



MAKASLAMA DAYANIMI TESTİ ÜZERİNE PARAMETRİK ANALİZLER

(PARAMETRICAL ANALYSES ON SHEAR STRENGTH TEST)

İhsan ÖZKAN*, Bülent ERDEM*

ÖZET/ABSTRACT

Bu çalışmada doğrudan makaslama dayanımı testinin temel prensipleri incelenmiş ve değişik kaya birimlerinin makaslama dayanımları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında beyaz kalker, sarı kalker ve traverten olmak üzere üç ayrı kaya birimi üzerinde çalışılmıştır.

Deneylerde 29 numune, Uluslararası Kaya Mekanikliği Derneği tarafından önerilen yöntemler kullanılarak normal, kurutulmuş ve suya doyurulmuş olmak üzere üç ayrı koşul altında teste tabi tutulmuştur (ISRM, 1981). Takiben, kaya birimlerinin normal yer değiştirme-normal gerilme, makaslama yer değiştirmesi-makaslama gerilmesi ve normal gerilme-makaslama dayanımı ilişkileri elde edilmiştir. Her kaya biriminin bu koşullar altında tepe ve kalıcı makaslama dayanımları, görünür kohezyon (c), görünür sürtünme açısı (Φ_b) ve kalıcı sürtünme açısı (Φ_r) değerleri bulunmuş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca kaya kütle parametrelerine bağlı Hoek-Brown ve Barton, Görgül yenilme kriterleri göz önüne alınarak mühendislik analizleri yapılmıştır (Hoek vd, 1995; Barton, 1993).

In this study, firstly the basic principles of the direct shear test have been evaluated and then the direct shear strength of different rock units were determined. The study covered white limestone, yellow limestone and travertine units.

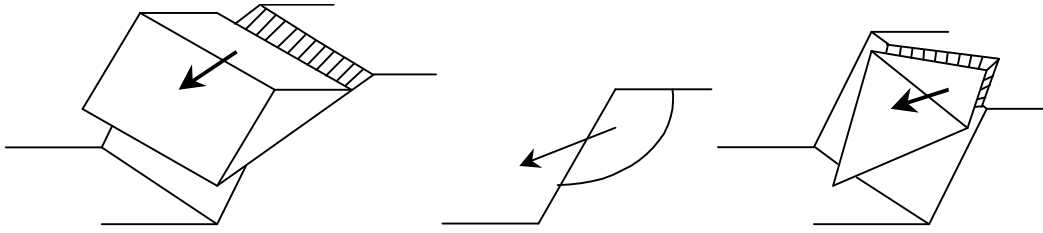
Shear tests were performed under the suggested conditions of the International Society for Rock Mechanics on 29 normal, heated and wetted samples (ISRM, 1981). Then, normal displacement vs. normal stress, shear displacement vs. shear stress and normal stress vs. shear strength relations have been obtained. Then, physical properties like peak and residual shear strengths, apparent cohesion (c), apparent friction angle (F_b) and residual friction angle (F_r) have been determined and interpreted. In addition, the engineering design analyses have been performed considering the Hoek-Brown and Barton's failure criteria which are based on rock mass parameters (Hoek vd, 1995; Barton, 1993).

ANAHTAR KELİMELER / KEY WORDS

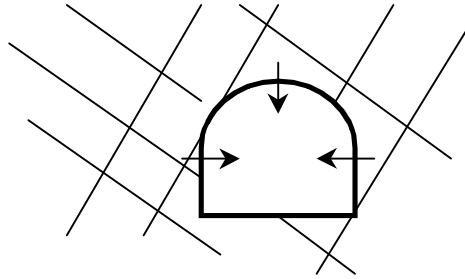
Makaslama dayanımı, Kohezyon, İçsel sürtünme açısı, Kaya yenilme kriteri
Shear strength, Cohesion, Internal friction angle, Rock failure criteria

1. GİRİŞ

Yerüstü madenlerinde sıklıkla karşılaşılan şev duraylılığı problemlerinde makaslama gerilmesi ve buna bağlı dayanım parametreleri büyük önem kazanmaktadır. Şev duraysızlıkları, ortam koşullarına bağlı olarak mevcut yapısal bozukluklar (süreksizlikler) boyunca oluşan kaymalar veya kaymaya karşı direncin en az olduğu noktalar boyunca meydana gelen kaymalar olarak tanımlanmaktadır. Burada sözü edilen kayma mekanizmasında makaslama gerilmeleri oldukça etkindir. Yerüstü madenlerinde şev duraysızlıkları genel olarak düzlemsel kayma, dairesel kayma ve kama tipi kayma biçiminde ortaya çıkmaktadır (Şekil 1). Ayrıca eklem takımlı orta sağlam veya sağlam kaya kütlelerinde açılan yeraltı boşlukları etrafında da sıkça kama tipi kayma ile karşılaşılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 1. Yerüstü madenlerinde karşılaşılan şev kayma tipleri



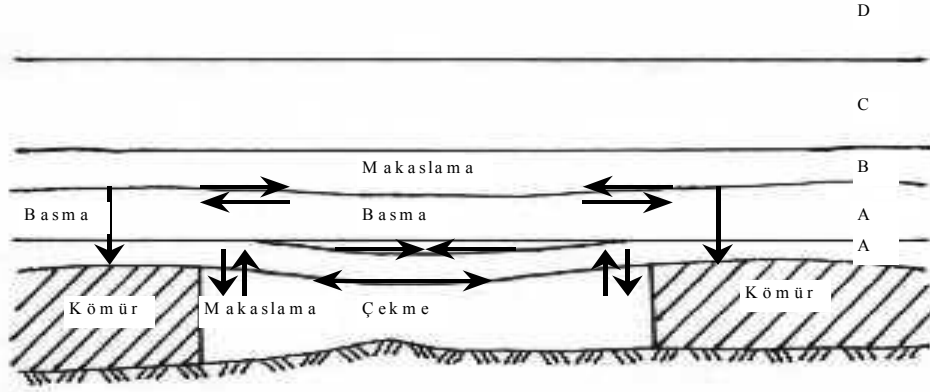
Şekil 2. Yeraltı boşlukları etrafında karşılaşılan kama tipi kayma

Yeraltı maden ocaklarında bakir bir noktada denge halindeki doğal arazi gerilmeleri, bir açıklık oluşturulmasından sonra açıklığın etrafındaki destek topukları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Yanısıra, açıklık tavanında basma, çekme ve makaslama gerilmeleri meydana gelir (Şekil 3). Kazı sonucu oluşan gerilmelerin yol açtığı diğer bir mekanik olay da, açılan boşluk etrafındaki yer değiştirme ve deformasyonlar olmaktadır. Bu hareketler, dengeye ulaşmaya çalışan gerilmelerin etkisiyle açığa çıkan iç enerjinin ürünüdür. Sözü edilen gerilmelerin diğer bir etkisi de, kaya kütlesi içindeki birim deformasyon enerjisinin artması şeklinde olmaktadır.

Kaya kütlesi içerisinde oluşturulacak yapılardan kaynaklanan ve yukarıda genel hatları ile özetlenen problemlerin aşılabilmesi için makaslama gerilmelerinin büyüklüklerine etki eden parametre karakteristiklerinin doğru ve hassas olarak belirlenmesi esastır. Bu parametreler laboratuvar ve/veya arazide kullanılmak üzere tasarlanan makaslama deney düzenekleri yardımıyla belirlenmektedir (ISRM, 1981).

Bu çalışmada Sivas yöresinde sıklıkla karşılaşılan beyaz kalker, sarı kalker ve traverten kaya birimleri model olarak seçilmiş ve birimlerin orijinal eklem yüzeylerine ait makaslama dayanım karakteristikleri ISRM tarafından önerilen yöntemler kullanılarak belirlenmiştir (ISRM, 1981). Ayrıca eklem yüzeylerinin makaslama dayanım parametreleri

fiziksel olarak değiştirilmiş ve deneyler tekrarlanmıştır. Bu fiziksel değişimler bir grup numune için eklem yüzeyleri suya doyurularak, diğer bir grup numune için ise eklem yüzeyleri kurutulmuş ve kurutulmuş eklem yüzeyli numuneler ile toplam 29 adet makaslama dayanım deneyi yapılmış ve elde edilen dayanım karakteristikleri değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Yeraltında açılan bir galeri etrafında oluşan gerilme türleri (Ünal ve Tutluoğlu, 1986)

2. MAKASLAMA DAYANIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE YENİLME ÖLÇÜTLERİNİN KULLANILMASI

Kaya yapılarının tasarımında kullanılan kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (Φ) ve eklem takımlarının makaslama karakteristikleri ISRM tarafından önerilen makaslama deneyi ile belirlenebilmektedir (ISRM, 1981).

Doğrudan makaslama deneyinin amacı, kaya numunelerinin veya zayıflık düzlemlerinin (süreksizlikler) en yüksek ve kalıcı doğrudan makaslama dayanımını, makaslama düzlemine dik olarak etkiyen gerilmenin fonksiyonu olarak belirlemektir (Eşitlik 1).

