

**ZAYIF KAYALARDAKİ PÜRÜZLÜLÜĞE SAHİP  
SÜREKSİZLİKLERİN MAKASLAMA DAYANIMLARININ  
ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF THE SHEAR STRENGTH OF ROUGH  
DISCONTINUITIES IN WEAK ROCKS**

**KEMAL CEM SOLAK**

**PROF. DR. ERGÜN TUNCAY**  
**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2023

## ÖZET

# ZAYIF KAYALARDAKİ PÜRÜZLÜLÜĞE SAHİP SÜREKSİZLİKLERİN MAKASLAMA DAYANIMLARININ ARAŞTIRILMASI

**Kemal Cem SOLAK**

**Doktora, Jeoloji Mühendisliği Bölümü**  
**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ergün TUNCAY**  
**Aralık 2023, 258 sayfa**

Tez çalışması kapsamında pürüzlülüğe sahip süreksizliklerinin makaslama dayanımlarının araştırılmasında yaygın biçimde kullanılan Barton-Bandis kriterinin zayıf kayalardaki performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Kriterde kullanılan girdi parametrelerinin tayinine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların ilk kısmında standart süreksizlik profillerine sahip örnekler üretilmiştir. Alçı ile üretilen örnekler üzerinde yapılan deneyler ile jeomekanik parametreler belirlenmiş ve devamında makaslama deneyleri gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda ise yapay örneklerde gerçekleştirilen deneylerin benzerleri doğal örnekler üzerinde tekrar edilmiştir.

Alçı örnekler üzerinde yapılan çalışmalarda, kriterin girdi parametresi olan JCS değerinin Schmidt çekici ile belirlenmesinde karşılaşılan zorluklar tespit edilmiş ve Schmidt çekicine alternatif olarak yumuşak malzemelerde iğne penetrometresinin kullanılabilceği ortaya konmuştur. Bir diğer girdi parametresi olan JRC'nin belirlenmesinde kullanılan farklı yöntemler incelenmiştir. Süreksizlik yüzeyleri profilometre, optik tarayıcı ve fotogrametri yöntemleriyle sayısallaştırılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üç yöntemle ait sayısallaştırma sonuçları standart

profillere ait sayısal verilere çok yakın değerler vermiş ve başarılı bulunmuştur. Sayısallaştırma yöntemlerinden elde edilen veriler ile pürüzlülük tanımlamada kullanılan istatistiksel parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler ile JRC değeri hesaplanmış ve sayısallaştırma yöntemlerinin JRC belirleme konusundaki performansı değerlendirilmiştir. Diğer yöntemlere kıyasla profilometre ile sayısallaştırma yöntemi izlenen süreçler nedeniyle daha pratik bulunmuştur. Alçılarda gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen sonuçlarla Barton-Bandis kriterinden belirlenen yenilme zarfları karşılaştırılmıştır. Kriter ile çizilen zarflardaki  $JCS/\sigma_n > 100$  olduğu şartlarda karşılaşılan olumsuzluklar irdelenmiştir. Bu duruma karşı önerilen eşik aı uygulaması ile çizilen zarfların makaslama deney sonuçlarını temsil etmede yetersiz kaldığı görülmüştür. Kriterin  $JCS/\sigma_n$  oranının 100'den büyük olduğu durumlarda da başarılı şekilde çalıştığı ve bu oranın tek başına eşik aı uygulaması için yeterli bir gösterge olmadığı anlaşılmıştır. JRC ve  $\phi_b$  değerine bağlı olarak kriterin sorunsuz şekilde çalışabileceği  $JCS/\sigma_n$  seviyeleri belirlenmiştir.

İgnimbiritlerde gerçekleştirilen çalışmalarda da JCS değerinin belirlenmesinde iğne penetrometresi ön plana çıkmıştır. JRC değerinin tayini için yaygın şekilde tercih edilen standart profillerle görsel karşılaştırmanın yanı sıra üç farklı sayısallaştırma yöntemi kullanılmış ve bu yöntemlerle istatistiksel parametreler belirlenmiştir. Görsel karşılaştırmaya en yakın sonuçlar profilometre ile sayısallaştırma yönteminden elde edilmiştir. Fotogrametri yöntemiyle süreksizlik yüzeyini temsil eden üç boyutlu pürüzlülük parametreleri belirlenmiştir. İgnimbiritlerde beş farklı JRC sınıfı için makaslama deneyleri yapılmış eşik aı ile çizilen yenilme zarflarının deney sonuçlarını temsil etmede yetersiz kaldığı görülmüştür. Eşik aı uygulanmadan çizilen yenilme zarflarında,  JRC sınıfı için gerçekleştirilen deneylere ait sonuçların kriter ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Kriterden kaynaklı olumsuzluklara karşılık iki ve üç boyutlu pürüzlülük parametrelerini kullanan alternatif yenilme kriterleri ile yenilme zarfları çizilmiştir. Ancak bu kriterlerin de deney sonuçlarını yansıtılmaktan uzak kaldığı belirlenmiştir. Barton-Bandis kriterinin kullanımında karşılaşılan olumsuzluklara rağmen makaslama dayanımının belirlenmesinde alternatif kriterlere göre daha başarılı olduğu anlaşılmıştır. Kritere ve kriterde kullanılacak parametrelere yeni alternatifler üretmektense, gözlenen

eksikliklerin Barton-Bandis kriterine ait parametrelere bağlı kalınarak giderilmesinde fayda olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Barton-Bandis kriteri, JRC, JCS, iğne penetrometresi, optik tarayıcı, fotogrametri, ignimbirit, yapay süreksizlik.

## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATION OF THE SHEAR STRENGTH OF ROUGH DISCONTINUITIES IN WEAK ROCKS**

**Kemal Cem SOLAK**

**Doctor of Philosophy, Department of Geological Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Ergün TUNCAY**

**December 2023, 258 pages**

The purpose of this thesis is to analyze the performance of the Barton-Bandis criterion, which is frequently used in determining the shear strength of discontinuities with roughness in weak rocks. Several studies have been conducted in order to identify the input parameters used in the criterion. In the first phase of these studies, samples with standard discontinuity profiles were produced. Geomechanical parameters were determined by the experiments on the samples produced with plaster, and then shear tests were conducted. In the second phase, similar experiments performed on artificial samples were applied on ignimbrite samples.

In the studies conducted on plaster samples, the complications encountered in determining the JCS value, which is the input parameter of the criterion, with the Schmidt hammer were observed, and this observation concluded that the needle penetrometer can be used as an alternative to the Schmidt hammer in soft materials. Different methods used to determine another input parameter, the JRC, were also examined. The discontinuity surfaces were digitized using profilometry, optical scanning, and photogrammetry, and the results were compared. The digitization results of the three methods show very close values to the numerical data of the standard profiles, and it was found to be successful. Statistical parameters used in defining roughness were determined with the data obtained from the digitization

methods. The JRC value was derived using these factors, and the performance of the digitization methods in determining JRC was examined. The digitization method with the profilometer was determined to be more practicable than other methods due to the processes used. The failure envelopes calculated using the Barton-Bandis criterion were compared to the results of plaster shear testing. The negativities encountered in the conditions where  $JCS/\sigma_n > 100$  in the envelopes drawn with the criterion are examined. In this case, the envelopes created with the recommended threshold angle application were found to be insufficient to represent the shear test results. It has been observed that the criterion works successfully in cases where the  $JCS/\sigma_n$  ratio is greater than 100 and this ratio alone is not a sufficient indicator for the application of the threshold angle. Depending on the JRC and  $\phi_b$  value, the  $JCS/\sigma_n$  levels at which the criterion can operate without any problems have been determined.

Needle penetrometer has come to the fore in the determination of the JCS value in studies performed on ignimbrites. Aside from visual comparison with commonly used standard profiles, three distinct digitization methods were used to determine the JRC value, and statistical parameters were determined by these methods. The digitization with the profilometer method produced the closest results to the visual comparison. Photogrammetry was used to determine three-dimensional roughness characteristics characterizing the discontinuity surface. Shear tests on five different JRC classes in ignimbrites were undertaken, and failure envelopes created with the threshold angle were found to be insufficient to represent the test results. In the failure envelopes drawn without applying the threshold angle, the results of the experiments performed for the three JRC classes were found to be in alignment with the criterion. Against the negativities arising from the criteria, failure envelopes were drawn with alternative failure criteria using two- and three-dimensional roughness parameters. However, it has been discovered that these criteria do not accurately reflect the experimental outcomes. Despite the drawbacks of using the Barton-Bandis criterion, it has been determined that it is more effective than alternative criteria in determining shear strength. It was decided that rather than developing new alternatives to the criterion and the parameters to be utilized in the criterion, it

is preferable to eliminate the detected flaws by adhering to the Barton-Bandis criterion parameters.

Keywords: Barton-Bandis criterion, JRC, JCS, needle penetrometer, optical scanner, photogrammetry, ignimbrite, artificial discontinuity.

## TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim süresince hem bilimsel hem de sosyal anlamda bana yol gösteren ve yolumu aydınlatan, tez çalışması kapsamında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, bilimsel olgunluğa erişmemde büyük emeği olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Ergün Tuncay'a,

Tezin gelişmesinde önemli katkıları olan, daha iyisini başarabilmem için görüşleri ile beni cesaretlendiren ve her daim beni destekleyen Tez İzleme Komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Nihat Sinan Işık'a ve Sayın Prof. Dr. Ahmet Hakan Nefeslioğlu'na,

Teze sundukları çok değerli katkıları için tez savunma jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Candan Gökçeoğlu'na ve Sayın Prof. Dr. Adil Binal'a,

Lisansüstü eğitim hayatım boyunca bilgi ve tecrübesiyle bana yön veren Sayın Prof. Dr. Reşat Ulusay'a,

Çalışma kapsamında kullanılan ekipman konusunda sunduğu destek dolayısıyla Sayın Doç. Dr. Şener Karabulut'a,

Laboratuvar çalışmalarında verdikleri desteklerden ötürü Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı teknisyenleri Sayın Özgür Erol'a ve Sayın Ahmet Bay'a,

Tez kapsamında gerçekleştirilen mineralojik incelemelere sunduğu desteklerden ötürü Sayın Dr. Lütfiye Akın'a,

Tez çalışması süresince verdikleri manevi destek dolayısıyla Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü akademik ve idari personeline,

Tez çalışması boyunca verdiği manevi desteklerden ve tez kapsamında gerçekleştirilen analizlerde sunduğu çok değerli katkılardan dolayı Jeoloji Yüksek Mühendisi Sayın Çağatay Alp Arslan'a,



Tez çalışması ile ilgili yaşadığım zorlukların yanı sıra bu uzun süreçte karşılaştığım her türlü sorunda yanımda olan ve bana destek olmak için elinden gelen bütün fedakârlığı yapan yol arkadaşım Ayşe'ye,

Her zaman yanımda olduklarını bildiğim, en zor zamanlarda varlıklarından bile güç aldığım ve haklarını asla ödeyemeyeceğim aileme,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kemal Cem SOLAK

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
ÇİZELGELER .....	xv
ŞEKİLLER .....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xxix
1. GİRİŞ .....	1
2. SÜREKSİZLİKLERİN MAKASLAMA DAYANIMININ BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	5
3. PÜRÜZLÜLÜĞÜN TANIMLANMASI VE SAYISALLAŞTIRILMASI .....	38
3.1. Süreksizliklere Ait Pürüzlülüğün Tanımlanması .....	38
3.1.1. Pürüzlülüğün Belirlenmesinde Kullanılan İstatistiksel Yöntemler .....	38
3.1.2. Pürüzlülüğün Belirlenmesinde Kullanılan Jeostatistiksel Yöntemler ...	44
3.1.3. Pürüzlülüğün Belirlenmesinde Kullanılan Fraktal Analiz Yöntemleri ...	44
3.2. Süreksizliklere Ait Pürüzlülüğün Sayısallaştırılması .....	46
3.2.1. Süreksizlik Yüzeyine Temas Ederek Ölçüm Yapan Cihazlar .....	46
3.2.2. Süreksizlik Yüzeyine Temas Etmeden Ölçüm Yapan Cihazlar .....	47
4. BARTON-BANDIS KRİTERİNE YÖNELİK DEĞERLENDİRMELER .....	50
5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI .....	53
5.1. Yapay Örnekler Üzerinde Yapılan Çalışmalar .....	53
5.1.1. Amaç ve Yöntem .....	53
5.1.2. Deney Örneklerinin Hazırlanması .....	54
5.1.3. Jeomekanik Parametrelerin Belirlenmesi .....	60
Birim Hacim Ağırlıkların Tayini .....	60
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini .....	61

Schmidt Sertlik Çekici İle Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini .....	63
İğne Penetrometresi İle Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini.....	66
Üç Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini .....	68
Brazilian Çekilme Dayanımının Tayini .....	69
Elastisite Modülü ve Poisson Oranının Tayini.....	70
5.1.4. Süreksizlik Yüzeylerinin Hazırlanması ve Makaslama Deneyleri.....	72
Temel Sürtünme Açılarının ( $\phi_b$ ) Tayini .....	74
Makaslama Dayanımı Deneyleri .....	80
5.2. Doğal Örnekler Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....	106
5.2.1. Jeomekanik Parametrelerin Belirlenmesi .....	112
Birim Hacim Ağırlıkların Tayini.....	112
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini.....	112
Schmidt Sertlik Çekici İle Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini .....	113
İğne Penetrometresi İle Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini.....	114
Brazilian Çekilme Dayanımının Tayini .....	115
5.2.2. Süreksizlik Yüzeylerinin Hazırlanması.....	116
6. SÜREKSİZLİK YÜZEYLERİNİN SAYISALLAŞTIRILMASI .....	123
6.1. Profilometre İle Sayısallaştırma.....	124
6.2. Üç Boyutlu Optik Tarayıcı İle Sayısallaştırma.....	127
6.3. Fotogrametrik Yöntem İle Sayısallaştırma.....	136
6.4. Sayısallaştırma Yöntemlerinin Değerlendirilmesi .....	150
7. SÜREKSİZLİK YÜZEYLERİNE AİT SAYISAL PARAMETRELER.....	154
7.1. Standart Profillere Ait İstatistiksel Parametreler ve JRC Değerleri .....	154
7.1.1. Profilometre Yöntemi.....	154
7.1.2. SLS Yöntemi .....	159
7.1.3. SfM Yöntemi.....	160
7.2. İgnimbirit Örneklerine Ait İstatistiksel Parametreler ve JRC Değerleri.....	161

7.2.1. Profilometre Yöntemi.....	161
7.2.2. SLS Yöntemi .....	167
7.2.3. SfM Yöntemi.....	170
7.3. İgnimbirit Örneklerde Üç Boyutlu İstatistiksel Parametreler .....	173
7.4. İstatistiksel Parametrelere İlişkin Genel Değerlendirme .....	176
7.5. İgnimbiritlerdeki Sayısallaştırma Performansının Değerlendirilmesi.....	177
8. İGNİMBİRİTLERDE MAKASLAMA DAYANIMI DENEYLERİ .....	190
8.1. Barton-Bandis Kriteri İle Oluşturulan Yenilme Zarfları.....	190
8.2. Alternatif Yenilme Kriterleri İle Oluşturulan Yenilme Zarfları .....	200
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	214
10. KAYNAKLAR .....	222
EKLER .....	237
ÖZGEÇMİŞ .....	258

## ÇİZELGELER

Çizelge 3.1:	JRC değerinin belirlenmesi için önerilen eşitlikler (Zheng ve Qi, 2016'dan). ....	43
Çizelge 3.2:	JRC ile D arasındaki ilişkiye bağlı olarak önerilen eşitlikler (Li ve Huang, 2015).....	45
Çizelge 5.1:	Yapay örneklerden yararlanılarak gerçekleştirilen bazı çalışmalarda kullanılan karışım oranları ve elde edilen dayanımlar.....	55
Çizelge 5.2:	Düşük dayanımlı örneklerin hazırlanmasında kullanılan alçılara ait teknik özellikler ile kimyasal analiz sonuçları.....	58
Çizelge 5.3:	Farklı karışım oranlarındaki örneklerin boy, çap, ağırlık ve birim hacim ağırlık ( $\gamma$ ) değerleri. ....	60
Çizelge 5.4:	Dört farklı karışım oranı kullanılarak hazırlanan alçı örnekleri üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonuçları. ....	62
Çizelge 5.5:	Kayaların dayanımının arazide tahmin edilmesine yönelik ISRM (2007) tarafından önerilen ölçütler (Ulusay, 2010'dan alınmıştır). ....	62
Çizelge 5.6:	Farklı karışım oranları için büyük karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilen Schmidt çekici deneyinden elde edilen geri sıçrama değerleri. ....	65
Çizelge 5.7:	Alçı örneklerde, farklı karışım oranları için NPI kullanılarak hesaplanan UCS (MPa) değerleri.....	68
Çizelge 5.8:	Alçı örneklerde yapılan üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerine ait sonuçlar.....	69
Çizelge 5.9:	Alçı örneklerde yapılan Brazilian çekilme dayanımı deneylerine ait sonuçlar.....	69
Çizelge 5.10:	Elastik parametrelerin belirlenmesi için yapılan deneylere ait sonuçlar.....	71
Çizelge 5.11:	Literatürde farklı araştırmacılar tarafından alçı-su karışımı ile hazırlanan yapay örnekler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen UCS ve $\phi_b$ değerleri.....	80

Çizelge 5.12:	Farklı $H$ , $\alpha$ ve $\beta$ değerleriyle oluşturulan şev geometrilerinde kayma yüzeylerine dik olarak etkiyen gerilmeler ( $\sigma_n$ , kPa).....	84
Çizelge 5.13:	Sayısal analizlerde kullanılmak üzere oluşturulan modellere ait başlangıç koşulları.....	87
Çizelge 5.14:	Farklı normal gerilme seviyeleri yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenen ve makaslama dayanım değerlerinin en son negatif değer aldığı ( $\tau$ (kPa) $< 0$ ), makaslama dayanımının azalma eğiliminin bittiği ( $\tau$ (kPa) $> 0$ ) ve makaslama dayanımının artma eğilimine başladığı ( $\tau$ (kPa) (+)) normal gerilme seviyeleri.....	104
Çizelge 5.15:	Farklı JCS ve JRC değerleri kullanılarak belirlenen kritik JCS/ $\sigma_n$ oranı ile buna bağlı olarak belirlenen eşik açı değerleri ( $\phi_b=40^\circ$ ).....	105
Çizelge 5.16:	İgnimbiritlerde gerçekleştirilen kimyasal analizlere ait sonuçlar.	109
Çizelge 5.17:	İgnimbirit örneklerin boy, çap, ağırlık ölçümleri ve hesaplanan birim hacim ağırlık değerleri. ....	113
Çizelge 5.18:	İgnimbiritlerde gerçekleştirilen UCS deneylerine ait sonuçlar. ....	113
Çizelge 5.19:	İgnimbiritler üzerinde gerçekleştirilen Schmidt çekici deneyinde elde edilen geri sıçrama değerleri ve hesaplanan UCS değerleri.....	115
Çizelge 5.20:	İgnimbiritlerde NPI kullanılarak hesaplanan UCS (MPa) değerleri. .	115
Çizelge 5.21:	İgnimbiritlerde yapılan Brazilian çekilme dayanımı deneylerine ait sonuçlar.....	116
Çizelge 6.1:	Artec Eva isimli üç boyutlu optik tarayıcının teknik özellikleri (www.artec3d.com).....	128
Çizelge 6.2:	Fotoğraf çekiminde kullanılan akıllı telefon kamerasına ait özellikler. ....	138
Çizelge 6.3:	Alçı örnekler için SfM yöntemiyle üç boyutlu model oluşturma işlemine ait performans parametreleri. ....	145
Çizelge 6.4:	İgnimbiritler için SfM yöntemiyle üç boyutlu model oluşturma işlemine ait performans parametreleri. ....	146
Çizelge 6.5:	Referans olarak kullanılan standart profillere ait maksimum ve minimum yükseklik ile genlik değerleri.....	153

Çizelge 6.6:	Referans veri kullanılarak üretilen örnekler üzerinde farklı sayısallaştırma yöntemleriyle elde edilen verilere göre hesaplanan RMSE değerleri. ....	153
Çizelge 7.1:	Standart profiller kullanılarak profilometre ölçümleri sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler. ....	156
Çizelge 7.2:	Çizelge 7.1’de sunulan istatistiksel parametreler kullanılarak hesaplanan JRC değerleri. ....	157
Çizelge 7.3:	Standart profiller kullanılarak SLS yöntemi ile sayısallaştırma sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler. ....	159
Çizelge 7.4:	Çizelge 7.3’te sunulan istatistiksel parametreler kullanılarak hesaplanan JRC değerleri. ....	160
Çizelge 7.5:	Standart profiller kullanılarak SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler. ....	161
Çizelge 7.6:	Çizelge 7.5’te sunulan istatistiksel parametreler kullanılarak hesaplanan JRC değerleri. ....	161
Çizelge 7.7:	İgnimbiritlerde profilometre ile alınan profillerin standart profillerle karşılaştırılması sonucu belirlenen JRC sınıfları. ....	164
Çizelge 7.8:	İgnimbiritlerde profilometre ile sayısallaştırma işlemi sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler. ....	165
Çizelge 7.9:	İgnimbiritlerde profilometreyle sayısallaştırma sonucu belirlenen istatistiksel parametrelerden hesaplanan JRC değerleri. ....	166
Çizelge 7.10:	İgnimbiritlerde profilometreyle sayısallaştırma sonucu belirlenen ortalama JRC değerleri. ....	167
Çizelge 7.11:	İgnimbiritlerde SLS yöntemi ile sayısallaştırma sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler. ....	168
Çizelge 7.12:	İgnimbiritlerde SLS yöntemi ile belirlenen istatistiksel parametrelerden hesaplanan JRC değerleri. ....	169
Çizelge 7.13:	İgnimbiritlerde SLS yöntemi ile sayısallaştırma sonucu belirlenen ortalama JRC değerleri. ....	170
Çizelge 7.14:	İgnimbiritlerde SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler. ....	171
Çizelge 7.15:	İgnimbiritlerde SfM yöntemi ile belirlenen istatistiksel parametrelerden hesaplanan JRC değerleri. ....	172

Çizelge 7.16:	İgnimbiritlerde SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu belirlenen ortalama JRC değerleri.....	173
Çizelge 7.17:	İgnimbiritlerde SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu oluşturulan yüzeylerden elde edilen üç boyutlu istatistiksel parametreler. ....	175
Çizelge 7.18:	İgnimbiritlerde SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu profiller ve yüzeylerden elde edilen iki ve üç boyutlu istatistiksel parametreler. ....	176



## ŞEKİLLER

Şekil 2.1:	Granüler malzemedeki yapılan makaslama deneyinden elde edilen sonuçlar (Newland ve Allely, 1957).....	5
Şekil 2.2:	Süreksizlik yüzeyinde gözlenen 1. ve 2. seviye pürüzler (Patton, 1966). .....	7
Şekil 2.3:	Pürüzlülük seviyesine bağlı olarak elde edilen yenilme zarfları (Patton, 1966). ....	7
Şekil 2.4:	Farklı araştırmacılar tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak çizilen yenilme zarfları (Bandis, 1980). ....	9
Şekil 2.5:	Jaeger (1971) tarafından önerilen ölçüte ait yenilme zarfı. ....	10
Şekil 2.6:	Doruk dilatasyon açısının uygulanan gerilmeler karşısındaki değişimi (Barton, 1971).....	11
Şekil 2.7:	Doruk dilatasyon açısının normal gerilmeye karşı değişimi (Barton, 1971). ....	12
Şekil 2.8:	Farklı normal gerilmeler için çizilmiş, pürüzlü-dalgalı süreksizlik yüzeylerine ait yenilme zarfları (Barton, 1973).....	13
Şekil 2.9:	Barton (1973) tarafından deneylerde kullanılan farklı pürüzlülüğe sahip profillere ait tanımlamalar. ....	13
Şekil 2.10:	Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen, Schmidt geri sıçrama değeri ile kaya yüzeyinin dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren abak (Barton ve Choubey, 1977). ....	15
Şekil 2.11:	JRC'nin farklı değerlerini temsilen önerilmiş standart profiller (Barton ve Choubey, 1977). ....	16
Şekil 2.12:	JRC değerinin belirlenmesi için kullanılan telli profilometre (Barton ve Choubey, 1977). ....	17
Şekil 2.13:	JRC değerinin belirlenmesi için kullanılan eğimlendirme deney düzeneği (Barton ve Choubey, 1977) ....	18
Şekil 2.14:	Farklı boyuta sahip örnekler üzerinde yapılan eğimlendirme deneyini ve bu deneyin sonuçlarını gösteren şekil (Barton ve Choubey, 1977)...	18
Şekil 2.15:	Örnek boyutunun artmasına bağlı olarak yenilme mekanizmasının kırılığandan sünümlüye doğru değişmesi (Barton ve Bandis, 1980)..	20
Şekil 2.16:	Örnek boyutundaki artışa bağlı olarak $\phi_b$ , $d_n$ ve SA parametrelerinde meydana gelen değişim (Bandis ve ark., 1981).....	21

Şekil 2.17:	Deneysel olarak ölçek etkisini gösteren grafikler (Bandis ve ark.,1981). .....	21
Şekil 2.18:	Süreksizlik profilinin uzunluğuna ve yüzeyindeki pürüzlerin genliğine bağlı olarak JRC belirleme abağı (Barton, 1981). ....	23
Şekil 2.19:	Makaslama yer değiştirmesi ile JRC arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Barton, 1982). ....	24
Şekil 2.20:	Farklı JRC değerine sahip örnekler üzerinde gerçekteştirilen makaslama deneylerinin ölçütten elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması (Barton, 1982). ....	25
Şekil 2.21:	Tek tip süreksizlik profili üzerinde ve farklı normal gerilmeler altında gerçekteştirilen makaslama deneylerinin ölçütten elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması (Barton, 1982). ....	26
Şekil 2.22:	Pürüzlülük bileşeni ile dilatasyon açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Barton, 1982). ....	26
Şekil 2.23:	Farklı örnek uzunlukları için deneyler sonucu belirlenen ve formülden hesaplanan dilatasyon açılarının karşılaştırılması (Barton, 1982). ....	27
Şekil 2.24:	Ölçek etkisini ortaya koymak için farklı boyuta sahip örnekler baz alınarak yapılan makaslama deneyi modelleri (Barton, 1982). ....	28
Şekil 4.1:	130 örnek üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen JRC, JCS ve $\phi_r^\circ$ değerlerinin değişimini gösteren histogramlar (Barton ve Bandis, 2017). ....	52
Şekil 5.1:	(a) 10 ton kapasiteye sahip yükleme ünitesi ile (b) yükleme ayarlarının yapıldığı kontrol paneli. ....	61
Şekil 5.2:	Schmidt çekici ile tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesinde kullanılan büyük karot örnekleri. ....	64
Şekil 5.3:	Schmidt çekicinin darbesine bağlı olarak örnek yüzeyinde meydana gelen ezilmeler. ....	65
Şekil 5.4:	(a) İğne Penetromesi ve (b) penetrometrenin alçı üzerinde kullanımına ait bir örnek. ....	66
Şekil 5.5:	Alçı örneklerdeki NPI ve UCS değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik. ....	67

Şekil 5.6:	Alçı örnekler üzerine birim deformasyon ölçerlerin yapıştırılması ve bu işlem sonucu oluşan yapıştırıcıya doymun bölgeler.....	71
Şekil 5.7:	POM levhalar üzerine işlenmiş JRC'nin (a) 0-2, (b) 4-6, (c) 8-10, (d) 14-16 ve (e) 18-20 profilleri için hazırlanmış süreksizlik yüzeyleri .....	73
Şekil 5.8:	POM levhalar kullanılarak JRC'nin (a) 0-2, (b) 4-6, (c) 8-10, (d) 14-16 ve (e) 18-20 profilleri için hazırlanmış süreksizlik yüzeylerine ait silikon kalıplar.....	75
Şekil 5.9:	1.07 karışım oranına sahip örneklere ait $\phi_b$ değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen (a) farklı $\sigma_n$ altındaki $\delta - \tau$ eğrileri ile (b) $\sigma_n$ ve $\tau$ kullanılarak çizilen yenilme zarfı. ..	76
Şekil 5.10:	1.43 karışım oranına sahip örneklere ait $\phi_b$ değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen (a) farklı $\sigma_n$ altındaki $\delta - \tau$ eğrileri ile (b) $\sigma_n$ ve $\tau$ kullanılarak çizilen yenilme zarfı. ..	76
Şekil 5.11:	1.66 karışım oranına sahip örneklere ait $\phi_b$ değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen (a) farklı $\sigma_n$ altındaki $\delta - \tau$ eğrileri ile (b) $\sigma_n$ ve $\tau$ kullanılarak çizilen yenilme zarfı. ..	76
Şekil 5.12:	2.80 karışım oranına sahip örneklere ait $\phi_b$ değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen (a) farklı $\sigma_n$ altındaki $\delta - \tau$ eğrileri ile (b) $\sigma_n$ ve $\tau$ kullanılarak çizilen yenilme zarfı. ..	77
Şekil 5.13:	1.07 karışım oranlı örneklerde testere kesimi ile oluşturulan yüzeylerde $\phi_b$ değerinin belirlenmesi için yapılan deneylerden elde edilen (a) farklı $\sigma_n$ altındaki $\delta - \tau$ eğrileri ile (b) $\sigma_n$ ve $\tau$ kullanılarak çizilen yenilme zarfı.....	78
Şekil 5.14:	1.43 karışım oranlı örneklerde testere kesimi ile oluşturulan yüzeylerde $\phi_b$ değerinin belirlenmesi için yapılan deneylerden elde edilen (a) farklı $\sigma_n$ altındaki $\delta - \tau$ eğrileri ile (b) $\sigma_n$ ve $\tau$ kullanılarak çizilen yenilme zarfı.....	78
Şekil 5.15:	1.66 karışım oranlı örneklerde testere kesimi ile oluşturulan yüzeylerde $\phi_b$ değerinin belirlenmesi için yapılan deneylerden elde edilen (a) farklı	

	$\sigma_n$ altındaki $\delta - \tau$ eğrileri ile (b) $\sigma_n$ ve $\tau$ kullanılarak çizilen yenilme zarfı.....	79
Şekil 5.16:	2.8 karışım oranlı örneklerde testere kesimi ile oluşturulan yüzeylerde $\phi_b$ değerinin belirlenmesi için yapılan deneylerden elde edilen (a) farklı $\sigma_n$ altındaki $\delta - \tau$ eğrileri ile (b) $\sigma_n$ ve $\tau$ kullanılarak çizilen yenilme zarfı.....	79
Şekil 5.17:	Makaslama deneylerinde izlenecek yolu gösteren akış şeması.....	82
Şekil 5.18:	Kayma yüzeyleri üzerine etkiyen normal gerilmelerin belirlenebilmesi için çizilmiş farklı yükseklik, şev açısı ve süreksizlik eğimi değerlerine sahip şevler.....	83
Şekil 5.19:	Deney esnasında kırılma sesi geldikten sonra: (a) kalıp içerisindeki alt yüzey, (b) kalıptan çıkarılan üst yüzey, (c) yüksek normal gerilme altında kırılmış örnek.....	86
Şekil 5.20:	Sayısal analizler için hazırlanan modele ait mesh görüntüsü ve sınır koşulları. ....	87
Şekil 5.21:	1.07 karışım oranlı, JRC 8-10 profile ve 10 mm kalınlığa sahip örnekler üzerinde (a) 14.22, (b) 24.03, (c) 43.65, (d) 73.08 ve (e) 102.51 kPa normal gerilmeler altında gerçekleştirilen sayısal analizlere ait sonuçlar. ....	88
Şekil 5.22:	1.07 karışım oranlı, JRC 8-10 profile ve 8 mm kalınlığa sahip örnekler üzerinde (a) 14.22, (b) 24.03, (c) 43.65, (d) 73.08 ve (e) 102.51 kPa normal gerilmeler altında gerçekleştirilen sayısal analizlere ait sonuçlar. ....	89
Şekil 5.23:	1.07 karışım oranlı, JRC 8-10 profile ve 15 mm kalınlığa sahip örnekler üzerinde (a) 14.22, (b) 24.03, (c) 43.65, (d) 73.08 ve (e) 102.51 kPa normal gerilmeler altında gerçekleştirilen sayısal analizlere ait sonuçlar. ....	90
Şekil 5.24:	1.07 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profili değerleri için Barton-Bandis kriteri yardımıyla çizilen teorik yenilme zarfları.....	93
Şekil 5.25:	1.43 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt	

	ve üst değerleri için Barton-Bandis kriteri yardımıyla çizilen teorik yenilme zarfları. ....	94
Şekil 5.26:	1.66 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için Barton-Bandis kriteri yardımıyla çizilen teorik yenilme zarfları. ....	95
Şekil 5.27:	2.80 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için Barton-Bandis kriteri yardımıyla çizilen teorik yenilme zarfları. ....	96
Şekil 5.28:	1.07 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için $JCS/\sigma_n$ oranına bağlı olarak yeniden çizilen teorik yenilme zarfları. ....	99
Şekil 5.29:	1.43 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için $JCS/\sigma_n$ oranına bağlı olarak yeniden çizilen teorik yenilme zarfları. ....	100
Şekil 5.30:	1.66 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için $JCS/\sigma_n$ oranına bağlı olarak yeniden çizilen teorik yenilme zarfları. ....	101
Şekil 5.31:	2.80 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için $JCS/\sigma_n$ oranına bağlı olarak yeniden çizilen teorik yenilme zarfları. ....	102
Şekil 5.32:	Farklı $\phi_b$ değerleri için hazırlanmış, JRC'nin değişimine bağlı olarak eşik açısı değerlerini veren kritik $JCS/\sigma_n$ değerlerini gösteren grafik.	106
Şekil 5.33:	Bej renkli ignimbritlerden alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol görüntüleri (Bio: biyotit, Q: kuvars, RF: kayaç parçası). ....	107

Şekil 5.34: Vişne renkli ignimbiritlerden alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol görüntüleri (Bio: biyotit, Q: kuvars, RF: kayaç parçası). .....	108
Şekil 5.35: Sarı renkli ignimbiritlerden alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol görüntüleri (Q: kuvars, RF: kayaç parçası). .....	108
Şekil 5.36: İgnimbirit bloklarından dayanım ve makaslama deneylerinde kullanılmak üzere örnek hazırlama aşamaları.....	111
Şekil 5.37: Süreksizlik yüzeyi oluşturma amacıyla üretilen başlıklardaki üçgen kesitli kamalar ve düzeneğe yerleştirilen prizmatik kare örnek. ....	112
Şekil 5.38: Bej (a ve d), vişne (b ve e) ve sarı (c ve f) renkli ignimbiritlerdeki UCS deneylerine ilişkin fotoğraflar.....	114
Şekil 5.39: Bej, vişne ve sarı renkli ignimbiritlerdeki NPI-UCS arasındaki ilişkiyi gösteren grafik. ....	116
Şekil 5.40: Normal gerilme uygulanmadan mengene düzeneği yardımıyla süreksizlik yüzeyi oluşturma işleminde meydana gelen kırıklar. ....	118
Şekil 5.41: 0.05 MPa'lık normal gerilme altında mengene düzeneği yardımıyla süreksizlik yüzeyi oluşturma işleminde meydana gelen kırıklar. ....	119
Şekil 5.42: 0.5 MPa'lık normal gerilme altında mengene düzeneği yardımıyla süreksizlik yüzeyi oluşturma işleminde meydana gelen kırıklar. ....	119
Şekil 5.43: Normal gerilme uygulanmadan, prizmatik kare örneğin döndürülerek konumlandırılması sonucu mengene düzeneği yardımıyla oluşturulan süreksizlik yüzeyi. ....	119
Şekil 5.44: Sarı renkli ignimbiritler üzerinde normal gerilme uygulanmadan oluşturulan yapay süreksizlik. ....	120
Şekil 5.45: Vişne ve sarı ignimbiritler üzerinde normal gerilme uygulanarak yapay süreksizlik oluşturma aşamaları. ....	121
Şekil 5.46: Bej renkli ignimbiritler üzerinde 0.5 MPa normal gerilme uygulanarak oluşturulan süreksizlikler. ....	121
Şekil 5.47: Bej renkli ignimbiritler üzerinde 1 MPa normal gerilme uygulanarak süreksizlik oluşturma sürecinde meydana gelen düşey yönlü kırıklar. ... .....	121
Şekil 5.48: Bej renkli ignimbiritler üzerinde 0.5 MPa normal gerilme altında süreksizlik oluşturulduktan sonra meydana gelen düşey yönlü kırıklar. .....	122

