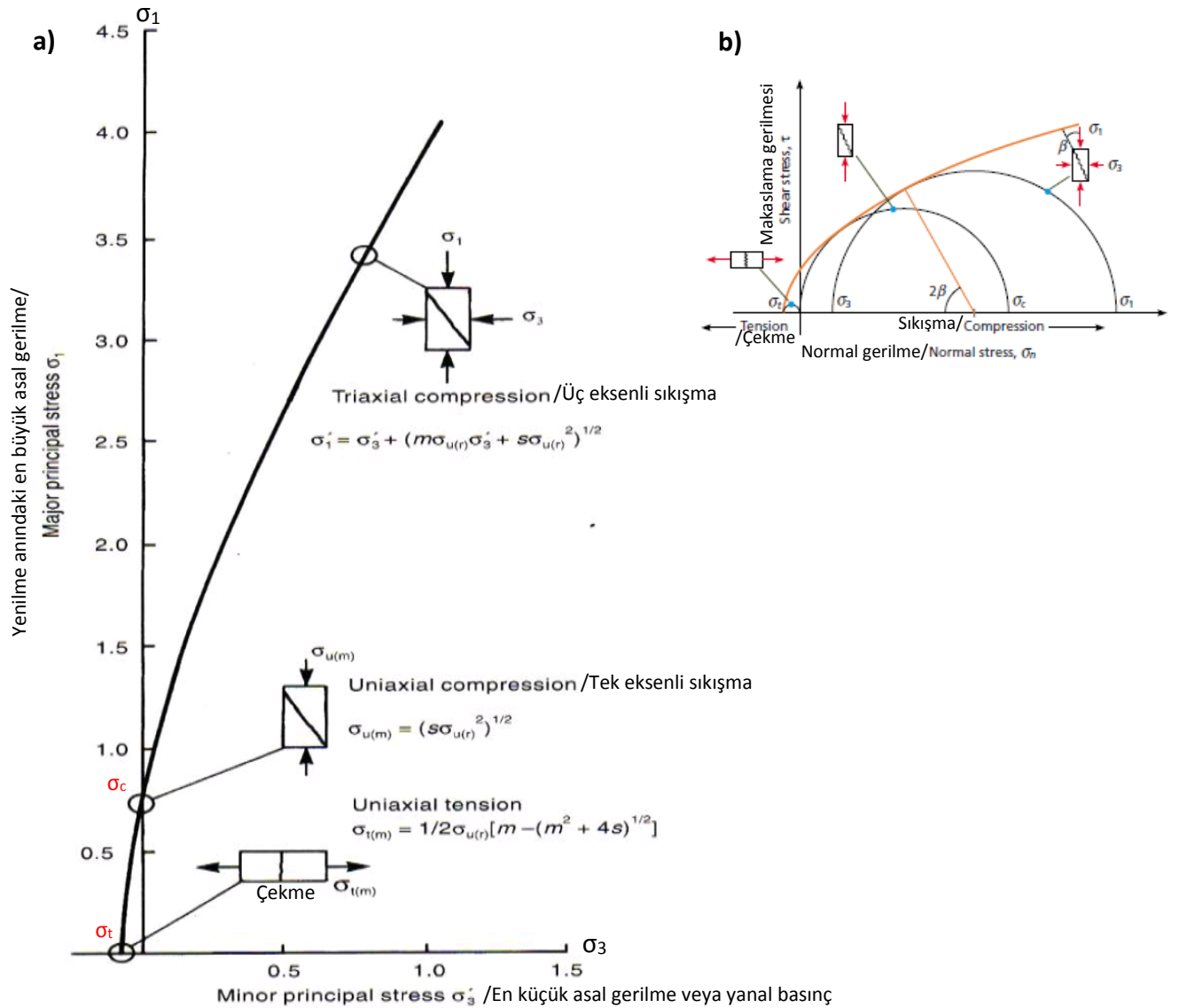
$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cdot \frac{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} - 1}{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} + 1},$$

$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{d\sigma'_1/d\sigma'_3}}{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} + 1}$$

Burada;

$$\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} = 1 + am_b \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}$$

olarak ifade edilir.



Kırıksız kayada farklı gerilme koşulları için a) asal gerilmelerin ve b) normal ve makaslama gerilmelerinin bir fonksiyonu olarak Hoek-Brown yenilme ölçütü için yenilme zarfları.

σ_c (Kaya kütlesinin tek eksenli sıkışma dayanımı/Uniaxial compressive strength):

Kaya kütlelerine ait tek eksenli sıkışma dayanımı, aşağıdaki denklemden $\sigma'_3=0$ alınarak elde edilir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (\text{MPa}) \quad \text{Hoek vd. (2002)}$$

σ_{ci} : Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)

σ_{cm} (Kaya kütlesinin global basınç dayanımı) / Global strength of rock mass

Bazı durumlarda kaya kütlesi tek eksenli sıkışma dayanımının yanı sıra, kaya kütlesinin genel dayanımının da ortaya konması gerekebilir. Bu durum Hoek ve Brown (1997) tarafından genel dayanımı olarak ifade edilmektedir ve bu değer Mohr-Coulomb ilişkisi ile aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

Formülde c' ve ϕ' değerleri $\sigma_t < \sigma'_3 < \sigma_{ci}/4$ gerilme aralığından belirlenir ve kaya kütlesi dayanımı σ'_{cm} için aşağıdaki değeri verir.

$$\sigma'_{cm} = \frac{\sigma_{ci} \cdot [m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1}}{2(a+1)(a+2)} \quad \text{MPa (Hoek vd., 2002)}$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

E_{rm} (Eklemlili kaya kütlesi deformasyon modülü)

Hoek-Brown yenilme ölçütü ile doğrudan ilişkili olmasa da, bir kaya kütlesinin deformasyon modülü, deformasyonları içeren herhangi bir kaya kütlesi davranışının analizinde önemli bir girdi parametresidir. Bu parametrenin doğrudan belirlenmesine yönelik arazi deneyleri zaman alıcı ve pahalıdır. Aynı zamanda bu deneylerin sonuçları sorgulamaya da açıktır.

Kaya kütlelerinin deformasyon modülünü belirlemek için aşağıdaki farklı araştırmacılar tarafından önerilen farklı denklemler kullanılmıştır:

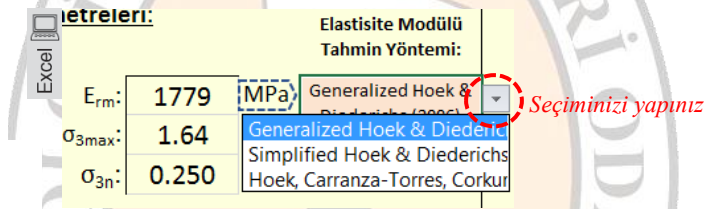
NOT: Çekme ve basınç dayanımları Hoek, Carranza-Torres ve Corkum'da (2002) verilen denklemler kullanılarak hesaplanır. Kaya kütlesinin basınç dayanımı için σ_c ve σ_{cm} olmak üzere iki değer kullanıldığına dikkat ediniz. Bu iki parametrenin nasıl tanımlandığı ve nasıl kullanılacakları ile ilgili olarak Hoek, Carranza-Torres ve Corkum (2002) Kaya Kütle Dayanımı'na bakabilirsiniz.

Kaya kütlesi deformasyon modülü, Elastisite Modülü Tahmin Yöntemine göre hesaplanır. Ayrıntılar için Kaya Kütle Elastisite Modülü konusuna bakınız.

Bir kaya kütlelerinin deformasyon modülü (Young Modülü) genellikle iyi bilinen veya kolayca ölçülebilen bir parametre değildir. Bununla birlikte, farklı sayısal analiz türleri için gerekli bir girdi parametresidir (örneğin Sonlu elemanlar yöntemi gerilme analizi), bu nedenle deformasyonları içeren herhangi bir analiz için gerçekçi deformasyon modülü değerleri elde etmek çok önemlidir.

Bazı araştırmacılar, sınıflandırma şemaları temelinde kaya kütlesi deformasyon modülünü tahmin etmek için deneysel ilişkiler önermiştir. Programda bulunan yöntemler en son bulguları temsil eder ve GSI kaya kütlesi sınıflandırma abağına ve Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütüne dayanır. Programdaki kaya kütlesi modülü tahmini için aşağıdaki üç seçenektten birini seçebilirsiniz:

- Generalized Hoek & Diederichs (2006)
- Simplified Hoek & Diederichs (2006)
- Hoek, Carranza-Torres, Corkum (2002)



Programda uygulanabilir denklemler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Generalized Hoek & Diederichs (2006) Denklemi:

Genelleştirilmiş Hoek ve Diederichs denklemi (Hoek ve Diederichs, 2006), kaya kütle modülünü hesaplamak için sağlam kayanın, GSI ve D değerini kullanır. Deformasyon modülünün birimi, MPa cinsinden hesaplanır.

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{\frac{60+15D-GSI}{11}}} \right) \quad (\text{Hoek ve Diederichs, 2006})$$

Burada;

E_i : Sağlam kaya malzemesinin deformasyon modülüdür ve MPa cinsinden hesaplanır

D : Örselenme faktörü (kaya kütlelerinin tahribatını ölçen bir faktördür) ($0 \leq D \leq 1$)

GSI : Jeolojik dayanım indeksi, GSI sınıflama sistemi abağından belirlenmektedir.


Kaynak: Hoek E, Diederichs M.S., Empirical Estimation of Rock Mass Modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2006; 43(2):203-15

Bu yöntemi seçerseniz, Hoek-Brown Giriş Parametreleri bölümündeki kenar çubuğuna sağlam kayanın deformasyon modülü (E_i) değerini girmeniz gerekir.

[opsiyonel] E_i 17000 MPa Kaya malzemesi elastisite modülü

Sağlam kaya modülünü doğrudan girebilir veya dolaylı yoldan hesaplamak için modül oranını (M_R) seçebilirsiniz. Kaya malzemesi modülü (E_i), sağlam kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_{ci}) ile çarpılan modül oranına ($M_R/Modulus Ratio$) eşittir ($E_i = M_R \cdot \sigma_{ci}$).