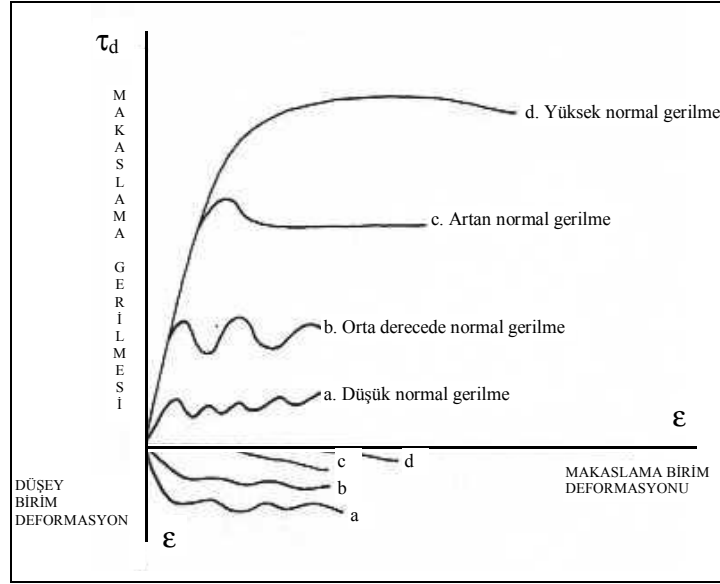
$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

Bu deney yardımıyla elde edilen kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (Φ) ve makaslama (τ)-normal gerilme (σ_n) karakteristiği genellikle şev duraylılığı problemlerinin denge sınırı analizlerinde ve temel tasarımında kullanılmaktadır (Ünal ve Tutluoğlu, 1986). Yeraltı boşlukları etrafında oluşan karmaşık gerilmelerin etkilerinin büyüklükleri tam olarak belirlenemediğinden, analitik tasarım çalışmaları ile bu gerilmelerin modellenmesi yapılmaktadır.

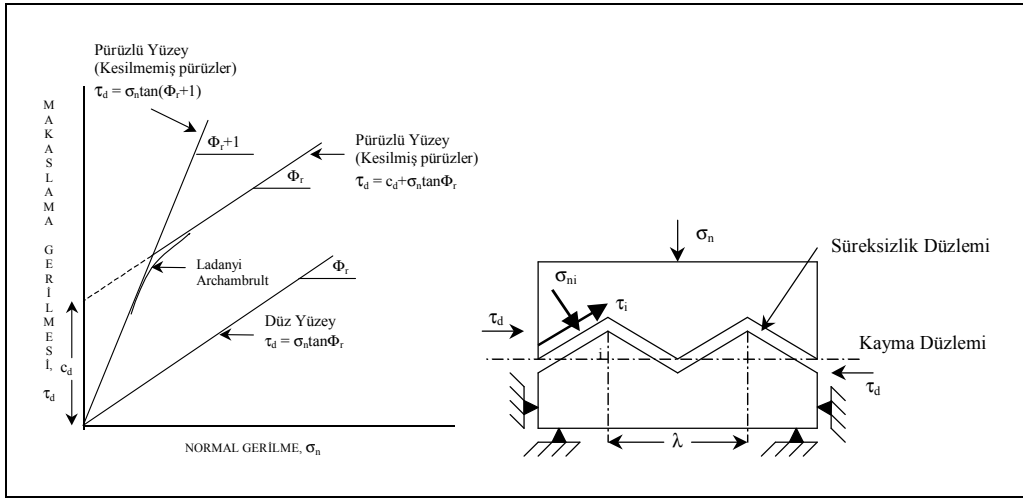
Doğrudan makaslama deneyinden elde edilen tipik sonuçlar Şekil 4'de verilmektedir. Görüleceği üzere süreksizlik düzlemine düşey olarak etki eden kuvvetlerin artması ile makaslama dayanımı artmakta, düşey makaslama hareketi azalmakta ve makaslama yer değiştirmesi giderek sabitleşmektedir. Çok büyük yüklerde ise makaslama yenilme noktasından sonra makaslama dayanımında bir düşme görülmemektedir. Bu davranış gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) deneylerindeki sünümlü kaya maddesi davranışını andırmaktadır.

Şekil 5, bir süreksizlik düzlemi üzerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen makaslama gerilmesi (τ_d) - düşey gerilme (σ_n) ilişkisini göstermektedir. Değişik pürüzlülük durumlarına göre elde edilen eğrilerle ilgili eşitlikler, kalıcı içsel sürtünme açısı (Φ_r) ve kohezyon (c)

değerleri şekil üzerinde gösterilmektedir. Şekilde verilen "i" açısı kayma düzlemi ile süreksizlik düzleminin yaptığı açıyı göstermektedir.



Şekil 4. Bir süreksizlik düzleminde makaslama gerilmesi-makaslama birim deformasyon ve düşey birim deformasyon-makaslama birim deformasyon ilişkisi (Ünal ve Tutluoğlu, 1986).



Şekil 5. Düz ve pürüzlü süreksizliklerde, makaslama gerilmesi ve düşey gerilme ilişkisi

Kaya mekaniği araştırmacıları tarafından laboratuvar ve/veya arazi çalışmaları ile belirlenen kalıntı makaslama dayanım parametreleri üzerinde yapılan istatistiksel analizler ve belirlenen kaya kütle özellikleri yardımıyla normal gerilme (σ_n)-makaslama dayanımı (τ) karakteristiğini modellemeye çalışan bir çok yaklaşım geliştirilmiştir (Özkan ve Özel, 2000). Geliştirilen güncel makaslama ve normal gerilmelere ait yenilme ölçütlerinin başlıcaları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Barton, makaslama gerilmesi ile düşey gerilme arasındaki karakteristik ilişkiyi aşağıdaki görgül ölçüt ile modellemiştir (Eşitlik 2) (Barton, 1976; Barton 1993).

$$t = s_n \tan \left[JRC \log \left(\frac{JCS}{s_n} \right) + \Phi_r \right] \quad (2)$$

Burada:

τ : makaslama gerilmesi

σ_n : süreksizlik düzlemine etki eden düşey gerilme

JRC : süreksizlik pürüzlülüğü katsayısı

JCS : süreksizlik yan kaya birimlerinin gerçek basma dayanımı (σ_c)

Φ_r : kalıcı içsel sürtünme açısı

Hoek ve Brown, Barton gibi laboratuardan elde edilen değerlere ek olarak kaya kütle karakteristiğini de eşitliklerine yansıtarak kaya maddesinden daha çok kaya kütlelerini tanımlayan bir yenilme ölçütü geliştirmişlerdir (Eşitlik 3) (Barton, 1976; Barton 1993; Hoek ve Brown, 1980a, Hoek ve Brown, 1980b).

$$S_1 = S_3 + \sqrt{m S_c S_3 + s S_c^2} \quad (3)$$

Burada:

σ_1, σ_3 : en büyük ve en küçük asal gerilmeler

σ_c : kaya maddesinin tek eksenli basma dayanımı

m, s : kaya kütle karakteristiği sabitleri

Hoek vd., tarafından yapılan çalışmalar neticesinde tüm kaya kütlelerini içerecek şekilde Eşitlik 3'de verilen Hoek-Brown yenilme ölçütü, yeniden aşağıdaki gibi genelleştirilerek sunulmuştur (Eşitlik 4) (Hoek vd.,1995).

$$S_1' = S_3' + S_c \left(m_b \frac{S_3'}{S_c} + s \right)^a \quad (4)$$

Burada:

σ_1', σ_3' : en büyük ve en küçük asal gerilmeler

σ_c : kaya maddesinin tek eksenli basma dayanımı

m_b, s, a : Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'ne bağlı kaya kütle karakteristiği sabitleri olup aşağıda sırasıyla tanımlanmıştır.

i) GSI>25 ve örselenmemiş kaya kütle için

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp \left(\frac{GSI - 100}{28} \right) \quad (5)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9} \right) \quad (6)$$

$$a = 0,5 \quad (7)$$

ii) GSI<25 ve örselenmemiş kaya kütle için

$$s = 0 \quad (8)$$

$$a = 0,65 - \frac{GSI}{200} \quad (9)$$

Yukarıda verilen Eşitlik 4'te sağlam ve orta sağlam kaya kütleleri için $a=0,5$ alınarak eşitlik özgün halini alırken, zayıf ve çok zayıf kaya kütleleri için $s=0$ alınarak eşitlik bu kez Hoek vd., tarafından geliştirilmiş olan Düzeltilmiş Hoek-Brown yaklaşımına dönüşmektedir (Eşitlik 3) (Hoek vd., 1992).

Genelleştirilmiş Hoek-Brown yaklaşımında makaslama gerilmesi (τ) ile normal gerilme (σ) arasındaki karakteristiği yansıtan makaslama dayanım zarfının kaya kütle parametreleriyle belirlenmesi için Balmer yaklaşımının kullanılması Hoek vd. tarafından önerilmiştir (Eşitlik 5) (Balmer, 1952; Hoek vd., 1992; Hoek vd., 1995).

$$t = s_c a \left[\frac{s}{s_c} \right]^b \quad (10)$$

Burada:

τ : makaslama dayanımı

σ : normal gerilme

σ_c : kaya maddesinin tek eksenli basma dayanımı

α ve β : en yüksek ve en düşük asal gerilme değerlerine bağlı büyüklükler.

Yukarıda ki eşitlikte kullanılan büyüklükler;

$$s = s_3 + \left[\frac{s_1 - s_3}{1 + \frac{\partial s_1}{\partial s_3}} \right] \quad (11)$$

$$t = (s_1 - s_3) \sqrt{\frac{\partial s_1}{\partial s_3}} \quad (12)$$

$$b = \left[\frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \right] \quad (13)$$

$$\log a = \frac{\sum y_i}{n} - b \frac{\sum x_i}{n} \quad (14)$$

Eşitlik 11, 12, 13 ve 14'de geçen büyüklükler ise aşağıda sunulmuştur.

$$y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (15)$$

$$x = s_3 \quad (16)$$

GSI>25 ve $a=0,5$ (orta sağlam ve sağlam kaya kütlesi) için

$$\frac{\partial S_1}{\partial S_3} = 1 + \frac{m_b S_c}{2(S_1 - S_3)} \quad (17)$$

GSI<25 ve s=0 (zayıf ve çok zayıf kaya kütlesi) için

$$\frac{\partial S_1}{\partial S_3} = 1 + am_b^a \left(\frac{S_3}{S_c} \right)^{a-1} \quad (18)$$

Eşitlik 2, 4 ve 10'da görüldüğü üzere popüler yenilme ölçütleri aynı zamanda kaya kütle karakteristiğini yansıtan sabitleri de içermektedir. Bu özellikleri yüzünden yukarıda özetlenen eşitlikler, kaya tasarım mühendisleri tarafından sıkça kullanılmaktadır.