Şekil 5.49:	Mengene yardımıyla oluşturulan vişne (a), sarı (b) ve bej (c) renkli ignimbiritlere ait süreksizlik yüzeylerinden örnek görüntümler. ....	122
Şekil 6.1:	Telli profilometre ile yapılan süreksizlik profili ölçümlerine ait görüntüler.	125
Şekil 6.2:	Profilometre ile sayısallaştırılan (a) 0-2, (b) 4-6, (c) 8-10, (d) 14-16 ve (e) 18-20 JRC değerlerine sahip standart profiller. ....	126
Şekil 6.3:	Standart JRC profillerinin AutoCAD programında sayısallaştırılmasında kullanılan 0.25 mm aralıklı düşey çizgiler. ....	126
Şekil 6.4:	Örneklerin sayısallaştırılmasında kullanılan Artec Eva isimli üç boyutlu optik tarayıcı ( <a href="http://www.artec3d.com">www.artec3d.com</a> ).....	127
Şekil 6.5:	Optik tarayıcının (a) yüksek ve (b, c ve d) alçak konumdan farklı örnek konumlandırmalarına göre kaydettiği görüntüler.....	131
Şekil 6.6:	SLS yönteminde hizalama yapılırken kullanılan referans noktalara örnek görüntüler.....	132
Şekil 6.7:	Taramalar ile üretilen nokta bulutu üzerinde yapılan (a) istenmeyen noktaların silinmesi, (b) global registration ve (c) sharp fusion işlemleri. ....	132
Şekil 6.8:	(a) Hareketli tarama ile elde edilen görüntü ve JRC'nin (b) 0-2, (c) 4-6, (d) 8-10, (e) 14-16 ve (f) 18-20 değerleri için elde edilen tarama görüntüleri.....	134
Şekil 6.9:	İgnimbirit örneklerin optik tarayıcı ile taranmasına ilişkin görüntü... ..	134
Şekil 6.10:	Optik tarayıcı ile taranan ignimbiritlere ait örnek modeller. ....	135
Şekil 6.11:	Artec Studio programı kullanılarak gerçekleştirilen kesit alma işlemi... ..	136
Şekil 6.12:	Fotogrametrik analiz için hazırlanan düzenekten görüntüler.....	138
Şekil 6.13:	Düzeneğin performansını test etmek amacıyla gerçekleştirilen fotogrametrik analiz denemesine ilişkin görüntüler. ....	140
Şekil 6.14:	Kameranın sabit olmadığı ve fotoğrafların yakından çekildiği yeni yöntem ile oluşturulan modele ilişkin görüntüler. ....	141
Şekil 6.15:	Fotogrametrik yöntemde referanslama amacıyla kullanılan ölçekli çizim. ....	142

Şekil 6.16:	Fotogrametrik yöntemde kullanılmak üzere çekilen fotoğraflar: (a) JRC'nin 14-16 olduğu alçı örnek; (b) bej, (c) sarı ve (d) vişne renkli ignimbirit. ....	143
Şekil 6.17:	SfM yönteminde kullanılacak fotoğrafların çekimi esnasındaki (a) kamera konumları ve (b) çekilen fotoğraflardaki görüntü üst üste bindirme sayıları.....	143
Şekil 6.18:	SfM yöntemi ile oluşturulan (a) yüksek yoğunluklu nokta bulutu, (b) mesh, (c) tiled model ve (d) sayısal yükseklik modeli. ....	147
Şekil 6.19:	Sayısal yükseklik modeli kullanılarak oluşturulan 0.1 mm aralıktaki yükseklik konturları. ....	147
Şekil 6.20:	JRC'nin 18-20 aralığına sahip alçı örnek için fotogrametrik yöntem ile oluşturulan nokta bulutu.....	148
Şekil 6.21:	Bej renkli bir ignimbirit örneğine ait çok yüksek kaliteli nokta bulutu. ....	148
Şekil 6.22:	CloudCompare programı kullanılarak oluşturulan mor renkli kesit hatları.....	149
Şekil 6.23:	Alçılarda farklı JRC aralıkları için sayısallaştırma yöntemlerinden elde edilen veriler ile referans veriler arasındaki yükseklik farkları. ....	152
Şekil 7.1:	Bej renkli bir ignimbirite ait (a) yoğun nokta bulutu, (b) süreksizlik yüzeyini temsil eden sadeleştirilmiş nokta bulutu ve (c) süreksizlik yüzeyine ait üç boyutlu katı model. ....	174
Şekil 7.2:	JRC'nin 13-14 aralığında bulunan ignimbiritlerde sayısallaştırma performansının değerlendirilmesi adına oluşturulan fark grafikleri...180	
Şekil 7.3:	JRC'nin 14-15 aralığında bulunan ignimbiritlerde sayısallaştırma performansının değerlendirilmesi adına oluşturulan fark grafikleri...182	
Şekil 7.4:	JRC'nin 15-16 aralığında bulunan ignimbiritlerde sayısallaştırma performansının değerlendirilmesi adına oluşturulan fark grafikleri...184	
Şekil 7.5:	JRC'nin 16-17 aralığında bulunan ignimbiritlerde sayısallaştırma performansının değerlendirilmesi adına oluşturulan fark grafikleri...186	
Şekil 7.6:	JRC'nin 17-18 aralığında bulunan ignimbiritlerde sayısallaştırma performansının değerlendirilmesi adına oluşturulan fark grafikleri...188	



- Şekil 8.1:  $\phi_b$  parametresinin belirlenmesi amacıyla (a) sarı, (b) vişne ve (c) bej renkli ignimbiritlerde gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar. .... 191
- Şekil 8.2: Sarı renkli bir ignimbirit örneğinin makaslama düzeneği içerisindeki (a) deney öncesi, (b) deney sonrası görüntüleri ile (c) - (d) deney sonrasında oluşan deformasyonlara ilişkin görüntüler. .... 192
- Şekil 8.3: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar ve aynı aralıklar için eşik açısı değeri kullanılarak Barton-Bandis kriterinden belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir). .... 193
- Şekil 8.4: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar ve aynı aralıklar için Barton-Bandis kriterinden belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir). .... 196
- Şekil 8.5: Vişne renkli ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14 ve (b) 15-16 değişim aralıkları için farklı JRC değerleri kullanılarak çizilen yenilme zarfları..... 198
- Şekil 8.6: Sarı renkli ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 14-15 ve (b) 16-17 değişim aralıkları için farklı JRC değerleri kullanılarak çizilen yenilme zarfları..... 199
- Şekil 8.7: Bej renkli ignimbirit örneklerinde JRC'nin 17-18 değişim aralığı için farklı JRC değerleri kullanılarak çizilen yenilme zarfları..... 200
- Şekil 8.8: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından önerilen eşitlik ile belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).. .... 203
- Şekil 8.9: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Tatone ve Grasselli (2009) tarafından önerilen eşitlikte  $\theta_{max}/(C+1)$  (2D)

	kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).....	204
Şekil 8.10:	Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Tatone ve Grasselli (2009) tarafından önerilen eşitlikte $\theta_{max}/(C+1)$ (3D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).....	205
Şekil 8.11:	Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Tang ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikte $\theta_{max}/(C+1)$ (2D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).....	207
Şekil 8.12:	Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Tang ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikte $\theta_{max}/(C+1)$ (3D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).....	208
Şekil 8.13:	Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Xia ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikte $\theta_{max}/(C+1)$ (2D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).....	210
Şekil 8.14:	Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Xia ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikte $\theta_{max}/(C+1)$ (3D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).....	211

# SİMGELER VE KISALTMALAR

## Simgeler

c	Kohezyon
$\phi$	İçsel sürtünme açısı
$\sigma_1, \sigma_3$	En büyük ve en küçük asal gerilmeler
$\sigma_n$	Normal gerilme
$\tau$	Makaslama gerilmesi
$\phi_b$	Temel sürtünme açısı
$\phi_r$	Artık sürtünme açısı
$\sigma_c$	Tek eksenli sıkışma dayanımı
$\sigma_t$	Çekilme dayanımı
$d_n$	Dilatasyon açısı
$\delta$	Makaslama yer değiştirmesi
R	Schmidt çekici geri sıçrama değeri
$S_A$	Pürüzlere ait yenilme bileşeni
E	Elastisite modülü
$\nu$	Poisson oranı

## Kısaltmalar

GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi
JCS	Süreksizlik yüzeyinin dayanımı
JRC	Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük katsayısı
SLS	Yapılandırılmış ışıklı tarayıcı (Structured Light Scanner)
SfM	Hareket ile nesne oluşturma (Structure from Motion)
NPI	İğne penetrasyon indeksi
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği
ASTM	Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
USBR	United States Bureau of Reclamation
SRC	Yüzey Pürüzlülük Hesaplayıcı (Surface Roughness Calculator)

# 1. GİRİŞ

Kaya kütlelerinin makaslama dayanımı, kaya malzemesinin yanı sıra süreksizlikler tarafından da kontrol edilmektedir. Eklemlili kaya kütlelerinin makaslama davranışı, içerdiği eklemlerin göstereceği deformasyona bağılı olarak değişebilmektedir. Bu durum, kaya kütlelerinin makaslama dayanımının belirlenmesinde süreksizliklerin önemini ortaya koymaktadır. Geçmişten bu yana kayaların dayanımının belirlenmesinde, teorik ve görgül olmak üzere birçok yenilme ölçütü önerilmiştir. Bunlardan en bilinen teorik yenilme ölçütleri Griffith ölçütü, Tresca ölçütü, Mohr – Coulomb ölçütü iken, görgül yenilme ölçütlerinden Hoek – Brown ve Barton-Bandis kriteri öne çıkmaktadır.

Coulomb (1776) ve Mohr (1882) tarafından farklı zamanlarda geliştirilen ancak birbirlerine olan benzerliklerinden ötürü ortak bir isim altında kullanılan Mohr – Coulomb yenilme ölçütü, kullanım kolaylığı açısından yaygın şekilde tercih edilen doğrusal bir yenilme ölçütüdür. Makaslama dayanım parametreleri olan kohezyon ( $c$ ) ve sürtünme açısı ( $\phi$ ) normal gerilmeden bağımsızdır ve farklı normal gerilmeler için sabit değerler almaktadır. Mohr – Coulomb yenilme ölçütü en büyük ( $\sigma_1$ ) ve en küçük ( $\sigma_3$ ) asal gerilmenin bir fonksiyonu olarak yazılabildiği gibi, yenilme anındaki normal gerilme ( $\sigma_n$ ) ve makaslama gerilmesinin ( $\tau$ ) fonksiyonu olarak da yazılabilir (Jaeger ve ark., 2007).

Hoek ve Brown (1980) tarafından geliştirilen Hoek – Brown yenilme ölçütü, kaya kütlelerinin dayanımının belirlenmesinde kullanılan eğrisel bir yenilme ölçütüdür. Bu ölçüt yardımıyla kaya kütlelerinin dayanımı tahmin edilmeye çalışıldığı için kaya malzemesine ait özelliklerle birlikte süreksizliklere ait özelliklerin de bilinmesi gerekmektedir. Yenilme ölçütünün genel eşitliği,  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$ 'ün yanı sıra sağlam kayaya ve kaya kütlelerine ait parametreler ile ifade edilmektedir. Kaya kütlelerinin ve süreksizliklerin özelliklerine bağılı olarak jeolojik dayanım indeksi (GSI) puanı belirlenmekte ve GSI puanından yararlanılarak ölçütte kullanılan kaya kütleleri parametreleri hesaplanmaktadır. Sağlam kayaya ait parametreler ise laboratuvar deneyleri yardımıyla belirlenebilmektedir.

Barton yenilme ölçütü (Barton, 1973) (ilerleyen yıllarda Barton-Bandis kriteri olarak adlandırılacaktır) süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesi için önerilmiş bir ölçüt olup eğrisel yenilme zarfı sunar. Barton önceki çalışmalarında (Barton, 1971, 1973, 1976), makaslama esnasında süreksizlik yüzeylerinde meydana gelen hareketleri ve değişimleri incelemiştir. Barton ve Choubey (1977) tarafından deney sonuçları ile gözlemleri birlikte değerlendirilerek ölçütün son hali sunulmuştur. Önerilen ölçütte, süreksizlik yüzeyinin dayanımı (JCS), pürüzlülük katsayısı (JRC) ve temel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) olmak üzere üç girdi parametresi bulunmaktadır. Bu parametrelerin pratik deneylerle belirlenmesi ve dolayısıyla süreksizliklere ait makaslama dayanımının kolayca hesaplanması sebebiyle Barton-Bandis kriteri özellikle pürüzlü süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımının belirlenmesi için bugüne değin sıkça tercih edilen bir yenilme ölçütü olmuştur.

Mohr – Coulomb ve Hoek – Brown yenilme ölçütleri dünya çapındaki yaygın kullanım alanları sebebiyle en çok tercih edilen yenilme ölçütleri olmakla birlikte pürüzlü özellikteki süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımının belirlenmesi amacıyla kullanılamamaktadır. Bunlara ek olarak önerilen diğer yenilme ölçütleri de bu amaçla kullanılamamaktadır. Barton-Bandis kriteri ise, yapısı itibarıyla Mohr – Coulomb yenilme ölçütüne benzemektedir fakat süreksizlik yüzeyinde gözlenen pürüzlü ve bunların dayanım özelliklerini doğrudan girdi parametresi olarak kullanıyor olmasıyla diğer yenilme ölçütlerinden ayrılmaktadır. Önerildiği zamandan bu yana süreksizlik yüzeyi dayanımının belirlenmesinde çokça kullanılan ölçüt, kullanıcıların dikkat çektiği noktalar gözetilerek yeniden gözden geçirilmektedir. Literatürde, ölçütte kullanılan parametrelerin daha pratik, gerçeğe yakın ve hızlı şekilde belirlenebilmesi amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda sunulan yaklaşımlar, ölçütün 1977 yılında önerilmiş olan orijinal halini değiştirmeye yeterli olmamakla birlikte ölçüt üzerinde ek çalışmaların gerekliliğini ortaya koymuştur.

Bu çalışma kapsamında Barton-Bandis kriterinin pürüzlülüğe sahip zayıf kayalar üzerindeki performansının araştırılması amaçlanmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında zayıf kayalar üzerinde yeterli çalışma yapılmadığı gözlenmiştir. Bu eksikliğin giderilmesi adına ilk etapta düşük dayanıma sahip yapay örnekler üretilmiştir. Barton-Bandis kriterinde bulunan standart JRC profillerinden beş tanesi

seçilmiş ve bu profillere uyacak şekilde yapay süreksizlik yüzeyleri üretilmiştir. Pürüzlerin makaslama dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılabilmesi adına düşük normal gerilmeler uygulanarak süreksizlik yüzeyleri üzerinde makaslama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile Barton-Bandis kriterinden hesaplanan makaslama dayanımlarının karşılaştırılabilmesi için kriterde kullanılan JRC, JCS ve  $\phi_b$  gibi girdi parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. JRC değerleri geleneksel olarak profilometre yardımıyla belirlenebiliyorken, ayrıca JRC'nin tayini için literatürde farklı yöntemler de önerilmektedir. Bunlar içerisinde ön plana çıkan optik tarayıcı ve fotogrametrik yaklaşımlar kullanılarak süreksizlik yüzeyleri sayısallaştırılmıştır. Sayısal modeller üzerinden JRC değerleri belirlenmiştir. Profilometre, optik tarayıcı ve fotogrametrik yöntemlerle belirlenen JRC değerleri karşılaştırılmış ve bu yöntemlerin performansları değerlendirilmiştir. JCS parametresinin belirlenmesi için Schmidt çekicinin kullanılması önerilmektedir. Bu yöntem ile yapay örnekler için JCS değeri belirlenmeye çalışılmış, ancak karşılaşılan zorluklar üzerine alternatif JCS belirleme yöntemi olarak iğne penetrometresinin kullanılması önerilmiştir.  $\phi_b$  parametresinin belirlenmesi için düz ve pürüzsüz yüzeyler üretilip, bu yüzeyler üzerinde makaslama deneyleri yapılmış ve ilgili parametreye ait değerler hesaplanmıştır. Barton-Bandis kriteri için gerekli olan parametreler belirlendikten sonra makaslama deneyleri ile elde edilen sonuçlar ile kriterden hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmış ve kriterin kullanımında karşılaşılan zorlukların giderilmesine yönelik önerilerde bulunulmuştur.

Yapay süreksizlikler üzerinde yapılan çalışmaların benzerleri düşük dayanıma sahip doğal örnekler üzerinde de tekrarlanmıştır. Bu amaçla bir taş ocağından ignimbirit blokları temin edilmiş ve bu bloklardan doğal süreksizlik yüzeyleri üretilmiştir. Barton-Bandis kriterinde kullanılan girdi parametreleri ignimbirit örnekler için de belirlenmiştir. JRC değeri doğrudan profilometre ölçümlerinin yanı sıra optik tarayıcı ve fotogrametrik yöntemlerle de belirlenmiştir. Bu yöntemler birbirlerine karşı üstünlüklerine yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. JCS değerinin belirlenmesi için hem Schmidt çekici hem de iğne penetrometresi kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İgnimbiritler üzerinde gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen sonuçlarla Barton-Bandis kriterinden hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ölçütün bu tip düşük dayanımlı kayalar üzerindeki performansı değerlendirilmiştir. Ölçütteki eksik yönlerin farklı yenilme ölçütleri ile giderilip

giderilmediğini anlamak adına literatürde önerilmiş alternatif yenilme ölçütleri ile makaslama dayanımları belirlenmiştir. Barton-Bandis kriteri ile makaslama dayanımları belirlenirken çeşitli sorunlarla karşılaşılmasına rağmen, literatürdeki alternatif kriterlere nazaran Barton-Bandis kriterinin makaslama deneylerine ait sonuçlara en yakın değerleri verdiği görülmüştür.

Süreksizlik yüzeylerinin sayısallaştırılmasında kullanılan profilometre, optik tarayıcı ve fotogrametrik yöntemlere ait sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hangi yöntemin daha pratik ve doğru sonuçları verdiğine yönelik gerçekleştirilen çalışmada, geleneksel yöntem olan profilometrenin oldukça tutarlı sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Hassas bir şekilde JRC'nin belirlenmesinin istendiği durumlarda fotogrametrik yöntemlerden iyi sonuçlar alınabildiği anlaşılmıştır. Optik tarayıcı ile de doğru sonuçlar alınabilmekte ancak tarayıcının maliyeti dolayısıyla yaygın şekilde kullanılacak bir yöntem olmadığı kanaatine varılmıştır. Bu iki yöntem her ne kadar hassasiyet açısından ön plana çıksa da profilometre ile belirlenen JRC değerlerine karşı tartışmasız bir üstünlük kuramamıştır. Uygun ekipmanın ve yeterli analiz zamanının olmadığı durumlarda, profilometre ile oldukça tutarlı JRC değerlerinin belirlenebileceği anlaşılmıştır.

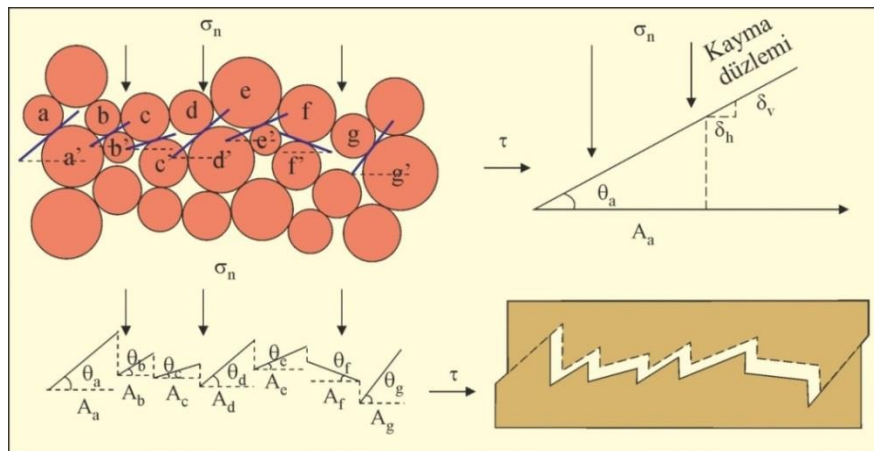
Barton-Bandis kriterinde, düşük normal gerilmeler altında görece yüksek dayanıma sahip örneklerde  $JCS/\sigma_n$  oranına bağlı olarak alternatif bir eşitliğin kullanılması gerektiği literatürde belirtilmişti. Bu dayanım ve gerilme şartlarında gerçekleştirilen deneylerde, alternatif eşitliğe geçiş yapılmadan orijinal eşitlik ile de makaslama deney sonuçlarına uygun sonuçların elde edilebildiği görülmüştür. Alternatif eşitliğin kullanılması gereken şartlara yönelik önerilerde bulunulmuştur. JCS değerinin belirlenmesi için Schmidt çekicinin kullanımı sırasında gözlenen sorunlara karşın iğne penetrometresinin kullanımı önerilmiştir. İğne penetrometresi Schmidt çekici gibi pratik bir şekilde kullanılabilen ve Schmidt çekicinin ölçüm almakta zorlandığı düşük dayanım seviyelerinde oldukça başarılı bir performans sergilemektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar takip eden bölümlerde detaylı şekilde anlatılmıştır.

## 2. SÜREKSİZLİKLERİN MAKASLAMA DAYANIMININ BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Ancak Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen eşitlik, geçmişten günümüze en çok tercih edilen eşitlik olmuştur. Bu sebeple, Barton-Bandis kriterine öncül olan çalışmalar ve ölçütün zaman içerisindeki gelişimi bu bölümde anlatılacaktır.

Newland ve Allely (1957) granüler malzemeyle yaptıkları üç eksenli deneyler ile örnek üzerinde meydana gelen hacim değişikliklerini incelemiştir. Makaslama gerilmesine bağlı olarak örnek içerisindeki bir düzlem boyunca kayma meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu kaymanın, temas halinde bulunan tanelerin birbiri üzerine çıkarak hareket etmesi sonucu oluştuğunu ifade eden araştırmacılar, içsel sürtünme açısı haricinde bir başka bileşenin daha varlığından bahsetmişlerdir. Bu bileşeni, tanelerin temas noktalarından çizilen teğet ile uygulanan makaslama gerilmesinin doğrultusu arasındaki açı ( $\theta$ ) olarak tanımlamışlardır (Şekil 2.1). Temas eden her tane için farklı  $\theta$  değerlerinin olduğunu gösteren araştırmacılar, makaslama süreci devam ettikçe bu açı değerlerinin sıfıra kadar ineceğini belirtmişlerdir. Kullandıkları granüler malzemedeki kohezyon bileşeni ile ilgili bir bulguları olmamıştır (Eş. 2.1).

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_f + \theta) \quad (\text{Eş. 2.1})$$



Şekil 2.1: Granüler malzeme makaslama deneyinden elde edilen sonuçlar (Newland ve Allely, 1957).



Patton (1966), yaptığı çalışmada süreksizlik yüzeyinde gözlenen pürüzleri birinci seviye (dalgalılık) ve ikinci seviye (pürüzlülük) olmak üzere ikiye ayırmıştır (Şekil 2.2). Düşük miktardaki makaslama yer değiştirmelerinde pürüzlülüğün etkili olduğunu belirten araştırmacı, makaslama yenilmelerindeki bu etkiyi araştırmak adına yapay süreksizlik yüzeyleri oluşturmuştur. Testere dişi yapısına uygun, dayanımı, diş sayısı ve diş açısı farklı süreksizlik modelleri üreterek makaslama deneylerini gerçekleştirmiştir. Pürüzlülüğün etkisini görebilmek adına düz yüzeye sahip modeller üzerinde de çalışmış ve başlıca 3 sonuç elde etmiştir (Şekil 2.3):

- i. Düz süreksizlik yüzeylerinde, örneğin, içsel sürtünme açısının etkin rol oynadığından ve kohezyon bileşeninin olmadığından söz etmiştir. Bu koşullarda etkin olan sürtünme açısına temel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) adı verilmektedir (Eş. 2.2).

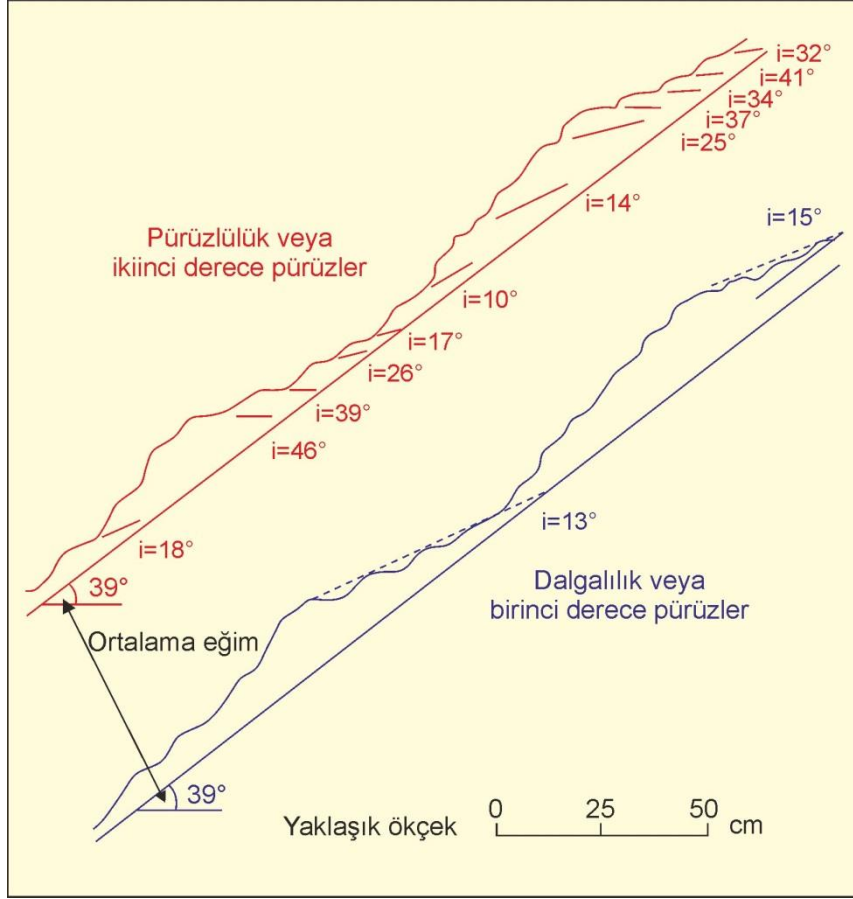
$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b) \quad (\text{Eş. 2.2})$$

- ii. Düşük normal gerilme altında, 'i' diş açısına sahip süreksizlik yüzeylerinin birbiri üzerinde kayarak hareket ettiğini bildirmiştir. Normal gerilmenin düşük olması sebebiyle dişler zarar görmeden kalmıştır. Temel sürtünme açısı ile dişlerin açısının makaslama dayanımında etkili olduğunu belirtmiştir (Eş. 2.3).

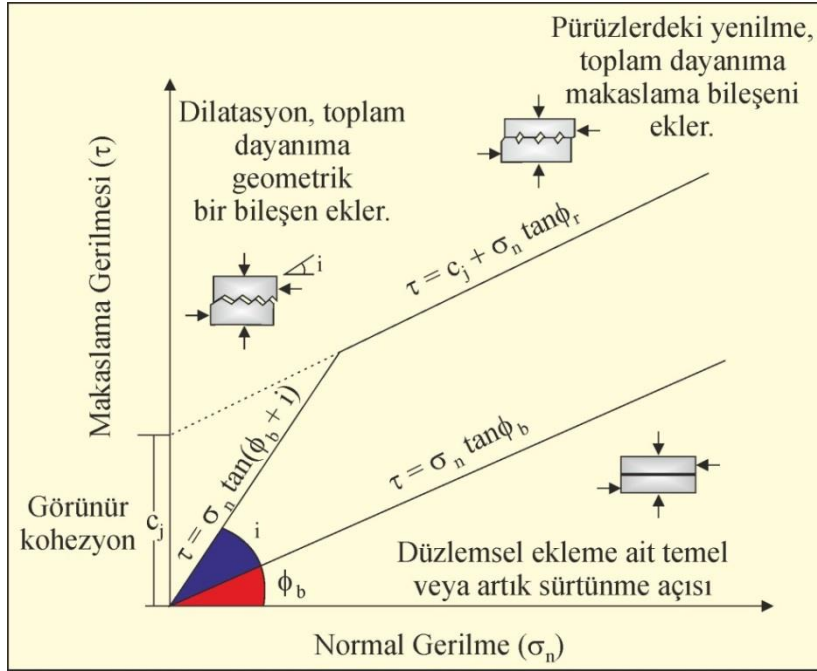
$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (\text{Eş. 2.3})$$

- iii. Uygulanan normal gerilmenin arttırılması sonucu dişler kırılmış ve ufalanan malzeme üzerinde makaslama devam etmiştir. Bu durumda artık sürtünme açısı ( $\phi_r$ ) ve kohezyon (c) makaslama dayanımını kontrol etmektedir (Eş. 2.4).

$$\tau = c + \sigma_n \tan(\phi_r) \quad (\text{Eş. 2.4})$$



Şekil 2.2: Süreksizlik yüzeyinde gözlenen 1. ve 2. seviye pürüzler (Patton, 1966).



Şekil 2.3: Pürüzlülük seviyesine bağlı olarak elde edilen yenilme zarfları (Patton, 1966).

Ladanyi ve Archambault (1969), yüzey alanı A olan bir örnekte,  $A_s$  ile temsil edilen bir alanda makaslamanın gerçekleşeceğini ve geri kalan alanda ( $A - A_s$ ) ise kaymanın meydana geleceğini öne sürmüşlerdir. Araştırmacılar, makaslanmış alan ( $A_s$ ) ile toplam yüzey alanını (A) oranlayarak makaslama alanı oranı ( $a_s$ ) kavramını ortaya koymuşlar ve süreksizlik yüzeyinin makaslama dayanımı için Eşitlik 2.5'i önermişlerdir. Bandis (1980), Ladanyi ve Archambault tarafından önerilen eşitliğin yanı sıra Fairhurst (1964) ve Patton (1966) tarafından önerilmiş eşitlikleri kullanarak yenilme zarflarını birlikte göstermiştir (Şekil 2.4).

$$\tau = \frac{\sigma_n(1 - a_s)(\nu + \tan \phi_\mu) + \tau_r a_s}{1 - (1 - a_s)(\nu \tan \phi_\mu)} \quad (\text{Eş. 2.5})$$

Burada;

- $a_s$  : Makaslama alanı oranı,
- $\nu$  : Dilatasyon oranı,
- $\phi_\mu$  : İçsel sürtünme açısı,
- $\tau_r$  : Sağlam kayanın makaslama dayanımı.

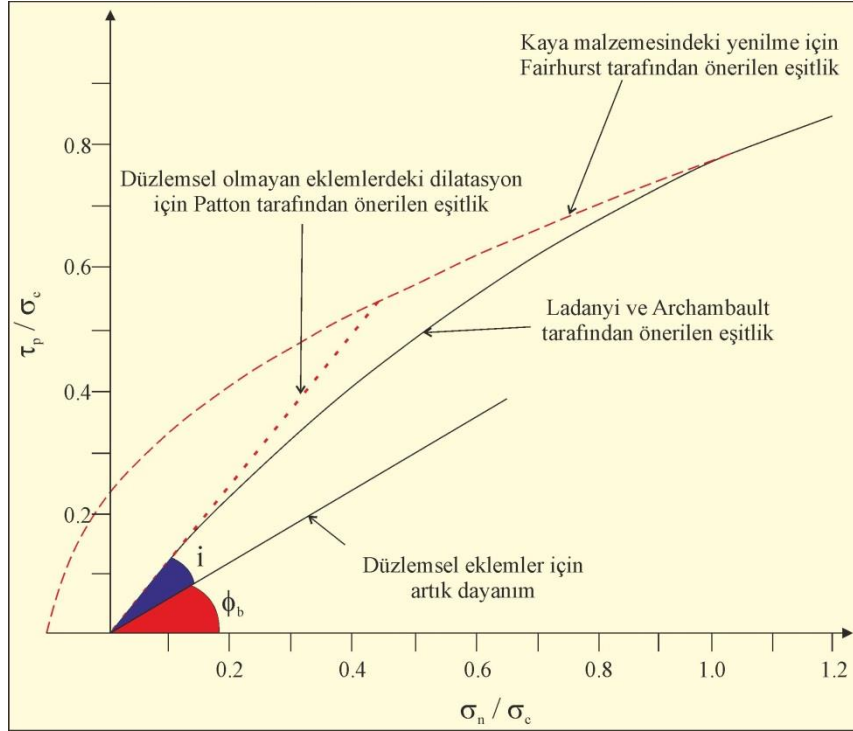
Araştırmacılar sağlam kayanın makaslama dayanımının belirlenmesinde Fairhurst (1964) tarafından önerilen yaklaşımın kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Eş. 2.6). Eşitlik 2.6'da  $\sigma_j$  süreksizlik yüzeyinin tek eksenli sıkışma dayanımına karşılık gelirken, n ise kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı ile çekilme dayanımı arasındaki oranı ifade etmektedir.

$$\tau_r = \sigma_j \frac{\sqrt{1+n} - 1}{n} \sqrt{\left(1 + n \frac{\sigma}{\sigma_j}\right)} \quad (\text{Eş. 2.6})$$

Ladanyi ve Archambault (1969) makaslama alanı oranı ( $a_s$ ) ve dilatasyon oranı ( $\nu$ ) parametrelerinin hesaplanması için sırasıyla Eşitlik 2.7 ve 2.8'i önermişlerdir. Eşitlik 2.8'de yer alan 'i' değeri, süreksizlik yüzeyindeki dişlerin eğim açısına karşılık gelmektedir.

$$a_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_j}\right)^{1.5} \quad (E\text{ş. 2.7})$$

$$v = \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_j}\right)^4 \tan(i) \quad (E\text{ş. 2.8})$$

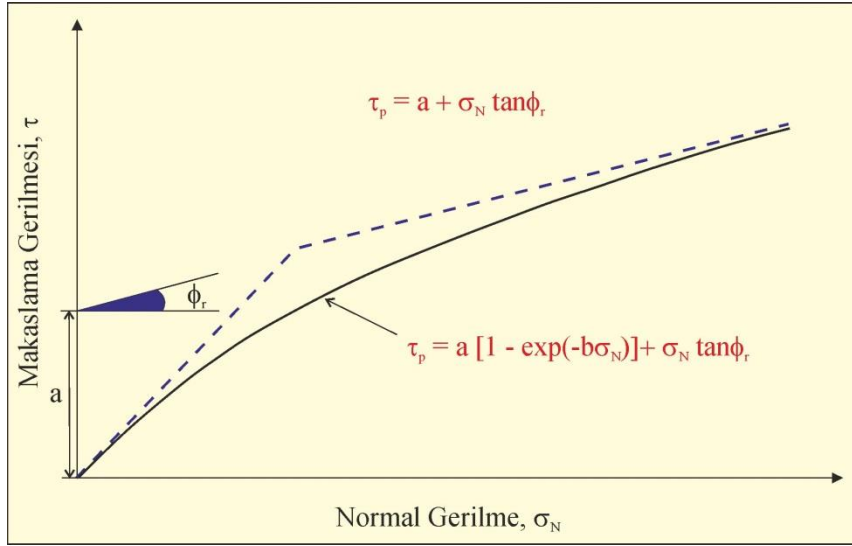


Şekil 2.4: Farklı araştırmacılar tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak çizilen yenilme zarfları (Bandis, 1980).