Modül oranı (M_R) seçeneğini kullanıyorsanız, E_i değeri, kenar çubuğuna girilen mevcut M_R ve σ_{ci} değerleri kullanılarak otomatik olarak hesaplanır (örneğin, σ_{ci} veya M_R değerlerini değiştirirseniz, E_i otomatik olarak değişecektir).

 $E_i = 2400$ MPa

İPUÇU: Kaya tipine göre modül oranını tahmin etmek için M_R düzenleme kutusunun yanındaki Seçici düğmesini kullanabilirsiniz.

Basitleştirilmiş Hoek & Diederichs (2006) Denklemi:

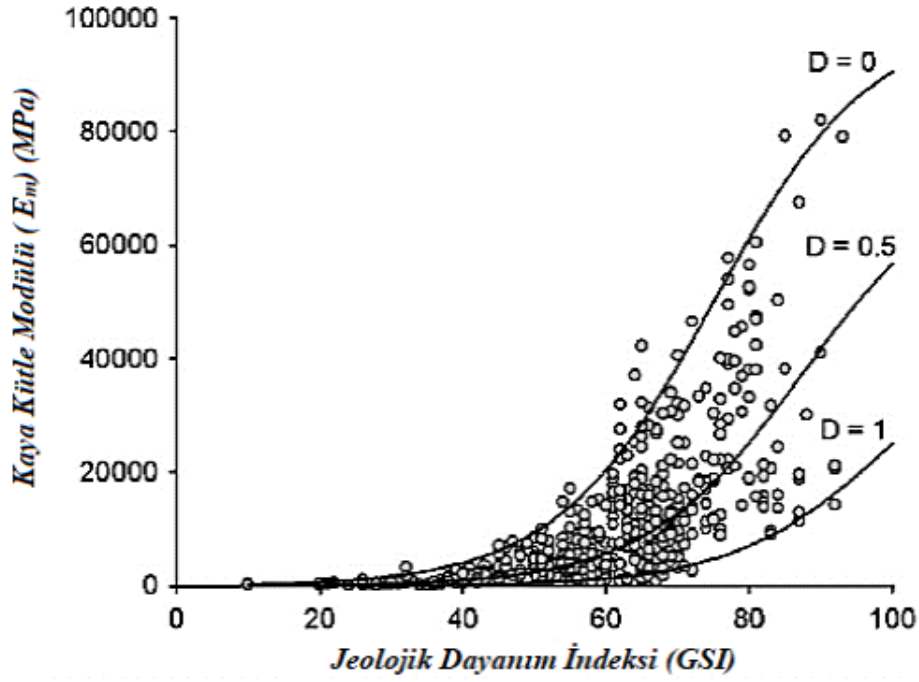
Kaya kütle modülü (E_{rm}) için Basitleştirilmiş Hoek ve Diederichs denklemi (Hoek ve Diederichs, 2006), girdi parametreleri olarak yalnızca GSI ve D'yi (örselenme faktörü) gerektirir. Modül, MPa cinsinden hesaplanır.

$$E_{rm}(MPa) = 100000 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{\left(\frac{75+25D-GSI}{11}\right)}} \right)$$

Bu denklem, sağlam kaya modülünün güvenilir değerleri mevcut olmadığı durumda; yani tek eksenli sıkışma dayanımından elastisite modülü belirlenmemiş ise kullanılabilir.

Bu kütle deformasyon modülü hesap yöntemi olarak tercih edilmemelidir. Örneğin tuf gibi zayıf dayanımlı kayaç malzemelerinde GSI değeri yüksek çıkabilir. Bunlarda sağlam kayaca (*intact*) ait elastisite modülü (E_i) değerini koymazsanız kütle deformasyon modülü çok yüksek çıkar. O nedenle bunları kullanırken bu sınırlamaları dikkate almak gerekir.

Kaynak: Hoek E, Diederichs M. S., Empirical Estimation of Rock Mass Modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2006; 43(2): 203-215



Basitleştirilmiş Hoek ve Diederichs denkleminin Çin'deki ve Tayvan'daki veri değerleri

Hoek, Carranza-Torres, Corkum (2002) Denklemi:

Kaya kütle modülü için Hoek, Carranza-Torres ve Corkum denklemi (Hoek vd., 2002), sağlam kayanın tek eksenli sıkışma dayanımını (σ_{ci}), kaya kütlelerine ait Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değerini ve örselenme faktörünü (D) dikkate alır.

$\sigma_{ci} \leq 100$ MPa için;

$$E_{rm}(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$$

Yukarıdaki denklem, $\sigma_{ci} \leq 100$ MPa için geçerlidir, $\sigma_{ci} > 100$ MPa için aşağıdaki denklemi kullanılır. Bu denklemde, kaya kütlelerinde patlatma ve gerilim ferahlaması sonucu oluşabilecek örselenme etkisinin dahil edilebilmesi amacıyla örselenme faktörünün (D) dahil edilmesiyle değiştirildiğine dikkat edin.

$\sigma_{ci} > 100$ MPa için,

$$E_{rm}(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$$

Modül, MPa cinsinden hesaplanır.

$\sigma_{3\max}$ 'ın belirlenmesi:

Aşağıdaki eşitliklerde kullanılacak $\sigma'_{3\max}$ için uygun değerin belirlenmesi konusu uygulamaya konu olan özel duruma bağlıdır.

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \text{ derece}$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}} \text{ kPa}$$

Hoek-Brown ve Mohr-Coulomb kriterleri arasındaki ilişkide göz önüne alınan çevre basıncının üst sınırı olan $\sigma'_{3\max}$ 'ın her bir durum için ayrı ayrı belirlenmesi gerektiğine dikkat ediniz.

Analiz Tipi "Genel" seçildiğinde;

$$\sigma_{3\max} = \sigma_{ci} / 4 \text{ (MPa)}$$

Analiz Tipi "Tünel" seçildiğinde;

$$\sigma_{3\max} = \sigma_{cm} \cdot 0.47 \cdot (\sigma_{cm} / \sigma_0)^{-0.94} \text{ (MPa)} \quad \sigma_0 = \gamma \cdot H$$

H: Tünelin yüzeyden derinliği (m)

Burada σ'_{cm} kaya kütle dayanımı olup aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir.

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

γ : Kaya kütlelerinin birim hacim ağırlığı.

H: Yüzey altındaki tünelin derinliğidir. Yatay gerilmenin düşey gerilmeye daha yüksek olduğu durumlarda, $\gamma \cdot H$ yerine yatay gerilme değeri kullanılmalıdır.

Yukarıdaki denklem ($\sigma_{3\max} = \sigma_{cm} \cdot 0.72 \cdot (\sigma'_{cm} / \sigma_0)^{-0.91}$) yüzeye uzanmayan bir yenilme bölgesi ile çevrili tüm yeraltı kazıları için geçerlidir. Madenlerdeki blok kazıları gibi problemlerle ilgili çalışmalarda, Hoek-Brown ve Mohr-Coulomb parametrelerinin ilişkilendirilmesine yönelik hiçbir girişim yapılmaması ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve sonraki analizlerin bu kriterlerden yalnızca birine dayandırılması tavsiye edilir.

Analiz Tipi "Şev" seçildiğinde;

$$\sigma_{3\max} = \sigma_{cm} \cdot 0.72 \cdot (\sigma'_{cm} / \sigma_0)^{-0.91} \text{ (MPa)} \quad \text{Hoek vd., (2002)}$$

$$\sigma_0 = \gamma \cdot H$$

H : Şevin yüksekliği (m)

γ : Kaya kütlelerinin birim hacim ağırlığı (MN/m³)

Bishop yöntemiyle dairesel göçme analizi yapılan şevler için gerçekleştirilen çalışmalar çok çeşitli şev geometrileri ve kaya kütleleri özellikleri için yukarıdaki formülün kullanılmasının uygun olduğunu işaret etmektedir.

σ_{3n} Değeri:

$$\sigma_{3n} = \sigma_{3\max}/\sigma_{ci} \text{ 'dir.}$$

Poisson Oranı: (Bilgi amaçlı verilmiştir)

Kaya kütlesine ait Poisson oranı (ν_m) hesaplanırken Aydan vd. (1993) tarafından tanımlanan aşağıdaki görgül denklemden yararlanılabilir.

$$\nu_m = 0.25(1 + e^{-\sigma_{cm}/4})$$

Yenilme Zarfının Çizimi/Failure Envelope Plots:

Program, hem temel gerilme uzayında (σ_1 'e karşı σ_3) hem de kayma-normal gerilme uzayında (σ_n normal ve τ) kaya kütlesi yenilme zarflarını çizer. Varsayılan olarak, hem asal gerilim hem de kayma normal gerilme grafikleri görüntülenir. Ancak kullanıcı menüden istenen çizim için grafik tipini seçerek görüntüleyebilir.

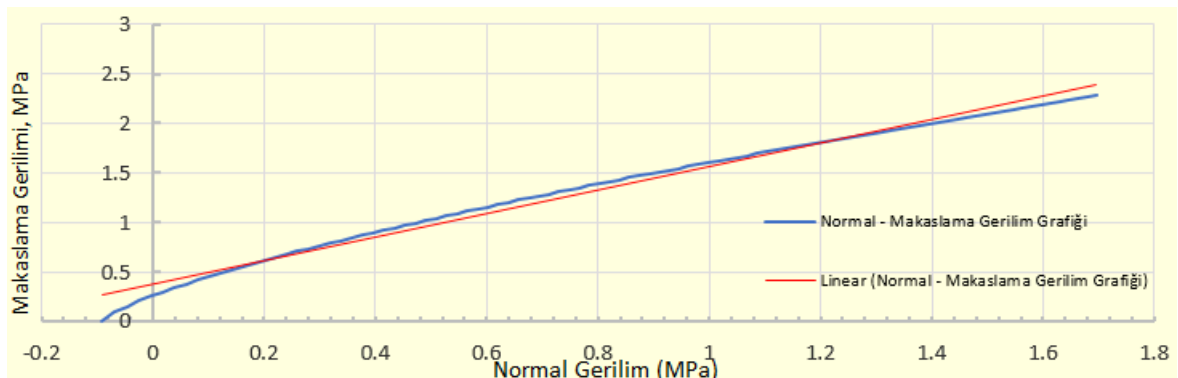
Grafik Simgeleri

Grafik Simgeleri, asal gerilme ve normal-makaslama gerilimi grafiklerini temsil eder ve görüntülediğiniz grafik türünü hızlı bir şekilde belirlemenize yardımcı olur. Grafik Simgelerinin görünümünü üzerine işaret imleci ile gelip çıkan el işaretini (☞) seçmek için mouse'un sol tuşuna basmanız gerekmektedir.