3. LABORATUAR ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada üç farklı kaya birimi üzerinde makaslama deneyleri yapılmıştır. Orijinal eklem yüzeyleri önce orijinal neminde, daha sonra ise kurutulmuş ve suya doyurulmuş eklem yüzey koşulları altında makaslama deneylerine tabii tutulmuş ve elde edilen sonuçlar ile bir veri tabanı oluşturularak parametrik analizler yapılmıştır (Çizelge 1).

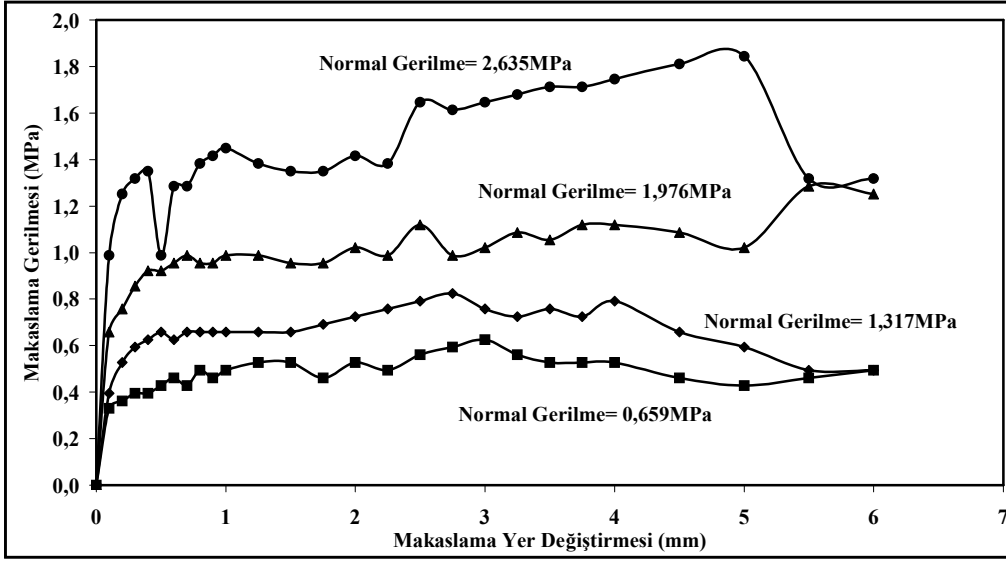
Çizelge 1. Doğrudan makaslama deneyinde kullanılan numune sayıları

Model	Deney koşulları		
	Orijinal Eklem Yüzeyi	Kurutulmuş Eklem Yüzeyi	Suya Doyurulmuş Eklem Yüzeyi
Traverten	4	3	2
Beyaz kalker	4	3	3
Sarı kalker	4	3	3

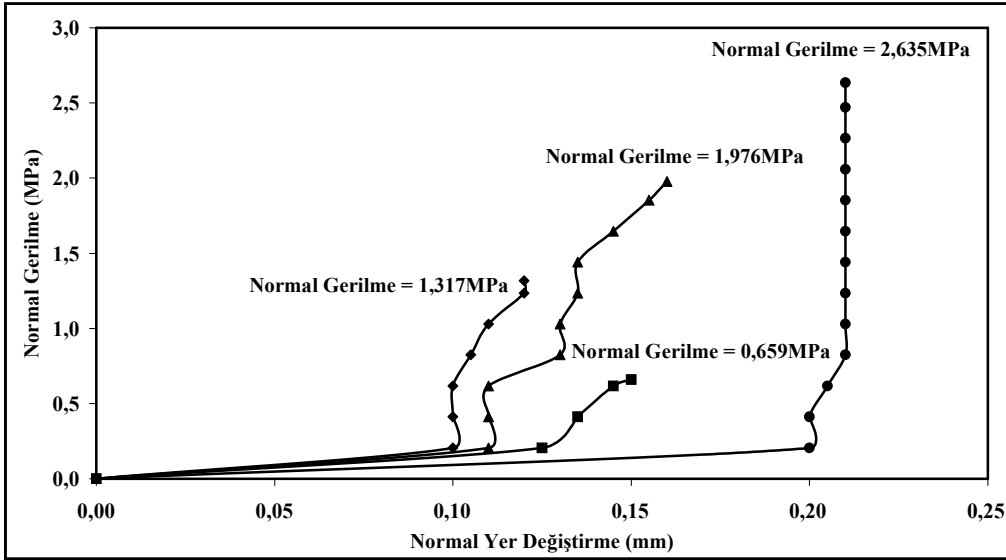
3.1. Orijinal Eklem Yüzeyleri Üzerinde Yapılan Deneyler

ISRM tarafından önerilen makaslama deney koşullarına uygun olarak model kaya birimlerinin orijinal eklem yüzeylerini içeren karot numuneleri hazırlanmış ve yüzey nemi değişmeden makaslama deneyleri gerçekleştirilmiştir (ISRM, 1981). Deney sonuçlarının bilgisayar ortamına aktarılmasıyla model kaya birimleri için makaslama yer değiştirmesi-makaslama gerilmesi, normal yer değiştirme-normal gerilme ve normal gerilme-makaslama dayanımı karakteristikleri belirlenmiş ve traverten kaya birimi için elde edilen sonuçlar Şekil 6, 7 ve 8'de sunulmuştur. Şekil 8'de görüldüğü gibi, model kaya birimleri için tepe ve kalıcı doğrusal makaslama dayanım zarfı eşitlikleri ile kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri belirlenmiştir (Çizelge 2).

Orijinal eklem yüzeyleri için yapılan makaslama deneylerine ait grafiksel sonuçlar üzerinde genel değerlendirme sonuçları: i) Makaslama yer değiştirmesi-makaslama gerilmesi karakteristik yapıları itibariyle beyaz kalker biriminin diğer kaya birimlerine kıyasla aynı makaslama yer değiştirmesi değerinde daha yüksek makaslama dayanımına sahip olduğu görülmüştür. ii) Normal yer değiştirme-normal gerilme ilişkisinde; beyaz kalker, traverten ve sarı kalker'e kıyasla daha yüksek normal gerilme değerlerine erişirken, sarı kalker'in çok az farkla takip ettiği ve traverten kaya biriminin daha az normal gerilmeye ulaştığı görülmüştür.

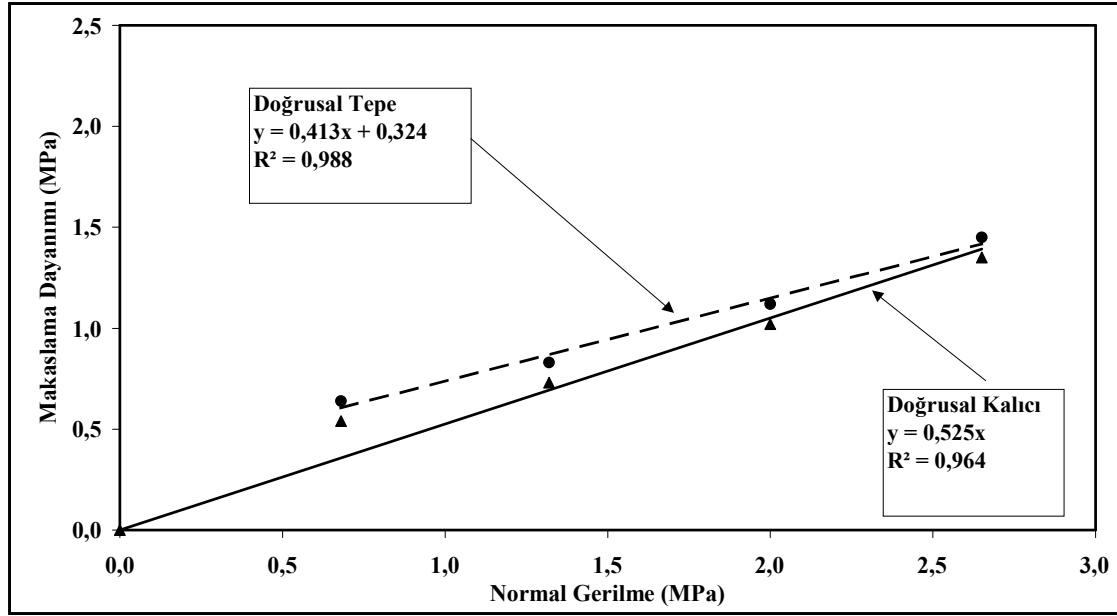


Şekil 6. Orijinal eklem yüzeyli model kaya birimlerine ait tipik bir (traverten) makaslama yer değiştirilmesi-makaslama gerilmesi ilişkisi



Şekil 7. Orijinal eklem yüzeyli model kaya birimlerine ait tipik bir (traverten) normal yer değiştirme-normal gerilme ilişkisi.

iii) Normal gerilme-makaslama dayanımı ilişkisinde; traverten kaya birimi normal gerilmeye karşı en düşük makaslama dayanımı değerine ulaşırken diğer birimlerin yaklaşık aynı makaslama dayanımı değerlerine ulaştığı görülmüştür. iv) Normal koşullarda en düşük makaslama dayanımı değerine traverten birimi ulaşmıştır ($\tau_p=1,50$ MPa ve $\tau_r=1,30$ MPa). Beyaz kalker ve sarı kalker de ise bu değerlerin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir ($\tau_p=2,30$ MPa, $\tau_r=2,10$ MPa; $\tau_p=2,45$ MPa, $\tau_r=2,20$ MPa).