Jaeger (1971), Patton (1966) tarafından bi-lineer formda önerilen yenilme ölçütünün gerçeği yansıtmadığını ve iki doğru arasındaki keskin geçişin daha yumuşak ve eğrisel bir formda olması gerektiğini belirtmiştir (Şekil 2.5). Bilgisayar kullanımının artmasıyla sürekli formda, eğrisel eşitliklere ihtiyaç olduğunu belirten araştırmacı, makaslama dayanımı için Eşitlik 2.9'un kullanılabileceğini ifade etmiştir. Buradaki  $a$  katsayısı, Şekil 2.5'te de görüldüğü üzere, doğrusal yenilme zarflarındaki kohezyon bileşeninin eşdeğeridir. Bir diğer parametre olan  $b$  ise Eşitlik 2.10 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\tau = a[1 - \exp(-b\sigma_n)] + \sigma_n \tan(\phi) \quad (E\text{ş. 2.9})$$

$$b = \frac{\tan(i) \sec^2(\phi_r)}{a[1 - \tan(\phi_r) \tan(i)]} \quad (\text{Eş. 2.10})$$



Şekil 2.5: Jaeger (1971) tarafından önerilen ölçüte ait yenilme zarfı.

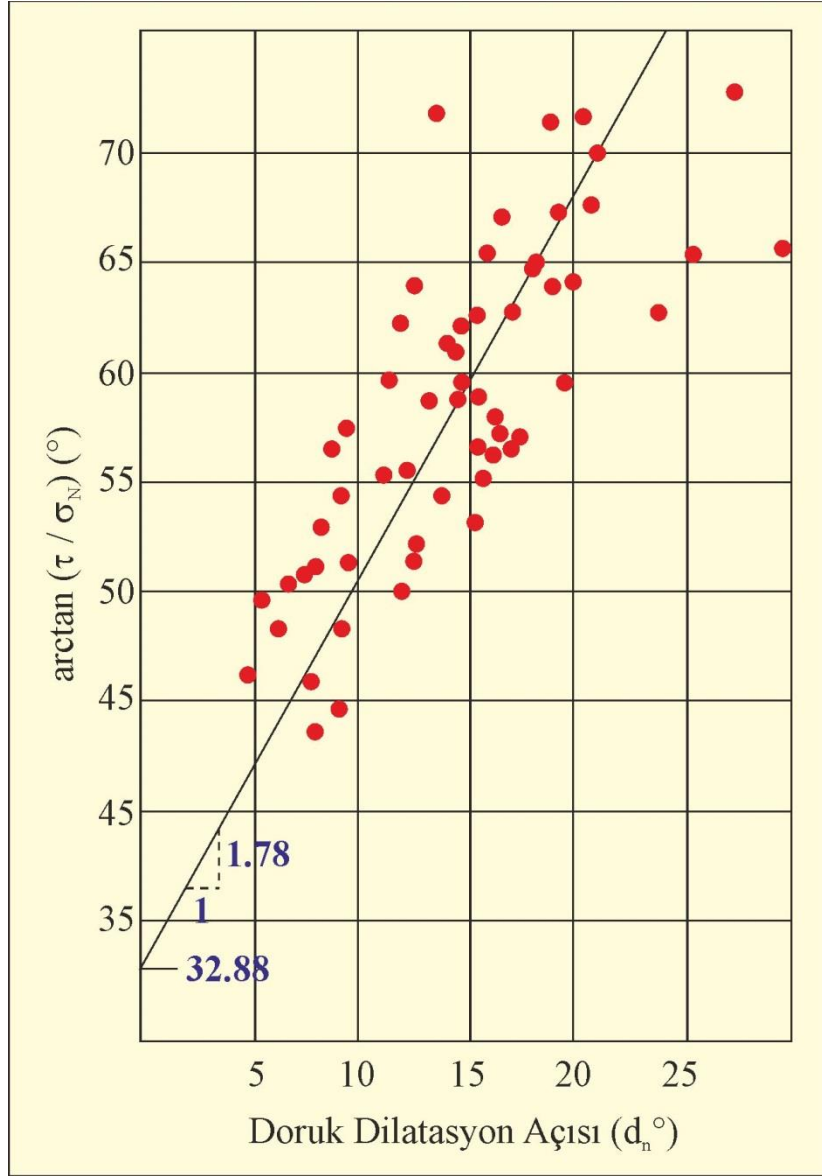
Barton (1971), süreksizlik yüzey pürüzlülüğü ile makaslama dayanımı arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Makaslama yenilmesi anında, süreksizlik düzlemi üzerinde bulunan bloğun yatay düzlemle belirli bir açı ( $d_n$ ) yapacak şekilde hareket edeceğini belirtmiştir. Önceki araştırmacıların pürüzlere ait dış açısı ( $i$ ) olarak tanımladığı bu açıyı, doruk dilatasyon açısı ( $d_n$ ) şeklinde yeniden isimlendirmiştir. Yapay olarak ürettiği süreksizlik yüzeylerinde yaptığı makaslama deneyleri sonucunda, gerilme oranı (makaslama gerilmesi/normal gerilme) ile doruk dilatasyon açısı arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmıştır (Şekil 2.6). Gerilme oranının, dilatasyon açısı ve temel sürtünme açısı ile ilişkili olduğunu belirten araştırmacı, temel sürtünme açısının kullanılan örnekler için ortalama değer olan  $30^\circ$  olarak alınmasının uygun olacağını belirtmiştir (Eş. 2.11). Doruk dilatasyon açısı ile normal gerilme arasındaki ilişkiyi Eşitlik 2.12'de ortaya koyan araştırmacı (Şekil 2.7), pürüzlü eklemler için genelleştirilmiş doruk dayanım ölçütünü Eş. 2.13'teki haliyle önermiştir.

$$\tau = \sigma_n \tan(2d_n + 30^\circ) \quad (\text{Eş. 2.11})$$

$$d_n = 10 \log \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) \quad (\text{Eş. 2.12})$$

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ 20 \log \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) + 30^\circ \right]$$

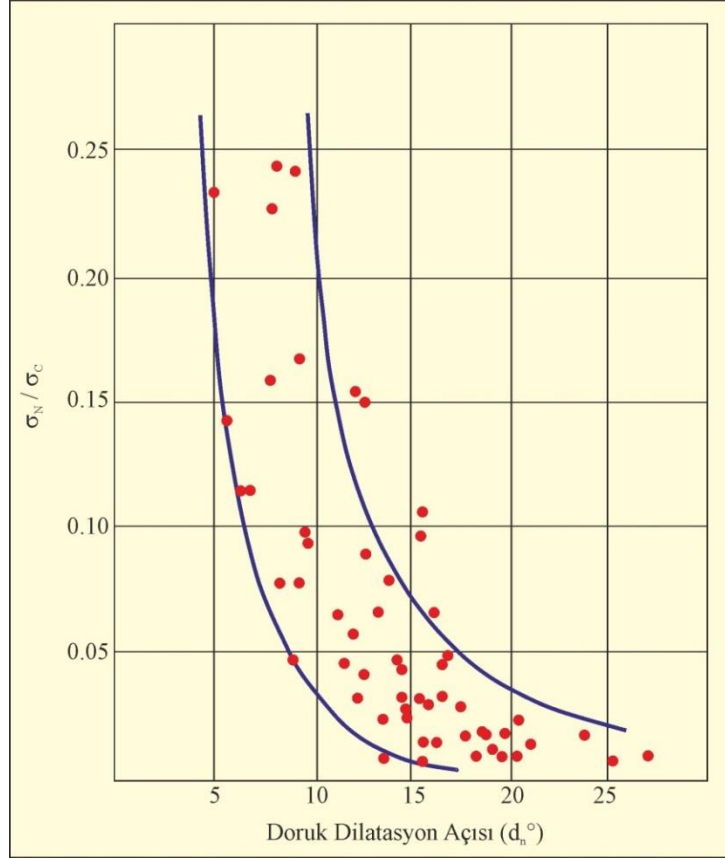
(Eş. 2.13)



Şekil 2.6: Doruk dilatasyon açısının uygulanan gerilmeler karşısındaki değişimi (Barton, 1971).

Barton (1973), 1971 yılında önerdiği ölçütün düşük normal gerilmelerde yüksek makaslama dayanımı değeri verdiğini belirtmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) ile normal gerilmenin oranına bağlı olarak ( $\sigma_c/\sigma_n \geq 100$ ) yeni bir eşitlik (Eş. 2.14) öneren araştırmacı, söz konusu koşulun karşılanmadığı durumlarda 1971 yılında önermiş olduğu orijinal eşitliğin (Eş. 2.12) kullanılması gerektiğini belirtmiştir (Şekil 2.8).

$$\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_n}\right) \geq 100 \quad ; \quad \tau = \sigma_n \tan(70^\circ) \quad (Eş. 2.14)$$



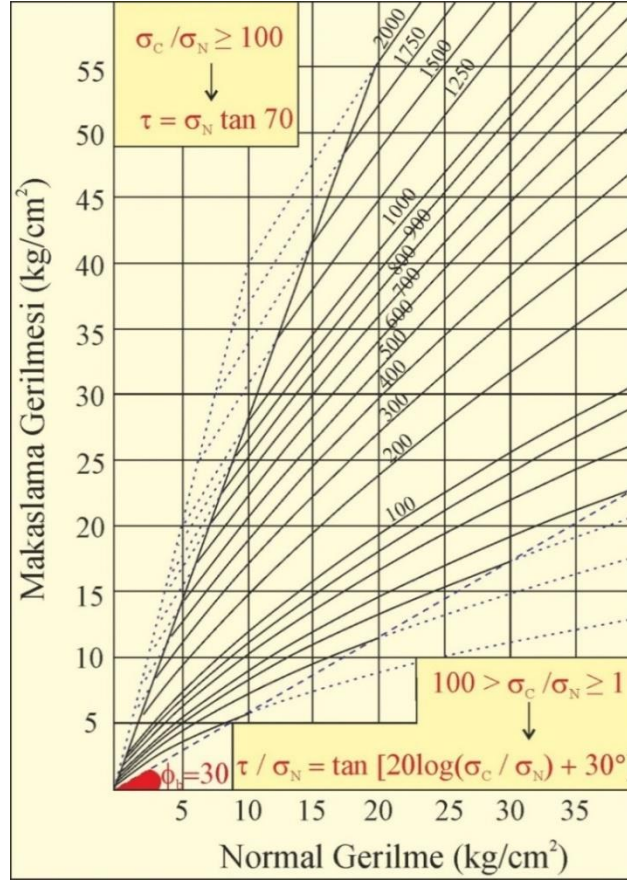
Şekil 2.7: Doruk dilatasyon açısının normal gerilmeye karşı değişimi (Barton, 1971).

Bozunmamış ve pürüzlü süreksizlik yüzeyleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda, önerilen ölçütün, daha az pürüzlü ve/veya bozunmuş yüzeyleri temsil etmede yetersiz kaldığı araştırmacı tarafından dile getirilmiştir. Bu nedenle araştırmacı tarafından farklı pürüzlülüğe sahip üç süreksizlik profili (Şekil 2.9) kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneyleri ile eklem pürüzlülüğünün yenilme ölçütü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Pürüzlü-dalgalı, pürüzsüz-dalgalı ve pürüzsüz-düzlemsel şeklinde tanımlanan yüzeylerde yapılan deneyler sonucu Eşitlik 2.15'te bulunan ilişkiler önerilmiştir.

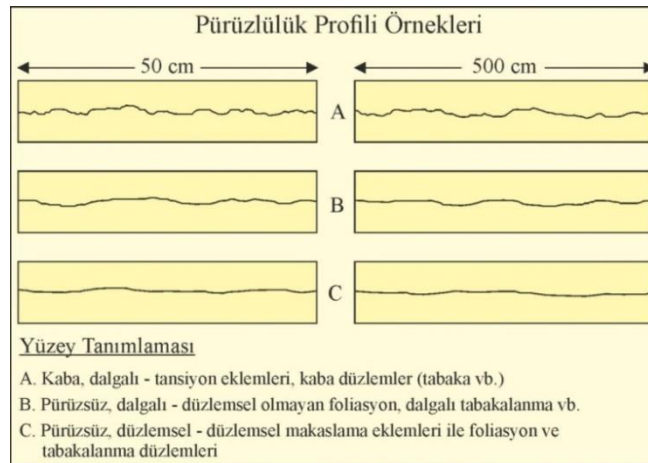
$$\text{Pürüzlü – dalgalı} \quad ; \quad \tau = \sigma_n \tan \left[ 20 \log \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) + 30^\circ \right] \quad (Eş. 2.15a)$$

Pürüzsüz – dalgalı ;  $\tau = \sigma_n \tan \left[ 10 \log \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) + 30^\circ \right]$  (Eş. 2.15b)

Pürüzsüz – düzlemsel ;  $\tau = \sigma_n \tan \left[ 5 \log \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) + 30^\circ \right]$  (Eş. 2.15c)



Şekil 2.8: Farklı normal gerilmeler için çizilmiş, pürüzlü-dalgalı süreksizlik yüzeylerine ait yenilme zarfları (Barton, 1973).



Şekil 2.9: Barton (1973) tarafından deneylerde kullanılan farklı pürüzlülüğe sahip profillere ait tanımlamalar.

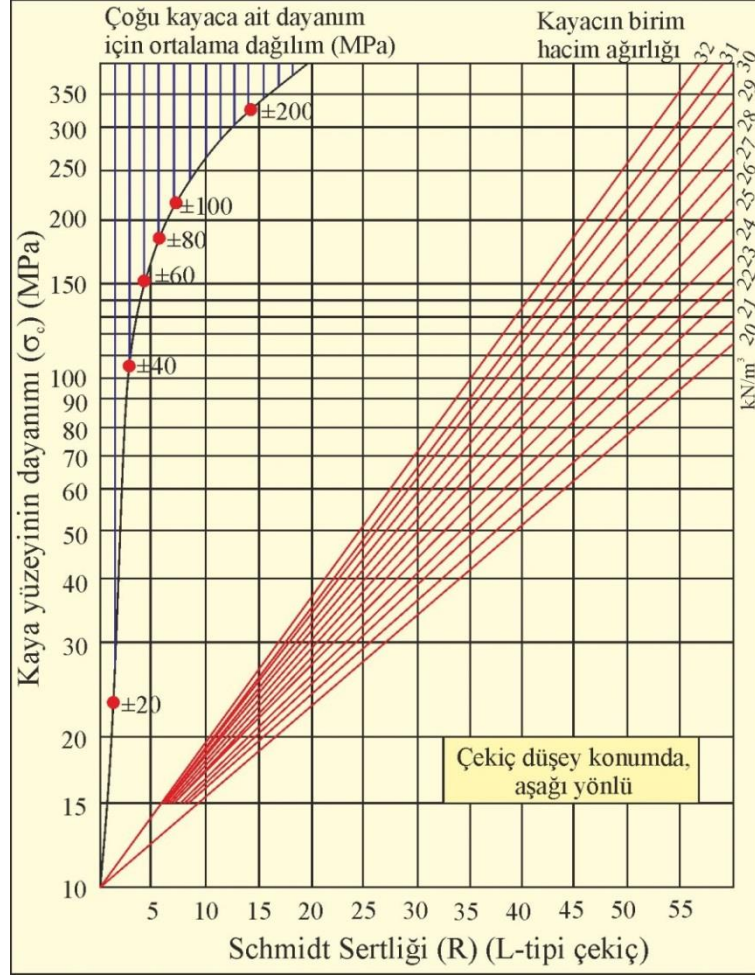


Eşitlikler incelendiğinde, pürüzlülüğün azalmasına bağlı olarak azalan bir katsayı görülmektedir ve Barton tarafından bu katsayı eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) olarak adlandırılmıştır. Ayrıca yazar, bozunmuş eklem yüzeyleri için kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) yerine süreksizlik yüzeyi dayanımının (JCS) kullanılması gerektiğini savunmuştur. JCS değerinin belirlenemediği durumlarda, pratik ve tutucu bir yaklaşım olarak, UCS değerinin dörtte birinin kullanılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca 30° olarak kullanmış olduğu  $\phi_b$  değeri için yaptığı literatür araştırmalarında, bu değer gösterdiği değişikliğin  $\pm 5$  dereceden fazla olabildiğini gözlemlemiştir. Ortalama bir değer olarak kullanarak hatalı sonuçlar elde etmek yerine tekrar  $\phi_b$  terimini yerleştirmeyi uygun görmüştür. Bu düzenlemelerden sonra ölçüt Eşitlik 2.16'daki son halini almıştır.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (Eş. 2.16)$$

Barton ve Choubey (1977) ölçütte kullanılan parametrelerin pratik şekilde belirlenebilmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Eklem yüzeyinde bozunmanın gözlenmediği durumlarda JCS yerine UCS değerinin kullanılabileceğini ve bu değer nokta yükü dayanım indeksi deneyi ile kolayca hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. UCS değerinin dörtte birinin bozunmuş örnekler için kullanılabileceği ve hatta bu değer JCS için tutucu bir alt sınır olarak kabul edilebileceği Barton (1973) tarafından belirtilmişti. Ancak Richards (1975) tarafından bozunmuş kumtaşında yapılan deneylerde, kaya malzemesine ait UCS değerinin bozunmuş eklem yüzeyinin dayanımından altı kat daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle araştırmacılar bozunmuş eklem yüzeyinin dayanımının farklı bir yöntemle belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Eklem yüzeylerinde bozunmanın olması durumunda yüzey üzerinde Schmidt sertlik çekici kullanılarak geri sıçrama değerlerinin belirlenebileceğini anlatan araştırmacılar, Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen yöntem ile geri sıçrama değerinden JCS tahmininde bulunulabileceğini ifade etmişlerdir (Şekil 2.10 ve Eş. 2.17). Eşitlik 2.17'deki  $\gamma$  değeri kayacın birim hacim ağırlığı olup, R değeri ise Schmidt çekicine ait geri sıçrama değeridir.

$$\log(\sigma_c) = 0.00088\gamma R + 1.01 \quad (Eş. 2.17)$$



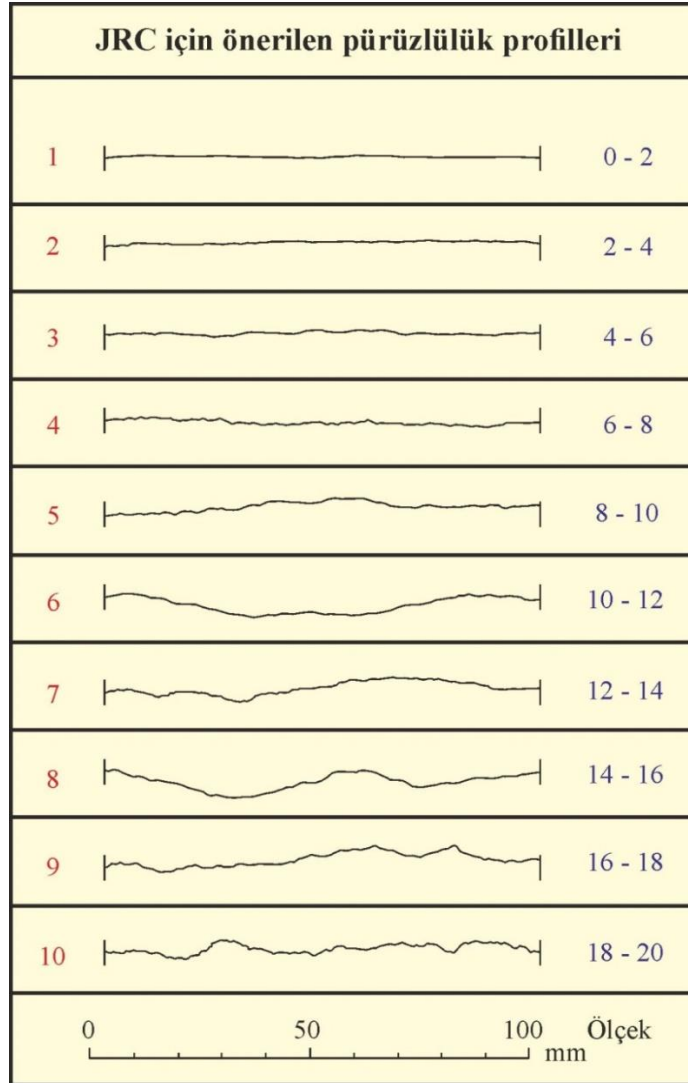
Şekil 2.10: Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen, Schmidt geri sıçrama değeri ile kaya yüzeyinin dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren abak (Barton ve Choubey, 1977).

Temel sürtünme açısı, kaya örneğinden kesilerek hazırlanan düz, pürüzsüz ve bozunmamış yüzeyler üzerinde yapılan makaslama deneyleri ile belirlenmektedir. Bozunmuş yüzeylerde  $\phi_b$  değerinin kullanılmayacağını belirten araştırmacılar, artık sürtünme açısı ( $\phi_r$ ) değerinin kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir.  $\phi_r$  değerinin hesaplanması için Eşitlik 2.18'i önermişlerdir.

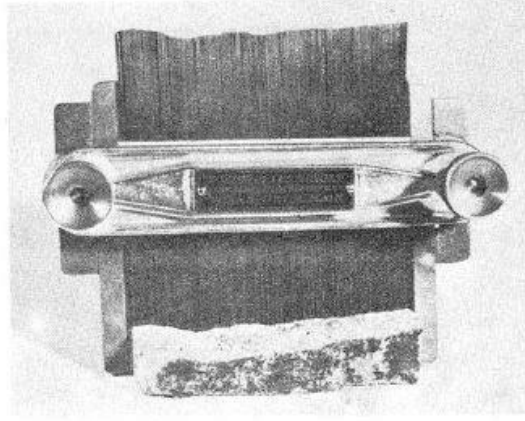
$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \left( \frac{r}{R} \right) \quad (Eş. 2.18)$$

Buradaki R değeri pürüzsüz, bozunmamış ve kuru yüzeyler üzerindeki Schmidt geri sıçrama değeri iken, r ise nemli eklem yüzeyine ait geri sıçrama değeridir.

Eklem yüzeyine ait JRC değerinin pratik şekilde belirlenebilmesi için 136 eklem örneğinin süreksizlik profilini çıkaran araştırmacılar, daha sonra örnekler üzerinde makaslama deneyi gerçekleştirip geriye dönük analiz ile her bir örneğe ait JRC değerini hesaplamışlardır. Araştırmacılar, elde ettikleri JRC değerlerini eşit aralıklara sahip 10 gruba (0-2, 2-4, ... 18-20) bölerek her grubu temsil edecek tipik bir süreksizlik profili seçmişlerdir (Şekil 2.11). Telli profilometre (Şekil 2.12) yardımıyla eklem yüzeyinin pürüzlülük profilini çıkardıktan sonra Şekil 2.11'deki pürüzlülük profillerini kullanarak JRC değerinin belirlenebileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.11: JRC'nin farklı değerlerini temsilen önerilmiş standart profiller (Barton ve Choubey, 1977).

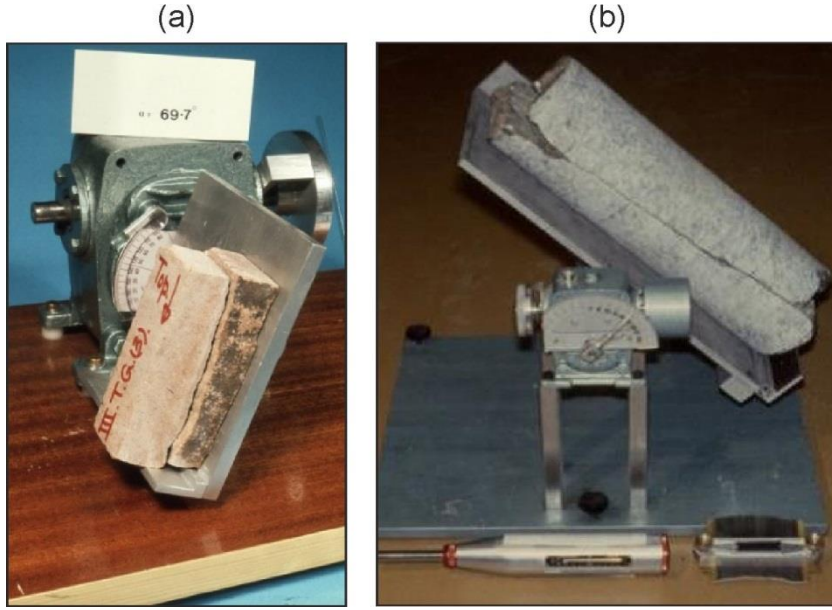


Şekil 2.12: JRC değerinin belirlenmesi için kullanılan telli profilometre (Barton ve Choubey, 1977).

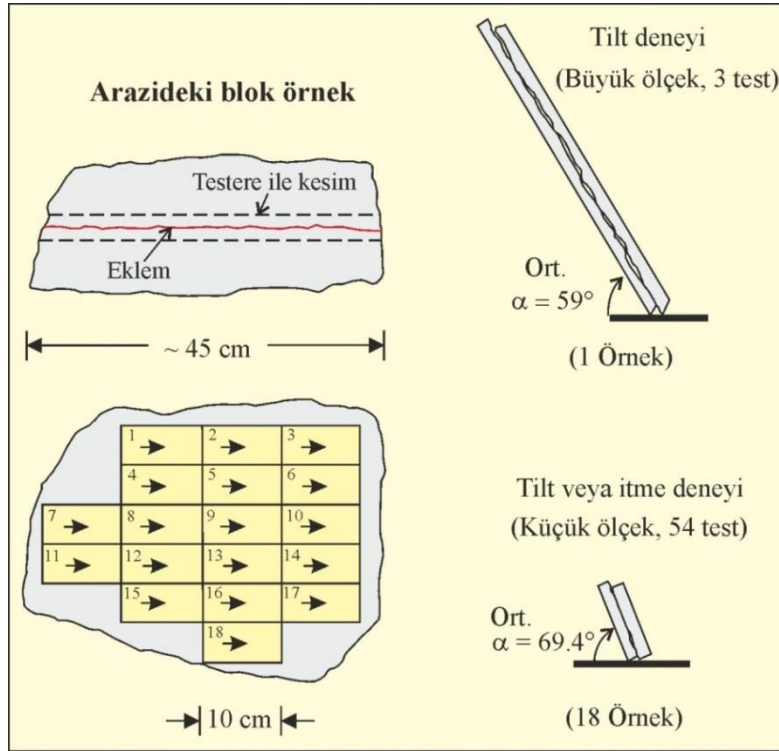
Barton ve Choubey (1977), JRC değerinin belirlenmesi için eğimlendirme deneyi adı verilen başka bir yöntem daha önermişlerdir (Şekil 2.13). Bu yöntemde, süreksizliğe ait birbirini karşılayan iki yüzey üst üste konularak eğimlendirme düzeneğinin tablasına yerleştirilmektedir. Tabla yatay konumdayken başlayan deney, tabla eğiminin kademeli olarak artırılmasıyla devam etmekte ve üst yüzeyin alt yüzey üzerinde kaymaya başladığı anda son bulmaktadır. Kaymanın başladığı anda ölçülen tabla açısı ( $\alpha$ ) kullanılarak yüzeyin JRC değeri belirlenebilmektedir (Eş. 2.19). Eşitlikteki  $\sigma_n$  değeri, kayma yüzeyi üzerinde bulunan bloğun ağırlığından kaynaklı oluşan normal gerilmedir.

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_b}{\log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)} \quad (Eş. 2.19)$$

Araştırmacılar, JRC üzerindeki ölçek etkisini incelemek adına büyük boyutlu bir süreksizlik düzlemi üzerinde eğimlendirme deneyi yapmışlardır. Üç kere tekrarladıkları deneyde, kayma başladığı andaki tabla açısını  $59^\circ$  olarak ölçmüşlerdir. Büyük boyuttaki örneği daha küçük boyuta sahip 18 parçaya bölen ve her bir parça üzerinde yine üç eğimlendirme deneyi yapan araştırmacılar, kayma başladığındaki tabla açısını  $69.4^\circ$  olarak belirlemişlerdir (Şekil 2.14). Örnek boyutu arttıkça JRC değerinin düştüğünü belirtmişler ve süreksizliğe dik yöndeki diğer süreksizliklerin sayılarının artması durumunda (süreksizlik aralığının azalması) JRC'nin artacağını belirtmişlerdir.



Şekil 2.13: JRC değerinin belirlenmesi için kullanılan eğimlendirme deney düzeneği (Barton ve Choubey, 1977).



Şekil 2.14: Farklı boyuta sahip örnekler üzerinde yapılan eğimlendirme deneyini ve bu deneyin sonuçlarını gösteren şekil (Barton ve Choubey, 1977).

Byerlee (1978) gerçekleştirdiği çalışmada Patton (1966) tarafından önerilen bi-lineer yenilme zarfına benzer bir yenilme zarfı elde etmiştir. Düşük ve yüksek normal

gerilmeler için iki ayrı normal gerilme-makaslama dayanımı ilişkisi olduğunu belirten araştırmacı, bu ilişkileri Eşitlik 2.20'deki haliyle sunmuştur.

$$\sigma_n < 2kbar \quad ; \quad \tau = 0.85\sigma_n \quad (Eş. 2.20a)$$

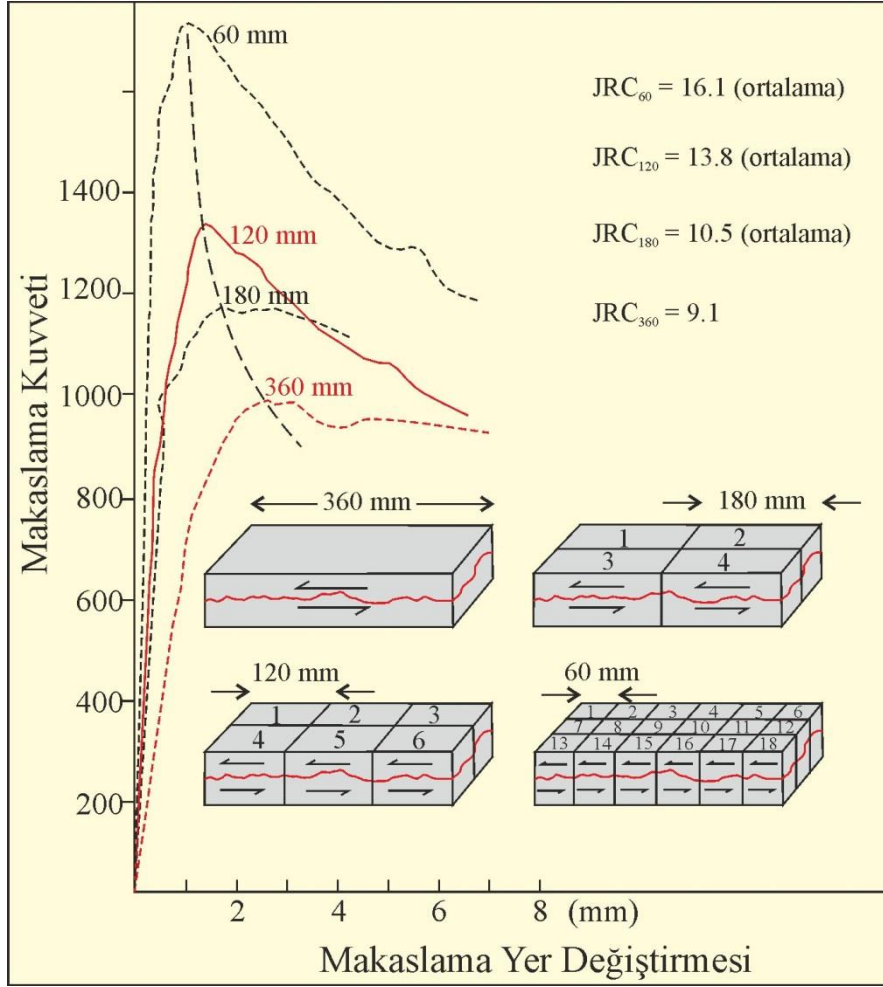
$$2kbar < \sigma_n < 20kbar \quad ; \quad \tau = 0.5 + 0.6\sigma_n \quad (Eş. 2.20b)$$

Barton ve Bandis (1980) birbiri ile aynı yapay eklem yüzeyleri üreterek ölçek etkisini incelemişlerdir. Bir kenarı 360 mm uzunluğa sahip örnekler üretilmiş ve bu örneklerden 180, 120 ve 60 mm kenar uzunluğuna sahip daha küçük boyutlu örnekler oluşturulmuştur. 360, 180, 120 ve 60 mm kenar uzunluğuna sahip örnekler için JRC değerlerini geriye dönük analiz yönteminden yararlanarak sırasıyla 9.1, 10.5, 13.8 ve 16.1 olarak bulmuşlardır. Örnek boyutunun artması ile birlikte yenilme mekanizmasının kırılığandan sünümlüye doğru geçtiğini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.15). Küçük boyutlu örneklerin büyük boyutlu örneklere nazaran daha küçük miktardaki makaslama yer değiştirmesi ile doruk dayanım değerine ulaştığını ifade etmişlerdir. JRC değerinin belirlenmesi için eğimlendirme deneyinin dışında itme-çekme (push-pull test) deneyinin de kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu deneyde süreksizlik yüzeyinin üzerinde bulunan blok, dışarıdan uygulanan bir kuvvet etkisiyle hareket ettirilmektedir. Hareket için gerekli olan kuvvet belirlendikten sonra Eşitlik 2.21 yardımıyla JRC'nin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

$$JRC = \frac{\arctan\left(\frac{T_1 + T_2}{N}\right) - \phi_r}{\log\left(\frac{JCS \cdot A}{N}\right)} \quad (Eş. 2.21)$$

Burada:

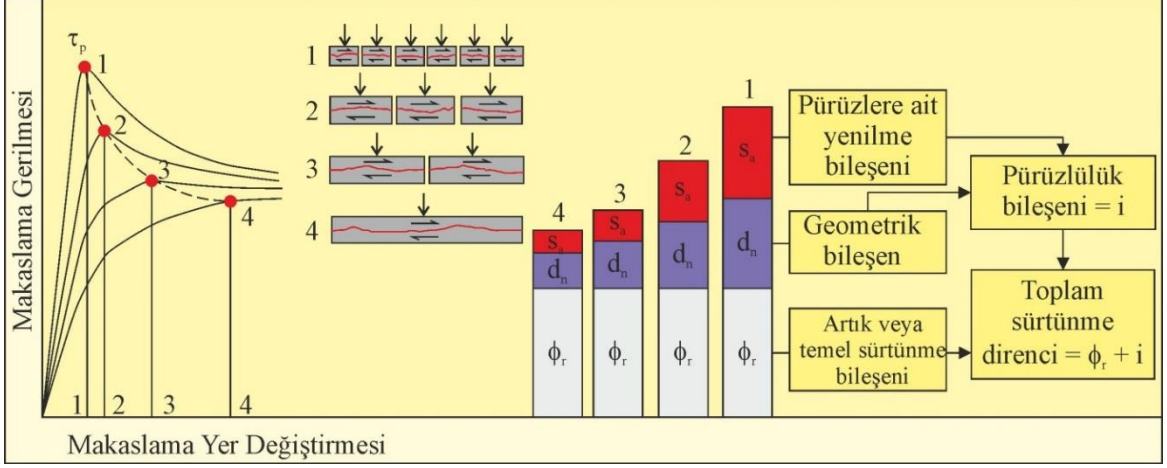
- T1: Blok ağırlığına bağlı olarak kayma yüzeyine etki eden teğetsel bileşen,
- T2: Bloğa uygulanan dış kuvvet,
- N: Blok ağırlığına bağlı olarak kayma yüzeyine etki eden normal bileşen,
- JCS: Süreksizlik yüzeyinin dayanımı,
- A: Bloğun taban alanı,
- $\phi_r$ : Artık sürtünme açısıdır.