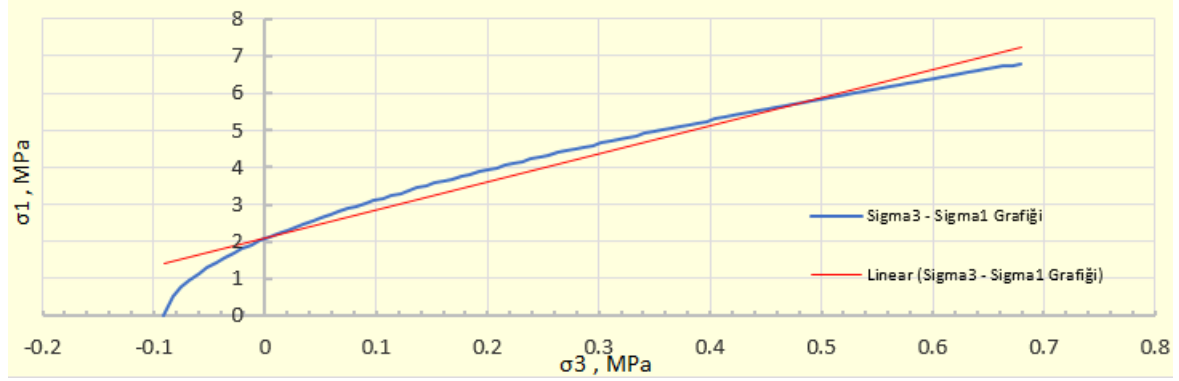
$\sigma_1 - \sigma_3$ ve kayma (τ) - normal (σ_n) gerilme grafiği simgeleri aşağıda gösterilmektedir. Grafik simgeleri üzerlerine imleç ile tıklanarak grafik çizimini gerçekleştirebilirsiniz.



Normal (σ_n) - Makaslama Gerilimi (τ) Grafiği



$\sigma_1 - \sigma_3$ Grafiği



Kaya kütlesine ait ($\sigma_1 - \sigma_3$) ve ($\sigma - \tau$) grafikleri

Gerilim Örneleyici/ Stress Sampler

Gerilim örneleyici seçeneği, kullanıcının yenilme zarfı boyunca herhangi bir gerilim seviyesinde kaya kütlesine ait makaslama dayanım değerlerini elde etmesini sağlar.

Eşdeğer MC Örneleyici/Instantaneous MC Sampler

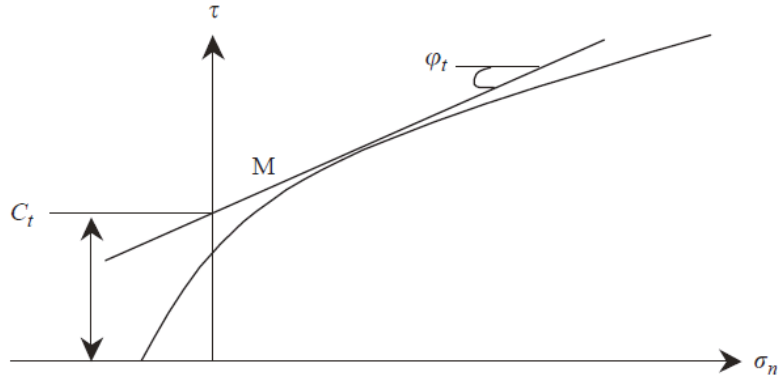
Anlık Mohr-Coulomb Örneleyici seçeneği, kullanıcının eğrisel Hoek-Brown yenilme zarfları boyunca herhangi bir noktada anlık Mohr-Coulomb parametrelerini (kohezyon ve sürtünme açısı) grafiksel olarak elde etmenizi sağlar.

Hoek-Brown (HB) Parametreleri				
Veri Tablosu:	σ_n [MPa]:	0.41	τ_n :	1.654
	c'_i [MPa]:	0.589	ϕ'_i :	68.9°

Yenilme zarfına bağlı olarak elde edilen kaya kütlesi dayanım parametreleri

Doğrusal olmayan yenilme zarfı üzerinde normal gerilime karşılık gelen koordinat değerini yukarıdaki turuncu renkli hücreye yazınız.

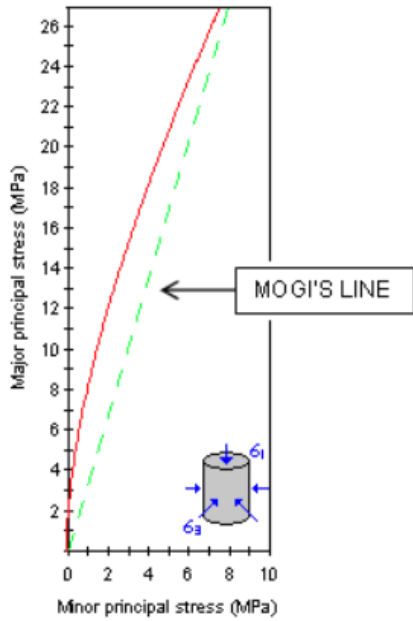
Anlık Mohr-Coulomb zarfı (teğetsel çizgi), normal gerilme için anlık kohezyon ve sürtünme açısı değerleri ile gerilim koordinatları görüntülenmektedir. Konum grafikte "+" şeklinde bir ikonla görüntülenecektir.



Yenilme zarfına bağlı olarak elde edilen kaya kütlesi dayanım parametreleri

Mogi çizgisi /Mogi's Line

Mogi's Line, kırılmalardan sünek kırılmaya geçişin olduğu büyük ve küçük etkili asal gerilmelerin oranını tanımlar. Bu çizgi basitçe $\sigma_1/\sigma_3=3.4$ ile tanımlanır ve Görüntü Seçenekleri iletişim kutusunda Mogi's Line seçeneği seçildiğinde ana gerilim grafiğinde yeşil bir çizgi olarak çizilir.



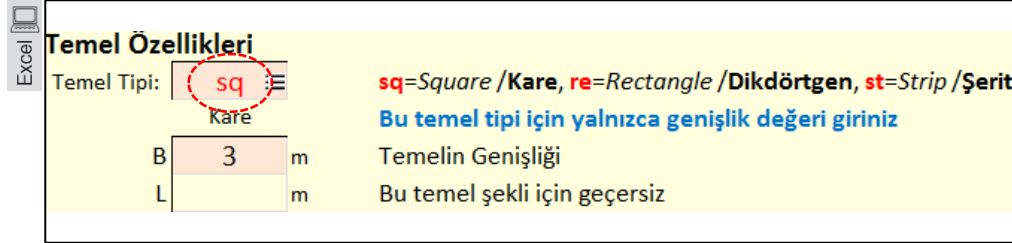
Asal gerilim kırılma zarfı Mogi çizgisinin üzerinde yer alıyorsa, bu kırılmalardan sünek kırılma modunu gösterir.

Asal gerilim kırılma zarfı Mogi çizgisinin altındaysa, bu sünek bir durumu gösterir. Bu, örneğin düşük GSI değerlerinde meydana gelebilir.

Mogi's çizgisinin gösterimi

Temel Özellikleri:

Sığ Temel Tipi: Temelin şekli şerit (st), kare (sq) ve dikdörtgen (re) olmak üzere “Temel tipi” kutucuğunda aşağıya doğru açılır pencereden* yapılacak seçime göre kullanıcı tarafından belirlenir.



Temel Özellikleri
Temel Tipi: **sq** (Kare) **sq=Square /Kare, re=Rectangle /Dikdörtgen, st=Strip /Şerit**
Bu temel tipi için yalnızca genişlik değeri giriniz
B: 3 m Temelin Genişliği
L: m Bu temel şekli için geçersiz

Temel tipinin seçiminin yapılması

Örneğin temel tipi “sq” (şerit) seçildiğinde kullanıcıdan sadece B hücresine değer girmesi istenir (bu durumda L hücresi pasif olur). Temel tipi olarak “re” (dikdörtgen) seçildiğinde “L” hücresi aktif hale gelir ve kullanıcıdan bu hücreye de veri girmesi istenir.

Temel Genişliği (B): Taşıma gücü hesabı yapılacak sığ temelin genişliğidir. Birimi m’dir. Temel genişliği olarak temelin kısa kenar uzunluğunu giriniz.

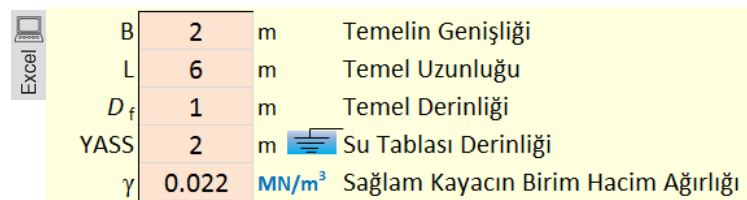
Temel Uzunluğu (L): Taşıma gücü hesabı yapılacak sığ temelin uzunluğudur. Şerit temel için Temel tipi kutucuğunda “st” seçimini yapınız. Birimi m’dir.

Temel Derinliği (D_f): Taşıma gücü hesabı yapılacak sığ temelin, zemin yüzeyinden itibaren derinliğidir. Birimi m’dir.

Yeraltı Suyu Seviyesi (YASS): Taşıma gücü hesabı yapılacak alanda ölçülen yeraltı suyu seviyesidir. Yeraltı suyu yok ise hücreyi boş bırakınız. Yeraltı suyu yüzeyde ise “0” yazınız. Birimi m’dir.