Şekil 8. Orijinal eklem yüzeyli model kaya birimlerine ait tipik bir (traverten) normal gerilme-makaslama dayanımı ilişkisi

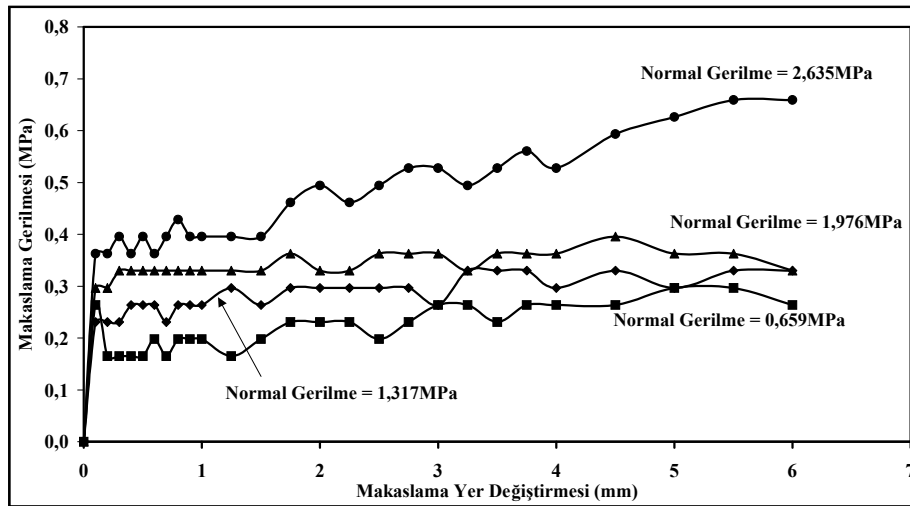
3.2. Kurutulmuş Eklem Yüzeyleri Üzerinde Yapılan Deneyler

Eklem yüzeylerinin 105°C'da 96 saat boyunca kurutulmasından sonra deney numuneleri, ISRM deney standartlarına uygun olarak deneye tabi tutulmuştur (ISRM, 1981). Deney sonuçları bilgisayar ortamında bir veri tabanına aktarılmış, değerlendirilmiş ve makaslama yer değiştirmesi-makaslama gerilmesi, normal yer değiştirme-normal gerilme ve normal gerilme-makaslama dayanımı karakteristik ilişkileri belirlenmiştir (Şekil 9, 10 ve 11). Çizelge 3'de tepe ve kalıcı doğrusal makaslama dayanım zarfı eşitlikleri ile kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri verilmiştir.

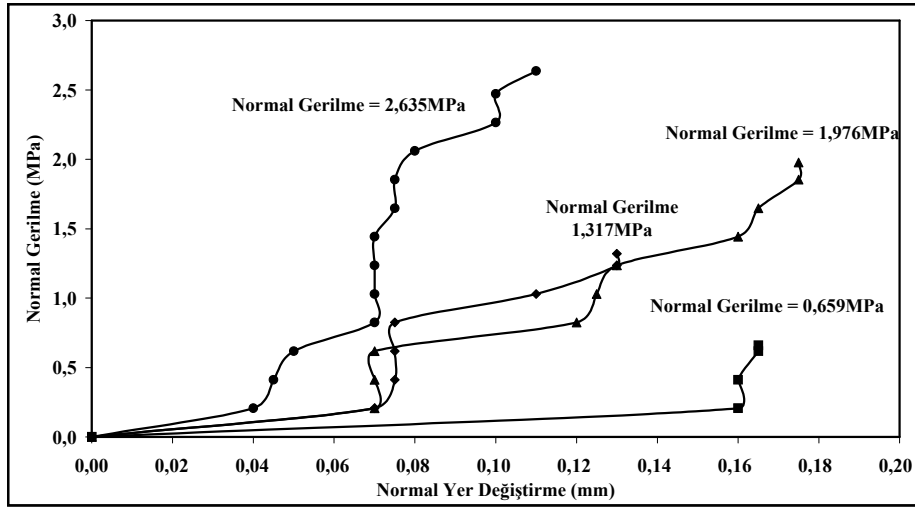
Kurutulmuş eklem yüzeyleri için yapılan makaslama deneyleri sonucunda elde edilen grafiklere bağlı genel değerlendirme sonuçları şu şekildedir: i) Makaslama yer değiştirmesi-makaslama gerilmesi ilişkilerine bakıldığında traverten biriminin diğer iki birime kıyasla oldukça düşük makaslama dayanımı değerine sahip olduğu görülmüştür. Sarı kalker biriminin ise beyaz kalker birimine göre daha yüksek makaslama dayanımı değerine sahip olduğu belirlenmiştir. ii)Normal yer değiştirme-normal gerilme karakteristik eğrileri üzerinde yapılan analizler sonucunda beyaz kalker biriminde normal gerilme değerinin traverten ve sarı kalkerle kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. iii)Traverten biriminde, normal gerilmeye karşı makaslama dayanımının diğer iki birime kıyasla oldukça düşük olduğu görülmüştür. Diğer birimlerin yaklaşık aynı değerlere ulaştığı görülmüştür. iv)Kurutulmuş koşullarda en düşük makaslama dayanımı değerlerine traverten kaya birimi ulaşmıştır ($\tau_p=0,50\text{MPa}$, $\tau_r=0,30\text{MPa}$).

Çizelge 2. Orijinal eklem yüzeyleri için elde edilen doğrusal makaslama dayanım zarfı eşitlikleri ile kohezyon ve içsel sürtünme açıları

Model	Tepe Karakteristiği			Kalıntı Karakteristiği			
	Kaya Birimi	Dayanım Zarfı Eşitliği	Kohezyon (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Dayanım Zarfı Eşitliği	Kohezyon (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)
Traverten		$\tau = 0,413\sigma + 0,324$	0,324	22,44	$\tau = 0,525\sigma$	-	27,70
		$\tau = 0,135\sigma + 1,145$	1,145	7,69	$\tau = 0,171\sigma$	-	9,73
		$\tau = 0,278\sigma + 0,407$	0,407	15,54	$\tau = 0,426\sigma$	-	23,07
		$\tau = 0,912\sigma + 0,288$	0,288	42,36	$\tau = 0,797\sigma$	-	38,54
Beyaz kalker		$\tau = 0,515\sigma + 0,825$	0,825	27,25	$\tau = 0,833\sigma$	-	39,79
		$\tau = 0,677\sigma + 0,215$	0,215	34,10	$\tau = 0,756\sigma$	-	37,09
		$\tau = 0,629\sigma + 0,176$	0,176	32,17	$\tau = 0,624\sigma$	-	31,96
		$\tau = 0,595\sigma + 0,614$	0,614	30,75	$\tau = 0,981\sigma$	-	44,45
Sarı kalker		$\tau = 0,872\sigma + 0,087$	0,087	41,09	$\tau = 0,800\sigma$	-	38,66
		$\tau = 0,595\sigma + 0,619$	0,619	30,75	$\tau = 0,785\sigma$	-	38,13
		$\tau = 0,947\sigma + 0,165$	0,165	43,44	$\tau = 0,775\sigma$	-	37,78
		$\tau = 0,370\sigma + 0,421$	0,421	20,30	$\tau = 0,534\sigma$	-	28,10

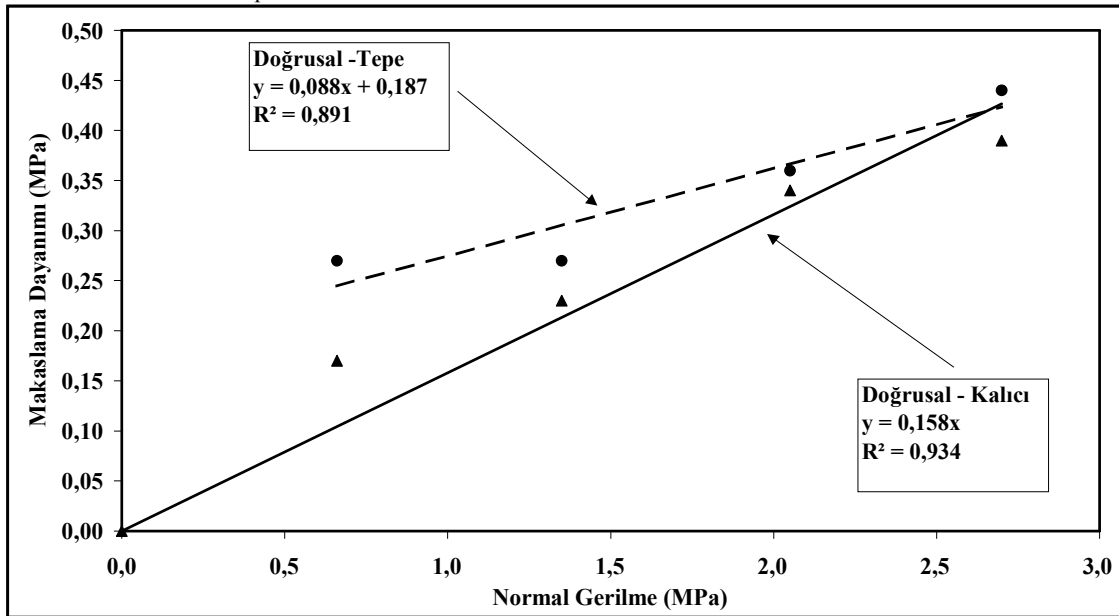


Şekil 9. Kurutulmuş model kaya birimlerine ait tipik bir (traverten) makaslama yer değiştirme-makaslama gerilmesi ilişkisi



Şekil 10. Kurutulmuş model kaya birimlerine ait tipik bir (traverten) normal yer değiştirme - normal gerilme ilişkisi

Beyaz kalker kaya biriminin makaslama dayanımı değeri ise diğer iki birimin değerlerinin arasında yer almıştır ($\tau_p=1,20\text{MPa}$, $\tau_r=0,95\text{MPa}$).