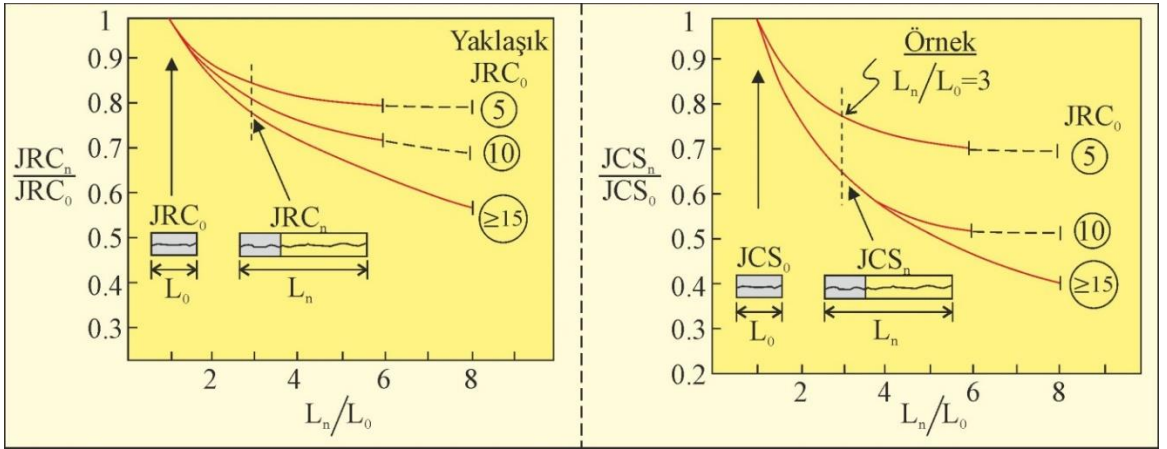
Şekil 2.15: Örnek boyutunun artmasına bağlı olarak yenilme mekanizmasının kırılığandan sünümlüye doğru değişmesi (Barton ve Bandis, 1980).

Bandis ve ark. (1981) tarafından yapılan çalışmada, Barton ve Bandis (1980)'ten farklı olarak, değişik pürüzlülüğe sahip yapay süreksizlik yüzeyleri üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılara göre doruk dayanımı etkileyen üç faktör vardır ve bunlar temel sürtünme açısı ( $\phi_b^\circ$ ), dilatasyon açısı ( $d_n^\circ$ ) ve pürüzlere ait yenilme bileşenidir ( $S_A^\circ$ ). Farklı örnek boyutu ve süreksizlik profili üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonunda, örnek boyutu arttıkça doruk makaslama dayanımına ulaşmak için gerekli olan makaslama yer değişirmesinin ( $\delta$ ) arttığı ve  $d_n^\circ$  ile  $S_A^\circ$ 'nın azaldığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Şekil 2.16). Ayrıca küçük boyutlu (laboratuvar ölçeği) ve büyük boyutlu (arazi ölçeği) örnekler üzerinde yaptıkları deneylerle, örneklerin boyutu ile JRC ve JCS değerleri arasında bir ilişki kurmayı amaçlamışlardır. Boyutu belli olan ( $L_0$ ) laboratuvar örneğine ait  $JRC_0$  ve  $JCS_0$  değerlerinden, daha büyük boyuta sahip ( $L_n$ ) arazi örneğinin  $JRC_n$  ve  $JCS_n$

değerlerinin hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. Örnek parametreleri arasındaki ilişkiyi bir grafik üzerinde göstermişlerdir (Şekil 2.17). Buradaki '0' ve 'n' alt indisleri sırasıyla laboratuvar ve arazi ölçeğindeki örnek parametrelerini ifade etmektedir.



Şekil 2.16: Örnek boyutundaki artışa bağlı olarak  $\phi_b$ ,  $d_n$  ve  $S_A$  parametrelerinde meydana gelen değişim (Bandis ve ark., 1981)



Şekil 2.17: Deneysel olarak ölçek etkisini gösteren grafikler (Bandis ve ark., 1981).

Barton (1981),  $\phi_b$  değerinin belirlenmesi için alternatif olacak bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde, eğilendirme cihazının tablasına yan yana yerleştirilen iki karotun üzerine üçüncü bir karot yerleştirilmekte ve eğim artırılarak üstteki karotun, tabandaki iki karot üzerinde kayması sağlanmaktadır. Bu yöntem ile  $\phi_b$  değerinin belirlenebileceğini ifade eden araştırmacı, daha sonraki çalışmalarında ise iki karot ile bu yöntemin uygulanması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca karot örneği içerisinde süreksizlik düzlemi bulunması durumunda, eğilendirme deneyi ile süreksizlik



yüzeyinin JRC değerinin hesaplanabileceğini (Eş. 2.19) belirtmiştir. JRC değerinin örnek boyutuna bağlı olmasından dolayı, mümkün olan durumlarda büyük boyutlu örnekler üzerinden JRC değerinin belirlenmesinin daha doğru olacağını ifade eden yazar, maksimum genliğin ölçülmesine dayalı bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde, incelenen süreksizlik düzlemi üzerine paralel olacak biçimde yerleştirilen hat boyunca bir cetvel yardımıyla hatta dik şekilde ölçümler alınması ile maksimum genliğin belirlenmesi amaçlanmaktadır. İncelenen hat uzunluğu (L) ve ölçülen maksimum genliğe (a) bağlı olarak önerilen eşitlikler (Eş. 2.22) ve abak (Şekil 2.18) yardımıyla JRC değerinin yaklaşık olarak hesaplanabileceği belirtilmiştir.

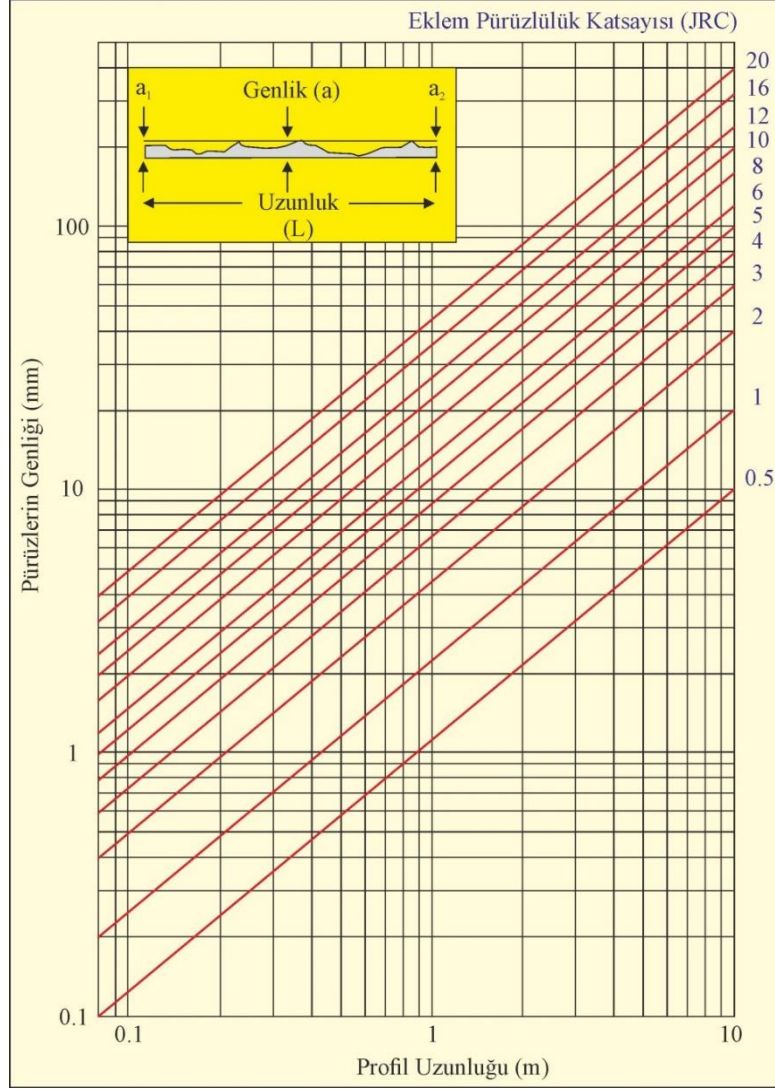
$$L = 0.1 m \quad ; \quad JRC \cong 400 \frac{a}{L} \quad (Eş. 2.22a)$$

$$L = 1 m \quad ; \quad JRC \cong 450 \frac{a}{L} \quad (Eş. 2.22b)$$

$$L = 10 m \quad ; \quad JRC \cong 500 \frac{a}{L} \quad (Eş. 2.22c)$$

Araştırmacı, doruk makaslama dayanımına ulaşılması için gereken makaslama yer değiştirmesi miktarını bulabilmek adına, 40 mm ile 12 m arasında değişen uzunluğa sahip 650 eklem yüzeyi üzerinde yapılmış deneyleri incelemiştir. Yaptığı değerlendirmeler sonucunda Eşitlik 2.23 ile verilen ilişkiyi ortaya koymuştur. Eşitlikteki  $\delta$ , doruk makaslama dayanımına ulaşılması için gerekli olan yer değiştirme miktarı iken, L süreksizliğin uzunluğudur.

$$\delta = \frac{L}{500} \left( \frac{JRC}{L} \right)^{0.33} \quad (Eş. 2.23)$$



Şekil 2.18: Süreksizlik profilinin uzunluğuna ve yüzeyindeki pürüzlerin genliğine bağlı olarak JRC belirleme abağı (Barton, 1981).

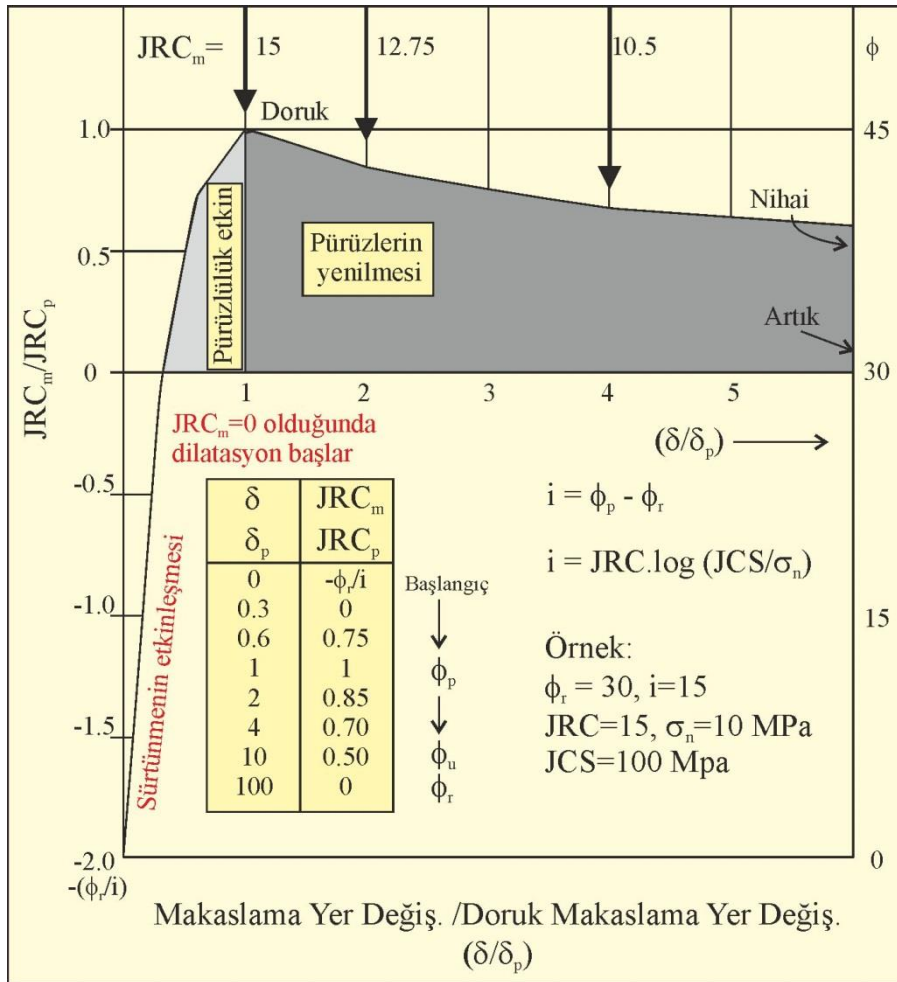
Barton (1982) yayımladığı teknik raporda, örnek uzunluğu ile JRC ve JCS değerleri arasındaki ilişkiyi yaklaşık olarak belirlemek için eşitlikler önermiştir. Yazar, Bandis ve ark. (1981) tarafından grafik halinde verilen ilişkilerin yaklaşık olarak belirlenmesi için Eşitlik 2.24'ün kullanılması gerektiğini belirtmiştir.

$$JRC_n \cong JRC_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0} \quad (Eş. 2.24a)$$

$$JCS_n \cong JCS_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03JRC_0} \quad (Eş. 2.24b)$$

JRC değerlerinin doruk makaslama dayanımına ulaşıldığı anda geriye dönük analize hesaplandığını söyleyen araştırmacı, doruk değerlere ulaşmadan önceki ve ulaşıktan sonraki JRC ve makaslama dayanımı değerlerinin de belirlenebileceğini ifade etmiştir (Şekil 2.19). Doruk değerler dışındaki değerler için 'mobil' ifadesini kullanan yazarın önerdiği ilişki Eşitlik 2.26'da verilmiştir.

$$\frac{JRC_{mobil}}{JRC_{doruk}} = \frac{\arctan\left(\frac{\tau_{mobil}}{\sigma_n}\right) - \phi_r}{\phi_p - \phi_r} \quad (Eş. 2.26)$$

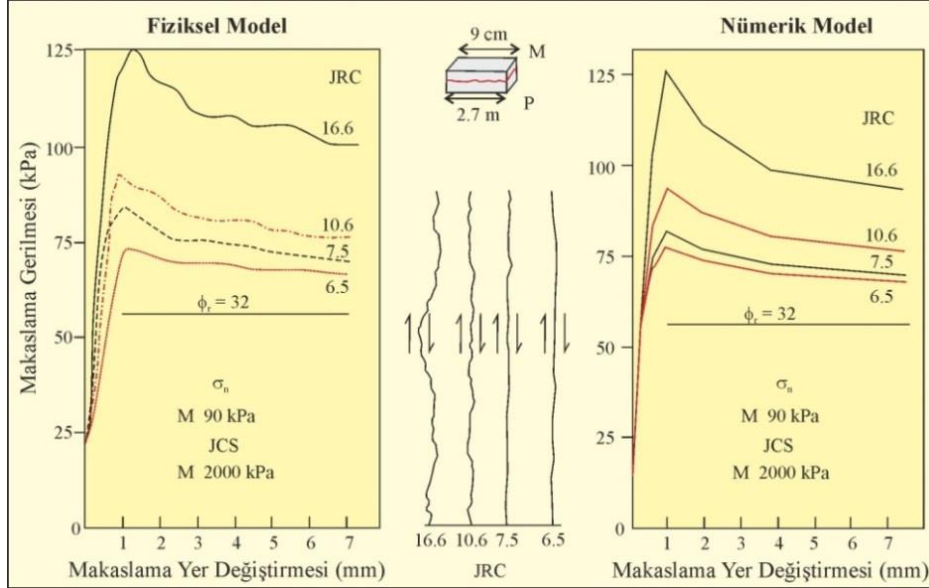


Şekil 2.19: Makaslama yer değiştirmesi ile JRC arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Barton, 1982).

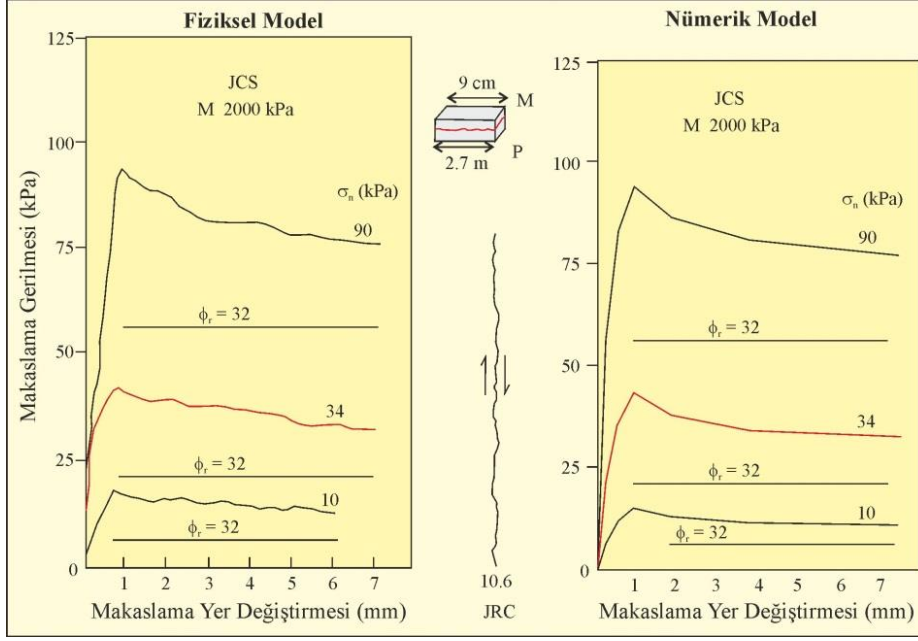
Farklı JRC ve normal gerilme değerlerini kullanarak oluşturduğu yapay süreksizlik yüzeyleri üzerinde makaslama deneyleri yapan Barton (1982); elde ettiği sonuçların, önerilen yenilme kriteri ile hesaplanan sonuçlarla büyük oranda benzerlik

gösterdiğini belirtmiştir (Şekil 2.20 ve 2.21). Ayrıca dilatasyon davranışını modellemek adına Barton ve Choubey (1977) tarafından ölçülen dilatasyon açılarını kullanmıştır. Pürüzlülük bileşeni olarak adlandırdığı ve  $JRC \log(JCS/\sigma_n)$  şeklinde ifade edilen bileşene karşılık ölçülen dilatasyon açılarının ( $d_i$  ve  $d_n$ ) grafiğini oluşturmuştur (Şekil 2.22).  $d_n$  değerinin doruk makaslama dayanımının elde edildiği andaki doruk dilatasyon açısı olduğunu belirten araştırmacı;  $d_i$  değerinin ise makaslama gerilmesi uygulandığı andaki dilatasyon açısı olduğunu ifade etmiştir. Şekil 2.22'deki 2 numaralı doğrunun bütün verileri, 1 numaralı doğrunun ise  $d_n$  değerlerini temsil ettiğini aktaran araştırmacı, 1 numaralı doğruyu en iyi şekilde temsil eden regresyon eşitliğini belirlemiştir (Eş. 2.27). Yapay süreksizlik yüzeyleri üzerinde deneyler yaparak belirlediği  $d_n$  değerleri ile Eşitlik 2.27'den hesapladığı  $d_n$  değerlerini karşılaştırmış ve birbirine yakın sonuçlar elde ettiğini ifade etmiştir (Şekil 2.23).

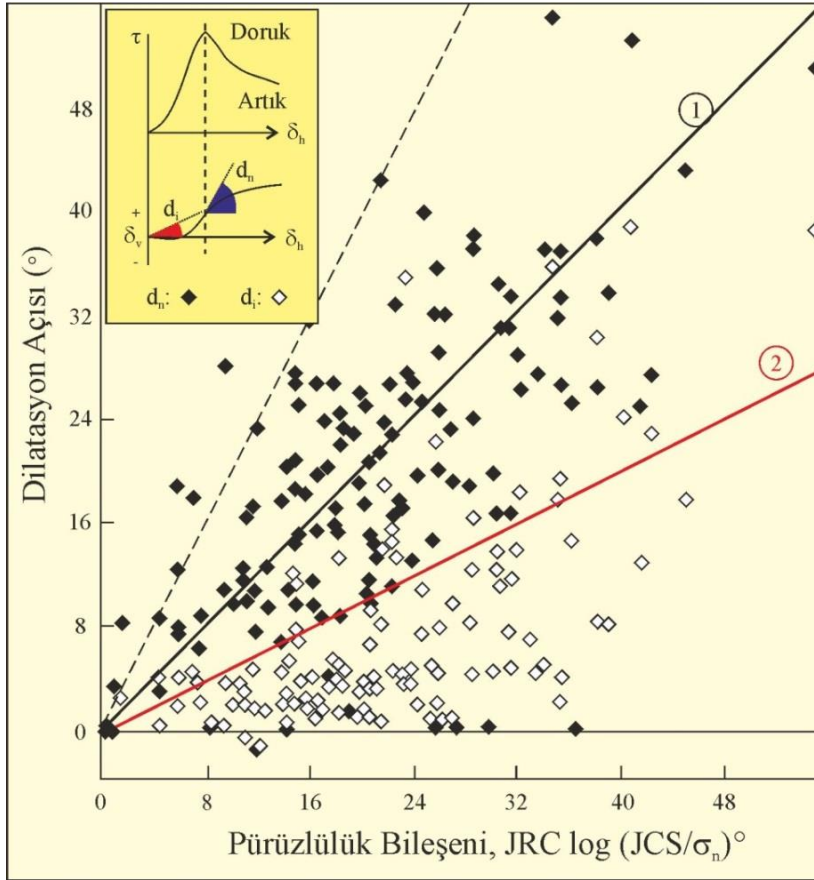
$$d_n \cong \frac{1}{2} JRC \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \quad (Eş. 2.27)$$



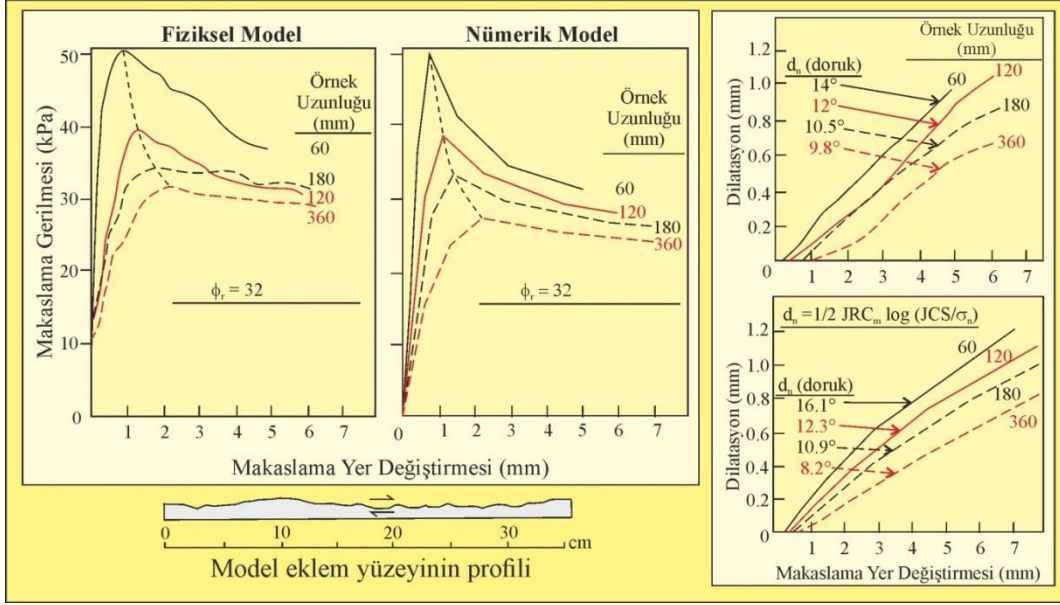
Şekil 2.20: Farklı JRC değerine sahip örnekler üzerinde gerçekleştirilen makaslama deneylerinin ölçütten elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması (Barton, 1982).



Şekil 2.21: Tek tip süreksizlik profili üzerinde ve farklı normal gerilmeler altında gerçekleştirilen makaslama deneylerinin ölçütten elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması (Barton, 1982).



Şekil 2.22: Pürüzlülük bileşeni ile dilatasyon açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Barton, 1982).

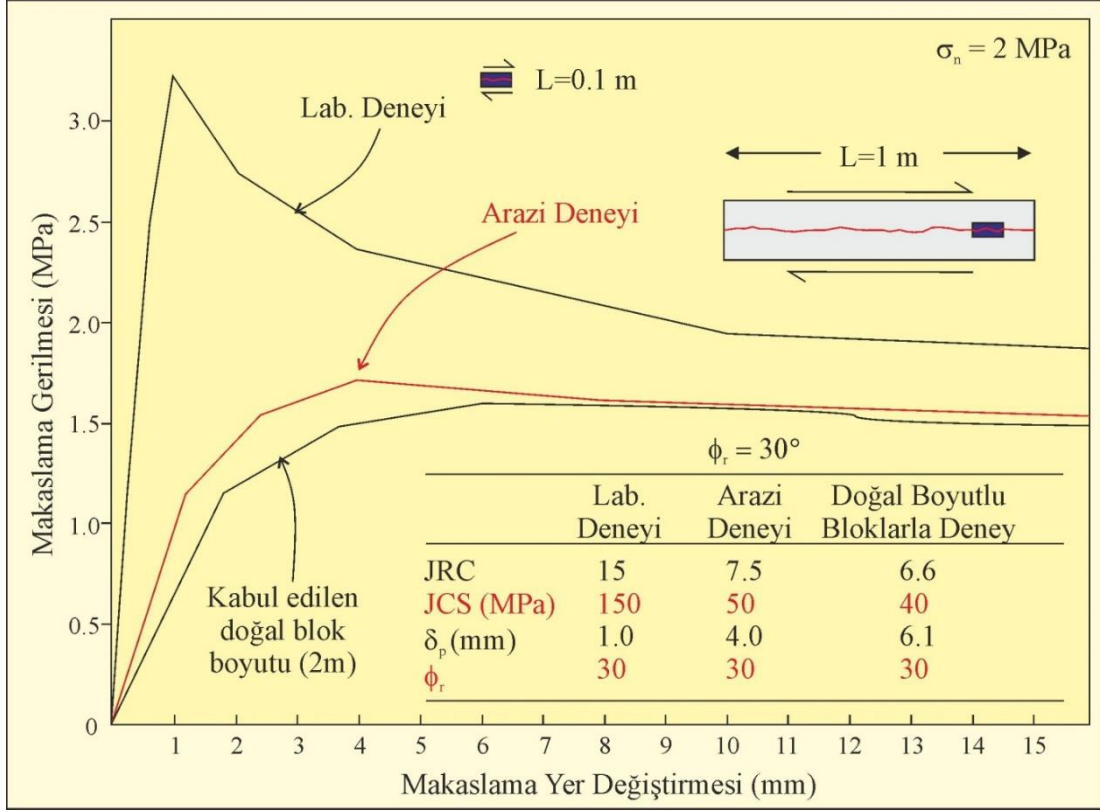


Şekil 2.23: Farklı örnek uzunlukları için deneyler sonucu belirlenen ve formülden hesaplanan dilatasyon açılarının karşılaştırılması (Barton, 1982).

Laboratuvarda ve arazide eğimlendirme deneyi yapılmasına olanak veren blok boyutlarının (sırasıyla 10cm ve 1m) yanı sıra ölçek etkisi açısından yeterli olduğu varsayılan bir blok boyutuna (2m) sahip örnekleri kullanarak makaslama dayanımı deneyleri yapan araştırmacı; en düşük dayanım değerini, doğal blok boyutuna sahip örnekler üzerinde yaptığı deneyler sonucunda elde etmiştir (Şekil 2.24). Ölçek etkisinin ortadan kaldırılması için doğal blok boyutuna sahip örnekler üzerinde deney yapılması gerektiğini belirtmiştir.

Jing ve ark. (1992) granit örneklerinden elde ettikleri doğal süreksizlik yüzeylerini model almış ve betondan yapay süreksizlik yüzeyleri üretmişlerdir. Yapay yüzeyler üzerinde farklı normal gerilmeler altında ve değişik doğrultularda makaslama deneyi yapmışlardır. Eklem yüzeyine ait makaslama dayanımının Eşitlik 2.28'den belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. Buradaki  $\alpha_0$  pürüzlerin açısını temsil ederken, b ise malzemenin aşınma derecesine bağlı olarak değişen bir sabittir ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmektedir. Araştırmacılar  $\alpha_0$  değerinin belirlenmesi için eğimlendirme deneyini önermektedirler.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + \alpha_0 \left( 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^b \right] \quad (Eş. 2.28)$$



Şekil 2.24: Ölçek etkisini ortaya koymak için farklı boyuta sahip örnekler baz alınarak yapılan makaslama deneyi modelleri (Barton, 1982).

Maksimovic (1992) mekanik bir model üzerinde dilatasyon davranışını incelemiş ve elde ettiği sonuçları kullanarak kayalardaki süreksizlik yüzeyinin makaslama dayanımını belirlemeye yönelik bir yaklaşımda bulunmuştur (Eş.2.29). Eşitlikteki  $\Delta\phi$  ile  $P_N$  sırasıyla eklem yüzeyinin pürüzlülük açısı ve pürüzlerin ufalanmaya karşı gösterdiği direnci ve uğradığı deformasyonu temsil eden bir parametredir.  $P_N$  değeri, ölçülen dilatasyon açısının, sıfır normal gerilme altında ölçülen dilatasyon açısının yarısına eşit olduğu andaki normal gerilme değeridir.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + \frac{\Delta\phi}{\left(1 + \frac{\sigma_n}{P_N}\right)} \right] \quad (\text{Eş. 2.29})$$

Kulatilake ve ark. (1995) pürüzlülük parametresinin belirlenmesi için fraktal analiz yönteminden yararlanmışlardır. Pürüzlülüğü temsil eden sabit ve sabit olmayan iki bileşen olduğunu belirten araştırmacılar, sabit olmayan bileşenin pürüzlüğe ait açılar olduğunu ifade etmişlerdir. Birbirine paralel olacak şekilde seçtikleri 9 profili

kullanarak pürüzlere ait açıları ( $I$ ) belirlemişler ve daha sonra bu değerlerin ağırlıklı ortalamasını almışlardır. Pürüzlü süreksizlik yüzeyinin gerçek uzunluğunun belirlenmesinde kullanılan fraktal parametrelerden ( $K_d$  ve  $D$ ) yararlanarak pürüzlülüğe ait sabit bileşeni (SRP) belirlemeye çalışmışlardır. SRP değerini belirlerken fraktal parametreleri farklı kombinasyonlarda kullanmışlardır. Doruk makaslama dayanımını hesaplamak için önerdikleri bağıntı genel haliyle Eşitlik 2.30'da verilmiştir. Eşitlikteki  $a$ ,  $c$  ve  $d$  terimleri regresyon analizine göre belirlenen sabitler olup, kullanılan fraktal parametrelere bağlı olarak değişmektedir.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + a(SRP)^c \left( \log \frac{JCS}{\sigma_n} \right)^d + 1 \right] \quad (Eş. 2.30)$$

Papaliangas ve ark. (1995) kayalardaki eklemler için kapsamlı bir yenilme kriteri üretmek amacıyla yaptıkları çalışmada Eşitlik 2.31'de gösterilen bağıntıyı elde etmişlerdir. Önerdikleri eşitlik, yapı itibarıyla Patton (1966) tarafından önerilen eşitliğe benzemekle birlikte, doruk sürtünme açısı ( $\phi_m$ ) ve dilatasyon açısı ( $\psi$ ) hesaplanırken izlenen yolda farklılık vardır.  $\phi_m$  açısı, dilatasyona izin verilmeyecek derecede yüksek çevre basınçlarının kullanıldığı üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen doruk sürtünme açısıdır. Araştırmacılar  $\psi$  değerinin ise, süreksizlik yüzeyi üzerinde örneğin kendi ağırlığı altında, herhangi bir normal gerilme uygulanmadan gerçekleştirilecek makaslama deneylerinden belirlenebileceğini belirtmişlerdir.

$$\tau_p = \sigma_n \tan[\phi_m + \Psi] \quad (Eş. 2.31)$$

Aydan ve ark. (1996) süreksizlik yüzeyine ait morfolojik özelliklerin makaslama dayanımı üzerinde etkili olduğunu belirtmiştir. Söz konusu morfolojik özelliklerin anizotrop olmasından ötürü makaslama dayanımının da anizotrop olacağını ifade eden araştırmacılar, süreksizliklerin makaslama dayanımını belirlemeye yönelik bir ilişki önermişlerdir (Eş. 2.32).

$$\tau = A_1(1 - e^{-B_1\sigma_n}) + \sigma_n(\tan \phi_i + A_2e^{-B_2\sigma_n}) \quad (Eş. 2.32)$$



Bu eşitlikte  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  ve  $B_2$  parametreleri kohezyon ( $c$ ), çekilme dayanımı ( $\sigma_t$ ), pürüzlerin ortalama eğimi ( $\alpha$ ), temel sürtünme açısı ( $\phi_i$ ) ve yöne bağlı olarak değişen sürtünme açısı ( $\phi_\alpha$ ) değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır (Eş. 2.33).

$$A_1 = c \quad (\text{Eş. 2.33a})$$

$$\begin{aligned} A_2 \\ = \tan \phi_\alpha - \tan \phi_i \end{aligned} \quad (\text{Eş. 2.33b})$$

$$B_1 = \frac{\tan(\alpha + \phi_\alpha) - \tan \phi_i}{c} \quad (\text{Eş. 2.33c})$$

$$B_2 = \frac{\tan \alpha - \tan \phi_i}{\sigma_t} \quad (\text{Eş. 2.33d})$$

Zhao (1997), süreksizlik yüzeylerinin birbiriyle tam olarak kenetlenmediği ve örtüşmenin az olduğu durumlarda, JRC ve JCS kullanılarak hesaplanan makaslama dayanımının gerçekte olması gerekenden daha yüksek dayanım değerleri verdiğini ifade etmiştir. Bu sorunu çözmek adına, Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilmiş yenilme kriterine eklem uyumluluk katsayısı (JMC) adını verdiği bir parametreyi eklemiştir (Eş. 2.34). Bu parametre, süreksizliğin alt ve üst yüzeyinin profilometre veya başka ölçüm yöntemleri ile sayısallaştırılıp örtüşen yüzeylerin toplam yüzeye oranlanmasıyla belirlenmektedir. JMC, süreksizliğin alt ve üst yüzeyinin tam olarak örtüştüğü durumlarda 1 değerini alırken, kenetlenme azaldıkça JMC değeri de düşmektedir. Yazar,  $JMC < 0.3$  olduğu durumlarda JMC'nin 0.3 alınması gerektiğini ifade etmiştir.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \cdot JMC \cdot \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (\text{Eş. 2.34})$$

Grasselli ve Egger (2003) yedi farklı kaya türüne ait örnekler kullanarak yapay süreksizlik düzlemleri oluşturmuşlardır. Özel geliştirilmiş bir algoritma yardımıyla süreksizlik yüzeyini temsil edecek küçük üçgenler meydana getirerek yüzeyi sayısallaştırmışlardır. Oluşturdukları üçgenleri kullanarak makaslama esnasında

birbirine temas edecek alanları belirlemeyi amaçlayan yazarlar, toplam potansiyel temas alanının ( $A_{\theta^*}$ ) belirlenmesi için Eşitlik 2.35'ten yararlanmışlardır.

$$A_{\theta^*} = A_0 \left( \frac{\theta_{max}^* - \theta^*}{\theta_{max}^*} \right)^c \quad (Eş. 2.35)$$

Burada;

$A_0$  : Maksimum olası temas alanı,

$\theta_{max}^*$  : Makaslama doğrultusundaki üçgenlere ait maksimum eğim açısı,

$\theta^*$  : Üçgenlere ait minimum görünür eğim açısı,

$c$  : Süreksizlik yüzeyindeki görünür eğim açılarının dağılımıyla karakterize edilen ve regresyon analizi ile belirlenen pürüzlülük parametresini ifade etmektedir.