Kayacın Birim Hacim Ağırlığı (γ): Temel tabanı seviyesindeki kayacın doğal birim hacim ağırlığıdır. Birimi MN/m³’tür. Temel derinliği YASS’nin altında ise kayacın doymun birim hacim ağırlığını giriniz.

Yeraltı suyu seviyesi altındaki temeller için etkin birim hacim ağırlık (*effective unit weight*), temel kayacın birim hacim ağırlığı ile suyun birim hacim ağırlığının çıkarılmasıyla (yani kayacın su altı birim ağırlığı) elde edilen değerdir. Bu nedenle yeraltı suyu seviyesi üzerinde yer alan temeller, su seviyesinin altındaki temellere göre potansiyel taşıma kapasitesi yenilmelerine karşı önemli ölçüde daha fazla dayanım geliştirecektir.



B	2	m	Temelin Genişliği
L	6	m	Temel Uzunluğu
D _f	1	m	Temel Derinliği
YASS	2	m	Su Tablası Derinliği
γ	0.022	MN/m ³	Sağlam Kayacın Birim Hacim Ağırlığı

Temel özelliklerinin yer aldığı menü

Güvenlik Katsayısı: Sağlam kaya üzerindeki çoğu yükleme koşulu için güvenlik katsayısını kullanıcılar kendileri belirlemelidir. Bu belirleme yöntemlerini belirtmelidirler.

Güvenlik Katsayısı

GK: 3

Güvenlik Katsayısı Giriş Kutusu

Sınıf	Tipik yapılar	Sınıf özellikleri	Güvenlik Katsayısı (G _s)	
			Zemin araştırmaları mükemmel tamamlanmış	Zemin araştırmaları sınırlı tamamlanmış
A	Demiryolu köprüleri, ambarlar, yüksek fırınlar, istinat duvarları, silolar	En büyük tasarım yükü uygulanır (duraysızlık çok kötü sonuçlara neden olur)	3	4
B	Otoyol köprüleri, hafif sanayi yapıları, işyeri binaları	En büyük tasarım yükü uygulanmaz (duraysızlık ciddi sonuçlar doğurur)	2.5	3.5
C	Apartman, resmi binalar	En büyük tasarım yükü uygulanmaz	2	3

Yapı türlerine ve zemin araştırmalarının niteliğine göre Güvenlik katsayıları (G_s) (Winkerton ve Fang, 1975)

Eşdeğer Mohr-Coulomb Parametreleri:

Kaya malzemesi üzerinde üç eksenli basınç testinden elde edilen c ve φ değerleri baz alınarak taşıma gücü vb. hesapların yapılması doğru değildir. Çünkü kaya malzemesine ait bu değerler süreksizliklerle kesilmiş kaya kütlelerine geçildiğinde düşer. Süreksizliklerle kesilmiş kaya kütlelerinin makaslama dayanımını laboratuvar koşullarında belirlemek imkansızdır.

İçsel Sürtünme Açısı (φ): Temel tabanı seviyesi altındaki kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısıdır. Birimi derecedir. Program tarafından otomatik hesaplanır.

Kohezyon (c): Temel tabanı seviyesi altında B derinliğindeki (efektif-etkin derinlik sınırları içinde) kaya kütlelerinin kohezyon değeridir. Birimi MN/m² 'dir. Program tarafından otomatik hesaplanır.

Eşdeğer MC Parametreleri			
c	0.401	MPa	
φ	49.6	derece	

Hesaplanan eşdeğer Mohr-Coulomb parametreleri

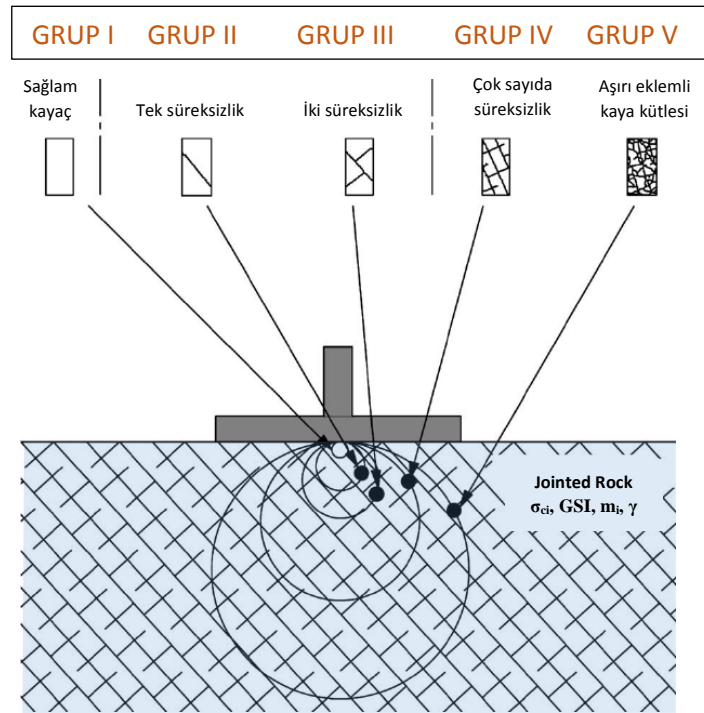
$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \text{ derece}$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}} \text{ kPa} \quad \sigma'_{3n} = \sigma'_{3\max}/\sigma_{ci} \text{ dir.}$$

TAŞIMA GÜCÜ HESAP YÖNTEMLERİ:

Kaya kütlelerinde yapı temeline ait zeminin sınır taşıma gücü değerini hesaplayabilmek amacıyla farklı araştırmacılar tarafından birçok katsayı ve denklem ile abak çözümü önerilmiştir. Hazırlanan Excel tablosunda bu çalışmalardan alınan dört farklı taşıma gücü hesap yöntemi kullanılmaktadır.

Kaya ortamlar zeminlerdeki kadar sürekli ortamlar olmadıklarından kaya kütle parametrelerinin belirlenmesinin önünde birçok zorluk vardır. Sondaj verisinden GSI üretmek (hatta kazı duvarından) çoğu zaman içinden çıkılmaz zorlukta olabilir. GSI'ya dayalı H-B yöntemi veya Bell çözümünün çalıştığı kaya kütleleri farklı olup bu iki yöntemin aynı anda kullanılıp karşılaştırma yapılması her zaman mümkün olmayabilir.

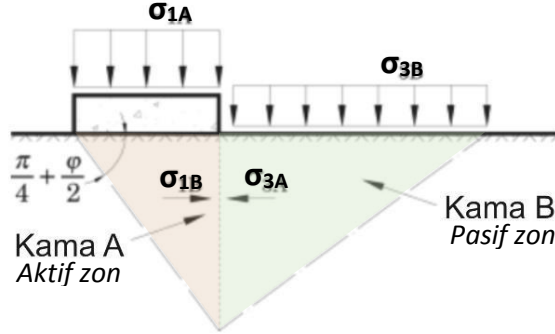


Sığ temeller için Hoek-Brown yenilme kriterinin uygulanabilirliği

Sığ temellerin tasarımı için kaya kütlelerinin davranışı üzerindeki ölçeğin etkisinin basitleştirilmiş gösterimi (Hoek ve Brown, 1980'den değiştirilmiştir).

a) Hoek - Brown Yenilme Ölçütünü Esas Alan Yöntem (Wyllie, 1992 Yöntemi):

Yakın aralıklı süreksizliklerle bölünmüş ileri derecede eklemli kaya kütleleri için taşıma gücü, temel altındaki kayada gelişen aktif ve pasif kamalarda zemin mekaniğindeki benzer şekilde hesaplanır. Analizlerde eklemli kaya malzemesinin makaslama dayanımı parametreleri kullanılır.



Wyllie (1992) kaya kütlesi taşıma gücü yöntemine göre yenilme mekanizması

Yukarıdaki Şekil’de A kaması aktif kama, B kaması ise pasif kamadır. Yatay bir kaya yüzeyinde sonsuz uzunluğa sahip bir temel altındaki kaya kütlelerinin üç eksenli deneyindeki benzer bir durumda olduğu varsayılır. Kayaç ağırlığı ihmal edilirse, A kamasındaki en büyük asal gerilme (σ_{1A}) temelden aktarılan gerilmeye eşittir. B kamasındaki kaya kütlesi de yatay yönde etki eden en büyük asal gerilme (σ_{1B}) ve en küçük asal gerilmenin düşey (σ_{3B}) durumda olduğu üç eksenli deney koşuluna benzetilir. Temel kaya yüzeyine oturuyorsa, en küçük asal gerilme (σ_{3B}) sıfır olacaktır. Şekil’de gösterilen A ve B kamaları yenildiğinde, A kamasına etki eden en küçük asal gerilme, B kamasındaki kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma dayanımına eşit olacaktır. Bu koşullarda Hoek ve Brown (1980, 2002) yenilme kriteri uygulanılarak, aşağıdaki eşitlik elde edilir.

Süreksizlik içeren kaya kütlelerinin izin verilebilir taşıma gücü Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre Wyllie (1992) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmektedir.

İzin verilebilir taşıma gücünün değiştirilmiş değeri aşağıdaki gibidir:

$$q_a = \frac{C_{f1} \cdot s^{0.5} \cdot \sigma_{ci} \cdot [1 + (m_b \cdot s^{-0.5} + 1)^{0.5}]}{GK}$$

Burada;

C_{f1} : Temelin şekline bağlı boyutsuz düzeltme faktörü (şerit temel ($L/B > 6$) için 1). Taşıma kapasitesi faktörlerinden N_c ’ye bağlı olup değeri aşağıda verilen çizelgeden program tarafından L/B oranına bağlı olarak otomatik olarak belirlenir. Ara değerler için interpolasyon yapılmıştır.

$$C_{f1} = 1.25$$

Dikdörtgen temel ($B=4$; $L=10$; $L/B=2.5$) için C_{f1} değeri

Temel şekli	C_{f1}	C_{f2}
Şerit, L/B>6	1.00	1.00
Dikdörtgen, L/B=2	1.12	0.90
L/B=5	1.05	0.95
Kare	1.25	0.85
Dairesel	1.20	0.70

(Sowers, 1970; Wyllie'den, 1998)

L/B oranına bağlı olarak C_{f1} 'in belirlenmesi

L : Temel uzunluğu,

B : Temelin genişliği,

q_{all} : İzin verilen taşıma kapasitesi,

σ_{ci} : Kaya malzemesi tek eksenli sıkışma dayanımı,

m_b : Hoek-Brown kaya kütleleri sabiti,

s : Hoek-Brown yenilme kriteri sabiti olup Jeolojik Dayanım İndisi (GSI) kullanılarak belirlenir.