Şekil 11. Kurutulmuş model kaya birimlerine ait tipik bir (traverten) normal gerilme-makaslama dayanımı ilişkisi

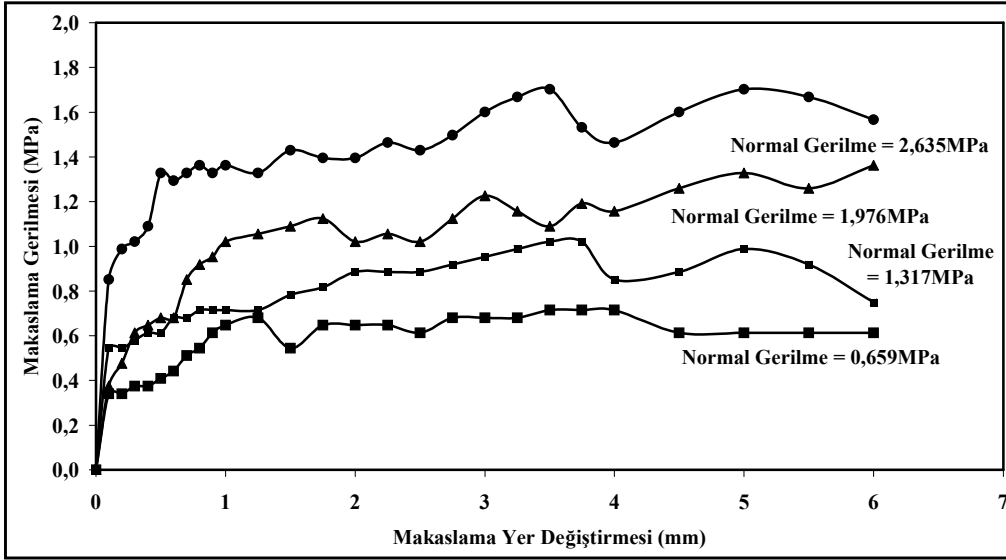
Çizelge 3. Kurutulmuş eklem yüzeylerine ait tepe ve kalıntı doğrusal makaslama dayanım zarfı eşitlikleri ile kohezyon ve içsel sürtünme açıları

Model	Tepe Karakteristiği			Kalıntı Karakteristiği		
	Dayanım Zarfı Eşitliği	Kohezyon (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Dayanım Zarfı Eşitliği	Kohezyon (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)
Traverten	$\tau = 0,088\sigma + 0,187$	0,187	5,03	$\tau = 0,158\sigma$	-	8,98
	$\tau = 0,067\sigma + 0,406$	0,406	3,83	$\tau = 0,230\sigma$	-	12,95
Beyaz kalker	$\tau = 0,454\sigma + 0,346$	0,346	24,42	$\tau = 0,717\sigma$	-	35,64
	$\tau = 0,486\sigma + 0,440$	0,440	25,92	$\tau = 0,625\sigma$	-	32,01
Sarı kalker	$\tau = 0,265\sigma + 0,643$	0,643	14,84	$\tau = 0,477\sigma$	-	25,50
	$\tau = 0,724\sigma + 0,111$	0,111	35,90	$\tau = 0,702\sigma$	-	35,07

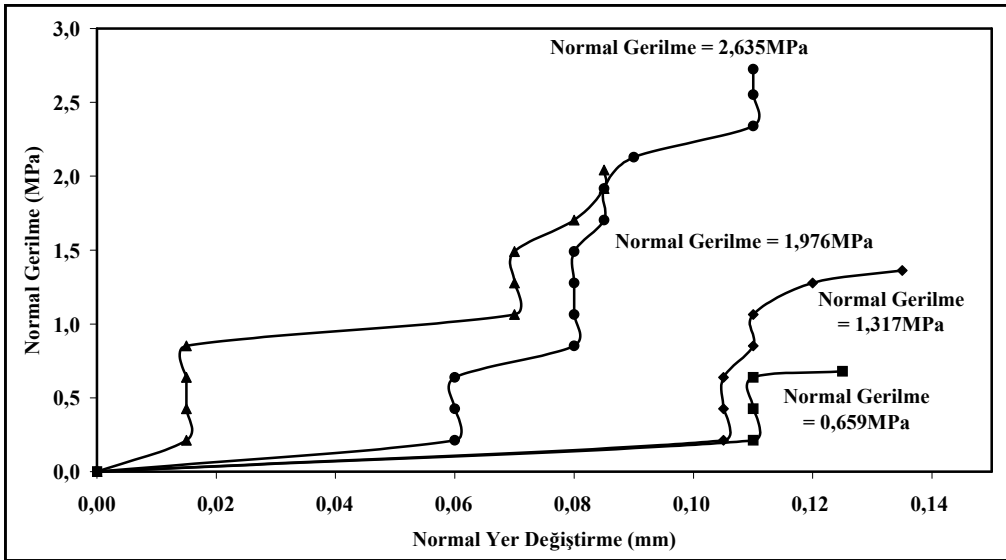
3.3. Suya Doyurulmuş Eklem Yüzeyleri Üzerinde Yapılan Deneyler

Model kaya birimlerinden alınan karot numuneler makaslama deneyi için beton kalıplara yerleştirildikten sonra eklem yüzeyleri beton kalıplara zarar vermeyecek şekilde 168 saat boyunca pamuk ve enjektör yardımıyla suya doyurulmuştur. Daha sonra ISRM deney standartlarına uygun olarak deneyler gerçekleştirilmiştir (ISRM, 1981). Deney sonuçları kullanılarak oluşturulan veri tabanı, değerlendirilmiş ve makaslama yer değiştirmesi-makaslama gerilmesi, normal yer değiştirme-normal gerilme ve normal gerilme-makaslama dayanımı karakteristik ilişkileri belirlenmiş ve Şekil 12, 13 ve 14'de traverten kaya birimi için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Tepe ve kalıcı doğrusal makaslama dayanım zarfı eşitlikleri ile kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri Çizelge 4'de sunulmuştur.

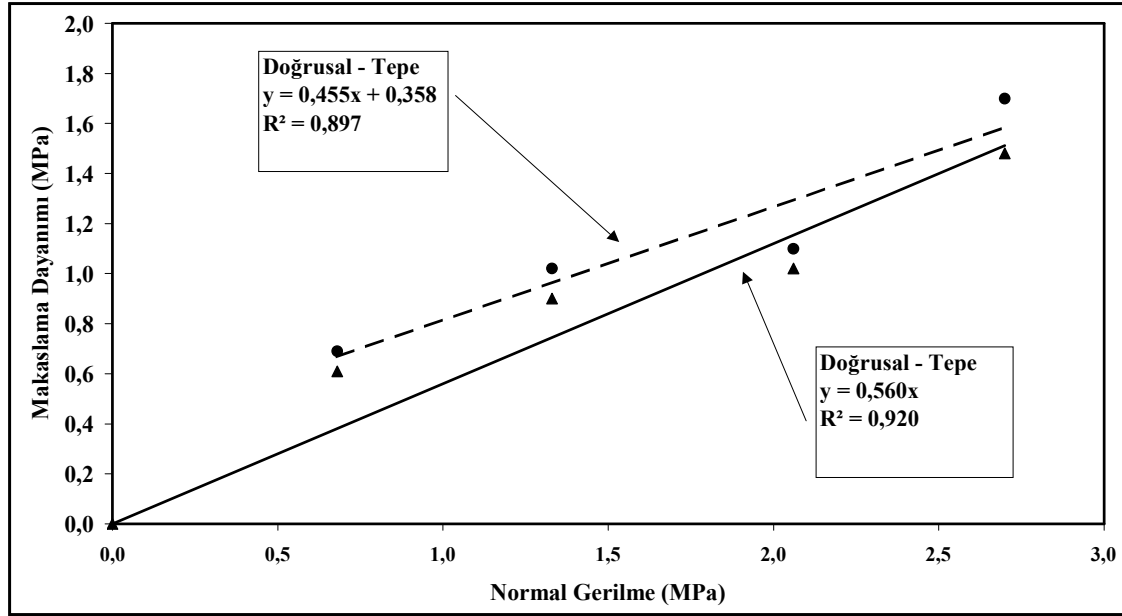
Suya doyurulmuş numunelerin makaslama deney sonuçlarına ait genel sonuçlar şu şekildedir: i)Eklem yüzeyleri suya doyurulmuş traverten, beyaz kalker ve sarı kalker birimlerinde makaslama yer değiştirmesi-makaslama gerilmesi ilişkisinde tüm karakteristik özelliklerin yaklaşık olarak aynı yapıda geliştiği analizler sonucunda belirlenmiştir. ii)Normal yer değiştirme-normal gerilme ilişkisinde, beyaz kalker birimi daha düşük normal gerilme değerlerine ulaşırken, sarı kalker biriminin daha düşük normal yer değiştirmelerde yüksek normal gerilme değerlerine eriştiği belirlenmiştir. iii)Beyaz kalker kaya biriminde normal gerilme değerine karşılık gelen makaslama dayanımının diğer iki kaya biriminden biraz daha düşük olduğu görülmüştür. v)Suya doyurulmuş kaya birimleri üzerinde yapılan deneylerde en düşük makaslama dayanımına beyaz kalker kaya biriminin sahip olduğu tespit edilmiştir ($\tau_p=1,30$ MPa; $\tau_r=1,20$ MPa). Traverten ve sarı kalker kaya birimlerinde kalıcı makaslama dayanım değerlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir ($\tau_p=1,70$ MPa, $\tau_r=1,50$ Mpa; $\tau_p=1,70$ MPa, $\tau_r=1,60$ MPa).