Araştırmacılar, doruk makaslama dayanımının belirlenmesi için Eşitlik 2.36'nın kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + \left( \frac{\theta_{max}^*}{c} \right)^{1.18 \cos \beta} \right] \cdot \left[ 1 + e^{-\left( \frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{max}^*}{c} \frac{\sigma_n}{\sigma_t} \right)} \right] \quad (Eş. 2.36)$$

Eşitlikte  $\sigma_t$  çekilme dayanımını ve  $\beta$  ise şistozite düzlemi ile süreksizliğin normal düzlemi arasında kalan açıyı temsil etmektedir. Eğer örnekte şistozite gözlenmiyorsa,  $\beta$  açısının sıfır olarak alınması gerektiği belirtilmiştir.

Tatone ve Grasselli (2009), Grasselli ve Egger (2003) tarafından kullanılan  $c$  parametresinin, pürüzlülük özelliklerini tek başına temsil etmede eksik kaldığını öne sürmüştür.  $\theta^*$  ve  $A_{\theta^*}$  arasında eğrisel bir ilişki olduğunu ve bunun  $c$  parametresi ile kontrol edildiğini belirten yazarlar, Eşitlik 2.35 kullanılarak çizilen grafikteki eğrisel zarfın altında kalan alan ile  $\theta_{max}^*/c$  oranının pozitif korelasyona sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Eğrinin altında kalan alanı bulmak için Eşitlik 2.35'teki ifadenin integralini alan araştırmacılar, elde ettikleri  $\theta_{max}^*/(c+1)$  ifadesinin  $\theta_{max}^*/c$  ile olan benzerliğine dikkat çekmişler ve Grasselli ve Egger (2003) tarafından önerilen ifadenin düzenlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir (Eş. 2.37).

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + \left( \frac{\theta_{max}^*}{c+1} \right)^{1.18\beta} \right] \cdot \left[ 1 + e^{-\left( \frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{c+1} \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \right)} \right] \quad (Eş. 2.37)$$

Ghazvinian ve ark. (2012), alçı kullanarak sabit dış açısına sahip süreksizlik yüzeyleri üretmişlerdir. Aynı ve farklı JCS değerlerine sahip süreksizlik yüzeylerini üst üste getirerek bu yüzeyler üzerinde makaslama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Belirtilen şartlar altında örneklerin makaslama davranışını belirlemenin yanı sıra çekilme dayanımının ( $\sigma_t$ ) süreksizliklerin makaslama dayanımı üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. Araştırmacılar, farklı JCS değerine sahip süreksizlik yüzeylerine ait makaslama dayanımının, Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen yenilme kriteri kullanılarak hesaplanan makaslama dayanımı ile aynı olmayacağını öne sürmüşlerdir. Yaptıkları karşılaştırmalar sonucunda Barton-Bandis kriterinin daha düşük dayanım değerleri verdiğini ve bu durumun kriterin farklı JCS değerlerine sahip süreksizlik yüzeylerini temsil etmedeki yetersizliğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yaptıkları deneylerde ölçtükleri dilatasyon açıları ile kriterinden belirlenen dilatasyon açılarını karşılaştıran yazarlar, deneyler sonucunda elde ettikleri açıların daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Barton-Bandis kriterinde dilatasyonu kontrol eden parametrelerin JRC ve JCS/ $\sigma_n$  olduğunu belirten araştırmacılar, kriter ile hesaplanan düşük değerlerin JCS/ $\sigma_n$  parametresinden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Kriterde JCS yerine  $\sigma_t$  kullanıldığı takdirde, aynı ve farklı dayanım değerine sahip süreksizlik yüzeyleri ile yapılan deneylerden elde edilen makaslama dayanımı sonuçlarının daha tutarlı olacağını göstermişlerdir. Dilatasyon açısı ile  $\sigma_t/\sigma_n$  oranı arasındaki ilişkiyi Eşitlik 2.38'de gösterildiği şekliyle bulan araştırmacılar, makaslama dayanımının hesaplanması için Eşitlik 2.39'u önermişlerdir.

$$d_n = \frac{\left[ 19.4 + \frac{3.74}{\left( \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \right)} + JRC \right] \left( \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \right)}{1 + \left( \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \right)} \quad (Eş. 2.38)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + \frac{\left[ 19.4 + \frac{3.74}{\left( \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \right)} + JRC \right] \left( \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \right)}{1 + \left( \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \right)} \right] \quad (\text{Eş. 2.39})$$

Lee ve ark. (2014), yükleme koşulları ve malzeme özelliklerinin makaslama dayanımı ve dilatasyon üzerindeki etkilerini incelemek adına çimentodan ürettikleri yapay süreksizlik yüzeyleri üzerinde makaslama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sabit normal yük ve sabit normal rijitlik (stiffness) koşullarında yüklemenin gerçekleştirildiği deneylerde makaslama dayanımının normal gerilmeye bölünmesiyle elde edilen ve yüzey direnç indeksi ( $SRI_p$ ) adını verdikleri değeri hesaplamayı amaçlamışlardır.  $SRI_p$  değerinin hesaplanması için önerdikleri yaklaşım Eşitlik 2.40'ta verilmiştir.

$$SRI_p = \frac{\tau_p}{\sigma_n} = 0.017(JRC)^{0.89} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right)^{0.42} + \tan \phi_b \quad (\text{Eş. 2.40})$$

Tang ve ark. (2014), süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımının belirlenmesi için sabit normal yükleme koşulunda, yapay süreksizlik yüzeyleri üzerinde deneyler yapmışlardır. Grasselli ve Egger (2003) tarafından kullanılan yüzey sayısallaştırma yöntemine benzer bir yöntem kullanarak makaslama sırasında birbirine temas edecek alanları belirleyen yazarlar, yüzeyin sayısallaştırılmasıyla elde edilen fonksiyonun en iyi pürüzlülük değerlendirme tekniği olduğunu belirtmişlerdir. Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından önerildiği gibi dilatasyon açısının belirlenmesinde  $\sigma_t$ 'yi kullanmışlardır. Ortaya koydukları makaslama dayanım kriteri (Eş. 2.41) Tatone ve Grasselli (2009) ve Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından önerilen kriterlere büyük oranda benzerlik göstermektedir.

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + \left( 10 \frac{A_0 \theta_{max}^*}{c + 1} \right) \left( \frac{\frac{\sigma_t}{\sigma_n}}{1 + \frac{\sigma_t}{\sigma_n}} \right) \right] \quad (\text{Eş. 2.41})$$

Xia ve ark. (2014) makaslama dayanımı belirlenirken kullanılan doruk dilatasyon açısının hesaplanması aşamasında önceki araştırmacılardan farklı bir görüş dile getirmişlerdir. Literatürde ifade edildiği gibi normal gerilmenin sonsuza yaklaştığı durumda dilatasyonun sıfır olacağını, ancak uygulanan normal gerilmenin de örneğin dayanımını aşamayacağını belirtmişlerdir. Dilatasyon açısının üst sınırını belirleyen normal gerilmenin  $\sigma_{nkritik}$  olduğunu ifade eden araştırmacılar,  $\sigma_{nkritik}$  üstündeki normal gerilme değerleri için dilatasyon açısının sabit kalacağını söylemişlerdir. Dilatasyon açısı ve makaslama dayanımının belirlenmesi için sırasıyla Eşitlik 2.42 ve 2.43'ü önermişlerdir.

$$d_n = \left( \frac{4A_0\theta_{max}^*}{c+1} \right) \left[ 1 + e^{-\left( \frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{c+1} \frac{\sigma_n}{\sigma_t} \right)} \right] \quad (Eş. 2.42)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \left\{ \phi_b + \left( \frac{4A_0\theta_{max}^*}{c+1} \right) \left[ 1 + e^{-\left( \frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{c+1} \frac{\sigma_n}{\sigma_t} \right)} \right] \right\} \quad (Eş. 2.43)$$

Jang ve Jang (2015) dolgu içermeyen ve bozunmamış kaya eklemlerinin makaslama dayanımının,  $\phi_b$ , eklem pürüzlülük açısı ( $\phi_j$ ) ve makaslama bileşeni ( $s_n$ ) ile hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar  $\phi_j$  değerini istatistiksel yöntemlerle (Pürüz eğimlerinin karelerinin ortalamasının karekökü,  $Z_2$ ) belirlemişlerdir. Makaslama dayanımının belirlenmesi için Eşitlik 2.44'ü önermişlerdir. B ve  $s_n$  parametrelerinin hesaplanabilmesi için  $\phi_j$ 'nin yanı sıra eklem yüzeyinin dayanımına da ( $\sigma_j$ ) ihtiyaç duyulduğunu ifade etmişlerdir (Eş. 2.45).

$$\tau = \sigma_n^B \tan(\phi_b + \phi_j + s_n) \quad (Eş. 2.44)$$

$$B = 0.00062\sigma_j - 0.01085\phi_j + 0.90331 \quad (Eş. 2.45a)$$

$$s_n = 0.1837\sigma_j + 0.4519\phi_j + 0.9774 \quad (Eş. 2.45b)$$

Yang ve ark. (2016) süreksizlik yüzeyini üç boyutlu olarak incelemiş ve morfolojik parametreleri kullanarak doruk makaslama dayanımını belirlemeye çalışmışlardır. Grasselli ve Egger (2003)'in önerdiği yaklaşımı esas alarak süreksizlik yüzeyini

sayısallaştırmışlardır.  $\phi_b$  ve eklemlere ait efektif pürüz açısı ( $\alpha_e$ ) ile doruk dilatasyon açısının ( $\phi_p$ ) belirleneceğini ifade eden araştırmacılar,  $\alpha_e$  değerinin Eşitlik 2.46'dan hesaplanabileceğini belirtmişlerdir.

$$\alpha_e = \frac{\theta_{max}^*}{c^{0.45}} \quad (Eş. 2.46)$$

$\alpha_e$ 'nin  $d_n$  ve  $s_n$ 'ye bağlı bir parametre olduğunu ifade eden araştırmacılar,  $s_n$  belirlenirken JCS değerinin kullanılması gerektiğini söylemişlerdir. Buradaki  $s_n$  değeri, Bandis ve ark. (1981) tarafından  $S_A^\circ$  olarak ifade edilen pürüzlere ait yenilme bileşenidir. Makaslama dayanımının belirlenmesi için Eşitlik 2.47'yi önermişlerdir.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + \frac{\theta_{max}^*}{c^{0.45}} \left( e^{-\frac{\sigma_n}{JCS} c^{0.75}} \right) \right] \quad (Eş. 2.47)$$

Zhang ve ark. (2016), iki boyutta yaptıkları analizlerle makaslama dayanımını belirlemeye çalışmışlardır. İki boyutlu pürüzlülük parametreleri olarak, süreksizlik yüzeyi üzerinde belirledikleri profilin birinci türevinin karekök ortalaması ( $Z_2$ ) kullanılarak hesaplanan  $\tan^{-1}(Z_{2r})$  ile profilin makaslama yönüne bakan yüzlerinin uzunluğunun gerçek profil uzunluğuna oranı ile belirlenen maksimum temas katsayısı ( $C_m$ ) değerleri kullanılmıştır.  $Z_2$  değerini Tse ve Cruden (1979)'ün önerdiği şekilde hesaplamışlardır (Eşitlik 2.48).

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{N(\Delta x)^2} \sum_{i=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (Eş. 2.48)$$

Burada;

L : Profil uzunluğu,

$x_i, y_i$  : Eşit aralıkla seçilen örnekleme noktalarına ait koordinatlar,

N : Profil içinde ölçüm yapılan aralık sayısı,

dx : Örnekleme hattı boyunca yan yana olan noktalar arasındaki yatay uzaklık,

dy : Örnekleme hattı boyunca yan yana olan noktaların örnekleme hattına olan düşey uzaklığıdır.

Araştırmacılar, makaslama deneyi anında makaslama yönüne bakan yüzlerin birbiri ile temas edeceğini ve yüzey pürüzlülüğü belirlenirken temas halindeki bu yüzeylerin hesaba katılması gerektiğini belirtmişlerdir.  $Z_2$  parametresi yerine  $\tan^{-1}(Z_{2r})$  parametresini kullanarak makaslama yönüne bakan pürüzlerin açılarını belirlemeyi hedeflemiş ve  $\tan^{-1}(Z_{2r})$  için Eşitlik 2.49'u önermişlerdir. Eşitlikteki  $N^+$ , makaslama yönüne bakan yüzeylere ait örnekleme noktalarıdır.

$$\tan^{-1}(Z_{2r}) = \tan^{-1} \sqrt{\frac{1}{N^+(\Delta x)^2} \sum_{i=1}^N [\max(0, y_{i+1} - y_i)]^2} \quad (\text{Eş. 2.49})$$

Önerdikleri  $C_m$  parametresi ise Eşitlik 2.50 yardımıyla belirlenmektedir. Eşitlikteki  $L_0$  değeri profili alınan eklem yüzeyinin uzunluğudur.

$$C_m = \frac{1}{L_0} \sum_{i=1}^N \sqrt{\Delta x^2 + [\max(0, y_{i+1} - y_i)]^2} \quad (\text{Eş. 2.50})$$

Doruk dilatasyon açısının ( $i_p$ ) belirlenmesi için önerdikleri  $\tan^{-1}(Z_{2r})$  ve  $C_m$  parametrelerinin yanı sıra önceki çalışmalardakine benzer şekilde  $\sigma_t$  değerini kullanmışlardır.  $i_p$  değeri hesaplanırken Eşitlik 2.51'in kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

$$i_p = \frac{\tan^{-1}(Z_{2r})}{(1 - C_m)^{0.64}} \left[ 1 - e^{(-3.36 C_m \frac{\sigma_t}{\sigma_n})} \right] \quad (\text{Eş. 2.51})$$

Doruk makaslama dayanımının hesaplanması için Eşitlik 2.52'yi önermişlerdir.

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left\{ \phi_b + \frac{\tan^{-1}(Z_{2r})}{(1 - C_m)^{0.64}} \left[ 1 - e^{(-3.36 C_m \frac{\sigma_t}{\sigma_n})} \right] \right\} \quad (\text{Eş. 2.52})$$

Hou ve ark. (2016) süreksizlik yüzeyinin üç boyutlu olarak sayısallaştırılması için Grasselli ve Egger (2003) tarafından önerilen yöntemi kullanmışlardır. Süreksizlik

yüzeyinin tanımlanması için  $\bar{\theta}^*$  ve  $A_0$  parametrelerinden yararlanan araştırmacılar, doruk dilatasyon açısı için Eşitlik 2.53'ü önermişlerdir.

$$i_p = \frac{\bar{\theta}^*}{a \frac{\sigma_n}{\sigma_t} + b \cdot A_0} \quad (\text{Eş. 2.53})$$

En küçük kareler yönteminden faydalanarak deneylerde kullandıkları granit ve kumtaşı örnekleri için a ve b katsayılarını belirlemişlerdir. Bu değerler granit için a=0.0118, b=0.2917 iken, kumtaşı için a=0.0573 ve b=0.2699'dur. Yazarlar tarafından önerilen doruk makaslama dayanımı kriteri Eşitlik 2.54'te verilmiştir.

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left( \phi_b + \frac{\bar{\theta}^*}{a \frac{\sigma_n}{\sigma_t} + b \cdot A_0} \right) \quad (\text{Eş. 2.54})$$



### 3. PÜRÜZLÜLÜĞÜN TANIMLANMASI VE SAYISALLAŞTIRILMASI

#### 3.1. Süreksizliklere Ait Pürüzlülüğün Tanımlanması

Süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımını etkileyen parametrelerden biri olan pürüzlülük bileşeninin tanımlanması için farklı yaklaşımlar önerilmiştir. Barton-Bandis kriterinde kullanılan JRC, makaslama dayanımı eşitliklerinde pürüzlülüğü ifade etmek için tercih edilen en yaygın parametre iken, literatürde JRC'nin yerine kullanılabilecek diğer bazı parametreler de önerilmiştir. Bunlar çeşitli istatistiksel, jeoistatistiksel ve fraktal geometri yöntemleri ile belirlenebilmektedir. JRC ise, pürüzlülük profilleri, eğimlendirme deneyi, çekme deneyi ve maksimum genlik yöntemleri ile tayin edilebilmektedir (bkz. Şekil 2.11, Eş. 2.19, 2.21 ve 2.22).

#### 3.1.1. Pürüzlülüğün Belirlenmesinde Kullanılan İstatistiksel Yöntemler

Süreksizlik yüzeyi üzerinde belirli bir doğrultuda alınan süreksizlik profilleri kullanılarak iki boyutlu pürüzlülük tanımlaması yapmak mümkündür. Birden fazla süreksizlik profilinin birlikte değerlendirilmesiyle üç boyutta pürüzlülük tanımlaması da yapılabilmektedir. İki boyutlu pürüzlülük tanımlaması için kullanılan başlıca istatistiksel yöntemler aşağıda açıklanmıştır. Bununla birlikte pürüzlülüğün üç boyutta tanımlanmasına olanak veren yöntemlere de değinilmiştir.

a) Ortalama pürüz yüksekliği ( $R_a$  veya CLA)

Süreksizlik profili boyunca, yatay konumda olacak şekilde bir referans çizgi belirlenmektedir. Yüzeydeki pürüzlerin referans çizgisine olan dikey uzaklıklarına bağlı olarak ortalama pürüz yüksekliği Eşitlik 2.53 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(i)| \quad (\text{Eş. 2.53})$$

Burada n değeri ölçüm yapılan noktaların sayısıdır.

b) Ortalama yüzey yüksekliği (RMS veya  $Z_1$ )

Pürüzlerin, seçilen referans çizgisine olan uzaklıklarının karelerinin toplamının ortalaması hesaplanmakta ve daha sonra karekökü alınarak RMS değeri belirlenmektedir (Eş. 2.54). RMS değeri, pürüzlerin ortalamadan sapmalarının bir ölçüsüdür.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y(i)^2} \quad (Eş. 2.54)$$

c) Pürüz eğimlerinin karelerinin ortalamasının karekökü ( $Z_2$ )

Myers (1962) tarafından önerilen  $Z_2$  parametresi ile belirli ilerleme aralıklarında pürüzlerin eğimleri hesaplanmakta ve Eşitlik 2.55 kullanılarak  $Z_2$  değeri belirlenmektedir.

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{x_{i+1} - x_i}} \quad (Eş. 2.55)$$

Bu eşitlikte  $x_i$  ve  $y_i$ ,  $i$ . noktadaki pürüzün koordinatı iken,  $L$  ise ölçülen profilin uzunluğudur.

d) Yapı fonksiyonu (SF)

İlk defa Sayles ve Thomas (1977) tarafından önerilen yapı fonksiyonu otokorelasyon fonksiyonuna benzemekte ve Eşitlik 2.56 kullanılarak hesaplanmaktadır (Yu ve Vayssade, 1991). Eşitlikteki  $f(x)$ ,  $L$  uzunluğuna sahip profilin  $x$ . ölçüm noktasındaki pürüze ait genlik iken,  $Dx$  ise  $x$  yönündeki iki ölçüm noktası arasındaki mesafedir.

$$SF = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} [f(x + Dx) - f(x)]^2 \quad (Eş. 2.56)$$

e) Ortalama eğim açısı ( $i_{ave}$ )

İncelenen profildeki pürüzlerin eğim açılarının ortalaması Eşitlik 2.57 yardımıyla belirlenebilmektedir (Yu ve Vayssade, 1991). Eşitlikteki  $L$  profil uzunluğu,  $y_i$  ise pürüzün  $i$ . noktadaki yüksekliğidir.

$$i_{ave} = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left( \frac{dy}{dx} \right) dx \right] \quad (Eş. 2.57)$$

f) Ortalama eğim açısının standart sapması (SD<sub>i</sub>)

SD<sub>i</sub>, Eşitlik 2.57'de verilen  $i_{ave}$  parametresinin standart sapmasıdır (Eş. 2.58).

$$SD_i = \tan^{-1} \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left( \frac{dy}{dx} - \tan i_{ave} \right)^2 dx} \quad (Eş. 2.58)$$

g) Maksimum eğim açısı ( $i_{max}$ )

Kusumi ve ark. (1997),  $i_{ave}$  ve SD<sub>i</sub> değerlerinden yararlanarak  $i_{max}$  parametresini hesaplamışlar (Eş. 2.59) ve eklem yüzeyinin birinci derece pürüzlülüğünü belirlemede bu parametreyi kullanmışlardır.

$$i_{max} = i_{ave} + \sqrt{2}SD_i \quad (Eş. 2.59)$$

h) Gerçek profil uzunluğu (R<sub>L</sub>)

Süreksizlik profili üzerinde ölçülen gerçek uzunluğun, profil uzunluğuna oranı şeklinde tanımlanan R<sub>L</sub>, Eşitlik 2.60 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$R_L = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (Eş. 2.60)$$

i) Normalize edilmiş uzunluk yöntemi (L<sub>0\*</sub>)

Tatone ve Grasselli (2010) tarafından önerilen bu yöntem, Grasselli ve Egger (2003)'in kullandığı üç boyutlu potansiyel temas alanı (A<sub>0\*</sub>) yönteminin iki boyuta uyarlanmış halidir. Profil hattı boyunca makaslama yönündeki pürüzlerin eğimleri kullanılarak süreksizlik yüzeyinin normalize edilmiş uzunluğu (L<sub>0\*</sub>) bulunmaktadır. Normalizasyon işlemi için makaslama yönündeki pürüzlere ait farklı eğim açıları eşik değeri olarak kabul edilmektedir. Seçilen açı değerine eşit ve daha büyük eğime sahip pürüzlerin uzunluğu, süreksizliğin toplam uzunluğuna oranlanarak normalizasyon gerçekleştirilmektedir. Farklı eşik açı değerleri için bu işlemleri yapan

araştırmacılar, Eşitlik 2.61'de verilen genel bağıntıyı ortaya çıkarmışlardır. Eşitlik 2.61'deki  $L_0$ , makaslama yönünde  $0^\circ$  eşik açısına sahip normalize edilmiş süreksizlik uzunluğuna,  $\theta^*_{max}$  ise maksimum pürüz açısına karşılık gelmektedir. C parametresi, eşik aı ile  $L_{\theta^*}$  arasındaki ilişkiye bağlı olarak oluşturulan dağılım eğrisinin şeklini belirlemektedir. Boyutsuz C parametresinin istatistiksel yöntemlerle belirlenmesiyle profile ait puruzluluk derecesi ( $R_d$ ) hesaplanabilmektedir (Eş. 2.62).

$$L_{\theta^*} = L_0 \left( \frac{\theta^*_{max} - \theta^*}{\theta^*_{max}} \right)^C \quad (Eş. 2.61)$$

$$R_d = \left( \frac{\theta^*_{max}}{C + 1} \right)_{2D} \quad (Eş. 2.62)$$

j) Gerçek yüzey alanı ( $A_t$ )

Gerçek yüzey alanının ( $A_t$ ) belirlenmesinde, gerçek profil uzunluğunun ( $R_L$ ) hesaplanmasında kullanılan yönteme benzer bir yöntemden yararlanılmaktadır. Belem ve ark. (2000),  $A_t$  değerinin belirlenmesi için Eşitlik 2.63'te verilen yaklaşımı önermişlerdir.

$$A_t \approx \Delta x \Delta y \sum_{i=1}^{N_x-1} \sum_{j=1}^{N_y-1} \sqrt{1 + \left( \frac{Z_{i+1,j} - Z_{i,j}}{\Delta x} \right)^2 + \left( \frac{Z_{i,j+1} - Z_{i,j}}{\Delta y} \right)^2} \quad (Eş. 2.63)$$

Burada;

$\Delta x, \Delta y$  : x ve y eksenindeki onkleme aralığı,

$N_x, N_y$  : x ve y eksenindeki nokta sayıları,

$Z_{i,j}$  :  $x_i, y_j$  koordinatındaki noktanın yukseklidir.

k) Yüzey aısallığı ( $\theta_s$ )

İki boyutlu profiller yardımıyla ortalama eğim açısının hesaplanmasında olduğu gibi, pürüzlerin eğim açıları kullanılarak yüzey aısallığı da ( $\theta_s$ ) belirlenebilmektedir. Bunun için süreksizlik yüzeyi sayısallaştırılmakta ve farklı eğimlere sahip pürüzleri temsil eden düz yüzeyler oluşturulmaktadır. Düz yüzeylere ait normal vektörlerinin

düşey ile yaptığı açı ( $\alpha_k$ ) kullanılarak  $\theta_s$  hesaplanmaktadır (Eş. 2.64). Oluşturulan yüzeylerin sayısı  $m$  ile ifade edilmektedir.

$$\theta_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\alpha_k)_i \quad (\text{Eş. 2.64})$$

l) Pürüz eğimlerinin karelerinin ortalamasının karekökü ( $Z_{2\text{-yüzey}}$ )

İki boyutlu profiller yardımıyla belirlenen  $Z_2$  parametresi, yüzeyler için de hesaplanabilmektedir ( $Z_{2\text{-yüzey}}$ ). Belem ve ark. (2000) gerçekleştirdikleri çalışmada,  $Z_{2\text{-yüzey}}$  parametresinin hesaplanması için Eşitlik 2.65'i kullanmışlardır.

$$Z_{2\text{-yüzey}} = \left[ \frac{1}{(N_x - 1)(N_y - 1)} \left( \frac{1}{\Delta x^2} \sum_{i=1}^{N_x-1} \sum_{j=1}^{N_y-1} \frac{(z_{i+1,j+1} - z_{i,j+1})^2 + (z_{i+1,j} - z_{i,j})^2}{2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{\Delta y^2} \sum_{j=1}^{N_y-1} \sum_{i=1}^{N_x-1} \frac{(z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j})^2 + (z_{i,j+1} - z_{i,j})^2}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (\text{Eş. 2.65})$$

Burada;

$\Delta x, \Delta y$  : x ve y eksenindeki örnekleme aralığı,

$N_x, N_y$  : x ve y eksenindeki nokta sayıları,

$z_{i,j}$  :  $x_i, y_j$  koordinatındaki noktanın yüksekliğidir.

m) Normalize edilmiş alan yöntemi ( $A_{\theta^*}$ )

İlk olarak Grasselli ve ark. (2002) tarafından geliştirilen bu yöntem yardımıyla, makaslama yönünde bulunan ve makaslama sırasında etkin olan yüzeylere ait alanların seçilen bir eşik açı ( $\theta^*$ ) değerine bağlı olarak belirlenmesi mümkün olmaktadır. Farklı  $\theta^*$  değerlerine bağlı olarak normalize edilmiş alanları ( $A_{\theta^*}$ ) belirleyen araştırmacılar,  $A_{\theta^*}$  değeri için Eşitlik 2.66'yı önermişlerdir. Tatone ve Grasselli (2010) bu eşitlikten yola çıkarak, daha önce anlatılmış olan normalize edilmiş uzunluk yöntemini ( $L_{\theta^*}$ ) önermişlerdir (bkz. Eş. 2.61). Grasselli ve Egger (2003) de önerdikleri yenilme ölçütünde Eşitlik 2.66'da kullanılan parametrelerden yararlanmışlardır.

$$A_{\theta^*} = A_0 \left( \frac{\theta_{max}^* - \theta^*}{\theta_{max}^*} \right)^C \quad (E\text{ş. 2.66})$$

Çeşitli istatistiksel parametreler kullanarak JRC değerinin belirlenmesi için farklı araştırmacıların önerdikleri eşitlikler Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1: JRC değerinin belirlenmesi için önerilen eşitlikler (Zheng ve Qi, 2016'dan).

No	Eşitlik	Kaynak
1	$JRC = 2.37 + 70.97(RMS)$	Tse ve Cruden (1979)
2	$JRC = 10.9577 \log(RMS) + 11.5207$	Li ve Zhang (2015)
3	$JRC = 32.2 + 32.47 \log(Z_2)$	Tse ve Cruden (1979)
4	$JRC = 61.79(Z_2) - 3.47$	Yu ve Vayssade (1991)
5	$JRC = 32.69 + 32.98 \log(Z_2)$	Yang ve ark. (2001)
6	$JRC = 51.85(Z_2)^{0.6} - 10.37$	Tatone ve Grasselli (2010)
7	$JRC = 51.16(Z_2)^{0.531} - 11.44$	Jang ve ark. (2014)
8	$JRC = 55.7376(Z_2) - 4.1166$	Li ve Zhang (2015)
9	$JRC = 37.28 + 16.58 \log(SF)$	Tse ve Cruden (1979)
10	$JRC = 121.13(SF)^{0.5} - 3.28$	Yu ve Vayssade (1991)
11	$JRC = 37.65 + 16.5 \log(SF)$	Yang ve ark. (2001)
12	$JRC = 73.95(SF)^{0.266} - 11.38$	Jang ve ark. (2014)
13	$JRC = 137.1739(SF)^{0.5} - 3.9998$	Li ve Zhang (2015)
14	$JRC = 411.1(R_p - 1)$	Maerz ve ark. (1990)
15	$JRC = 92.07(R_p - 1)^{0.5} - 3.28$	Yu ve Vayssade (1991)
16	$JRC = (0.0336 + 0.00124/\ln R_p)^{-1}$	Tatone ve Grasselli (2010)
17	$JRC = 65.9(R_p - 1)^{0.302} - 9.65$	Jang ve ark. (2014)
18	$JRC = 229.44R_p - 226.9357$	Li ve Zhang (2015)
19	$JRC = 3.95[\theta_{max}^*/(C + 1)_{2D}]^{0.7} - 7.98$	Tatone ve Grasselli (2010)
20	$JRC = 5.3[\theta_{max}^*/(C + 1)_{2D}]^{0.605} - 9.49$	Jang ve ark. (2014)

### **3.1.2. Pürüzlülüğün Belirlenmesinde Kullanılan Jeostatistiksel Yöntemler**

Ferrero ve Giani (1990), eklem yüzey pürüzlülüğünün jeostatistiksel tanımını yaparken variogramlardan yararlanmışlardır. Chilès ve Gentier (1993) jeostatistiksel yöntemler kullanılarak, süreksizlik yüzeyinin konumsal özelliklerine dair çalışmalar yapılabileceğini belirtmişlerdir. Roko ve ark. (1997) variogramdan belirlenen jeostatistiksel parametreler yardımıyla süreksizlik yüzeyinin morfolojisini tanımlamışlardır. Gentier ve ark. (2000) gerçekleştirdikleri çalışmada Kriging yöntemini kullanarak süreksizlik yüzeyine ait variogramlar oluşturmuşlardır. Belem ve ark. (2000) süreksizlik yüzeyinde gözlenen yapısal anizotropiyi incelemek adına variogram analizini kullanmışlardır. Ünal ve ark. (2000), variogramlar yardımıyla fraktal boyut hesaplayarak süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğünü modellemişlerdir. Ünal ve Ünver (2004) süreksizlik yüzeylerini variogram yöntemiyle analiz etmişlerdir. Daha sonra bu yüzeyler üzerinde makaslama deneyleri gerçekleştirip, yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen değişimleri yine aynı yöntemi kullanarak belirlemişlerdir.

### **3.1.3. Pürüzlülüğün Belirlenmesinde Kullanılan Fraktal Analiz Yöntemleri**

Mandelbrot (1983), doğanın, Öklid uzayında belirtilen geometrilerin aksine düzensiz ve parçalanmış olduğunu iddia etmektedir. Söz konusu düzensizlik karşısında Öklid geometrisinin yetersiz kaldığını belirten yazar, fraktal geometri adını verdiği bir sistem ile düzensiz şekillerin tarif edilebileceğini ifade etmiştir. Fraktal boyutun belirlenmesinde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan en bilinenleri cetvel – modifiye edilmiş cetvel yöntemi (Lee ve ark., 1990; Kulatilake ve ark., 1995), güç spektral yoğunluğu yöntemi (Power ve ark., 1987; Develi ve Babadağlı, 1998), variogram yöntemi (Kulatilake ve ark., 1998; Develi ve Babadağlı, 1998), kutu sayma yöntemi (Feder, 1988), pürüzlülük uzunluğu yöntemi (Malinverno, 1990) ve çizgi boyutlandırma yöntemidir (Matsushita ve Ouchi, 1989). Fraktal analiz sonucu bulunan parametrelerin makaslama dayanımı eşitliklerinde pürüzlülüğü temsil edecek şekilde kullanıldığı çalışmalar vardır (bkz. Kulatilake ve ark., 1995). Ancak literatürde fraktal boyut (D) kullanılarak JRC değerinin hesaplandığı çalışmalara daha sık rastlanılmaktadır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2: JRC ile D arasındaki ilişkiye bağlı olarak önerilen eşitlikler (Li ve Huang, 2015)

No	Eşitlik	Yöntem	R	SI	JRC <sup>0</sup>	D Aralığı	Std. Profil	Kaynak
1	$JRC = -1138.6 + 1141.6D$	C-W*	-	-	3	1-1.015	E	Türk ve ark. (1987)
2	$JRC = -1022.55 + 1023.92D$	C-W*	0.98	-	1.37	1-1.018	E	Carr ve Warriner (1989)
3	$JRC = 209.751D - 204.1486$	C-W	0.947	0.5	5.603	1-1.069	H	Qin ve ark. (1993)
4	$JRC = 172.206D - 167.2946$	C-W	0.998	-	4.911	1-1.088	E	Zhou ve Xiong (1996)
5	$JRC = 7811778.928D^3 - 23723041.9842D^2 + 24014672.3562D - 8103409.7809$	C-W <sup>#</sup>	0.993	0.05	-0.181	1-1.014	E	Bae ve ark. (2011)
6	$JRC = 1000(D - 1)$	C-W*	-	-	0	1-1.02	E	Carr ve Warriner (1989)
7	$JRC = 1870(D - 1)$	C-W <sup>MR</sup>	-	0.68 4	0	1-1.011	E	Maerz ve Franklin (1990)
8	$JRC = 1647(D - 1)$	C-W	0.96	-	0	1-1.012	H	Liu (1993)
9	$JRC = 1195.38(D - 1)$	C-W	-	-	0	1-1.017	E	Lamas (1996)
10	$JRC = 479.396(D - 1)^{1.0566}$	C-W	-	-	0	1-1.05	E	Zhou ve Xiong (1996)
11	$JRC = 29.35(D - 1)^{0.46}$	C-W	0.905	0.02	0	1-1.434	H	Jia (2011)
12	$JRC = 150.5335(D - 1)^{0.5}$	C-W	-	-	0	1-1.018	E	Wakabayashi ve Fukushima (1992)
13	$JRC = -0.87804 + \frac{27.7844(D-1)}{0.015} - 16.9304 \left(\frac{D-1}{0.15}\right)^2$	C-W	0.95	1	-0.878	1.0005 – 1.0113	E	Lee ve ark. (1990)
14	$JRC = 28.5 - 33.18/(1 + 150(D - 1))$	C-W	0.999	0.5	-4.68	1.0011 – 1.0194	H	Xu ve ark. (2012)
15	$JRC = 100(D - 1)^{0.4} + \left(1 - \frac{1}{\exp(300(D-1))}\right)$	C-W	-	0.5	0	1-1.018	H	Xu ve ark. (2012)
16	$JRC = \frac{60(D-1)^{0.5}}{0.006+(D-1)}$	C-W	-	0.5	0	1-1.018	H	
17	$JRC = 15179W_a(D - 1)^{1.46}$	B-C	-	-	0	-	E	Chen ve ark. (2012)
18	$JRC = 53.7031(D - 1)^{0.3642}$	h-L <sup>1</sup>	0.985	-	0	1-1.066	H	Askari ve Ahmadi (2007)
19	$JRC = 85.2671(D - 1)^{0.5679}$	h-L <sup>2</sup>	-	-	0	1-1.078	E	Xie ve Pariseau (1994)



### **3.2. Süreksizliklere Ait Pürüzlülüğün Sayısallaştırılması**

Süreksizlik yüzeyindeki pürüzlülüğün tanımlanmasında yararlanılan istatistiksel, jeostatistiksel ve fraktal yöntemlerin kullanılabilmesi için süreksizlik yüzeyinin sayısallaştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. JRC değerinin Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen profiller yardımıyla belirlendiği durumlar için de süreksizlik profilinin sayısallaştırılması gerekmektedir. Literatürde bu amaca yönelik olarak yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda kullanılan yöntemler kabaca süreksizlik yüzeyine temas eden ve etmeyen yöntemler olmak üzere iki başlık altında incelenebilir.