Not: Wyllie yönteminin kullanılabilmesi için temelin yüzeye oturması ve yani temel derinliği, D'nin 0 olması gerekir.

Hoek ve Brown yenilme kriterinin ilk versiyonu kullanıldığından "a" parametresi 0,5 alınır. Miranda vd. (2012), Wyllie (1992) taşıma gücü eşitliğini geliştirilmiş Hoek ve Brown (2002) yenilme kriterine adapte etmişlerdir. Bu eşitlik aşağıda sunulmaktadır.

$$\sigma_{1A} = q_{ult} = [s^a + (m_b s^a + s)^a] \cdot \sigma_{ci}$$

q_{ult} : Kaya kütlelerinin nihai taşıma gücü,

s, m_b , a: Geliştirilmiş Hoek ve Brown yenilme kriteri sabitleri.

Hoek-Brown parametreleri:

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14 \cdot D}\right)}$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3 \cdot D}\right)}$$

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

GK: Güvenlik katsayısı

İzin verilebilir taşıma gücü, nihai taşıma gücü (q_{ult}) temel faktörü (C_{f1}) ile çarpılıp, güvenlik katsayısına bölünerek elde edilir. İzin verilen taşıma gücünün betonun basınç dayanımını aşmaması gerekir.

Wyllie (1992) tarafından geliştirilen eşitliklerde izin verilebilir taşıma gücünün hesaplanmasında temelin derinliğinin ve boyutlarının dikkate alınmadığı göz önünde

bulundurulmalıdır. Bu eşitliğin temel derinliğinin etkisini dikkate alan türevi Wyllie (1999)'da verilmiştir.

b) Taşıma Gücü Faktörleriyle Bell Çözümü:

Az kırıklı zayıf kayalar için taşıma gücünün hesaplanmasında Wyllie'de belirtilen esasların aynısını kullanan Bell çözümünden yararlanır.

Bu yöntemde aktif kamanın ağırlığının yanı sıra, inşa edilen temeli çevreleyen kayanın neden olduğu sıkıştırma da dikkate alınmaktadır. Bell çözümüne göre izin verilebilir taşıma gücü aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$q_a = \frac{C_{f1}cN_c + C_{f2} \frac{B \cdot \gamma}{2} N_\gamma + \gamma D_f N_q}{GK}$$

Burada;

N_c , N_γ , N_q : Boyutsuz taşıma gücü faktörleri

N_c faktörü kohezyonun etkisini, N_γ faktörü zemin ağırlığının ve temel genişliğinin etkisini ve N_q faktörü sürşarjın etkisini gösterir.

$$N_c = 2 \cdot N_\phi^{1/2} \cdot (N_\phi + 1)$$

$$N_\gamma = 0.5 \cdot N_\phi^{1/2} \cdot (N_\phi^2 - 1)$$

$$N_q = N_\phi^2$$

$$N_\phi = \tan^2(45 + \phi/2)$$

(Lambe and Whitman, 1969)

C_{f1} , C_{f2} : Temel Şeklinin Boyutsuz Düzeltme Faktörleri olup, Program tarafından L/B oranına bağlı olarak yukarıda verilen tabloya göre otomatik olarak belirlenir. L/B oranları 2 veya 5'ten farklı olan dikdörtgen temeller için düzeltme faktörleri doğrusal enterpolasyon ile tahmin edilebilir. Nihai taşıma kapasitesi, düzeltme faktörünün ilgili taşıma kapasitesi faktörünün değeri ile çarpılmasıyla denklemden hesap edilir.

$C_{f1} =$	1.25	$C_{f2} =$	0.85
------------	------	------------	------

L/B oranına bağlı olarak C_{f1} ve C_{f2} 'in belirlenmesi

D_f : Temel derinliği (m),

B : Temelin genişliği (m),

γ : Temelin altındaki zeminin doğal birim hacim ağırlığı (MN/m³),

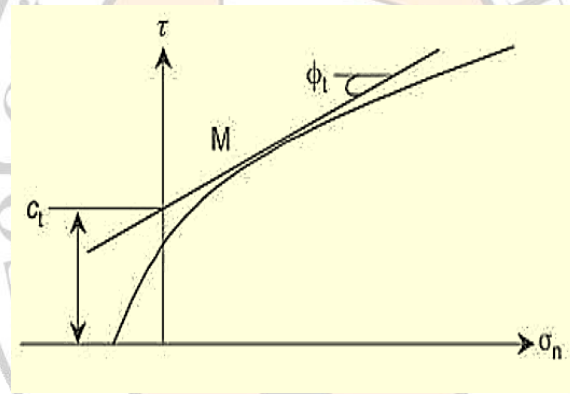
c'_i : Kaya kütlesinin anlık etkin kohezyonu (MPa),

ϕ'_i : Kaya kütlesinin anlık etkin içsel sürtünme açısı (derece).

Taşıma kapasitesi faktörlerinden izin verilen taşıma gücünü hesaplamak için yukarıda verilen denklemin uygulanması, kaya kütlesi sürtünme açısı ve kohezyon için değerler gerektirir. Bell yöntemi az kırıklı ve zayıf kayalar için kullanılmaktadır. Bu kayalarda laboratuvarında 3 eksenli deney yaptığımızda bulunan c ve ϕ değeri az kırıklı olduğu için arazideki c ve ϕ değerine yakın olacaktır. Hoek Brown yenilme kriterinin kullanılabildiği kaya kütlelerinde ise c ve ϕ değeri eğrisel zarftan elde edilir. Bunun için eğrisel yenilme zarfında (HB yenilme kriteri) yapının kaya kütlesine uygulayacağı gerilme aralığını bilmeyi gerektirir. Formülde kullanılan c'_i ve ϕ'_i değerleri Hoek-Brown eğrisel grafiğinde yapılan iterasyon sonucu program tarafından otomatik olarak belirlenir. Program eğrisel Hoek-Brown grafiği üzerinde yenilme anındaki q_u değerini en küçük (minimum) yapan makaslama ve normal gerilme değerini bulur ve buna karşılık gelen c'_i ve ϕ'_i değerlerini otomatik olarak hesaplar.

Excel	σ_n (MPa): 3.00
	c'_i (MPa): 2.116 ϕ'_i : 56.6°

Hoek-Brown eğrisel grafiğinde yapılan iterasyon sonucu



Eğrisel Hoek-Brown grafiği üzerinde yenilme anındaki q_u değerini minimum yapan makaslama ve normal gerilmeye karşı gelen c'_i ve ϕ'_i değerlerinin bulunması.

NOT: Kullanıcılar hesaplanan eşdeğer Mohr-Coulomb parametrelerinin bu yöntemde kullanılan makaslama dayanımı parametreleri ile aynı olmadığını bilmelidir. Yenilme ölçütünde kaya kütlesinin yenilme zarfının eğrisel olması nedeniyle, bu eğri üzerinde anlık etkin kohezyon (c'_i) ve anlık etkin içsel sürtünme açısının (ϕ'_i) belirlendiği veri çifti için eşitlikte verilen Bell çözümüne ait bağıntıyı minimum yapan σ' değeri seçilmiştir.

Excel	Eşdeğer MC Parametreleri		
	c	0.401	MPa
	ϕ	49.6	derece

σ_n (MPa): 3.00
c'_i (MPa): 2.116 ϕ'_i : 56.6°

c) Eurocode 7 'ye göre elle çözüm (Ampirik yöntem):

Eurocode 7'de taşıma gücü yönteminde kullanılan kayalar 4 gruba ayrılmıştır:

Grup 1	Saf kireçtaşı ve dolomitler, düşük gözenekliliğe sahip karbonatlı kumtaşları.
Grup 2	Magmatik kayalar, oolitik-marn içeren kireçtaşları, iyi çimentolanmış kumtaşları, sertleşmiş-çimentolanmış çamurtaşları, sleyt-şist dahil metamorfik kayalar (düz klivaj ve foliasyonlu).
Grup 3	Çok marnlı kireçtaşları, zayıf çimentolanmış kumtaşları, sleyt-şistler (tabakaya dik klivaj ve foliasyonlu).
Grup 4	Çimentolanmamış (gevrek) çamurtaşı ve şeyl birimleri.

Taşıma gücü yönteminde kullanılan kaya türleri grupları (Eurocode 7)

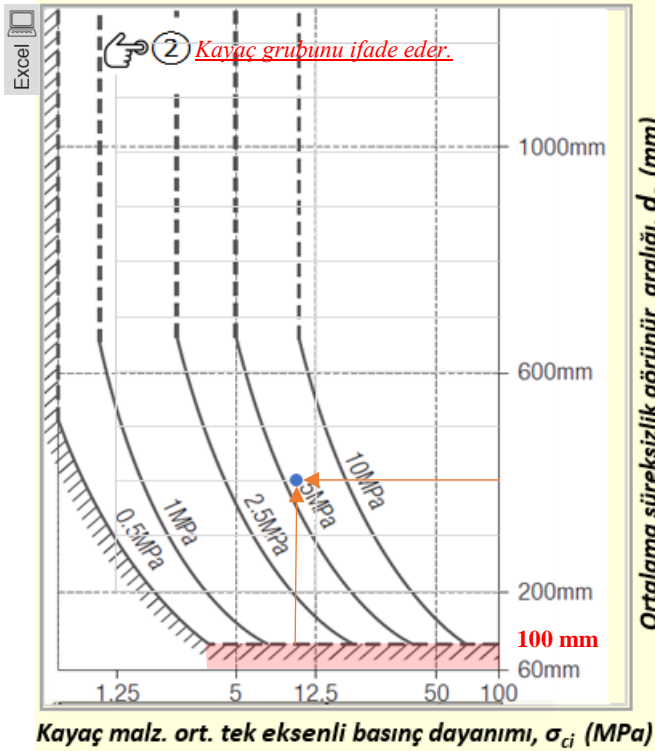
Kullanıcılar temel zemini hangi kayaç grubunu içeriyorsa onu seçmelidir. Yapılan seçim turuncu renkli hücrede gösterilir. Bu durumda o kayaç grubuna ait tanımlama hemen alt satırda görülür. Seçim yapıldıktan sonra aşağıdaki görüntü penceresinde o kayaç grubuna ait abak belirecektir. Abaklarda 4'e kadar olan sayılar "kayaç gruplarını" ifade etmektedir.