Şekil 12. Suya doyurulmuş model kaya birimlerine ait tipik bir (traverten) makaslama yer değiştirme - makaslama gerilmesi ilişkisi



Şekil 13. Suya doyurulmuş model kaya birimlerine ait tipik bir (traverten) normal yer değiştirme - normal gerilme ilişkisi



Şekil 14. Suya doyurulmuş model kaya birimlerine ait tipik bir (traverten) normal gerilme-makaslama dayanımı ilişkisi

Çizelge 4. Suya doyurulmuş eklem yüzeylerine ait makaslama deney sonuçları

Model	Tepe Karakteristiği			Kalıntı Karakteristiği			
	Kaya Birimi	Dayanım Zarfı Eşitliği	Kohezyon (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Dayanım Zarfı Eşitliği	Kohezyon (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)
Traverten		$\tau = 0,455\sigma + 0,358$	0,358	24,47	$\tau = 0,560\sigma$	-	29,25
		$\tau = 0,453\sigma + 0,395$	0,395	24,37	$\tau = 0,534\sigma$	-	28,10
		$\tau = 0,474\sigma + 0,445$	0,445	25,36	$\tau = 0,607\sigma$	-	31,26
Beyaz kalker		$\tau = 0,370\sigma + 0,388$	0,388	20,30	$\tau = 0,518\sigma$	-	27,39
		$\tau = 0,243\sigma + 0,281$	0,281	13,66	$\tau = 0,428\sigma$	-	22,81
		-	-	-	$\tau = 0,607\sigma$	-	31,24
Sarı kalker		$\tau = 0,674\sigma - 0,091$	0,000	33,98	$\tau = 0,587\sigma$	-	30,41
		$\tau = 0,107\sigma + 0,394$	0,394	6,11	$\tau = 0,252\sigma$	-	14,14
		$\tau = 0,129\sigma + 1,135$	1,135	7,35	$\tau = 0,535\sigma$	-	28,15

4. GÖRGÜL YENİLME ÖLÇÜTLERİ İLE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma kapsamında yapılan deneyler neticesinde hazırlanan normal gerilme-makaslama dayanım ilişkisi her ne kadar laboratuvar sonuçlarına bağlı olsa da, arazi gözlemleri ve bilgileri kullanılarak mühendislik analizleri çerçevesinde Hoek vd. ve Barton görgül yenilme yaklaşımları kullanılarak kaya kütesine ait dayanım karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır (Hoek vd., 1995; Barton, 1976; Barton, 1993).

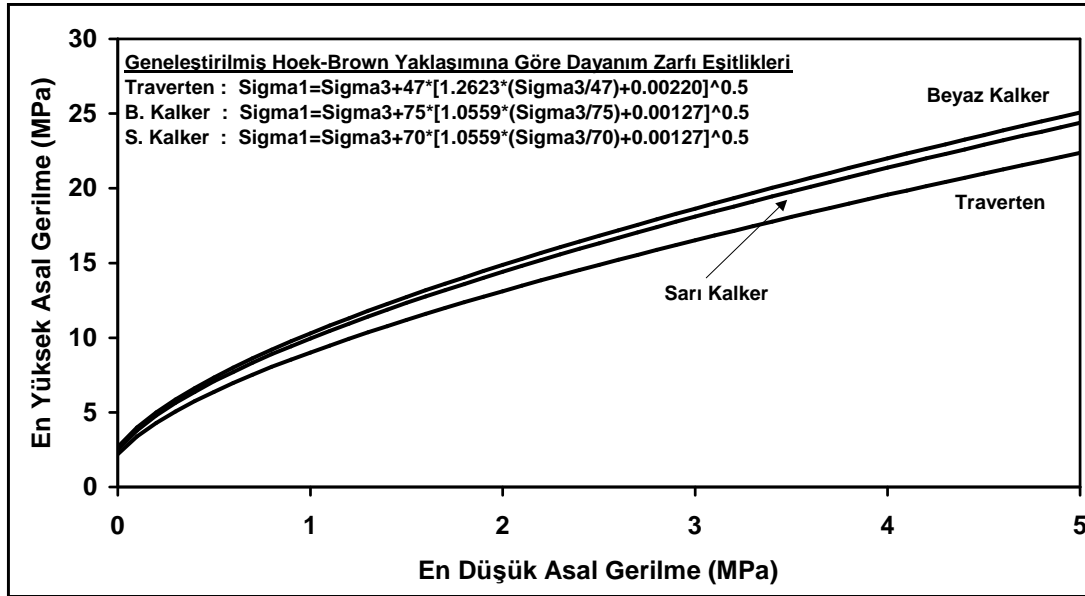
4.1. Genelleştirilmiş Hoek-Brown Görgül Yenilme Ölçütüne Göre Değerlendirme

Laboratuvar ve kaya kütle parametrelerini içeren Genelleştirilmiş Hoek-Brown görgül yenilme ölçüt yaklaşımı Eşitlik 4'de verilmiştir (Hoek vd,1995). Yaklaşım tarafından kullanılan arazi parametreleri, laboratuvar ve arazi çalışmalarına bağlı olarak tarafından verilen çizelgeler yardımıyla belirlenmiştir (Çizelge 5) (Hoek vd., 1995).

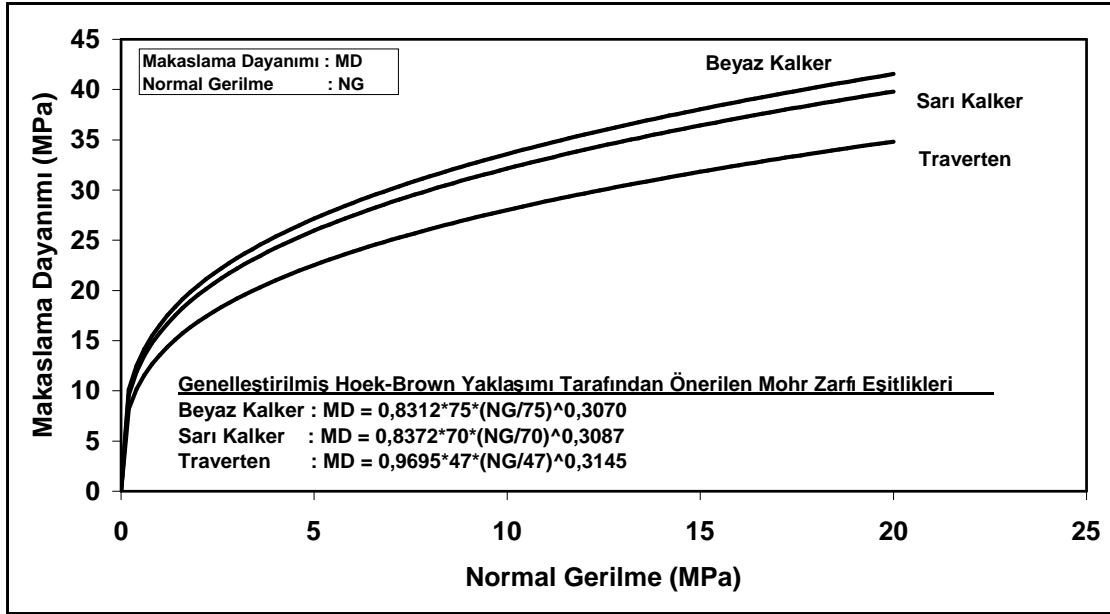
Çizelge 5'deki veriler kullanılarak Eşitlik 4 yardımıyla en büyük ve en küçük asal gerilme değerlerine bağlı dayanım zarfları belirlenmiştir (Şekil 15). Hoek ve Brown tarafından Mohr Zarfı için önerilen Eşitlik 10 kullanılarak her üç model kaya birimine ait orijinal eklem yüzeyleri için analizler yapılmış ve Şekil 16'da sunulmuştur (Hoek ve Brown, 1995). Laboratuvar deneyleri neticesinde elde edilen lineer karakterli eşitlikler kullanılarak yüksek seviyedeki normal gerilme değerlerinde beklenen makaslama dayanım değerleri türetilmiş 20) ve sadece traverten kaya biriminin laboratuvar ve görgül kaya yenilme ölçüt sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 17, 19 ve 20). Burada göze çarpan en önemli durum, her üç modelde de Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütünün orijinal, kurutulmuş ve suya doyurulmuş eklem yüzeyleri için yapılan laboratuvar makaslama deney sonuçları ile yakın bir benzerlik göstermemesidir.