#### **3.2.1. Süreksizlik Yüzeyine Temas Ederek Ölçüm Yapan Cihazlar**

Pürüzlülüğün sayısallaştırılması sırasında süreksizlik yüzeyi ince bir iğne uç yardımıyla taranır. İğne ucun süreksizlik yüzeyi boyunca gerçekleştirdiği yatay ve düşey yöndeki hareketler; mekanik sistemlerde komparatör, bilgisayar kontrollü sistemlerde ise sensörler yardımıyla kayıt altına alınır.

Mekanik sistemlerin kullanımına örnek olarak Fecker ve Rengers (1971), Lee ve ark. (1990), Aydan ve ark. (1996) ve Shigui ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmalar örnek olarak gösterilebilir. Bu çalışmalarda kullanılan cihazların kontrolü kullanıcı tarafından elle yapılmaktadır. İğnenin süreksizlik yüzeyi boyunca yaptığı hareketlere bağlı olarak incelenen yüzeyin süreksizlik profili iki-boyutlu olacak şekilde elde edilmektedir. Cihaz, kağıt üzerine doğrudan çizim yapabildiği için literatürde profilograf ismiyle de anılmaktadır (bkz. Shigui ve ark., 2009).

Bilgisayar kontrollü sistemlerde ise iğne hareketi bilgisayar tarafından kontrol edilmekte ve iğnenin temas ettiği noktalara ait veriler sayısal olarak kayıt edilmektedir. Ayday ve Göktan (1990), Develi (1996; 2006), Develi ve ark. (2001) ve Develi ve Vardar (2006) yapmış oldukları çalışmalarda bilgisayar kontrollü sistemlerden yararlanmışlardır.

Büyük ölçekli süreksizlik düzlemleri üzerinde pürüzlülük ölçümleri için Fecker ve Rengers (1971) tarafından arazide kullanılmak üzere bir yöntem geliştirilmiştir. Bu

yöntemde farklı çaplardaki diskler ile jeolog pusulasından yararlanılmaktadır. İncelenecek süreksizlik yüzeyi üzerinde belirlenen profil hattı boyunca noktalar seçilmekte ve bu noktalara farklı çaplara sahip diskler yerleştirilip konumları ölçülmektedir. Seçilen disk çapına bağlı olarak disklerin yüzey üzerindeki konumlarında değişimler meydana gelmektedir. Bu dağılımın analiz edilmesiyle birlikte yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Büyük çaplı diskler yardımıyla dalgalılık ölçümü yapılabilirken, disk çapı küçüldükçe pürüzlülük ile ilgili ölçümler de elde edilmektedir.

### **3.2.2. Süreksizlik Yüzeyine Temas Etmeden Ölçüm Yapan Cihazlar**

Optik sistemler yardımıyla, süreksizlik yüzeyine temas olmadan hassas ölçümler yapılmaktadır. Söz konusu cihazlarda bir lazer ve lazerin yansıttığı ışınları algılayacak kamera veya sensör bulunmaktadır. Yatay ve düşey yönde yüksek hassasiyette veri toplanmasını sağlayan bu sistemlerde nokta lazer ( $\pm 7\mu\text{m}$ ; Zhou ve Xie, 2004'ten) ve çizgi lazer ( $\pm 20\mu\text{m}$ ; Fardin, 2008'den) kullanılabilir. Nokta lazer kullanılan çalışmalara Jiang ve ark. (2006), Zhou ve Xie (2004) ve Milne ve ark. (2009)'nın yaptığı çalışmalar örnek olarak gösterilebilir. Belem ve ark. (1997; 2000), ve Fardin (2008)'in yaptığı çalışmalar ise çizgi lazerin kullanımına örnek teşkil etmektedir.

Lazer yönteminden farklı olarak, projeksiyon birimi ve iki dijital kameranın kullanıldığı bir sistem daha bulunmaktadır. Ölçüm esnasında yüzeye projeksiyon cihazı vasıtasıyla beyaz ışınlar gönderilmekte ve bunlar dijital kameralar vasıtasıyla kaydedilmektedir. Daha sonra üçgenleme yöntemi kullanılarak yüzeye ait koordinatlar belirlenebilmektedir. Grasselli ve ark. (2002), Grasselli ve Egger, (2003) ve Tatone ve Grasselli (2009) çalışmalarında bu yöntemden yararlanmışlardır. Grasselli ve ark. (2002) kullandıkları sistemin hassasiyetinin  $\pm 50\mu\text{m}$  olduğunu belirtmişlerdir.

Lazer tarayıcılar yardımıyla süreksizlik yüzeylerinin üç boyutlu olarak tanımlanmasına yönelik çalışmalar vardır. Bu tarayıcılar ile laboratuvar ölçeğinden daha büyük yüzeylerin sayısallaştırılması mümkün olmaktadır. Fardin ve ark. (2004), Tam ve ark. (2011), Tang ve ark. (2012), Park ve ark. (2013) ve Avşar ve

ark. (2016) yaptıkları çalışmalarda lazer tarayıcılardan yararlanmışlardır. Fardin ve ark. (2004) çalışmalarında kullandıkları lazer tarayıcının, 0.4 – 54 m uzaklıktaki cisimlerin taranmasında kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Avşar ve ark. (2016)'nın kullandığı tarayıcının hassasiyeti üretici firma tarafından  $\pm 0.127$ mm olarak açıklanmıştır.

Stereo fotoğraf adı verilen bir yöntem ile farklı açılardan çekilmiş iki fotoğraf kullanılarak süreksizlik yüzeyine ait üç boyutlu görüntüler elde edilebilmektedir. Çekilen iki fotoğraftaki ortak noktalar belirlenip, çeşitli algoritmalar kullanılarak görüntüler oluşturulabilmektedir. Ünal ve Ünver (2004) ile Ünal ve ark. (2004) stereo fotoğraf yöntemini kullanarak süreksizlik yüzeyini sayısallaştırmışlardır.

Ülkemizde de süreksizlik yüzeyleri üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yüksek lisans ve doktora tezi kapsamında yürütülen bu çalışmalarda, süreksizlik yüzeyinin modellenmesi ve süreksizliklere ait makaslama dayanımı hakkında araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazılarını aşağıda kısaca değinilmiştir.

Bozkurtoğlu (1996), İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) kampüsünde bulunan jeolojik birimleri incelemiştir. Gözlenen birimleri stratigrafik olarak inceleyen araştırmacı, bölgedeki yapısal unsurları da açıklamıştır. Ayrıca, gözlenen birimleri mühendislik jeolojisi açısından da incelemiştir. Çalışmasının son aşamasında, kampüs alanı içerisindeki bir kaya yüzeyine ait pürüzlülüğün incelenmesi için çalışmalar yapmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi için görüntü analiz yöntemlerinden faydalanmıştır.

Ünal (2000) gerçekleştirdiği doktora çalışmasında, süreksizlik yüzeyine ait pürüzlülüğün laboratuvar ortamında sayısallaştırılarak modellenmesi amacıyla çalışmalar yapmıştır. Süreksizlik yüzeyine ait fotoğraflar çeken araştırmacı, bu fotoğrafların yardımıyla yüzeyi sayısallaştırmış ve çeşitli analiz yöntemlerinden faydalanarak süreksizlik yüzeyine ait pürüzlülüğün sayısal modelini oluşturmuştur. Ayrıca pürüzlülüğün makaslama dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla makaslama deneyleri gerçekleştirmiştir.

Çağlan (2000) Barton-Bandis kriterinin pratik olarak uygulanabilirliğini araştırmak adına, meydana gelmiş şev duraysızlıklarının geriye dönük analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu analizler sonucunda, doruk makaslama dayanımı parametrelerinin yanı sıra artık makaslama dayanımı parametrelerinin de bu ölçütle hesaplanabileceğini belirtmiştir. Araştırmacı ayrıca, JRC ve JCS değerlerinin ölçekten bağımsız parametreler olduğunu belirtmiştir.

Develi (2006) ve Önsel (2014), süreksizlik yüzeylerinde gözlenen pürüzlülüğün tanımlanması için literatürde kullanılan yöntemleri açıkladıktan sonra, kendi önerdikleri sayısallaştırma yöntemleri için pürüzlülük tanımlaması yapmışlardır. Develi (2006) süreksizlik yüzeyini sayısallaştırmada ölçüm iğnesinden yararlanan bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı geliştirmiştir. Önsel (2014) ise sayısallaştırma işlemlerinde kullanılmak üzere üç boyutlu lazer tarayıcıdan yararlanmıştır.

İşleyen (2017), dijital fotogrametri yöntemi ile kayalardaki süreksizlik yüzeylerinin üç boyutlu modelini oluşturmuştur. Bu modelleri kullanarak oluşturduğu kalıplar ile betondan süreksizlik yüzeyleri üretmiştir. Bu yüzeyler üzerinde gerçekleştirdiği makaslama deneyleri ile makaslama hızının, örnek boyutunun ve pürüzlülüğün makaslama dayanımını nasıl etkilediğini incelemiştir.

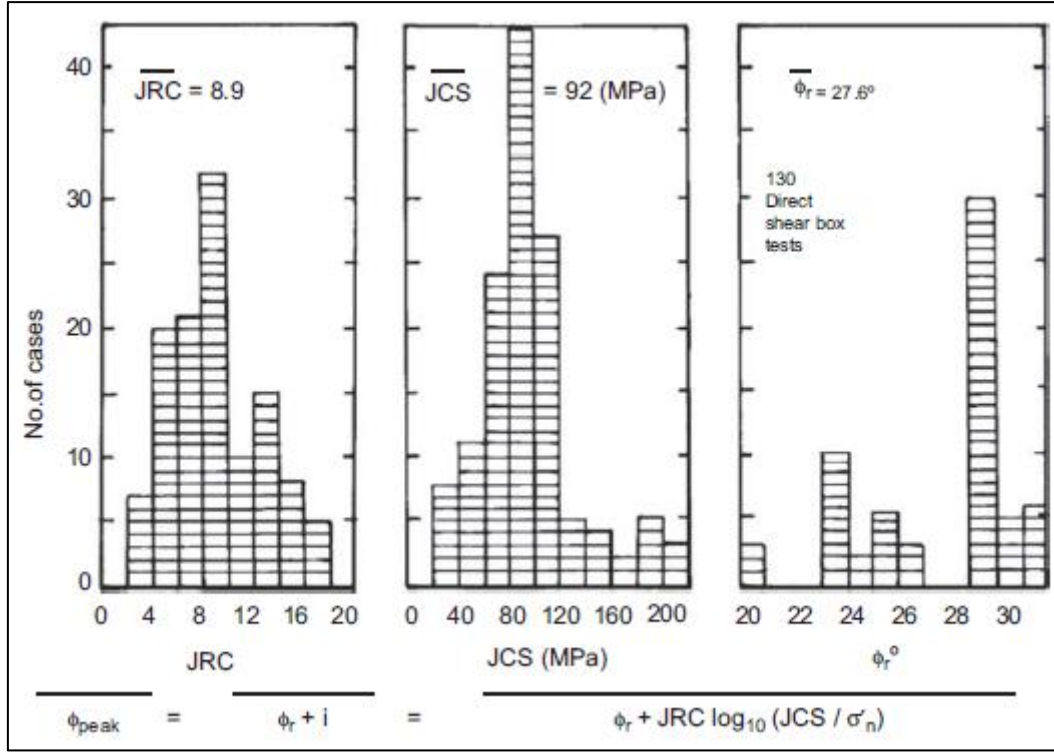
#### 4. BARTON-BANDIS KRİTERİNE YÖNELİK DEĞERLENDİRMELER

Süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesi için yapılan çalışmalar incelendiğinde (bkz. Bölüm 2), önerildiği tarihten bu yana sadeliğini kaybetmeden gelişmiş olan ve günümüzde de bu alanda en yaygın şekilde kullanılan yenilme ölçütü Barton-Bandis kriteridir. Ölçüt, makaslama dayanımının belirlenmesinde temel sayılabilecek dayanım (JCS), pürüzlülük (JRC) ve sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) parametrelerini kullanmakta ve bunların pratik yöntemlerle belirlenmesini mümkün kılmaktadır. JCS parametresinin belirlenmesi için Schmidt sertlik çekici kullanılmış ve farklı bir ölçüm yöntemine ihtiyaç duyulmamıştır. Aynı şekilde  $\phi_b$  değerinin belirlenmesi için de önerilmiş yöntemlerin dışına çok fazla çıkılmamış olmakla birlikte Alejano ve ark. (2018) tarafından bir yöntem önerilmiş olup ancak bu yöntemin zayıf kayalar için geçerliliği henüz test edilmemiştir. Bununla birlikte JRC parametresinin belirlenmesi için önerilen yöntemlerin geliştirilmesine dair zaman içerisinde çok sayıda çalışma yapılmış olsa dahi, ölçütün geliştiricileri tarafından önerilen yöntemler uygulamada geçerliliğini sürdürmektedir.

JRC parametresi saptanırken, standart profillerin kullanımı haricinde objektif yöntemlerin tercih edilmesinde yarar vardır. Bu düşünceden yola çıkılarak birçok sayısallaştırma yöntemi önerilmiş ve her bir yöntem için de ayrı bir hesaplama aşaması kullanılmıştır. Ancak bu durum, objektif ve sade hesaplama adımlarının yerini karmaşık matematiksel işlemlere bırakmasına sebep olmuştur. JRC değerini belirlemek için önerilen yöntemlerin fazla olması, hangi yöntemin daha doğru sonucu vereceği konusunda soru işaretlerini de beraberinde getirmiştir. Barton (2016) yaptığı bir çalışmada bu konuya değinerek; JRC'nin belirlenmesi için çeşitli zamanlarda önerilerde bulunan araştırmacıların, basit eğilendirme deneyinin önceden bu amaçla önerilmiş olduğunun farkında olmadıkları iddiasında bulunmuştur. Bununla birlikte, JRC parametresi süreksizlik yüzeyine ait makaslama dayanımının belirlenmesinde kullanılan bir parametre olmanın yanı sıra; süreksizlik yüzey morfolojisini temsil eden bir parametre olması dolayısıyla büyük bir önem taşımaktadır. Farklı kaya mekaniği uygulamalarında da pürüzlülük parametresinden faydalanılabileceği gerçeği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, yüzey pürüzlülüğünün tanımlanması çalışmalarında sadece eğilendirme deneylerine

bağlı kalınmayıp, önerilen diğer yaklaşımların nispeten daha basitleştirilebilmesi için yeni çalışmaların yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

JRC değerlerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, deneylerde kullanılmak üzere nispeten yüksek dayanımlı kayaların tercih edildiği görülmektedir. Barton ve Choubey (1977) tarafından 136 eklem yüzeyi üzerinde yapılan çalışmada ortalama JCS değerinin 92 MPa olduğu ifade edilmiştir. Deneylerde kullanılan örneklerin JCS değerleri incelendiğinde en düşük JCS değerinin 52 MPa olduğu fark edilmektedir. Barton (1982) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, JCS değerleri 100 ve 150 MPa olan örnekler de kullanılmıştır. Araştırmacılar, ISRM (2007) tarafından yayımlanmış olan ve kaya malzemesinin dayanımının tahmini için önerilen ölçütlerin yer aldığı tabloya göre, sağlam-çok sağlam kayalar üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, makaslama dayanımı deneylerinde zayıf kayalara ait örnekler kullanıldığına dair bir bulguya rastlanmamıştır. Barton ve Bandis (2017) yaptıkları bir çalışmada, zayıf kayaların kullanılmadığına ilişkin şüpheleri destekleyici bir grafik paylaşmışlardır (Şekil 4.1). Grafik incelendiğinde, yapılan deneylerde 0 – 20 MPa aralığında JCS değerine sahip örnek bulunmadığı görülmektedir. Zayıf kayaların içerdiği süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesi için pürüzlü olsalar dahi laboratuvar deneylerinden yararlanılması mümkündür. Ancak, bu tür kayalarda en önemli sorun, süreksizlik özelliğini bozmadan laboratuvar deneyine örnek hazırlanmasıdır. Örneğin ignimbirit vb. bir kaya için doğrudan makaslama deneyi için örnek hazırlama aşamalarında yapılan kesme işlemleri sırasında süreksizliklerin doğal halinin korunması oldukça güçtür. Ayrıca, Barton-Bandis kriterinde girdi olan JCS değerinin Schmidt çekiciyle belirlenmesi de 20 kN/m<sup>3</sup> altında birim hacim ağırlığa sahip kayalar için uygun görünmemektedir. Bu hususlar dikkate alındığında, ölçütün zayıf kayaların içerdiği süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesinde ne denli kullanılabilir olduğunun araştırılması gerektiği açıktır. Bu nedenlerle, zayıf kayalardaki süreksizliklerin makaslama dayanımının araştırılması amacıyla bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi planlanmıştır.



Şekil 4.1: 130 örnek üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen JRC, JCS ve  $\phi_r^\circ$  değerlerinin değişimini gösteren histogramlar (Barton ve Bandis, 2017).

## 5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

### 5.1. Yapay Örnekler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

#### 5.1.1. Amaç ve Yöntem

Düşük dayanımlı süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımının belirlenmesi için birbirinden farklı pürüzlülüğe (JRC) sahip yapay süreksizlik yüzeylerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Yapay şekilde oluşturulan süreksizlik yüzeyleri sayesinde birbiri ile özdeş örneklerin hazırlanabileceği öngörülmüştür. Farklı dayanımlara (JCS) sahip olacak şekilde üretilen örnekler üzerinde, değişik normal gerilmeler uygulanarak, makaslama deneyleri gerçekleştirilecektir. Barton ve Choubey (1977) (Bkz. Şekil 2.11) tarafından farklı JRC değerlerini temsil etmesi amacıyla önerilmiş olan standart profiller esas alınarak süreksizlik yüzeylerinin üretilmesine karar verilmiştir. Farklı pürüzlülüğe sahip on profilden beş tanesi seçilmiş ve süreksizlik yüzeylerine ilişkin kalıpların üretilmesi için kullanılmıştır. Söz konusu profiller iki boyutlu oldukları için, üçüncü boyuttaki pürüzlülük değişmeyecektir. Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilmiş olan standart profiller, çeşitli araştırmacılar tarafından farklı yöntemlerle sayısallaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan süreksizlik profillerinin sayısallaştırılmış hallerine ilişkin veriler, Tatone (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan alınmıştır. Sayısallaştırılmış veriler yardımıyla süreksizlik yüzeylerine ilişkin kalıplar hazırlanmıştır.

Literatürde, farklı malzeme türleri ve karışım oranları kullanılarak yapay örneklerin üretilmesine ilişkin çalışmalar bulunmaktadır (Atapour ve Moosavi, 2013; Asadi ve ark., 2013; Bahaaddini ve ark., 2016; Li, 2016; Gui ve ark., 2017; Asadizadeh, 2018; Cao ve ark., 2019; Ban ve ark., 2020). Çimento ve alçı gibi yapı malzemeleri ile gerektiği takdirde çeşitli yardımcı maddelerin (kum, mineral katkısı vs.) su içerisine katılmasıyla yapay örneklerin oluşturulması mümkündür. Literatürde yapılan çalışmalar ile çimento ve alçı üreticilerinin sunduğu veriler incelendiğinde, en düşük dayanımın elde edilebileceği karışım türünün alçı-su karışımı olacağı düşünülmüştür. Hem karışımın hem de makaslama maruz kalan yüzeyin homojenliğinin artmasına da yardımcı olacağı düşünülerek; örneği oluşturan



karışımın içerisinde dayanımı arttıracak kum vb. taneli malzemelerin kullanılmamasına karar verilmiştir. Farklı JCS değerlerine sahip yapay süreksizlik yüzeylerinin hazırlanması planlandığı için, değişik alçı-su oranlarına sahip olan karışımların üretilmesi gerekmektedir. Alçı üreticilerinin sunduğu dayanım verilerine bağlı olarak üç alçı türü seçilmiş olup, değişen alçı-su oranları kullanılarak farklı dayanımlara sahip dört karışımın üretilmesi planlanmıştır. İlk etapta, bu karışımlardan ISRM (2007) standartlarına uygun örnekler hazırlanıp jeomekanik parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS), üç eksenli sıkışma dayanımı, çekilme dayanımı ( $\sigma_t$ ), elastisite modülü (E) ve poisson oranı ( $\nu$ ) gibi dayanım parametreleri belirlendikten sonra deney planlamasına uygun olacak şekilde makaslama dayanımının belirlenmesinde kullanılacak örneklerin hazırlanması sürecine geçilmiştir. Bu süreçte, dört farklı JCS değerine sahip örnek setleri oluşturulmuştur. Örnek setlerinin içerisinde, seçilen beş JRC profilinin her birine ait altı makaslama yüzey çifti (alt-üst yüzeyler) ve temel sürtünme açısının ( $\phi_b$ ) tayininde kullanılmak üzere dört pürüzsüz yüzey çifti bulunmaktadır. Örnekler üzerinde yapılan deneylerde farklı normal gerilmeler kullanılmıştır. Pürüzlü ve düz yüzeyler üzerinde yapılan makaslama deneylerinde, uygulanan en yüksek normal gerilme aynı tutulmuştur.

Makaslama deneylerinde karşılaşılan sorunlara ilişkin olarak nümerik analiz yöntemlerinden yararlanılmıştır. Belirlenen jeomekanik parametreler nümerik analizde kullanılan program için girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Bu analizler vasıtasıyla laboratuvarında yapılan deneylerin sağlanması gerçekleştirilmiş olup, deney esnasında karşılaşılan sorunlara cevap bulunmuştur. Örneklerin hazırlanmasında kullanılan yöntemlere, yapılan deneylere ve deneylerden elde edilen sonuçlara takip eden bölümlerde detaylı şekilde yer verilmiştir.

### **5.1.2. Deney Örneklerinin Hazırlanması**

Literatürde, yapay örneklerin hazırlanması yoluyla yapılan çalışmalar incelendiğinde; çimento, alçı, kum, bentonit vb. malzemelerden birinin veya daha fazlasının sabit oranlar altında su ile karıştırılmasıyla örneklerin elde edildiği

görülmektedir (Çizelge 5.1). Bu çalışmalar ışığında, değişik karışım oranlarının kullanılmasıyla farklı dayanımlar elde edilebilmektedir. Tez çalışması kapsamında düşük dayanımlı malzemeler üzerinde deneylerin gerçekleştirilmesi planlandığı için hem literatür araştırmalarından hem de alçı üreticilerinden elde edilen veriler ışığında, alçı-su karışımı ile yapay örneklerin hazırlanmasına karar verilmiştir. Barton ve Bandis (2017), Barton-Bandis kriterinin geliştirilmesinde rol oynayan araştırmacıların (Barton ve Choubey, 1977) kullandığı 130 örneğe ilişkin verileri histogramlar şeklinde paylaşılmıştır (Bkz. Şekil 4.1). Bu histogramlar incelendiğinde, JCS değeri 40 MPa'ın altında 8 örneğin bulunduğu görülmekte olup, 20 MPa dayanımının altında ise örnek bulunmamaktadır. Farklı alçı-su karışım oranları kullanılarak, 20 MPa'dan düşük JCS değerlerine sahip örnekler hazırlanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, alçı üreticilerinin sunduğu veriler de göz önünde bulundurularak dört farklı karışım oranında örneklerin hazırlanması planlanmıştır.

Çizelge 5.1: Yapay örneklerden yararlanılarak gerçekleştirilen bazı çalışmalarda kullanılan karışım oranları ve elde edilen dayanımlar.

	Alçı (%)	Çimento (%)	Kum (%)	Katkı Maddesi (%)	Su (%)	UCS (MPa)
Asadi (2011)	-	20	65	-	15	29.2
Mirzaghobanali (2013)	77.8	-	-	-	22.2	60
Atapour ve Moosavi (2013)	62.5	-	-	-	37.5	10.5
Li (2016)	70.3	3.7	-	-	26	46
Gui ve ark. (2017)	74.8	-	-	0.3	24.9	24.5
Liu ve ark. (2017)	-	28.5	57	-	14.5	22
Asadizadeh ve ark. (2018)	48	24	-	-	28	22.97
Cao ve ark. (2019)	-	40	40	-	20	51.75
Ban ve ark. (2020)	-	29.5	57.7	-	12.8	29

Makaslama dayanımı deneylerinde kullanılacak örneklerin hazırlanabilmesi için, kullanılacak yapay örneklerin dayanımlarının belirlenmesi gerekmektedir. Tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) deneyinde kullanılmak üzere ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere uygun örneklerin hazırlanmasına ihtiyaç

duyulmaktadır. Boy/çap oranı (L/D) 2.5-3 olan ve çapı tercihen 54.7 mm'den (NX karot çapı) küçük olmayan silindirik örneklerin kullanılması önerilmektedir. Ancak uygulamada karşılaşılan zorluklardan dolayı farklı karot çapına sahip örneklerin kullanıldığı durumlar da bulunmaktadır. NX karot çapından farklı olarak NQ (47.6 mm) karot çapına sahip örnekler de yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda silindirik zemin örneklerinin hazırlanmasında kullanılan 75 mm çapa ve 150 mm boya sahip kalıplar bulunmaktadır. Ayrıca İnşaat Mühendisliği uygulamalarında silindirik beton örneklerin üretilmesinde yararlanılan, L/D oranı iki olan ve 100, 150 ve 160 mm çapa sahip kalıplar da bulunmaktadır. Söz konusu kalıpların arzu edilen L/D oranına sahip olmamasının yanı sıra, üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde kullanılan Hoek hücrelerine girecek standartta örneklerin üretilmesine de olanak vermediği görülmektedir. Bu sebeple, silindirik örneklerin üretilmesinde PVC boru kullanılmasına karar verilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, NQ karot çapına en yakın çapa (47 mm) sahip olan PVC boru kalıp olarak kullanılmak üzere seçilmiştir.

Örnek döküm ve kalıptan çıkarma pratiğinin kazanılması için yapılan denemelerde, örneğin kalıba yapışmasını engelleyerek kalıptan kolay çıkmasına yardımcı olması amacıyla vazelin, makine yağı vb. kayganlaştırıcı maddeler PVC boru içerisine sürülmüştür. Alçı-su karışımı yaklaşık 40 dakika kalıpta bekletilmiş ve donmanın bittiğine karar verildikten sonra örnek kalıptan çıkarılmaya çalışılmıştır. Ancak örneğe ve kalıba zarar vermeden örneğin kalıptan çıkarılması mümkün olmamıştır. Kalıp içerisine sürülen kayganlaştırıcı malzemelerin işe yaramadığı görülmüştür. Kalıptan numune çıkarmaya yarayan düzenekler ile alçı örnek kalıptan çıkarılmıştır ancak bu işlem esnasında örnekte deformasyonlar meydana gelmiştir. Örnek, kalıp içerisindeyken karot eksenine paralel şekilde dairesel testere kullanılarak kalıbın kesilmesine yönelik denemeler yapılmıştır. Her ne kadar hassas çalışılmış olsa da testerenin kalıbı kestiği esnada örnekte de hasar olduğu gözlenmiştir. Alçı-su karışımı donmaya başladığı esnada gerçekleşen kimyasal tepkimelere bağlı olarak genişlemektedir. Meydana gelen genişmeden ötürü örnek, silindirik kalıba baskı yapmakta ve kalıp içerisine sıkışmaktadır. Alçı-su karışımında su oranı arttıkça genişleme miktarı düşmekte ve örneğin kalıba sıkışmasına sebep olan kuvvet azalmaktadır. Ancak su miktarındaki artış örneğin dayanımını düşürecek, kalıptan

çıkması ve nihai dayanımına ulaşması için geçen süreyi artıracaktır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek amacıyla silindirik kalıp, karot eksenine paralel olacak şekilde, tek bir taraftan ince bir dairesel testere yardımıyla kesilmiştir. Kesim işleminden sonra 47 mm olan kalıp çapında bir azalma olmuştur ancak genel itibarıyla azalma miktarı 0.5 mm'yi geçmemiştir. Alçı örnekler, karışımın donmasını takiben kalıplardan sorunsuz bir şekilde çıkarılabilmektedir. Bu yöntemle, herhangi bir kayganlaştırıcı malzemenin kalıp iç yüzeyine sürülmesine ihtiyaç kalmamıştır. Dolayısıyla, kayganlaştırıcı malzemenin sıvı halde dökülen örneğe karışma riski de ortadan kalkmıştır.

Alçı örneklerin çekilme dayanımının belirlenmesi için dolaylı bir yöntem olan Brazilian deney yönteminden yararlanılmıştır. ISRM (2007) standartları esas alındığında, çapı en az 54.7 mm ve kalınlığı (boyu) yaklaşık olarak yarıçapına eşit olacak silindirik örneklerin hazırlanması gerekmektedir. Bu işlem için çapı 53.6 mm olan PVC boru kullanılmıştır. UCS deneyleri için hazırlanan kalıplarda olduğu gibi bu PVC boru da karot eksenine paralel olacak şekilde kesilmiştir. PVC boru kullanılarak yapılan bütün döküm işlemlerinde, alçı-su karışımının kalıpların alt yüzeyine yapışmaması için kalıp tabanına silikon yerleştirilmiştir. Karışımın sertleşme esnasında rahatça genişlemesi için kalıpların üst yüzeyleri açık bırakılmıştır.

Düşük dayanıma sahip örneklerin üretilmesi için iki farklı üreticiden alınan ve ticari adları farklı olan üç alçı türünün kullanılmasına karar verilmiştir. Üç alçıda da önerilen alçı-su karışım oranlarına göre karışım hazırlanmıştır. Ancak bir alçıda, önerilen alçı-su oranlarına uygun şekilde hazırlanan karışıma ek olarak, daha az alçı içeren bir karışım da üretilmiştir. Düşük alçı oranı içeren bu karışımın en düşük dayanıma sahip olması beklenmektedir. Böylelikle dört farklı dayanıma sahip örneğin üretilmesi amaçlanmıştır. Alçıların ticari adları ve üreticilerinin farklılık göstermesinden dolayı, alçılar bundan sonra karışım oranları üzerinden adlandırılacaktır. Çizelge 5.2'de, kullanılacak alçı-su karışım oranlarının yanı sıra üreticiler tarafından açıklanan teknik veriler ile bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen kimyasal analizlere ait sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 5.2: Düşük dayanımlı örneklerin hazırlanmasında kullanılan alçılara ait teknik özellikler ile kimyasal analiz sonuçları.

Alçı Adı	Tamir Alçısı	Tamir Alçısı	Döküm Alçısı	Kalıp Alçısı
Karışım Oranı (Alçı:Su)	1.07	1.43	1.66	2.8
UCS <sup>1</sup> (MPa)	- <sup>2</sup>	13.7	16.2	24.5
Donma başlangıcı (dk)	~10 <sup>3</sup>	3-4	10±2.5	5-8
Donma bitimi (dk)	~25 <sup>3</sup>	~10	Maks. 30	14-17
Yüzey sertliği (shore D)	60	60	65	90
SiO <sub>2</sub> (%)	0.95	0.95	0.54	0.45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.25	0.25	0.05	0.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.15	0.15	0.08	0.07
CaO (%)	41.52	41.52	40.92	43.92
MgO (%)	0.39	0.39	0.55	0.33
SO <sub>3</sub> (%)	56.61	56.61	57.78	54.96
K <sub>2</sub> O (%)	0.05	0.05	0.01	0.01
Na <sub>2</sub> O (%)	0.07	0.07	0.06	0.17
Cl (%)	0	0	0	0

1 Üreticiler tarafından belirtilen dayanım değerleri, 2 Düşük alçı miktarı ile laboratuvarda hazırlanan bu karışım için önerilen dayanım değeri bulunmamaktadır, 3 Laboratuvarda örnek hazırlama sırasında ölçülen sürelerdir.

Deneylerde kullanılacak alçılar 25-30 kg'lık çuvallar halinde tedarik edilmiştir. Çuvallar açıldıktan sonra içindeki alçılar, atmosferik koşullardan ötürü nem alarak bozulmasının önüne geçmek amacıyla, 2.5 kg'lık torbalara doldurularak saklanmıştır. Örneklerin hazırlanmasında dikkat edilen hususlar aşağıda belirtilmiştir.

- Örnekler sıcaklık farkının çok olmadığı, ortalama sıcaklığın 21±2 °C olduğu laboratuvar ortamında hazırlanmıştır.
- Örneklerin hazırlanmasında kullanılan su oda sıcaklığında bir süre bekletildikten sonra alçı ile karıştırılmıştır.
- Karıştırma kabına ilk olarak su eklenmiş, daha sonra alçı bir elek yardımıyla elenerek suya katılmıştır. Alçının su içinde çözünmesi beklendikten sonra düşük devirli bir mikser yardımıyla karışım homojen oluncaya dek

- kariştirilmiştir. Bu işlemler karişim içerisinde hava kabarcığının kalmaması amacıyla uygulanmıştır.
- Karişim, karot örnekleri için hazırlanan kalıplar içerisine, kalıplama esnasında hava kabarcığı oluşmaması için bir huni yardımıyla yavaşça dökülmüştür.
  - Kariştirme ve kalıplama işlemlerinde geçen süre hesaba katıldığında, örnekler kalıp içerisine döküldükten kısa bir süre sonra katılaşmaya başlamaktadır. rnek içerisinde hava kabarcığı kalmış olma ihtimaline karşılık uygulanacak şişleme yönteminin örneğin katılaşma sürecine zarar verme ihtimali bulunmaktadır. Bu sebeple kalıba dökülen örneğe gerekli olmadıkça müdahale edilmemiştir. Hava kabarcıklarının oluştuğu durumlarda hafif bir sarsma işlemi uygulanmış olup, sarsma işleminin yeterli olmadığı durumlarda ise kısa süreyle elek sallama cihazı kullanılmıştır.
  - Örnekler minimum 30 dakika olacak şekilde kalıplarda bekletilmiştir. Laboratuvarın sıcaklık koşullarının değiştiği durumlarda, örneklerin kalıpta bekletildiği süre artırılmıştır.
  - rnekte, alçı ve su arasında gerçekleşen ekzotermik tepkimeden kaynaklanan sıcaklık artışı gözlenmektedir. Bu esnada örnek soğuk bir ortamda sertleşmeye bırakıldığında, örneğin üzerinde çatlamaların meydana geldiği gözlenmiştir. Bu nedenle örnek kalıptan çıkartıldıktan sonra 24 saat süreyle plastik bir kap içerisinde kontrollü şekilde sertleşmeye bırakılmıştır. Daha sonra açık havada nihai dayanımını kazanana kadar kurumaya bırakılmıştır.
  - Örneklerin kuruyup kurumadığını tespit etmek amacıyla belirli aralıklarla ağırlık ölçümleri yapılmış ve ağırlık değişimleri kaydedilmiştir. Ağırlık değişiminin olmadığı ya da ihmal edilebilir düzeyde olduğu görüldükten sonra örneklerin kuruduğu kabul edilmiştir.
  - Kuruyan örneklerin alt ve st yüzeyleri dairesel testere ile düzelterek dayanım deneylerine hazır hale getirilmiştir. Örneğin bünyesine tekrar su alması istenmediği için, düzeltme işlemleri esnasında su kullanılmamıştır.