Eurocode 7 'ye göre elle çözüm

4 kaya türü grubundan birini belirleyiniz: GRUP=

Grup 2: Magmatik kayalar, oolitik-marn içeren kireçtaşları, iyi çimentolanmış kumtaşları, sertleşmiş-çimentolanmış çamurtaşları, sleyt-şist dahil metamorfik kayalar (düz klivaj ve foliasyonlu)

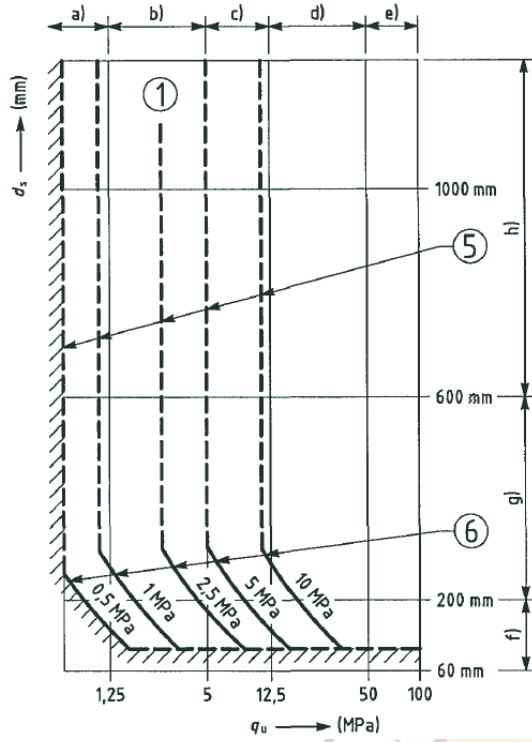
☰ ikonu kullanıcıya seçim yapması gerektiğini belirtir. Turuncu renkli hücreye bastığınızda aşağıya doğru açılır pencereden* seçiminizi yapınız.



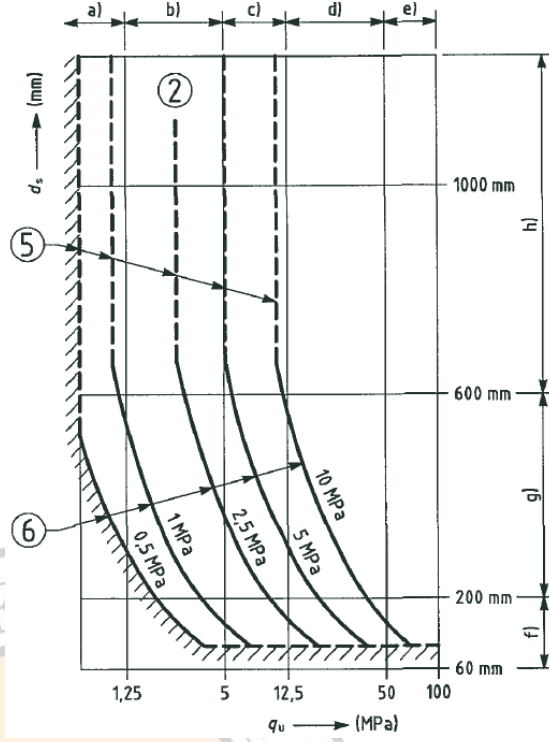
Kaya kütleleri üzerine oturan yüzeysel temellere ait tahmini taşıma gücü dayanımı için örnek:

Tek eksenli sıkışma dayanımı σ_{ci} (MPa) ve görünür süreksizlik aralığını (mm) belirledikten sonra ilgili kayaç grubuna ait abakta logaritmik olan yatay eksen (apsis) üzerinde σ_{ci} , düşey eksen (ordinat) görünür süreksizlik aralığı (d_s) değeri yer alır. Yatay ve düşey eksenlerde seçilen bu iki değerlerin kesişim noktası program tarafından otomatik olarak belirlenir (mavi renkli daire). Bu nokta referans alınarak çizgiler arasındaki uzaklığa göre q_a değeri tayin edilmektedir. Belirlenen bu değer turuncu renkli izin verilebilir taşıma gücü, q_a 'ya ait kutucuğa yazılır.

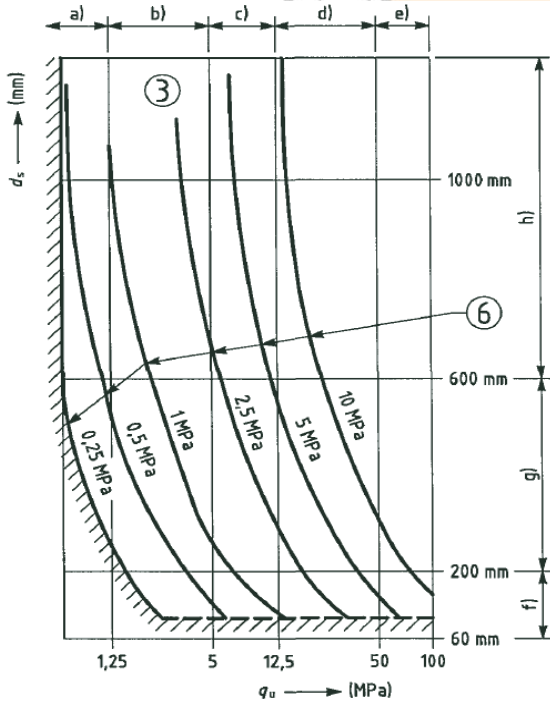
2. grup kayalara ait abak



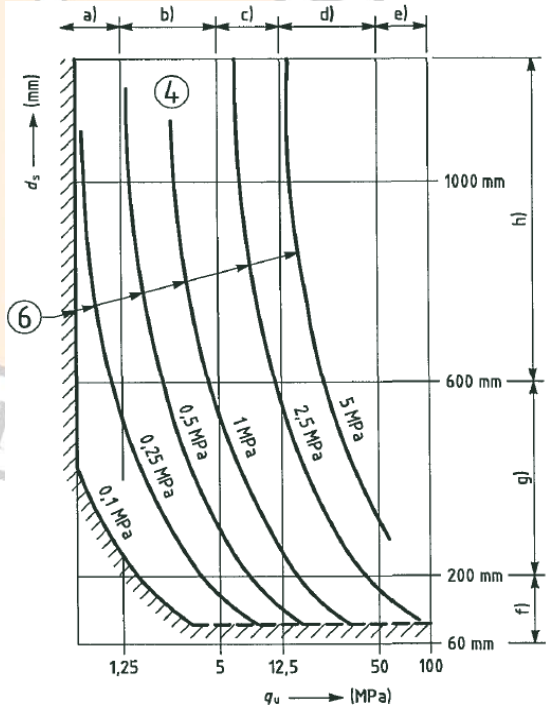
1. Grup Kayaçlar



2. Grup Kayaçlar



3. Grup Kayaçlar



4. Grup Kayaçlar

Ortalama süreksizlik görünür aralığı, d_s (mm)

Kayaç malzemesinin ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_{ci} (MPa)

Kayaç Üzerindeki Kare Şekilli Temeller için Tahmini Taşıma Gücü Dayanımı (oturmaların temel genişliğinin %5 'ini geçmemesi durumu için).

①: 1. Grup kayaçlar

②: 2. Grup kayaçlar

- ③: 3. Grup kayaçlar
 ④: 4. Grup kayaçlar
 ⑤: Süreksizlikler kapalı ise **izin verilen taşıma gücü kayacın tek eksenli sıkışma dayanımını aşmayacak**, süreksizlikler açık ise izin verilen taşıma gücü (q_a) için bu değer %50'si alınacaktır.
 ⑥: **İzin verilen taşıma güçleri**

Kayanın dayanımı aşağıdaki terimlerle tanımlanır:

- a) Çok zayıf kaya/*Very weak rock* (1.25 MPa),
 b) Zayıf kaya/*Weak rock* (1.25-5 MPa),
 c) Orta zayıf kaya /*Moderately weak rock* (5-12.5 MPa),
 d) Orta sağlam kaya /*Moderately strong rock* (12.5-50 MPa),
 e) Sağlam kaya/*Strong rock* (50-100 MPa).

Not: Kullanılan tanımlayıcı terimler ve bunlarla ilişkili boyutlar BS 5930'da belirtilenlerle aynıdır

Süreksizlik Aralıkları:


- f) Yakın aralıklı süreksizlikler (60-200 mm),
 g) Orta derecede aralıklı süreksizlikler (200-600 mm),
 h) Geniş aralıklı süreksizlikler (600-1000 mm).


Süreksizlik ara uzaklığı/Discontinuity spacing (mm)

Extremely close	Very close	Close	Medium	Wide	Very wide	
Tabakalanma kalınlığı/Bedding thickness (mm)						
Thinly	Thickly laminated	Very thin	Thin	Medium	Thick	Very thick
6 mm	20	60	200	600	2000	

Not: Kullanılan tanımlayıcı terimler ve bunlarla ilişkili boyutlar BS 5930'da belirtilenlerle aynıdır.

Kullanıcılar turuncu renkli hücelere değer girmek zorundadır. Bu parametreler ile ilgili açıklama aşağıda verilmiştir.

Excel 


Süreksizlik **görünür aralığını** belirleyiniz: $d_s =$ mm **Süreksizlik Açıklığı:** 

Sağlam kayacın ort. tek eksenli basınç dayanımı: $\sigma_{ci} =$ MPa *Seçiminizi yapınız*

İzin verilebilir taşıma gücü, $q_a =$ MPa $q_a < \sigma_{ci}$ olmalıdır.