Çizelge 5. Orijinal eklem koşulu için genelleştirilmiş Hoek vd. yenilme ölçütünde kullanılan arazi parametreleri (Hoek vd,1995; Balmer,1952)

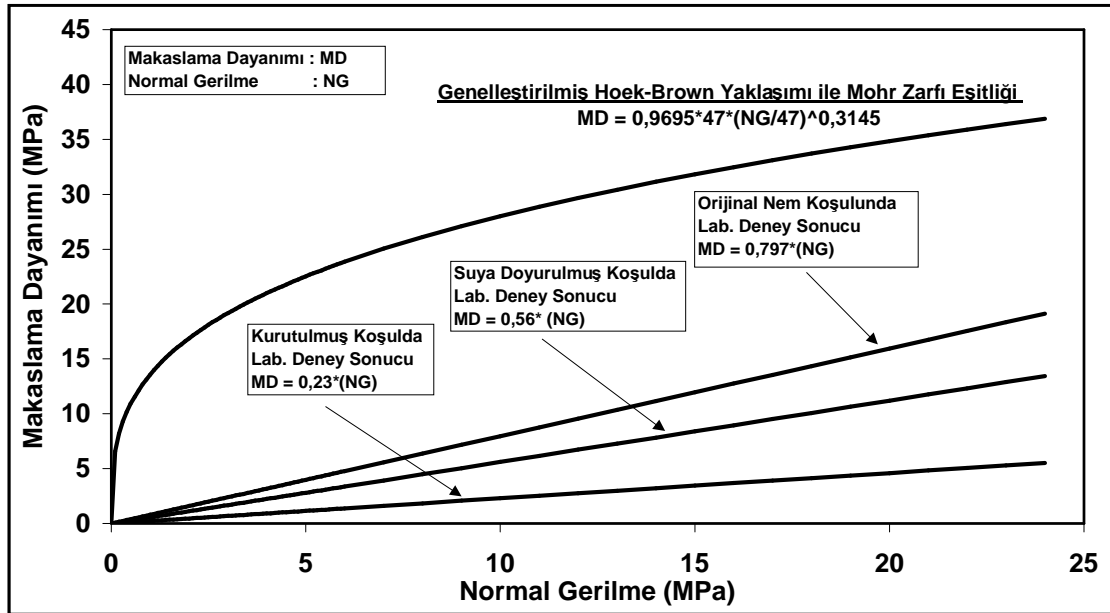
Model Kaya Birimi	Yapı	Eklem Yüzey Koşulları	GSI	m_b/m_i	s	a	σ_c (MPa)	α	β
Traverten	Çok Bloklulu	Orta-İyi	45	0,14025	0,0022	0.50	47	0,9695	0,3145
Beyaz Kalker	Çok Bloklulu	Orta	40	0,11732	0,00127	0.50	75	0,8312	0,3070
Sarı Kalker	Çok Bloklulu	Orta	40	0,11732	0,00127	0.50	70	0,8372	0,3087



Şekil 15. Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre orijinal eklem koşulunda kaya birimlerinin en düşük-en yüksek asal gerilmeleri (Hoek vd,1995)



Şekil 16. Orijinal eklem koşulunda kaya birimlerine ait Genelleştirilmiş Hoek-Brown yaklaşımına göre önerilen Mohr Zarfı karakteristiği (Balmer,1952; Hoek vd., 1995)



Şekil 17. Değişik laboratuvar koşullarında traverten model kaya birimine ait doğrusal Mohr Zarfları ile orijinal eklem koşulu için Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütüne bağlı Mohr Zarfı Karakteristiği (Hoek vd., 1995; Balmer, 1952)

4.2. Barton Görgül Yenilme Ölçütüne Göre Değerlendirme Sonuçları

Genelleştirilmiş Hoek-Brown ölçütü gibi hem laboratuvar hemde kaya kütle özelliklerini içeren Barton görgül yenilme ölçütü kullanılarak her üç model için yenilme zarfları belirlenmiştir (Hoek vd., 1995; Barton, 1976; Barton 1993) (Eşitlik 2). Öncelikle Barton tarafından geliştirilen yenilme ölçütünde kullanılan JRC (Joint Roughness Coefficient-Eklem Yüzey Pürüzlülük Katsayısı) ve JCS (Joint Wall Compressive Strength- Eklem Duvar Basınç Dayanımı) değerleri, laboratuvar ve arazi gözlemlerine bağlı olarak tespit edilmiştir (Çizelge 6) (Barton, 1976; Barton 1993).

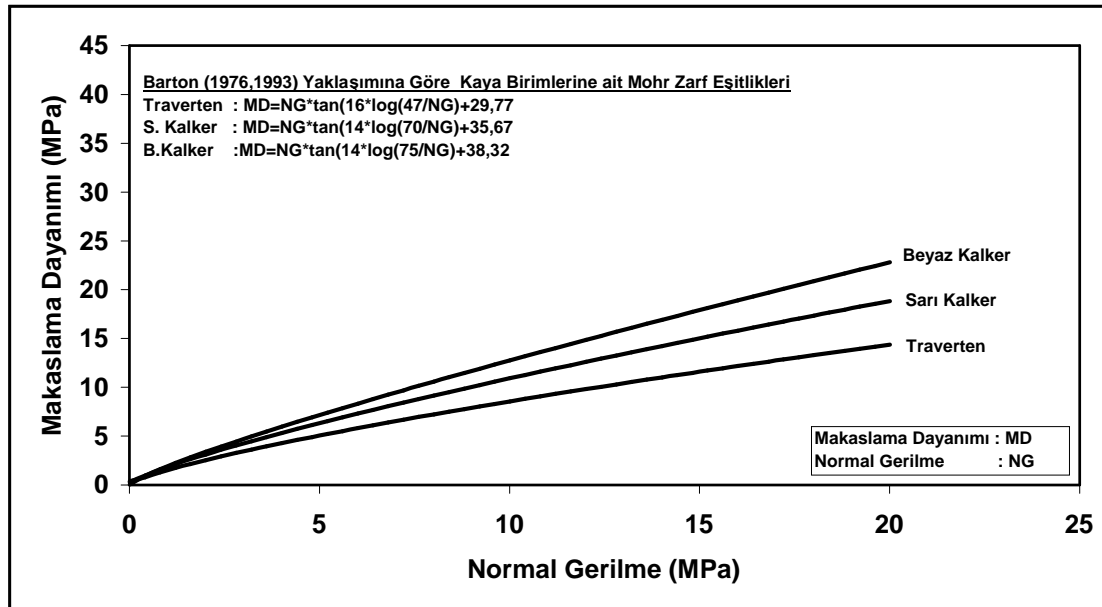
Eşitlik 2 kullanılarak yapılan analizler neticesinde model kaya birimlerine ait Mohr yenilme zarfları orijinal eklem yüzey koşulu için hazırlanmıştır (Şekil 18). Şekil 19'da ise, sadece traverten kaya birimine ait laboratuvar ve kaya yenilme ölçüt sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi orijinal eklem yüzey koşulu için dayanım büyüklükleri belli bir uyum göstermektedir. Normal gerilme değeri büyüdükçe görgül yaklaşım değerleri laboratuvar değerlerinin altında kalmaktadır. Görgül yaklaşım, kaya kütle özelliklerini yansıttığı için bu aslında beklenen bir sonuçtur.

Çizelge 6. Barton yenilme ölçütünde kullanılan parametreler

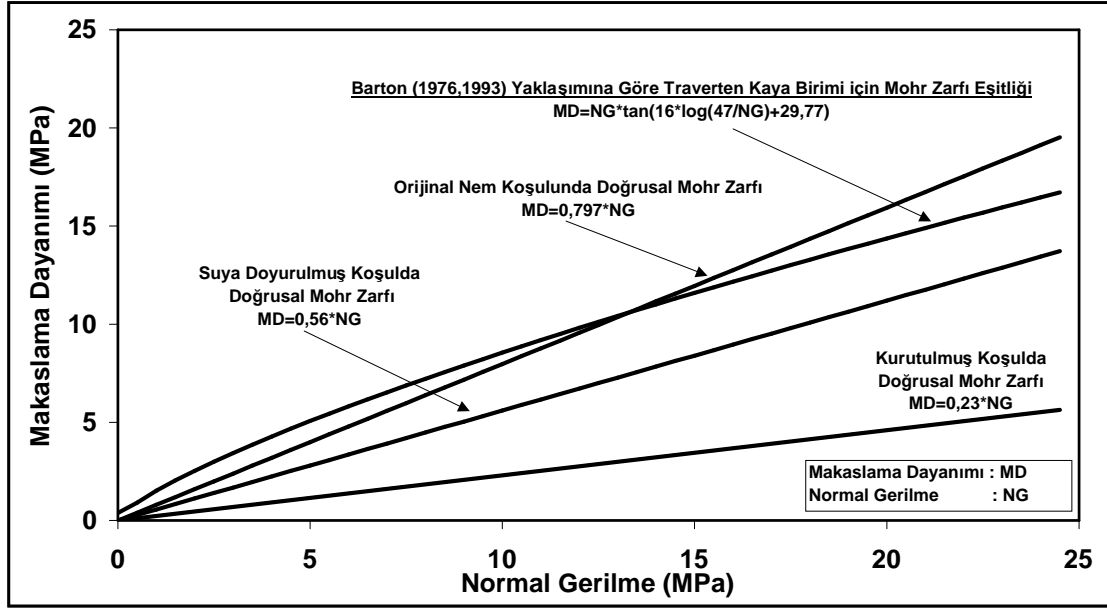
Model Kaya Birimi	Orijinal Eklem Koşulu JRC	Orijinal Eklem Koşulu JCS	Orijinal Eklem Koşulu $\phi_b = \phi_r$
Traverten	16	47	29,77
B. Kalker	14	75	38,32
S. Kalker	14	70	35,67

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, normal koşullar altında yapılan makaslama deney sonuçları ile kurutulmuş ve suya doyurulmuş koşullar altında gerçekleştirilen deney sonuçları arasındaki sapmanın belirlenmesi ve elde edilen sonuçların görgül yenilme ölçütleri ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 18. Barton (1976,1993) yaklaşımı ile orijinal eklem koşulu için model kaya birimlerine ait hazırlanmış Mohr Zarfları



Şekil 19. Barton (1976,1993) yaklaşımı ile orijinal eklem yüzeyli traverten model kaya birimine ait hazırlanmış Mohr Zarfı ile çeşitli koşullarda laboratuardan elde edilmiş doğrusal Mohr Zarfları

Laboratuar çalışmalarında her üç koşul da göz önüne alınan numunelerin, kurutulması veya suya doyurulması ile eklem yüzey özelliklerinde mühendislik tasarımı açısından makaslama dayanımı parametrelerinin olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. Normal oda koşullarında, kurutma ve suya doyurma koşullarında yapılan deney sonuçları aşağıda karşılaştırılmış ve daha sonra ise görgül yenilme ölçütlerine ait üretilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

- i) ISRM tarafından önerilen koşullarda yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen tepe kohezyon değerleri dikkate alındığında, orijinal eklem yüzey koşullarında elde edilen kohezyon değerlerinin fiziksel olarak bozunmuş olan diğer yüzey koşullarındaki kohezyon değerlerinin üstünde olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 7) (ISRM, 1981).
- ii) Kaya mühendislik tasarım çalışmalarında kullanılan diğer girdi parametresi olan içsel sürtünme açıları (tepe ve kalıcı) karşılaştırıldığında, kohezyon değerleri gibi orijinal eklem yüzey koşullarındaki içsel sürtünme açılarının fiziksel olarak bozunmuş haldeki değerlerden büyük olduğu göze çarpmaktadır (Çizelge 8).
- iii) Deney sonuçları neticesinde yapılan normal gerilme-makaslama dayanımı analizlerine bağlı hazırlanan doğrusal Mohr yenilme zarflarının karakteristik konumları model kaya birimleri için analiz edilmiştir. Çizelge 9'dan görüleceği üzere orijinal eklem yüzeyleri üzerinde yapılan deneylere ait dayanım zarfları diğer iki deneye nazaran oldukça fazla eğime sahiptirler. Diğer bir ifadeyle, aynı normal gerilme değerlerinde orijinal yüzey koşulları daha yüksek makaslama dayanımlarına sahiptirler. İfade edilen bu karakteristik yapı, laboratuardan elde edilen lineer karakterli normal gerilme-makaslama dayanımı ilişkilerini veren eşitlikler yardımıyla yüksek normal gerilme değerleri için üretilen makaslama dayanımı değerlerinde daha açık görülmektedir (Şekil 17,19 ve 20).