Dayanım rneklerinin hazırlanmasına 1.07 karişim oranına sahip örnekler ile başlanmıştır. Daha sonra sırasıyla 1.43, 1.66 ve 2.8 karişim oranına sahip örnekler hazırlanmıştır. Örnekler kalıplardan çıkarılıp hemen tartılmış ve daha sonra örnek

dökümünü takip eden 1., 3., 5., 7., 14. ve 21. günlerde de tartılarak ağırlık kaybının durduğu gözlenmiştir. Bu aşamadan sonra örnekler tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı ile Brazilian çekilme dayanımı deneylerine hazır hale getirilmiştir. Deneye hazır hale gelen örnekler üzerinde ilk olarak birim hacim ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Alçı örneklerin hazırlanması sürecinde yapılan çalışmalar ve kullanılacak karışım oranları belirlendikten sonra deney örneklerinin hazırlanması ile bu örnekler üzerinde deneylerin yapılması süreci yaklaşık bir buçuk senede tamamlanmıştır.

### 5.1.3. Jeomekanik Parametrelerin Belirlenmesi

#### Birim Hacim Ağırlıkların Tayini

Dayanım deneyleri için hazırlanmış silindirik örnekler kullanılarak farklı karışım oranlarına sahip alçıların birim hacim ağırlık ( $\gamma$ ) değerleri belirlenmiştir. Örneklerin boy ve çapları belirlenirken, birbirlerine dik iki yönde ölçümler yapılmış ve hesaplama aşamasında bu değerlerin ortalamaları kullanılmıştır. Ortalama  $\gamma$  değerleri Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

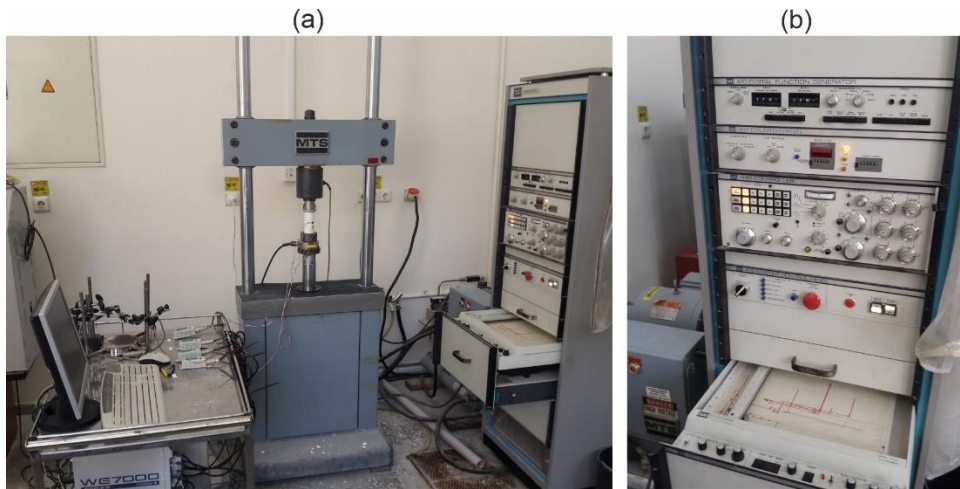
Çizelge 5.3: Farklı karışım oranlarındaki örneklerin boy, çap, ağırlık ve birim hacim ağırlık ( $\gamma$ ) değerleri.

Karışım Oranı	Örnek Sayısı	Min. $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Maks. $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Ort. $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Standart Sapma
1.07	24	7.53	9.17	8.53	0.27
1.43	23	8.57	10.53	9.87	0.85
1.66	22	11.58	11.77	11.68	0.05
2.8	20	15.7	16.29	15.95	0.17

## Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini

Çalışma yapılan laboratuvar bünyesinde üç adet tek eksenli yükleme ünitesi bulunmaktadır. Bu üniteler 10, 50 ve 150 tonluk yükleme kapasitesine sahiptir. Deneylerde kullanılacak örneklerin öngörülen dayanımları düşük olduğu için, hassas bir şekilde yüklemenin yapılabilmesi adına 10 tonluk yükleme ünitesi kullanılmıştır (Şekil 5.1). Söz konusu üniteye bulunan yük hücresine ek olarak, 50 kN kapasiteye sahip bir yük hücresi daha kullanılmış ve örneğe uygulanan kuvvetin hassas bir şekilde belirlenmesi sağlanmıştır. 50 kN'luk yük kapasitesini aşan tek bir örnekle karşılaşmıştır. Yükleme ünitesine ait yük hücresi ile harici olarak kullanılan yük hücresinden elde edilen verilerin birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlendiği için, bu örnek için yükleme ünitesine ait yük hücresinden alınan veri kullanılmıştır.

Deneylerden elde sonuçlar toplu bir şekilde Çizelge 5.4'te sunulmuştur. 1.07, 1.43 ve 1.66 karışım oranı ile üretilen örneklerin ortalama UCS değerleri 20 MPa altında hesaplanmıştır. 2.8 karışım oranına sahip örneklerin ortalama dayanımı ise 28.05 MPa'dır. Bu sonuçlara göre 20 MPa'dan düşük dayanıma sahip örnek hazırlama hedefine ulaşılmıştır. ISRM (2007) tarafından, kaya malzemesinin dayanımının ön değerlendirme amacıyla belirlenmesine yönelik önerilen dayanım tanımları incelendiğinde (Çizelge 5.5), karışım oranı 1.07, 1.43, 1.66 ve 2.8 olan örneklerin sırasıyla çok zayıf kaya, zayıf kaya, zayıf kaya ve orta derecede sağlam kaya tanımlamasına uyduğu görülmektedir.



Şekil 5.1: (a) 10 ton kapasiteye sahip yükleme ünitesi ile (b) yükleme ayarlarının yapıldığı kontrol paneli.



Çizelge 5.4: Dört farklı karışım oranı kullanılarak hazırlanan alçı örnekleri üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonuçları.

Karışım Oranı	Örnek Sayısı	Min. UCS (MPa)	Maks. UCS (MPa)	Ortalama UCS (MPa)	Standart Sapma
1.07	5	4.86	6.29	5.42	0.55
1.43	5	7.48	12.64	9.87	2.16
1.66	5	12.48	16.64	14.33	1.78
2.8	4	25.86	30.88	28.05	2.09

Çizelge 5.5: Kayaların dayanımının arazide tahmin edilmesine yönelik ISRM (2007) tarafından önerilen ölçütler (Ulusay, 2010'dan alınmıştır).

Simge	Dayanım Tanımı	Saha Tanımlaması	UCS, $\sigma_n$ (MPa)
R0	Aşırı derecede zayıf kaya	Kayanın yüzeyinde tırnak ile çentik oluşturulabilir.	0.25-1.10
R1	Çok zayıf kaya	Jeolog çekiciyle sert bir darbeye ufolanan kaya, çakı ile doğranabilir.	1-5
R2	Zayıf kaya	Kaya, çakı ile güçlkle doğranır. Jeolog çekici ile yapılacak sert bir darbe kayacın yüzeyinde iz bırakır.	5-25
R3	Orta derecede sağlam kaya	Kaya, çakı ile doğranamaz. Kaya örneği, jeolog çekici ile yapılacak tek ve sert bir darbeye kırılabilir.	25-50
R4	Sağlam kaya	Kaya örneğinin kırılabilmesi için jeolog çekici ile birden fazla darbenin uygulanması gerekir.	50-100
R5	Çok sağlam kaya	Kaya örneğinin kırılabilmesi için jeolog çekici ile çok sayıda darbe gerekir.	100-250
R6	Aşırı derecede sağlam kaya	Kaya örneği, jeolog çekici ile sadece yontulabilir.	>250

## Schmidt Sertlik Çekici İle Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini

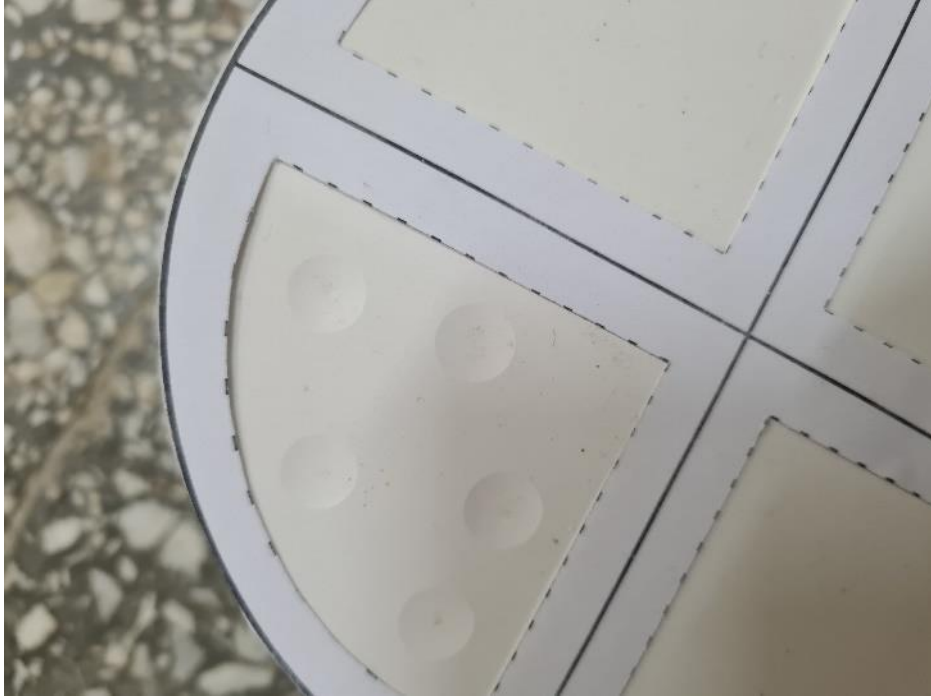
Barton-Bandis kriterinde kullanılan JCS değeri bozunmamış süreksizlik yüzeyleri için karot örnekler üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden belirlenebildiği gibi Barton ve Choubey (1977) tarafından JCS'nin pratik şekilde belirlenmesi amacıyla kullanılması önerilen Schmidt sertlik çekici yardımıyla da belirlenebilmektedir. Schmidt çekici yardımıyla JCS'nin belirlenebilmesi amacıyla normal karot örneklerinden daha büyük boyuta sahip silindirik örnekler hazırlanmıştır (Şekil 5.2). 16 cm'lik boy ve çapa sahip olan ve farklı karışım oranlarında hazırlanan bu örnekler üzerinde Schmidt geri sıçrama değerinin belirlenmesine yönelik deneyler yapılmıştır. Schmidt çekici deneyler esnasında düşey düzlemde, aşağı yönde bakacak ve örnek yüzeyine dik olacak şekilde tutulmuştur. Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen ve Schmidt geri sıçrama değeri ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren abak yardımıyla JCS değeri belirlenebilmektedir (bkz. Şekil 2.10). Bu abakta geri sıçrama değerinin yanı sıra örneğe ait birim hacim ağırlık değerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Abak incelendiğinde, abakta sunulan birim hacim ağırlık değerlerinin 20 kN/m<sup>3</sup> ile 32 kN/m<sup>3</sup> arasında olduğu görülmektedir. Kullanılan alçı örneklerinin birim hacim ağırlık değerleri ise 8.53 – 15.95 kN/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Dolayısıyla alçı örnekler üzerinde Schmidt çekici ile deneyler yapılırsa bile, abak yardımıyla JCS değerinin belirlenmesi mümkün olmayacaktır.

Barton ve Choubey (1977) önerilen abağın yanı sıra, bir eşitliğin de kullanılabileceğini belirtmişlerdir (bkz. Eş. 2.17). Her ne kadar abak üzerinde alçı örneklerin birim hacim ağırlıklarını temsil edecek değerler olmasa bile, önerilen formül yardımıyla JCS değerinin belirlenmesi için Schmidt geri sıçrama değerlerinin okunmasına yönelik deneyler yapılmıştır. Örneklerin düşük dayanımlı olmasından kaynaklı olarak geri sıçrama değerlerinin okunamadığı durumlar olmuştur. Ayrıca çekicinin darbesiyle birlikte örnek üzerinde ezilmeye bağlı hasarlar da gözlenmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.2: Schmidt çekici ile tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesinde kullanılan büyük karot örnekleri.

Schmidt çekici deneylerine ait sonuçlar Çizelge 5.6'da sunulmuştur. Schmidt çekici üzerindeki geri sıçrama değerlerini gösteren ölçeğin en düşük değeri 10'dur. Bu seviyenin altındaki değerler için sayısal bir karşılık bulunmamaktadır. Ancak 10 ile 12 değeri arasındaki aralık gözetilerek bir enterpolasyon yapılmış ve karışım oranları arasındaki farkı gösterebilmek adına geri sıçrama değerinin 8 ve 9 olduğu durumlar için de okumalar parantez içinde olacak şekilde Çizelge 5.6'da verilmiştir. Önerilen eşitlik ile hesaplanan tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri de bu çizelgede sunulmuştur. 1.07 ve 1.43 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan deneylerde enterpolasyon yardımıyla okunan üçer değer haricinde herhangi bir geri sıçrama değeri elde edilememiştir. Bu sebeple bahsedilen iki karışım oranı için formül kullanılarak UCS değeri belirlenmemiştir. 1.66 karışım oranlı örnek için ise iki geri sıçrama değeri nizami şekilde okunmuştur. Barındırdığı hata payları da gözetilerek, formül yardımıyla UCS değeri hesaplanmıştır. 2.8 karışım oranlı örnekte ise 10 tane geri sıçrama değeri okunmuş ve UCS değeri hesaplanmıştır. Ancak, örnekler için birim hacim ağırlık değerlerinin abaktaki en düşük değer altında kaldığı unutulmamalı ve bu sebeple formülün hatalı sonuçlar verme ihtimalinin olduğu da akıldan çıkarılmamalıdır.



Şekil 5.3: Schmidt çekicinin darbesine bağlı olarak örnek yüzeyinde meydana gelen ezilmeler.

Çizelge 5.6: Farklı karışım oranları için büyük karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilen Schmidt çekici deneyinden elde edilen geri sıçrama değerleri.

Okuma No.	Karışım Oranı			
	1.07	1.43	1.66	2.80
1	-	-	10	23
2	-	(8)	(8)	23
3	-	-	(9)	23
4	-	-	(8)	24
5	-	(8)	10	24
6	(9)	-	-	22
7	(9)	-	(9)	24
8	(8)	-	(8)	24
9	-	(8)	(9)	24
10	-	-	(8)	24
UCS* (MPa)	-	-	11.97**	21.87

\* Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen eşitlikten hesaplanmıştır.

\*\*Nizami şekilde okunan iki geri sıçrama değeri (10 ve 10) üzerinden hatalı olma ihtimali gözetenilerek hesaplanmıştır.

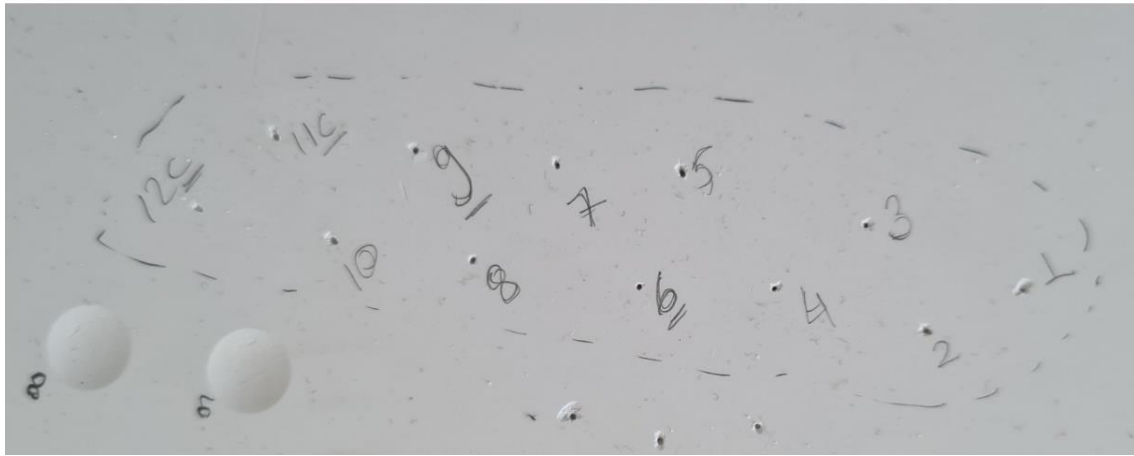
## İğne Penetrometresi İle Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini

Düşük dayanımlı yumuşak malzemelerde Schmidt çekici kullanılarak UCS belirlenirken çeşitli sorunlarla karşılaşmıştır. Örnek yüzeyinde ezilmeler, geri sıçrama değerinin okunamaması, UCS belirleme abağında uygun birim hacim ağırlık değerinin bulunmaması nedeniyle Schmidt çekicinin alçı örneklerde dayanım belirleme konusunda yetersiz kaldığı görülmüştür. Schmidt çekicine alternatif olması amacıyla UCS değerini pratik bir şekilde belirlemeye olanak sağlayan İğne Penetrometresi kullanılmıştır. İğne Penetrometresi çeşitli araştırmacılar tarafından düşük dayanımlı yumuşak kayalarda UCS değerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Kullanımının yaygınlaşmasıyla beraber İğne Penetrometre testine yönelik önerilmiş bir yöntem yayınlanmıştır (Ulusay ve ark., 2014). Schmidt çekici deneylerinin gerçekleştirildiği örnekler üzerinde bu önerilere uygun olarak İğne Penetrometresi kullanılmıştır. Kullanılan penetrometre ve alçı örnekler üzerindeki uygulamaya ait örnek Şekil 5.4'te sunulmuştur.

(a)



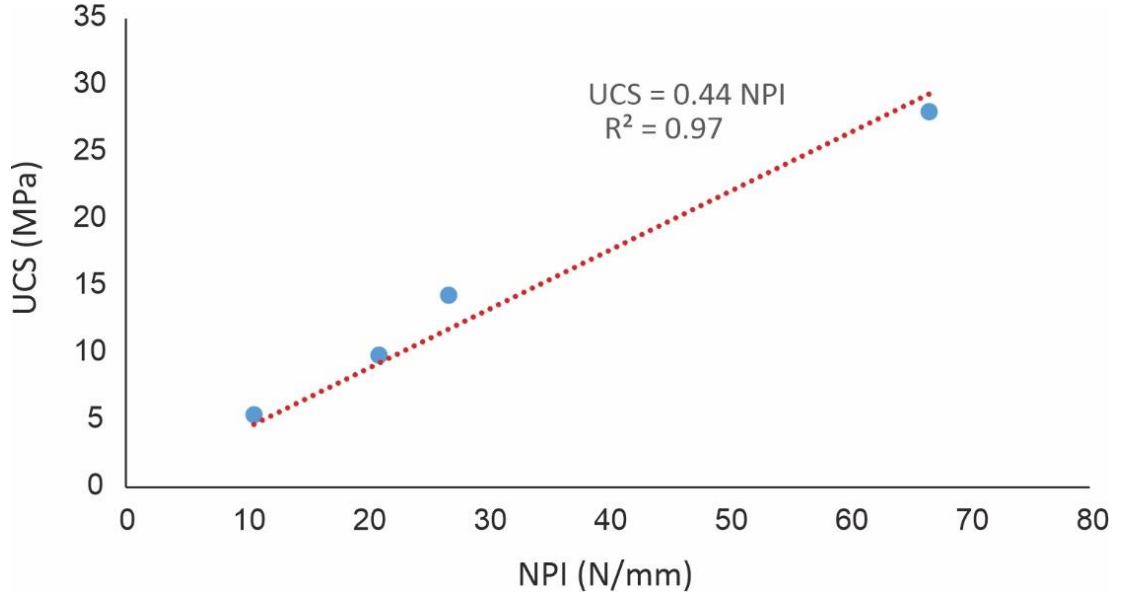
(b)



Şekil 5.4: (a) İğne Penetrometresi ve (b) penetrometrenin alçı üzerinde kullanımına ait bir örnek.

İğne Penetrometresi ile dört farklı dayanıma sahip alçı örnekler üzerinde deneyler yapılmış ve iğne penetrasyon indisleri (NPI, N/mm) hesaplanmıştır. 1.07, 1.42, 1.66 ve 2.8 karışım oranına sahip örnekler için NPI değerleri sırasıyla 10.64, 21.02, 26.79 ve 66.67 olarak belirlenmiştir. Alçı örneklerine ait tez çalışması kapsamında belirlenen NPI ve UCS değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.5'te sunulmuştur. Literatürde İğne Penetrometresi kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda NPI ve UCS arasındaki ilişkiyi gösteren eşitlikler türetilmiştir. Bu eşitlikler kullanılarak farklı karışım oranlarına ait UCS değerleri hesaplanmış ve Çizelge 5.7'de sunulmuştur.

Farklı araştırmacılar tarafından önerilen eşitliklerle belirlenen UCS değerleri incelendiğinde, çoğu eşitliğin gerçek UCS değerlerine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Rahimi ve ark. (2020) tarafından önerilen eşitlik diğerlerine göre ön plana çıkmaktadır. Araştırmacıların jipsli kayalar için türettiği eşitlik, bu çalışmada türetilen eşitliğe oldukça benzemektedir (Şekil 5.5). Benzer kaya gruplarında NPI ile hesaplanan UCS değerlerinin örneğin dayanımını belirlemede oldukça başarılı olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 5 5: Alçı örneklerdeki NPI ve UCS değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.

Çizelge 5.7: Alçı örneklerde, farklı karışım oranları için NPI kullanılarak hesaplanan UCS (MPa) değerleri.

Eşitlik	Karışım Oranı			
	1	2	3	4
$\log UCS = 0.978 \log NPI + 1.599^{(1)}$	4.22	8.21	10.41	25.39
$UCS = 0.2 NPI^{(2)}$	2.13	4.20	5.36	13.33
$UCS = 0.4 NPI^{0.929^{(3)}}$	3.60	6.77	8.48	19.79
$UCS = 0.3 NPI^{(4)}$	3.19	6.31	8.04	20
$UCS = 0.35 NPI^{(5)}$	3.72	7.36	9.38	23.33
$UCS = 0.49 NPI^{(6)}$	<b>5.21</b>	<b>10.3</b>	<b>13.13</b>	<b>32.67</b>
Gerçek UCS değerleri	<b>5.42</b>	<b>9.87</b>	<b>14.33</b>	<b>28.05</b>

(1) Okada ve ark. (1985), (2) Aydan (2012), (3) Ulusay ve Ergüler (2012), (4) Aydan ve Ulusay (2013), (5) Kahraman ve ark. (2017), (6) Rahimi ve ark. (2020).

### Üç Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini

Sayısal analizlerde girdi parametresi olarak sağlam kayanın makaslama dayanımı parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Hazırlanan alçı örnekleri üzerinde farklı yanal gerilmeler kullanılarak üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yanal gerilmenin etkisiyle örneklerin daha yüksek eksenel gerilmeler altında yenileceği tahmin edildiğinden, 50 tonluk kapasiteye sahip yükleme ünitesi kullanılmıştır.

Yanal gerilme olarak 1, 2, 3 ve 4 MPa uygulanması planlanmıştır. ISRM (2007) tarafından önerilen esaslar dikkate alınarak, sabit bir yükleme hızı altında örneğin 5-15 dakika arasında yenilmesi sağlanmıştır. Belirlenen  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  veri çiftleri ile Fell ve Jeffrey (1987) tarafından önerilen p-q grafikleri çizilmiş ve bu grafiklerden yararlanılarak örneklere ait makaslama dayanımı parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8: Alçı örneklerde yapılan üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerine ait sonuçlar.

Karışım Oranı	Yanal Gerilme (MPa)				Kohezyon (MPa)	İçsel sürtünme açısı (°)
	1	2	3	4		
1.07	5.43	8.69	10.82	13.58	1.25	27.07
1.43	14.16	16.52	18.34	20.48	4.22	20.52
1.66	16.42	17.85	21.12	19.47*	4.37	24.62
2.80	41.64	42.74	45.89	52.47	9.10	36.28

\*Deney sonucu hesaplamalara katılmamıştır.

### Brazilian Çekilme Dayanımının Tayini

Alçı örneklerine ait çekilme dayanımının tayini için ISRM (2007) tarafından önerilen en düşük örnek çapına (NX, 54.7 mm) yakın olacak çapta örnekler hazırlanmıştır. Örneklerle ait çekilme dayanımlarının düşük olacağı tahmin edildiği için, tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde kullanılan 10 tonluk yükleme düzeneği kullanılmıştır. Bu deneye özel olarak, uygulanacak yük miktarı maksimum yük miktarının %10'u (1 ton) ile sınırlandırılmıştır. Örneğin 15-30 saniye arasında yenilmesine sebep olacak bir yükleme hızı seçilmiştir. Çekilme dayanımı deneylerine ait sonuçlar Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9: Alçı örneklerde yapılan Brazilian çekilme dayanımı deneylerine ait sonuçlar.

Karışım Oranı	Örnek Sayısı	Min. $\sigma_t$ (MPa)	Maks. $\sigma_t$ (MPa)	Ortalama $\sigma_t$ (MPa)	Standart Sapma
1.07	5	1.07	1.60	1.32	0.22
1.42	5	1.41	2.42	1.87	0.42
1.66	5	2.28	2.99	2.48	0.29
2.8	6	1.86	3.09	2.40	0.42



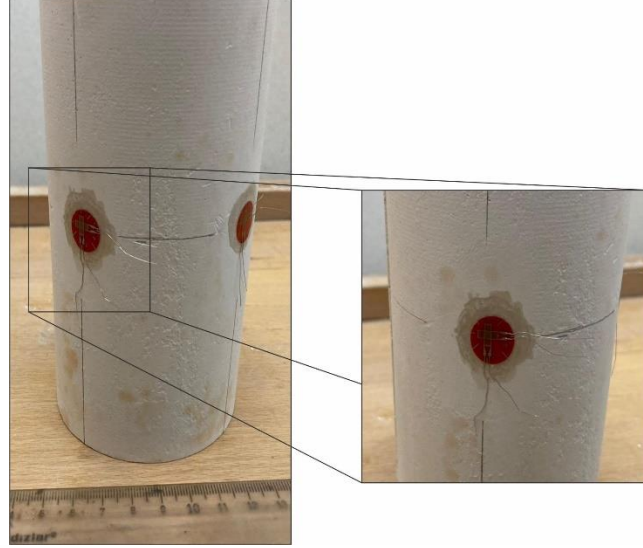
## Elastisite Modülü ve Poisson Oranının Tayini

Sayısal analizlerde kullanılan bir diğer parametre çifti de Elastisite Modülü (Young Modülü,  $E$ ) ve Poisson Oranı ( $\nu$ )'dır. Karot örnekleri üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerler vasıtasıyla, aksenal gerilme altındaki örneklerde meydana gelen deformasyonlar hassas şekilde ölçülebilmektedir. Birim deformasyon ölçerler aralarında 90 derece olacak şekilde karot yüzeyine yapıştırılmıştır. Kullanılan iki birim deformasyon ölçerin hem düşey hem de yatay yönde ölçüm yapma kapasitesi vardır. Birim deformasyon ölçerleri yapıştırmak için kullanılan yapıştırıcının alçı örneğin içine nüfuz ettiği görülmüştür (Şekil 5.6). Daha fazla yapıştırıcının kullanılmasıyla birlikte uygulama yapılan bölgenin yapıştırıcıya doyduğu anlaşılmıştır. Bu bölgeye yapıştırılacak birim deformasyon ölçerin alçı örnek yerine yapıştırıcıya ait deformasyonları ölçeceği düşünülmüştür. Bu sebeple biri siyanoakrilat (Japon yapıştırıcısı) bazlı akrilik yapıştırıcı diğeri ise aktive edici spreyden oluşan iki bileşenli bir yapıştırıcı türü kullanılmıştır. Birim deformasyon ölçer üzerine az miktarda yapıştırıcı sürülürken; örnek üzerine ise aktive edici sprey uygulanmıştır. Daha sonra, birim deformasyon ölçer, spreyin uygulandığı yüzeye beş saniye boyunca hafif bir kuvvet uygulanarak bastırılmıştır.

Birim deformasyon ölçerlerin alçı örnekler üzerinde yapıştırılması ve bağlantı kablolarının lehimleme işlemlerinin tamamlanmasının ardından 10 tonluk yükleme düzeneği kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.10'da sunulmuştur. 2.8 karışım oranına sahip örneklerden ikisi (2.8-UCS-6 ve 7) beklenenden çok daha düşük gerilmeler altında yenilmiştir. İki örneğin deneye hazırlık aşamasında düzeltilirken ıslanmasının bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Söz konusu örneklerin gerilme-birim deformasyon eğrilerinden elde edilen  $E$  değerinin 2.8-UCS-3 no.lu örnekten ciddi bir miktarda düşük olduğu görülmektedir. Benzer şekilde 2.8-UCS-7 örneğine ait  $\nu$  değerinin ise diğer bütün örneklerden büyük olduğu dikkat çekmektedir.

Düşük dayanımlı pürüzlü süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımının belirlenmesi için yürütülen bu çalışmada, yapay örnekleri hazırlarken kullanılacak alçıya ait karışım oranları ve bu oranlar ile hazırlanan karot örneklerinin dayanımları belirlenmiştir. Üretilen örneklerin, çalışmanın amacına uygun olacak şekilde düşük

dayanıma sahip oldukları deney sonuçlarından görülmektedir. Dayanım deneyleri sonucu belirlenen karışım oranları kullanılarak pürüzlü süreksizlik yüzeylerinin üretilmesi aşamasına geçilmiştir.



Şekil 5.6: Alçı örnekler üzerine birim deformasyon ölçerlerin yapıştırılması ve bu işlem sonucu oluşan yapıştırıcıya doygun bölgeler.

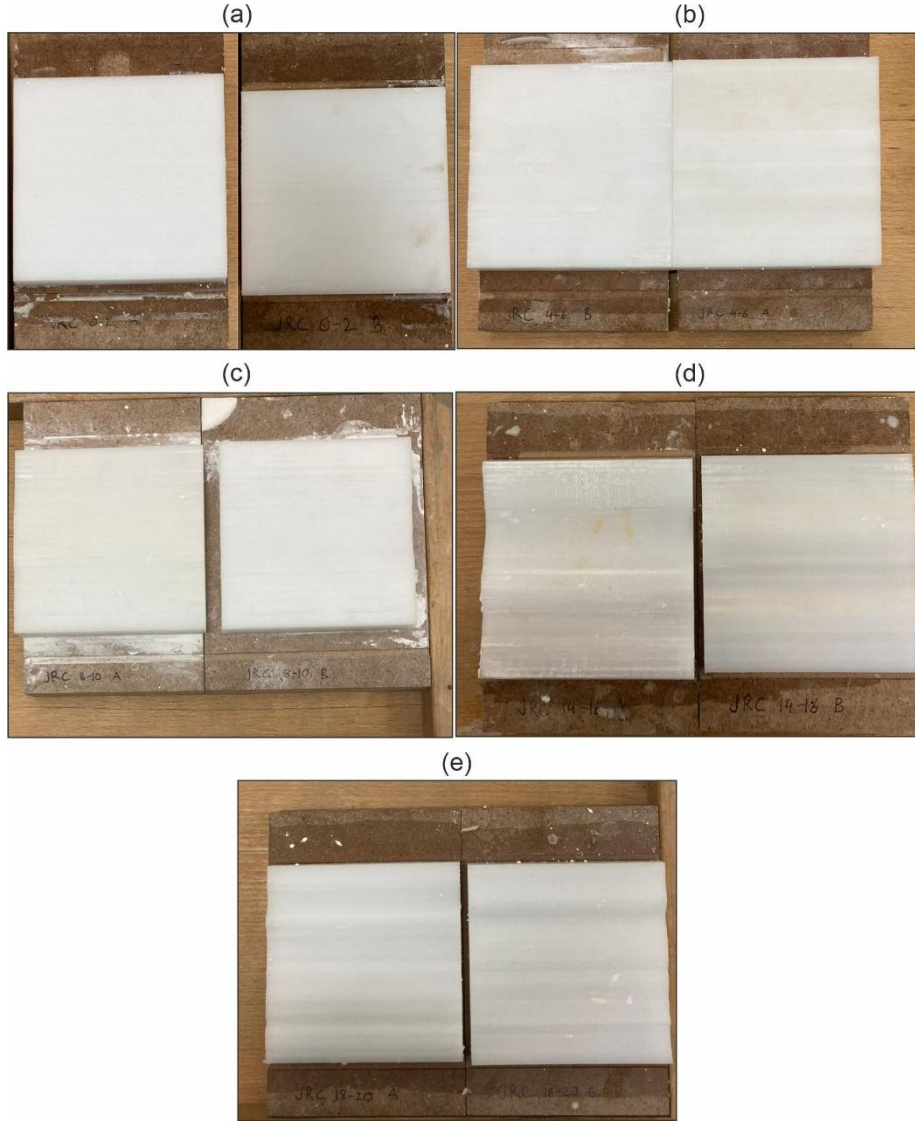
Çizelge 5.10: Elastik parametrelerin belirlenmesi için yapılan deneylere ait sonuçlar.