Kızgın yüz ifadesi turuncu renkli hücreye veri girmeniz gerektiğini belirtir.

Süreksizlik Açıklığı:

Süreksizlik **görünür aralığını** belirleyiniz: $d_s =$ mm 

Sağlam kayacın ort. tek eksenli basınç dayanımı: $\sigma_{ci} =$ MPa

İzin verilebilir taşıma gücü, $q_a =$ MPa *Lütfen değer giriniz!*

q_a değerini grafik üzerindeki dairesel işaretçinin yerine göre belirleyiniz.

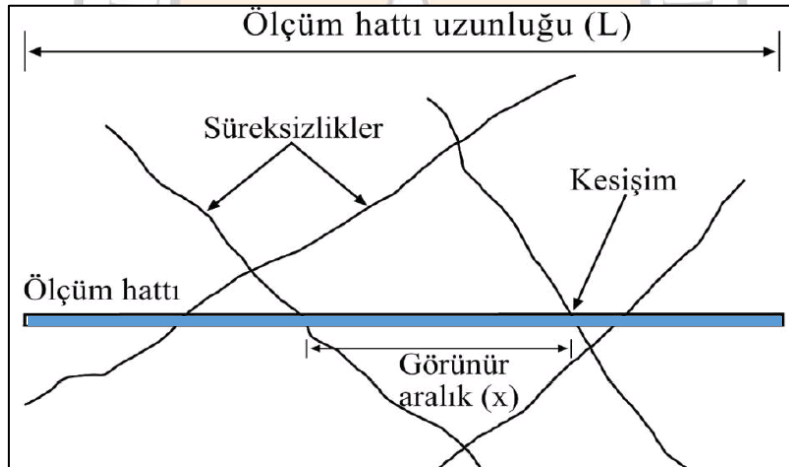
d_s: Süreksizlik görünür aralığı

Süreksizlik aralığı, iki komşu eklem arasındaki dikey mesafe olarak tanımlanır (gerçek süreksizlik aralığı). Bir şerit metre ile ölçülür ve birkaç santimetreden metreye kadar değişebilir. Birimi mm'dir. Burada görünür süreksizlik aralığı istendiğinden kullanıcılar iki eklem arasındaki dikey mesafeyi ölçmek zorunda değillerdir. Bu değer sondaj karotlarından da rahatlıkla belirlenebilir. ISRM (2007) tarafından önerilen ölçütlere göre eklemlere ait ara uzaklık tanımlanabilir.

Verilen abaklarda süreksizlik görünür aralığının 100 mm'den başladığı görülmektedir.



Sahadaki süreksizlik aralığının ölçülmesi (G. Ivan, 2019)



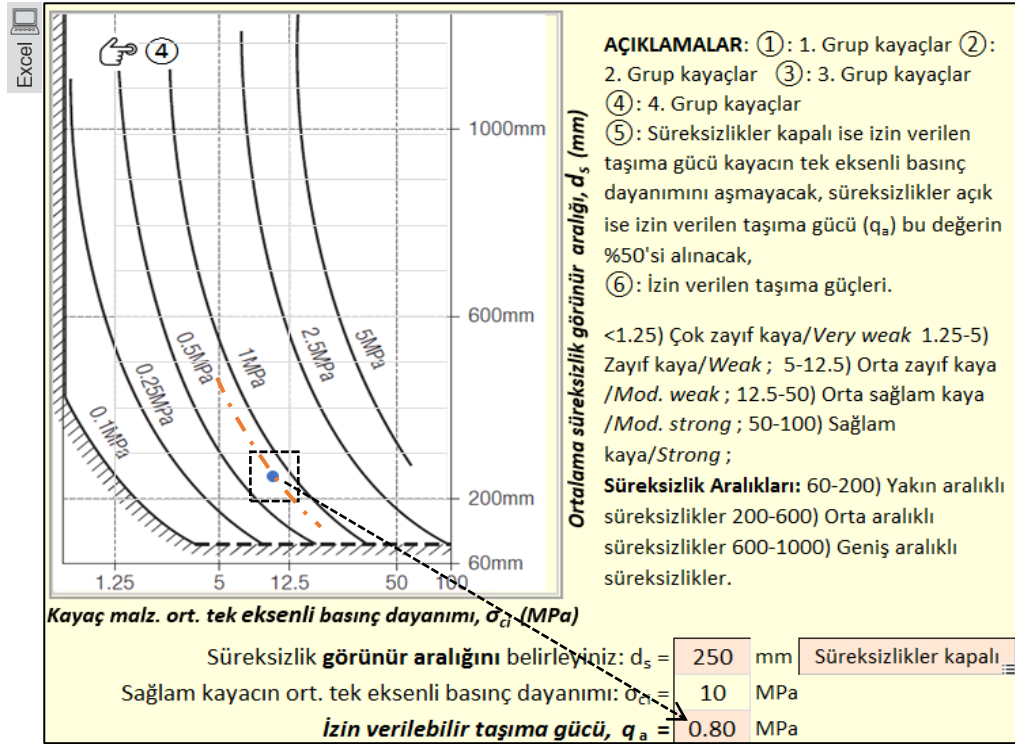
Hat etüdü ile süreksizlik ara uzaklığı tayini (Hudson, 1989)

σ_{ci} : Sağlam kayacın ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı

Program tarafından otomatik olarak sayfanın sol üst köşesinde veri girişi yapılan hücreden alınmaktadır. Kutucuk sarı renkli olduğundan kullanıcı bu hücreye veri girişi yapamaz.

q_a : İzin verilebilir taşıma gücü

Yatay ve düşey eksenlerde seçilen iki değerin (σ_{ci} ve d_s değerleri) kesişim noktası program tarafından otomatik olarak belirlenir (mavi renkli daire). Bu nokta referans alınarak eğik çizgiler arasındaki uzaklığa göre q_a değeri tayin edilmektedir. Belirlenen bu değer turuncu renkli izin verilebilir taşıma gücü, q_a 'ya ait kutucuğa yazılır.



4. grup bir kayaç için q_a değerinin kullanıcı tarafından belirlenme yöntemi

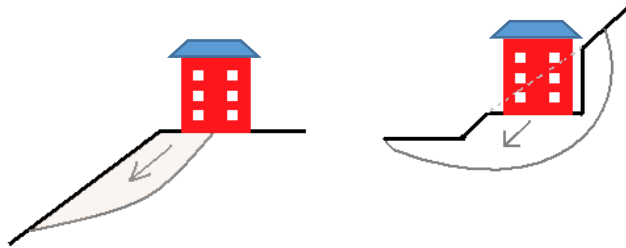
NOT: Bu yöntem, üst yapının, temel genişliğinin % 0,5'i kadar bir oturmaya izin verebileceği kabulüne dayanmaktadır. Farklı oturma seviyeleri için izin verilen taşıma gücü değerleri doğru orantı ile belirlenebilir.

Eurocode ampirik bir yöntem olup buradan elde edilen değer sadece taşıma gücü ile ilgili olmayıp hem oturmalar hem de taşıma gücü açısından güvenli olup yöntem kendi içerisinde güvenlik katsayısını (GK) içermektedir.

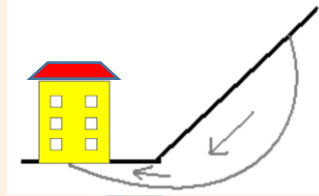
AÇIKLAMALAR:

- 1- Verilen formüllerde eğimli kaya kütleleri üzerinde bulunan temelerde taşıma kapasitesi faktörleri için değerler kullanılmamıştır. Bundan dolayı ayrıca **şev stabilitesi tahkiki bu koşullarda yapılmalıdır.**

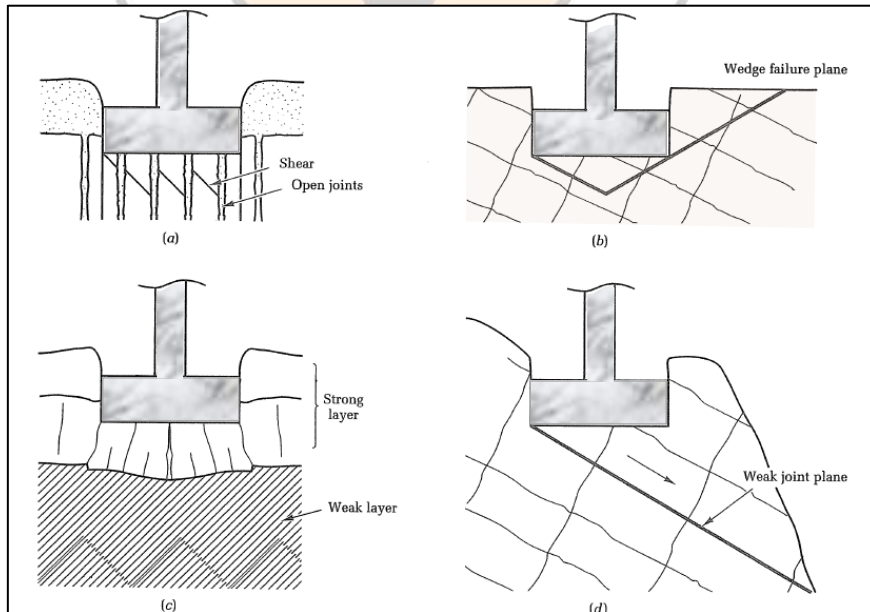
Şev Stabilitesinin Analizini Gerektiren Durumlar:



Ayrıca hemen şev topuğunda veya şev topuğuna çok yakın olan düz/eğimsiz arazi yüzeylerindeki analizlerde de dikkatli olunmalıdır. Şevin duraysızlığını tetikleyecek olumsuzlukların yapıyı etkileyip etkilemediği araştırılmalıdır.



- 2- Taşıma gücü analizi yapılacak tüm yapılar için kinematik ve gerek görülmesi durumunda limit denge analizlerinin de yapılarak kaya şevlerinde süreksizlik kontrollü bir yenilmenin gerçekleşip gerçekleşmeyeceğinden emin olunmalıdır.