Çizelge 7. Farklı deney koşullarında yapılan makaslama deney sonuçlarına ait ortalama tepe kohezyon sonuçları

Kaya Birimi	Orijinal Eklem Yüzey Koşulları Tepe Kohezyon, c (MPa)	Kurutulmuş Eklem Yüzey Koşulları Tepe Kohezyon, c (MPa)	Suya Doymuş Eklem Yüzey Koşulları Tepe Kohezyon, c (MPa)
Traverten	0,5410	0,2965	0,3990
Beyaz kalker	0,4575	0,3930	0,3345
Sarı kalker	0,4017	0,3770	0,3940

Çizelge 8. Farklı deney koşullarında yapılan makaslama deney sonuçlarına ait ortalama tepe ve kalıcı içsel sürtünme sonuçları

Kaya Birimi	Orijinal Eklem Yüzey Koşulları		Kurutulmuş Eklem Yüzey Koşulları		Suya Doymuş Eklem Yüzey Koşulları	
	Tepe İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	Kalıcı İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	Tepe İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	Kalıcı İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	Tepe İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	Kalıcı İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)
Traverten	29,77	26,78	10,97	4,43	28,10	24,47
Beyaz kalker	38,32	31,46	33,83	25,17	22,81	16,98
Sarı kalker	35,67	35,92	30,29	25,37	28,15	15,81

Çizelge 9. Normal gerilme-makaslama dayanımı karakteristikleri ($\sigma_n=1$ MPa için)

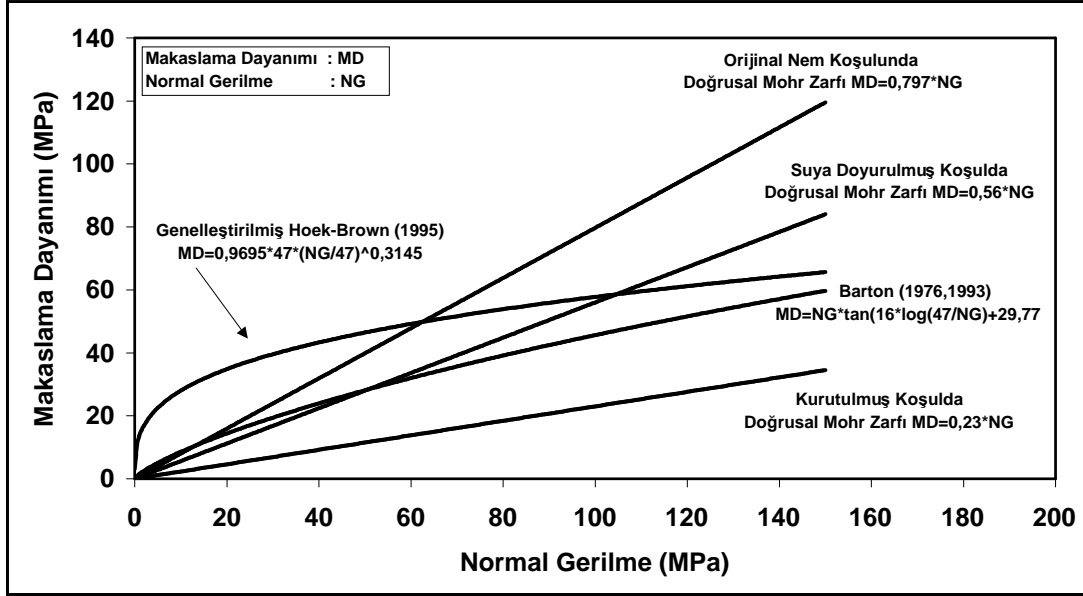
Kaya Birimi	Orijinal Eklem Yüzey Koşulları		Kurutulmuş Eklem Yüzey Koşulları		Suya Doymuş Eklem Yüzey Koşulları	
	Tepe τ (MPa)	Kalıcı τ (MPa)	Tepe τ (MPa)	Kalıcı τ (MPa)	Tepe τ (MPa)	Kalıcı τ (MPa)
Traverten	0,976	0,583	0,374	0,194	0,860	0,567
Beyaz kalker	1,062	0,799	0,863	0,671	0,641	0,518
Sarı kalker	1,019	0,724	0,872	0,589	0,783	0,458

iv) Laboratuvar deneyleri neticesinde elde edilen lineer eşitlikler yardımıyla yüksek normal gerilme değerlerinde olası makaslama yenilme değerlerinin seviyeleri tahmin edilmiştir (Şekil 17, 19 ve 20). Görgül yenilme ölçütleri yardımıyla belirlenen Mohr Zarfı değerleri ile laboratuvar sonuçları karşılaştırıldığında, Genelleştirilmiş Hoek-Brown yaklaşımı düşük normal gerilme değerlerinde ($\sigma_n < 63,5$ MPa) oldukça yüksek makaslama dayanım değerlerinde yenilmenin olacağını sergilerken özellikle yüksek normal gerilme değerlerinde orijinal ve suya doymuş koşullardaki deney sonuçlarının oldukça altında konumlandığı tespit edilmiştir (Şekil 20) (Hoek vd., 1995). Barton yaklaşımının laboratuardan elde edilen sonuçlara daha yakın bir karakter sergilediği hatta orijinal eklem yüzeyi için görgül yaklaşımın laboratuvar sonuçlarının altında kaldığı ($\sigma_n > 15$ MPa) gözlenmiştir (Barton, 1976; Barton, 1993).

v) Bu çalışmanın neticesinde ulaşılan somut sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- i. Laboratuvar deney sonuçlarından fiziksel olarak etkilenmiş yüzeylerdeki makaslama dayanım değerlerinin orijinal yüzeylere nazaran oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir.
- ii. Her iki görgül yaklaşım karşılaştırıldığında ise, normal gerilmenin artması durumunda ölçütlerin birbirlerine yaklaştığı tespit edilmiştir. Ancak Şekil 20'den görüleceği üzere Barton görgül yenilme ölçütünün diğer yenilme ölçütüne nazaran daha tutucu karakter

sergilemektedir. Bir başka deyişle, Barton yaklaşımı aynı kaya kütlesi için göreceli olarak önerdiği daha küçük makaslama dayanım değerleri ile daha emniyetli bir tasarım için kaya kütlesindeki yenilmeleri karakterize edecek bir dayanım verisi üretmektedir (Barton, 1976; Barton, 1993).



Şekil 20. Traverten model kaya birimine ait orijinal eklem yüzey koşulu için laboratuardan ve görgül ölçütlerden elde edilen Mohr Zarflarının karşılaştırılması

KAYNAKLAR

- Balmer G. (1952): "A General Analytical Solution for Mohr's Envelope", American Society for Testing Materials, vol. 52, pp. 1260-1271.
- Barton N. (1976): "The Shear Strength of Rock and Rock Joints", International Journal of Rock Mechanics Mineral Science and Geomechanics Abstracts, Vol. 13, No:9, pp. 255-279.
- Barton N. (1993): "Physical and Discrete Element Models of Excavation and Failure in Jointed Rock", Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, (Ed.) Pasamehmetoğlu, A.G., Turkish National Society for Rock Mechanics, Istanbul, Balkema, Rotterdam, pp. 35-46.
- Hoek E., Brown E.T. (1980a): "Underground Excavations in Rock", Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek E., Brown E.T. (1980b): "Empirical Strength Criterion for Rock Masses", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE 106 (GT9), pp. 1019-1035.
- Hoek E., Wood D., Shah S. (1992): "A Modified Hoek-Brown Criterion for Jointed Rock Masses", ISRM Symp.: EUROCK'92-Rock Characterization, J.A. Hudson (ed.), pp. 209-213.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. (1995): "Support of Underground Excavations in Hard Rock", Balkema, Rotterdam.
- ISRM (1981): "Rock Characterization, Testing and Monitoring - ISRM Suggested Method", Pergamon, Oxford, pp. 211.
- Özkan İ., Özel R. (2000): "Kaya Mühendislik Yapılarının Duyarlılık Analizlerinde Kullanılan Kaya Yenilme Ölçütleri", V. Ulusal Kaya Mekaniği Semp., Isparta, ss.129-137.

Ünal E., Tutluoğlu L. (1986): “Kaya Mekanığı İlkeleri”, ODTÜ Maden Müh. Böl., TKİ Eğitim Semineri, Ankara, s. 223.