Eklemlı kayalarda temellerin yenilmesi. (a) Desteklenmeyen kaya kolonlarının kayma göçmesi. (b) Kapalı eklemlerde (yatay veya eğimli) kama tipi yenilme. (c) Zayıf tabaka üzerinde güçlü tabaka ile bölme ve zımbalama. (d) Zayıf eğimli eklem üzerinde kayma.

Metin İçerisinde Kullanılan Terimler:

Kaya malzemesi: Herhangi bir süreksizlik içermeyen doğal koşullardaki birim kaya elemanı.

Süreksizlik: Kaya kütlelerinde çekme dayanımına sahip olmayan veya çok düşük değerlerde çekme dayanımına sahip tabakalanma düzlemi, eklem, fay, makaslama zonu, dilinim vb. gibi jeolojik anlamda zayıflık düzlemlerinin tümünü içeren kavramdır. Jeolojik kökenli doğal süreksizlikler yanı sıra sondaj, kazı gibi işlemler sırasında oluşan yapay süreksizlikler de kaya kütlesi içerisindeki mühendislik uygulamaları açısından önem taşır.

Süreksizlik Açıklığı: Herhangi bir süreksizliğin karşılıklı iki yüzeyi arasındaki dik uzaklık.

Süreksizlik Sıklığı: Birim uzunluğa düşen süreksizlik sayısı

Kaya kütlesi: Süreksizlikler ve kaya malzemesinin birlikte oluşturdukları kütle veya sistemdir.

Kırık: Kayaca uygulanan gerilmenin kayacın dayanımını aşması halinde gelişen, kaya kütlelerinin sürekliliği içindeki ayırık zayıflık düzlemi.

Kuvvet: Cisimlerin şeklini ve/veya hareketini değiştiren büyüklüğü, doğrultusu ve yönü olan etkidir.

Gerilme: Birim alana etkiyen kuvvettir.

Sıkışma (Basma) Gerilmesi: Etkidiği doğrultuda boy kısalmasına neden olan normal (kesite dik) gerilmedir. Bu gerilmeler, kaya mekaniğinde pozitif (+) olarak alınır.

Çekme Gerilmesi: Etkidiği doğrultuda boy uzamasına neden olan normal gerilmedir. Çekme gerilmeleri kaya mekaniğinde negatif (-) olarak alınır.

Makaslama: Bir kütlelerin birbirine komşu konumlu parçalarından birinin diğerine göre göreceli şekilde hareket etmesine neden olan kuvvetlerden kaynaklanan gerilme.

Makaslama Gerilmesi: Kesite paralel etkiyen, doğrultuları aynı yönleri zıt kuvvetlerin oluşturduğu gerilmelerdir.

Makaslama Dayanımı: Malzemenin yenilmeden dayanabildiği en yüksek makaslama gerilmesi.

Makaslama Kuvveti: Etkidiği yüzey elemanına paralel konumda olan kuvvet.

Deformasyon: Malzeme veya kütlelerin gerilme sonucu şekil ve boyutlarındaki değişimdir.

Birim deformasyon: Gerilme etkisi altındaki bir cismin birim boyut ya da birim şeklindeki değişimdir.

Dayanım: Maruz kalınan gerilmeye karşı gösterilen dirençtir. Maruz kalınan gerilme, kayanın dayanımını aştığında yenilme meydana gelmektedir.

Birincil Gerilme: Arazide mühendislik uygulaması öncesi var olan bakir gerilmelerdir. Farklı yönlerdeki asal gerilmeleri kapsamaktadır.

İkincil Gerilme: Mühendislik uygulamaları nedeni ile kaya kütlesi içerisindeki kazı sonucunda tetiklenen, oluşan gerilmelerdir.

Majör asal gerilme: Bir konuma, bölgeye etkiyen farklı doğrultudaki gerilmelerin büyük olanıdır.

Minör asal gerilme: Bir konuma, bölgeye etkileyen farklı doğrultudaki gerilmelerin küçük olanıdır.

Kohezyon: Dikey gerilmenin etkilediği bir düzlem boyunca malzemeyi kırmak için gerekli olan makaslama gerilmesi.

Kohezyonlu Zemin: Taneleri arasında moleküler çekim kuvvetleri bulunan zemin türü.

İçsel sürtünme açısı: Normal gerilme nedeni ile makaslama dayanımındaki artışın ölçütü olan mekanik bir parametre olup malzemelerin ve kütlelerin normal gerilme koşullarındaki dayanım değerlerini de doğrudan belirlemektedir. Mohr & Coulomb yenilme zarfının eğim açısı olan dayanım parametresidir.

Heterojenlik: Bir malzemenin özelliklerinin farklı konumlarda değişiklik göstermesi durumudur.

İzotropi: Bir malzemenin özelliklerinin her yönde aynı olması durumudur.

Elastisite Modülü: Malzemenin bir gerilme altında elastik şekil değiştirme ölçüsü olup, gerilmenin birim deformasyona oranı olarak tanımlanmaktadır.

Deformasyon Modülü: Malzemenin incelenen gerilme ya da gerilme farkları için sahip olduğu birim deformasyonun ölçütü olup, gerilmenin birim deformasyona oranı olarak tanımlanır.

Ortalama Deformasyon Modülü: Gerilme birim deformasyon eğrisinin lineer olduğu aralıktaki eğimidir.

Eklem: Yüzeyi boyunca herhangi bir yer değiştirmenin meydana gelmediği doğal kırıktır.

Klivaj (Dilinim): İnce taneli kayalarda sık aralıklı ve birbirine paralel olarak gelişmiş zayıf düzlemlerdir.

Foliasyon (Yapraklanma): Yüksek basınç ve/veya yüksek sıcaklık altında farklılaşma veya minerallerin tercihli yönelimi nedeniyle ortaya çıkan metamorfik kökenli zayıf yüzeylerdir.

Su içeriği: Boşluklardaki su ağırlığının kuru (katı) ağırlığına oranıdır.

Şev Duraylılığı: Bir doğal yamaca veya bir mühendislik şevine etkileyen iç ve dış kuvvetlere karşı şevin yenilmeye uğramadan yerini ve konumunu koruyabilmesi.

Şev Duraysızlığı: Bir yamacı veya mühendislik şevini oluşturan malzemenin yerçekimi veya diğer kuvvetlerin etkisiyle şev dışına doğru dengeye ulaşana değin hareket ederek yenilmesi.

Referanslar

- Aydan, Ö., Akagi, T. and Kawamoto, T. (1993). The squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26, 2, 137-163. <https://doi.org/10.1007/BF01023620>
- Barton, N.R. (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engng Geol.* 7, 287-332.
- Barton, N.R. (1976). The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 13(10), 1-24.
- Barton, N.R. and Bandis, S.C. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In *Rock joints, proc. int. symp. on rock joints, Loen, Norway*, (eds N. Barton and O. Stephansson), 603-610. Rotterdam: Balkema.
- Barton, N.R. and Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* 10(1-2), 1-54.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (9 Mart 2019). Zemin ve Temel Etüdü Uygulama Esasları ve Rapor Formatı.
- Gratchev, Ivan, 2019. *Rock Mechanics Through Project-Based Learning*
- Hoek, E. (2000). *Practical rock engineering*.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2018). The Hoek-Brown failure criterion and GSI–2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: NARMS-TAC, 2002, pp. 267-271.
- Hoek, E. and Diederichs, M.S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203–215.
- Hoek, E., Carter, T.G. and Diederichs, M.S. (2013). Quantification of the geological strength index chart. 47th US Rock Mechanics and Geomechanics Symposium, San Francisco, 23-26 June, 1-9.
- Hoek, E. and Marinos, P. (2006). A Brief History of the Hoek-Brown Failure Criterion, unpublished document.
- Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering – An Ongoing Set of Notes*, available on the Rocscience website, www.rocscience.com
- ISRM (International Society for Rock Mechanics)., *Rock Characterization, Testing and Monitoring, International Society of Rock Mechanics Suggested Methods*, Edited by E.T. Brown, Pergamon Press., Oxford, 1981; 211 pp.
- ISRM, 2007. *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006* (Editors: Ulusay and Hudson). International Society for Rock Mechanics, Kozan Ofset, Ankara, 628 p.
- Merifield RS, Lyamin AV, Sloan SW. (2006). Limit analysis solutions for the bearing capacity of rock masses using the generalized Hoek-Brown criterion. *Int J Rock Mech Min Sci* 43:920–937
- RocLab, 2002. <http://www.rocscience.com/downloads/RocLab.asp>, Rocscience Downloads RocLab.
- Rocscience Inc. 2019a, RocData, version 5.0, computer software, Rocscience Inc, Toronto, <https://www.rocscience.com/software/rocdata>
- Serrano A, Olalla C., 1994. Ultimate bearing capacity of rock masses. *International Journal Rock Mech. Min. Sci. Geomech Abstr.* 31, 93–106.
- Serrano A, Olalla C, González J. Ultimate bearing capacity of rock masses based on the modified Hoek–Brown criterion. *Int J Rock Mech Min Sci.* 2000;37:1013– 1018.
- Sutcliffe, D.J., Yu, H.S. and Sloan, S.W. "Lower bound solutions for bearing capacity of jointed rock", *Comput. Geotech.*, 31, pp. 23–36 (2004).

- TBDY (2018), "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği: Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar", Türkiye Cumhuriyeti, Ankara.
- Ulusay, R. ve Sönmez, H. (2007). Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri: Güncellenmiş-genişletilmiş 2. Baskı, TMMOB Jeoloji mühendisleri odası yayınları, No:60, Ankara
- Ulusay, R., Ekmekçi, Mehmet., Gerçek, Hasan., Çetin, K. Önder., Aktar, Mustafa. (2011) Yer Mühendislik Terimleri Sözlüğü. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.
- Yang, X.L. and Yin, J.H. Upper bound solution for ultimate bearing capacity with a modified Hoek-Brown failure criterion. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2005;42:550-560. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.03.002>.
- Winkerton, H.F. and Fang, H.Y. (1975). Foundation engineering handbook. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Wyllie, D. C. (1999). Foundations on Rock. Taylor & Francis; 2 edition (27 May 1999), New York.