Örnek No	Elastisite Modülü (E, MPa)	Ortalama E (MPa)	Poisson Oranı ( $\nu$ )	Ortalama $\nu$
1.07-UCS-7	2917.47		0.24	
1.07-UCS-11	2627.56	3085.23	0.19	0.21
1.07-UCS-12	3710.68		0.22	
1.43-UCS-1	6427.23		0.25	
1.43-UCS-4	4512.68	5047.79	0.21	0.25
1.43-UCS-9	4199.47		0.29	
1.66-UCS-1	5206.37		0.21	
1.66-UCS-2	3990.49	4867.68	0.20	0.20
1.66-UCS-3	5406.20		0.19	
2.8-UCS-3	8695.39		0.30	
2.8-UCS-6	4654.19	5742.76	0.28	0.31
2.8-UCS-7	3878.71		0.37	

#### 5.1.4. Süreksizlik Yüzeylerinin Hazırlanması ve Makaslama Deneyleri

Barton-Bandis kriteri kullanılarak pürüzlü süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımı belirlenebilmektedir. Ölçütte, süreksizlik yüzeyine ait pürüzlülüğünün tanımlanması adına JRC parametresi kullanılmaktadır. Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük derecesine bağlı olarak JRC parametresi 0-20 arasında değerler alabilmektedir. Barton ve Choubey (1977) farklı pürüzlülüğe sahip örnekler üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda on adet standart süreksizlik profili önermişlerdir. Yenilme ölçütünün kullanıldığı ilk zamanlarda; süreksizlik yüzeyinin JRC değerini belirlemek için örnek yüzeyi ile önerilen profiller karşılaştırılarak JRC değeri tespit edilmekteydi. Her ne kadar zaman içerisinde JRC değerini belirlemek için farklı yöntemler geliştirilmişse de bu durum standart profillerin kullanımına engel olmamıştır. Bu sebeple süreksizlik yüzeyleri hazırlanırken standart bir JRC değerine sahip olabilmek adına Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen profillerden yararlanılmıştır. Yapılan görsel değerlendirmeler sonucunda, farklı pürüzlülükleri temsil etmesi amacıyla JRC değeri 0-2, 4-6, 8-10, 14-16 ve 18-20 olan profiller çalışma kapsamında kullanılmak üzere seçilmiştir. Her ne kadar tez konusu pürüzlü süreksizliklerin makaslama dayanımının değerlendirilmesine yönelik olsa da düz yüzeyleri temsil eden JRC=0-2 profili de çalışma kapsamında dikkate alınmıştır. Tatone (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada standart süreksizlik profillerinin sayısallaştırılmış halleri sunulmuştur. Araştırmacı sayısallaştırma işlemi yatayda (X-yönü) 0.5mm ve düşeyde (Y-yönü) 0.01mm hassasiyette olacak şekilde gerçekleştirmiştir. Seçilen profiller iki-boyutlu oldukları için, süreksizlik yüzeyinin üçüncü boyutta da aynı profile sahip olduğu kabul edilmiştir. Süreksizlik yüzeyleri oluşturmak amacıyla X-Y veri çiftleri AutoCAD programına aktarılmış ve standart profiller çizilmiştir. Çalışmada kullanılacak yapay süreksizlik yüzeylerinin birbiri ile tam olarak örtüşen profillere sahip olması gerekmektedir. Profillerin başlangıç ve bitiş noktalarından negatif Y yönüne doğru X eksenine dik doğrular çizilmiş ve bu doğrular birleştirilerek kapalı bir poligon oluşturulmuştur. Birbirinin zıttı yüzeylerin oluşturulabilmesi için ikinci bir poligona daha gereksinim duyulmaktadır. Önceki poligon oluşturma işleminden farklı olarak bu poligon oluşturulurken, profillerin başlangıç ve bitiş noktalarından pozitif Y yönüne doğru X eksenine dik doğrular çizilmiş ve kapalı bir poligon daha üretilmiştir. Bu poligonlar 'extrude' komutu ile üç boyutlu bir katı cisim haline dönüştürülmüştür. Dışa aktar komutu ile ".STL" dosyası

olarak kaydedilmiştir. Bu dosya daha sonra Sayısal Kontrollü Bilgisayar'a (CNC) yüklenmiş ve oluşturulan üç boyutlu yüzey freze makinesi kullanılarak mühendislik plastiklerinden olan polioksimetilen (POM, Delrin) levha üzerine işlenmiştir (Şekil 5.7). Süreksizliğin alt ve üst yüzeyleri için tekrar edilen bu işlemler sonucunda bir profilden birbirinin tam zıttı iki yüzey elde edilmiştir.



Şekil 5.7: POM levhalar üzerine işlenmiş JRC'nin (a) 0-2, (b) 4-6, (c) 8-10, (d) 14-16 ve (e) 18-20 profilleri için hazırlanmış süreksizlik yüzeyleri

Standart profiller ile üretilen üç-boyutlu süreksizlik yüzeyleri kullanılarak, önceden dayanımları belirlenen dört farklı karışım oranında makaslama örnekleri hazırlanmıştır. Bu karışımlar doğrudan POM levhadan hazırlanan kalıp üzerine dökülmüştür. Örneğin kuruduktan sonra hasar görmeden levhadan ayrılması

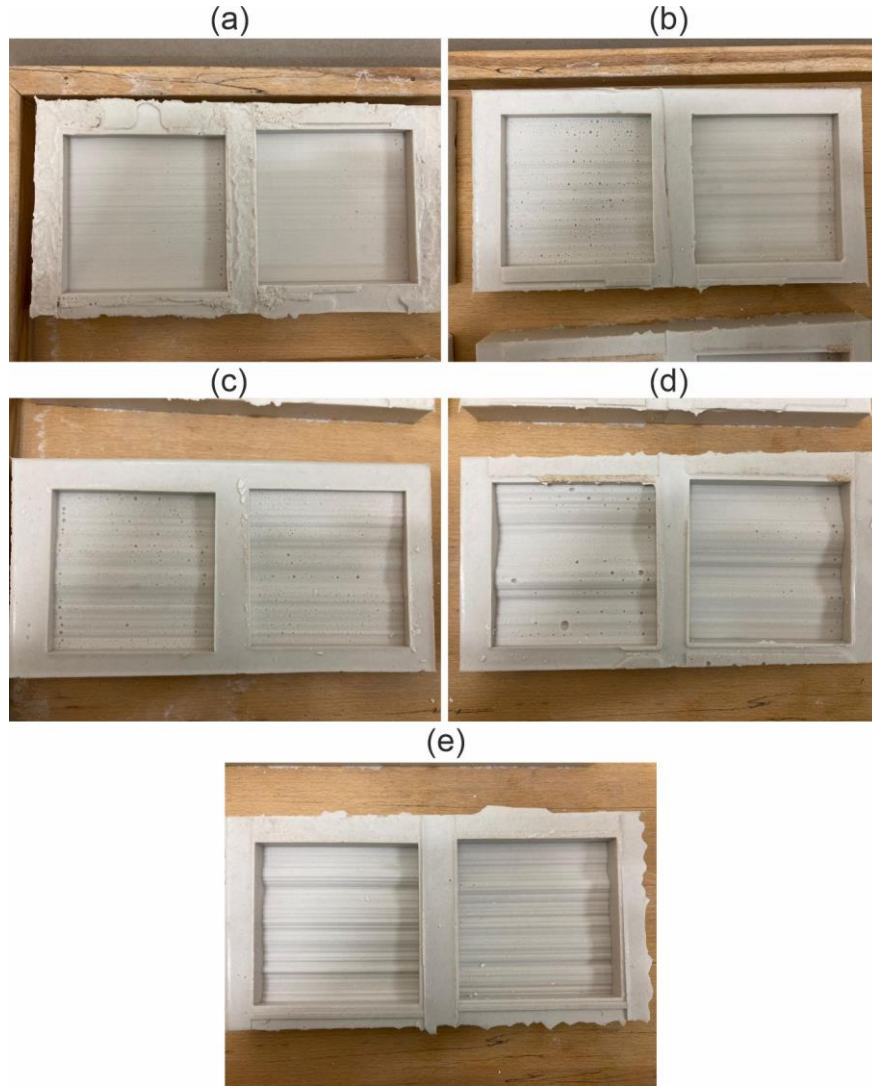
mümkün olmamıştır. Örnek kalıbın pürüzlü yüzeyine yapıştığı için, o bölgeye sürülecek herhangi bir kayganlaştırıcı madde alçıdaki pürüzlülük yüzeyine de bulaşacak ve pürüzlerin dayanımını etkileyecek sonuçlar doğurabilecektir. Bu sebeple örneğin kalıba yapışma riskini ortadan kaldıran, tekrar kullanılabilen bir malzeme olan ve oda sıcaklığında sertleşen bir malzeme olan silikon (RTV Silikon) kullanılmıştır. RTV silikon, silikon ve katalizörden oluşan çift bileşenli bir kalıp silikonudur. Ağırlıkça %97 silikon ve %3 katalizör kullanılarak silikon kalıplar üretilmektedir. RTV silikon kullanılarak POM levha üzerine işlenmiş süreksizlik yüzeylerinin kalıpları alınmıştır (Şekil 5.8). Silikon kalıplar üzerine dökülen alçı kalıba yapışmamakta ve silikon kalıp deformasyona uğramadan tekrar tekrar kullanılabilir.

Karot örneklerinin hazırlanmasında izlenen sürecin bir benzeri makaslama örnekleri için de uygulanmıştır. Örneğin kalıptan çıkarıldıktan nihai dayanımını kazanana kadar geçen süredeki ağırlık değişimleri takip edilmiş ve kurduğuna kanaat getirildikten sonra deneye hazırlık aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada karot örneklerinde uygulanan dairesel testere ile düzeltme işlemi gerçekleştirilmemiştir. Bunun yerine makaslama örneğinin alt yüzeyi, 10cm x 10cm x 1cm'lik makaslama kalıplarına sığacak şekilde zımpara yardımıyla düzeltilmiştir. Aynı işlem üst yüzey için de tekrarlanmıştır. Makaslama deneyi esnasında uygulanan makaslama yer değiştirmesine bağlı olarak pürüzlerin birbirleriyle kenetleneceği düşünüldüğünden, alt ve üst yüzeyin kalıp içerisinde hareket etmemesi büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple örneklerin kalıba tam olarak yerleşmesi için uğraş gösterilmiştir.

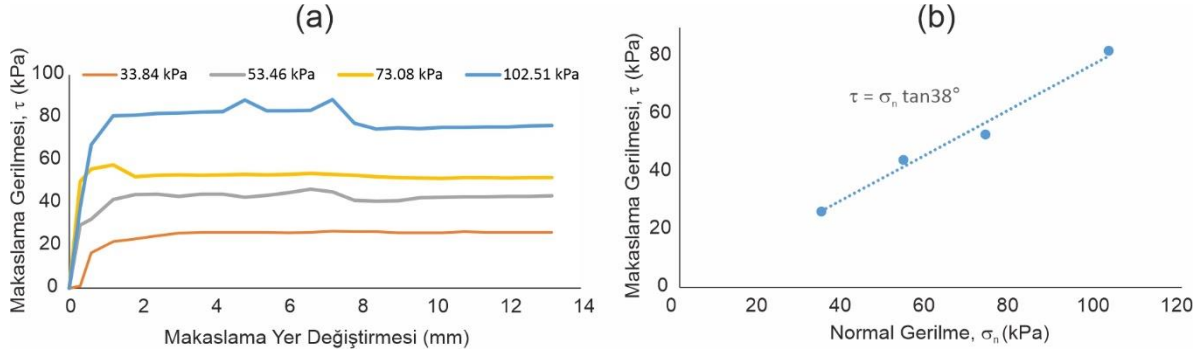
### **Temel Sürtünme Açılarının ( $\phi_b$ ) Tayini**

Pürüzlü süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımının Barton-Bandis kriteri yardımıyla belirlenebilmesi için JRC ve JCS değerlerinin yanı sıra temel sürtünme açısının da ( $\phi_b$ ) girdi parametresi olarak kullanılması gerekmektedir.  $\phi_b$  değerinin belirlenebilmesi için düz ve bozunmamış yüzeylere ihtiyaç vardır. Bu yüzeyler üzerinde farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilecek makaslama deneyleri sonucunda  $\phi_b$  değeri belirlenebilmektedir. Bu amaçla 10cm x 10cm yüzey alanına sahip olacak şekilde kalıplar üretilmiş ve bu kalıplar pleksiglas levha üzerine

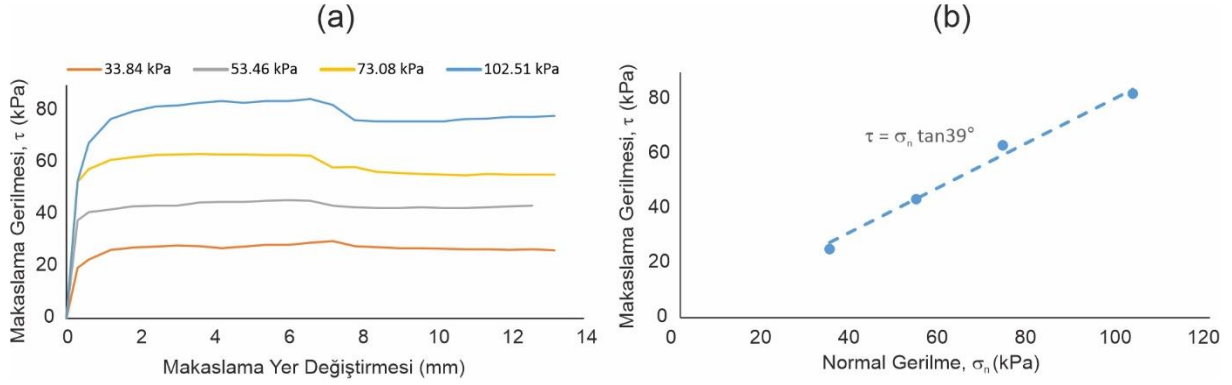
yerleştirilmiştir. Pleksiglas levhaya dökülen alçı-su karışımı son derece pürüzsüz yüzeyler oluşturulmasına olanak sağlamıştır. Kalıplardan çıkarılan örnekler, önceki bölümde anlatılan işlemler uygulanarak makaslama dayanımı deneylerine hazır hale getirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan farklı karışım oranları için, dört farklı normal gerilme altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerden toplanan verilerle makaslama yer değiştirmesine karşılık makaslama gerilmesi grafikleri çizilmiş ve grafiklerden belirlenen doruk makaslama gerilmesi değerleri ile uygulanan normal gerilmeler ( $\sigma_n$ ) kullanılarak örneklere ait yenilme zarfları oluşturulmuştur. Yenilme zarfları yardımıyla  $\phi_b$  değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.9, 5.10, 5.11 ve 5.12’de sunulmuştur.



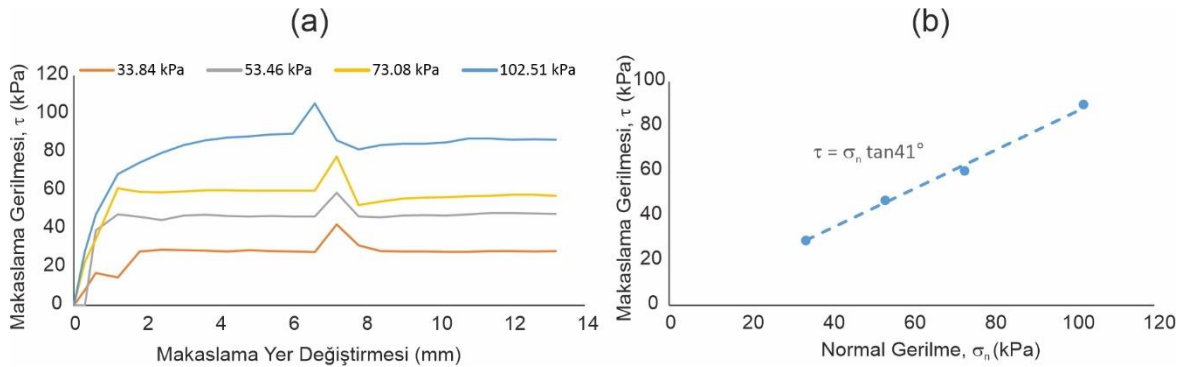
Şekil 5.8: POM levhalar kullanılarak JRC'nin (a) 0-2, (b) 4-6, (c) 8-10, (d) 14-16 ve (e) 18-20 profilleri için hazırlanmış süreksizlik yüzeylerine ait silikon kalıplar.



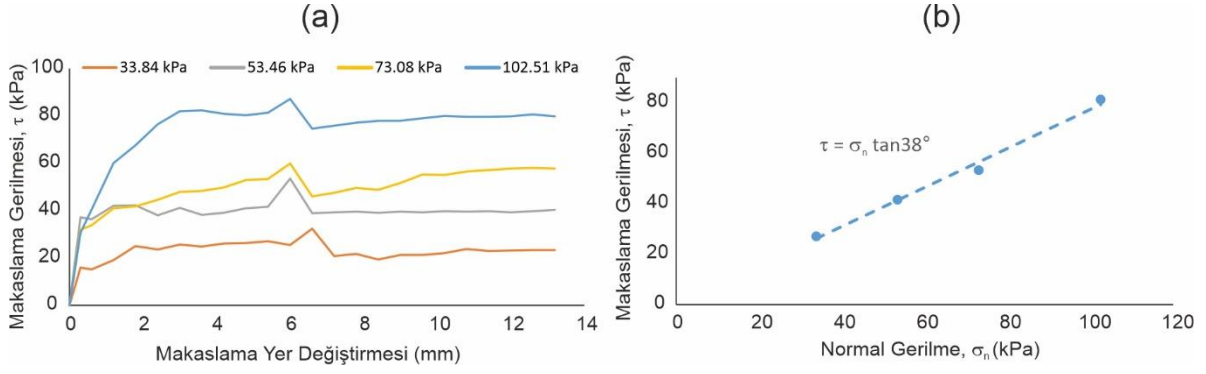
Şekil 5.9: 1.07 karışım oranına sahip örneklere ait  $\phi_b$  değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen (a) farklı  $\sigma_n$  altındaki  $\delta - \tau$  eğrileri ile (b)  $\sigma_n$  ve  $\tau$  kullanılarak çizilen yenilme zarfı.



Şekil 5.10: 1.43 karışım oranına sahip örneklere ait  $\phi_b$  değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen (a) farklı  $\sigma_n$  altındaki  $\delta - \tau$  eğrileri ile (b)  $\sigma_n$  ve  $\tau$  kullanılarak çizilen yenilme zarfı.



Şekil 5.11: 1.66 karışım oranına sahip örneklere ait  $\phi_b$  değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen (a) farklı  $\sigma_n$  altındaki  $\delta - \tau$  eğrileri ile (b)  $\sigma_n$  ve  $\tau$  kullanılarak çizilen yenilme zarfı.



Şekil 5.12: 2.80 karışım oranına sahip örneklere ait  $\phi_b$  değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen (a) farklı  $\sigma_n$  altındaki  $\delta - \tau$  eğrileri ile (b)  $\sigma_n$  ve  $\tau$  kullanılarak çizilen yenilme zarfı.

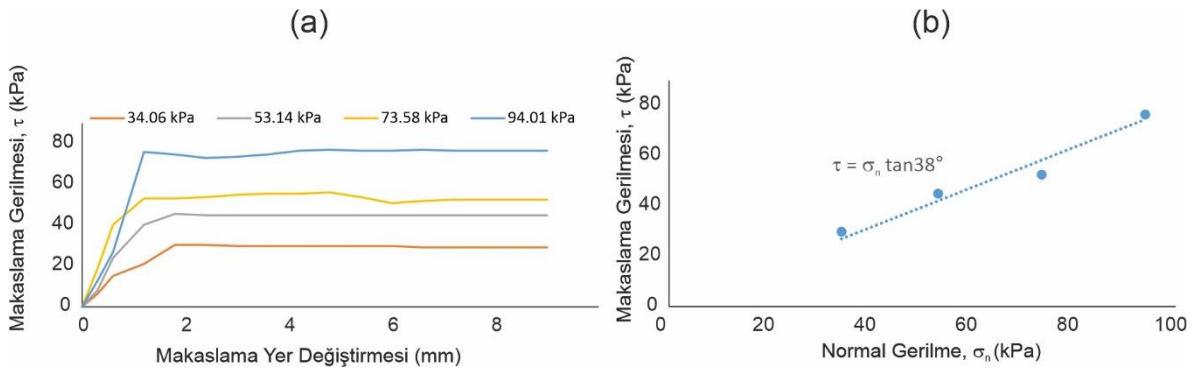
Deney sonuçları incelendiğinde,  $\phi_b$  değerlerinin başka kayalar için literatürde verilen ortalama değerlerden yüksek çıktığı görülmektedir. Bu yüksekliğin, pleksiglas levhalar kullanılarak hazırlanan örnek yüzeylerinin alışılmış dışındaki pürüzsüzlüğünden kaynaklandığı düşünülmektedir. Söz konusu pürüzsüzlükten dolayı örnek çiftinin birbirine yapıştığı tahmin edilmektedir. Alt ve üst makaslama yüzeylerinin deney esnasında karşılıklı şekilde serbestçe hareket edemediği düşünülmüştür. Bu teoriye göre, pleksiglas kullanılarak üretilen alçı yüzeylerinin deney sonuçlarını yanlış yönde etkileyeceği ihtimali göz önüne alınmıştır. Alçı örneklerde  $\phi_b$  değerinin bulunması için örnekler testere ile kesilmiş ve düz ve pürüzsüz yüzeylerin oluşması sağlanmıştır. Deneyde kullanılan örneklerin yüzey alanı 6cm x 6cm olacak şekilde kesilmiştir. Uygulanan ağırlıklar da bu yüzey alanlarına uyacak şekilde değiştirilmiştir. Testere dönüşünden kaynaklanabilecek izlerin olmamasına dikkat edilmiş ve en uygun olan yüzeyler deneylerde kullanılmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar farklı karışım oranları için Şekil 5.13, 5.14, 5.15 ve 5.16'da verilmiştir.

Tekrarlanan deney sonuçları incelendiğinde 1.07 karışım oranına sahip örneğin  $\phi_b$  değeri sabit kalırken, 1.43 ve 2.80 karışım oranına sahip örneklerin  $\phi_b$  değerleri sırasıyla 1° ve 2° artmıştır. 1.66 karışım oranlı örneğin  $\phi_b$  değeri ise 7°'lik düşüş ile 34° olmuştur.  $\delta - \tau$  eğrileri incelendiğinde, sonuçların pleksiglas ile hazırlanan örneklere nazaran daha tutarlı olduğu görülmektedir. Pleksiglas ile hazırlanan örneklere ait grafiklerde görünen, ilk etapta yapışma ve daha sonrasında kayma

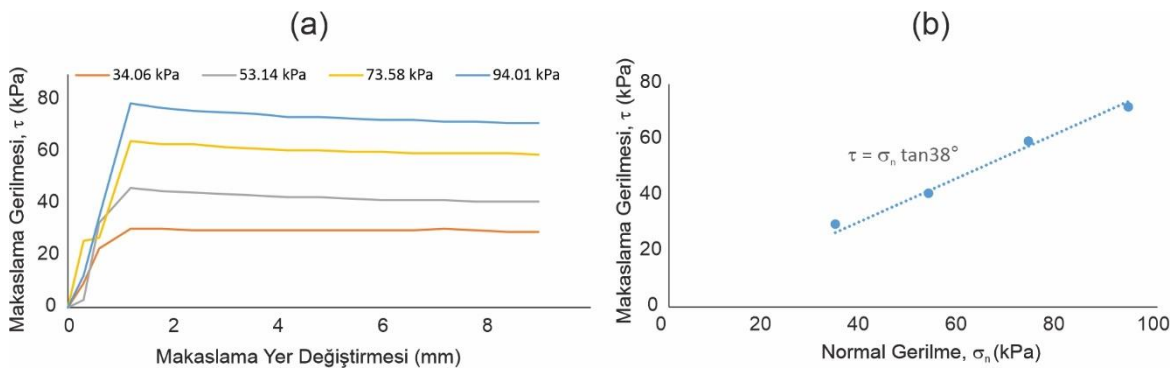


şeklinde yorumlanabilecek iniş-çıkışların, testere ile kesilen örneklerde neredeyse ortadan kalktığı görülmektedir.

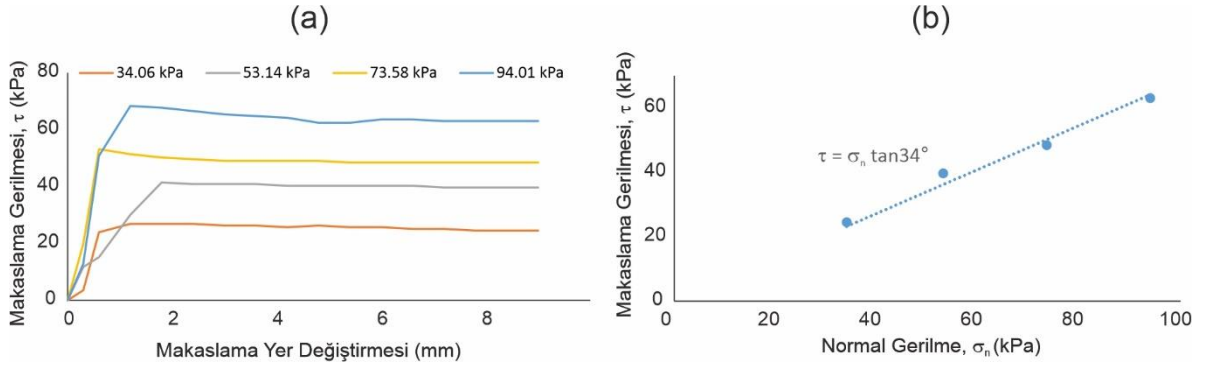
Testere ile kesilen yüzeylerden elde edilen  $\phi_b$  değerleri tahmin edildiği gibi düşük göstermemiştir. Yüzeyin oluşturulma yöntemi değişmesine rağmen, görece yüksek seyreden değerlerin örnek bileşimi ile ilgili olduğu kanaatine varılmıştır. Benzer sonuçların varlığını araştırmak adına literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Çeşitli araştırmacılar tarafından, alçı ve su kullanılarak hazırlanan yapay örnekler üzerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen UCS ve  $\phi_b$  değerleri Çizelge 5.11'de sunulmuştur.



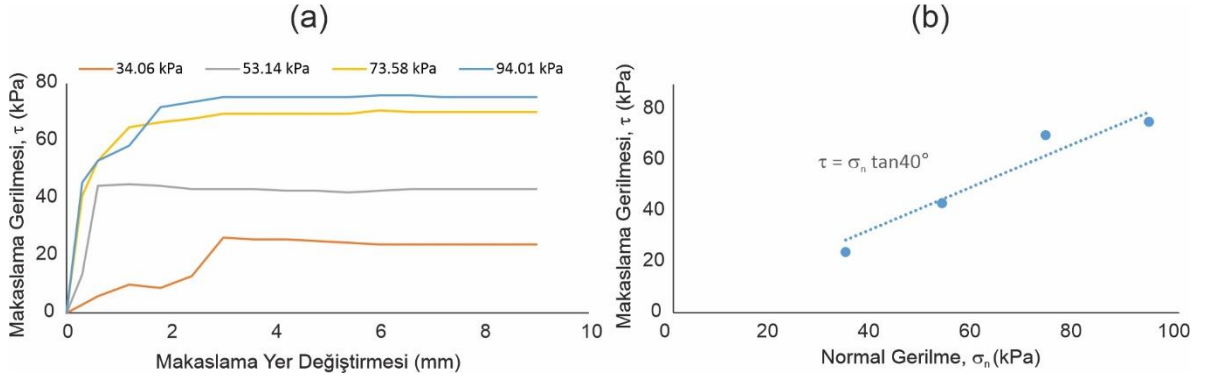
Şekil 5.13: 1.07 karışım oranlı örneklerde testere kesimi ile oluşturulan yüzeylerde  $\phi_b$  değerinin belirlenmesi için yapılan deneylerden elde edilen (a) farklı  $\sigma_n$  altındaki  $\delta - \tau$  eğrileri ile (b)  $\sigma_n$  ve  $\tau$  kullanılarak çizilen yenilme zarfı.



Şekil 5.14: 1.43 karışım oranlı örneklerde testere kesimi ile oluşturulan yüzeylerde  $\phi_b$  değerinin belirlenmesi için yapılan deneylerden elde edilen (a) farklı  $\sigma_n$  altındaki  $\delta - \tau$  eğrileri ile (b)  $\sigma_n$  ve  $\tau$  kullanılarak çizilen yenilme zarfı.



Şekil 5.15: 1.66 karışım oranlı örneklerde testere kesimi ile oluşturulan yüzeylerde  $\phi_b$  değerinin belirlenmesi için yapılan deneylerden elde edilen (a) farklı  $\sigma_n$  altındaki  $\delta - \tau$  eğrileri ile (b)  $\sigma_n$  ve  $\tau$  kullanılarak çizilen yenilme zarfı.



Şekil 5.16: 2.8 karışım oranlı örneklerde testere kesimi ile oluşturulan yüzeylerde  $\phi_b$  değerinin belirlenmesi için yapılan deneylerden elde edilen (a) farklı  $\sigma_n$  altındaki  $\delta - \tau$  eğrileri ile (b)  $\sigma_n$  ve  $\tau$  kullanılarak çizilen yenilme zarfı.

Çizelge 5.11:Literatürde farklı araştırmacılar tarafından alçı-su karışımı ile hazırlanan yapay örnekler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen UCS ve  $\phi_b$  değerleri.

	UCS (MPa)	$\phi_b$ (°)
Haque (1999)	12	37.5
Indraratna ve ark. (2015)	65.6	30
Jang ve Jang (2015)*	47.3	30.1
*3 farklı alçı karışımı kullanmıştır	72.4	24.4
	108	20.6
Tang ve Wong (2015)	7.3	35
Hong ve ark. (2016)	40.3	36.4
Oh ve ark. (2017)	46.3	42
Gui ve ark. (2019)	24	38

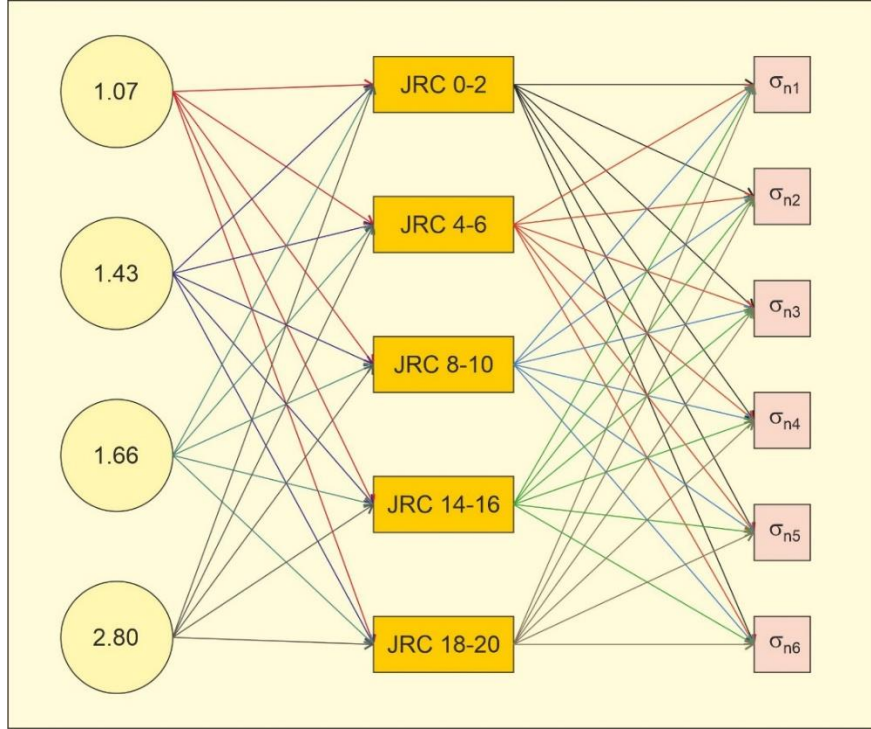
### Makaslama Dayanımı Deneyleri

Düşük dayanımlı örnekler üzerinde deneyler yapılacağı için laboratuvar bünyesinde bulunan ve zemin örneklerinin makaslanmasında kullanılan deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deney düzeneğinden yararlanılmıştır. Örneğe uygulanan makaslama yer değiştirmesi hızı 0.25 mm/dk olacak şekilde ayarlanmıştır. Deneyler suyun olmadığı kuru koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Her bir dayanım sınıfı için beş değişik JRC profilinde hazırlanan örnekler üzerinde altı farklı normal gerilme uygulanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan alçılara ait karışım oranlarını (daire), süreksizlik yüzeylerinin JRC değerlerini (dikdörtgen) ve farklı normal gerilmeleri (kare) gösteren bir akış şeması Şekil 5.17’de sunulmuştur. Bu akış şeması incelendiğinde, her bir karışım oranı için beş farklı JRC’ye sahip süreksizlik yüzeyleri üretildiği ve her JRC değeri için de altı farklı normal gerilme altında makaslama deneyleri gerçekleştirildiği anlaşılabilir. Deneyler esnasında, örneğin üst yüzeyinin makaslama yer değiştirmesine bağlı olarak alt yüzey üzerinde yükselme miktarının (dilatasyon) ölçülmesi adına komparatör saati kullanılmıştır. Yer değiştirmelere bağlı olarak makaslama gerilmeleri okunurken, dilatasyon miktarları da kaydedilmiştir. Makaslama deneylerinin sayısal yöntemlerle modellenebilmesi için, şimdiye kadar belirlenen girdi parametrelerine ( $E$ ,  $\nu$ ,  $\sigma_t$  vb.)

ek olarak normal ve makaslama rijitliği değerlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Normal rijitlik değerinin belirlenebilmesi için örnek makaslama kalıbına yerleştirilmiş ve deney aşaması için tercih edilen normal gerilme örnek üzerine uygulanmıştır. Uygulanan normal gerilmeye bağlı olarak süreksizlik yüzeyinde kapanma, bir başka deyişle negatif dilatasyon meydana gelmektedir. Uygulanan normal gerilmenin meydana gelen kapanma miktarına oranı normal rijitlik değerini vermektedir. Makaslama rijitlik değeri için de pratik bir yaklaşım izlenmiş ve normal rijitlik değerinin %10'u kullanılmıştır. Bu işlem her deney öncesinde farklı normal gerilmeler için tekrarlanmıştır. Kullanılan deney düzeneğinin yapısı gereği, makaslama kalıbı içerisine yerleştirilen örneğin üzerine ilk olarak yükleme başlığı yerleştirilmektedir. Yükleme başlığı üzerine yk askısı oturtulmakta ve yk askısına da dilatasyonu ölçen komparatör bağlanmaktadır. rnek zerine harici bir yük uygulanmadığında dahi yk askısının ağırlığından (4.5 kg) kaynaklanan bir normal gerilme örneğe etki etmektedir. Komparatör saati yk askısı yerleştirildikten sonra bağlandığı için askının ağırlığından kaynaklanan kapanma miktarı ölçülememektedir. Deneyde kullanılmak üzere seçilen en düşük normal gerilme miktarı yk askısının oluşturduğu normal gerilme olduğu için ilk deneylere ait kapanma miktarı ve dolayısıyla normal ve makaslama rijitlik değerleri belirlenememiştir. İlerleyen normal gerilme aşamalarında, harici olarak eklenen ağırlıklara bağlı olarak kapanma miktarları ölçülebilmektedir. Ancak bu aşamalarda, yukarıda bahsedilen durumdan dolayı yk halkasından kaynaklanan kapanma miktarı göz ardı edilmiştir.

Makaslama deneyleri, en düşük karışım oranından en yüksek karışım oranına; en az przli yüzeyden en przli yüzeye gidilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan normal gerilmeler örneğin dayanımına eşit olduğunda ( $JCS/\sigma_n=1$ ), örneğin sahip olduğu przlilik etkisini yitirmektedir. Bir başka deyişle makaslanma sırasında pürüzler yenilmekte ve örnek artık dayanıma düşmektedir. Eşitlik 5.1'den de görüleceği üzere,  $JCS/\sigma_n=1$  olduğu durumda örneğin makaslama dayanımı  $\sigma_n$  ve  $\phi_b$ 'nin bir fonksiyonu olmaktadır. Örneklerin düşük dayanıma sahip olmaları ve deney ekipmanlarının teknik kapasitesinden dolayı örnekler üzerine yüksek normal gerilmeler uygulanmamıştır. Normal gerilmeye sebep olan ağırlıklardan ilki yk askısının ağırlığı olan 4.5 kg iken, diğerleri sırasıyla 14.5 kg,

24.5 kg, 44.5 kg, 74.5 kg ve 104.5 kg olarak seçilmiştir. Uygulanan normal gerilmelerin doğa şartlarında benzetiminin yapılması amacıyla farklı yüksekliklere (H), şev açısına ( $\alpha$ ) ve süreksizlik eğimine ( $\beta$ ) sahip şev geometrileri tasarlanmıştır (Şekil 5.18). Bu hesaplamalar sırasında birim hacim ağırlık değeri olarak kullanılmak üzere, deneylerde kullanılan farklı karışım oranlarına sahip alçı örneklerin birim hacim ağırlık değerlerinin ortalamasına ( $11.5 \text{ kN/m}^3$ ) yakın bir değer olan  $12 \text{ kN/m}^3$  değeri alınmıştır. Söz konusu şevlerde kayma yüzeyi üzerine dik olarak etkiyen gerilmeler, makaslama deneylerinde uygulanan normal gerilmelere karşılık gelmektedir. Kayma yüzeyine etkiyen normal gerilmeler Çizelge 5.12'de sunulmuştur. Gerilmelerin hesaplandığı şevlere ait çizimler Şekil 5.18'de gösterilmiştir.

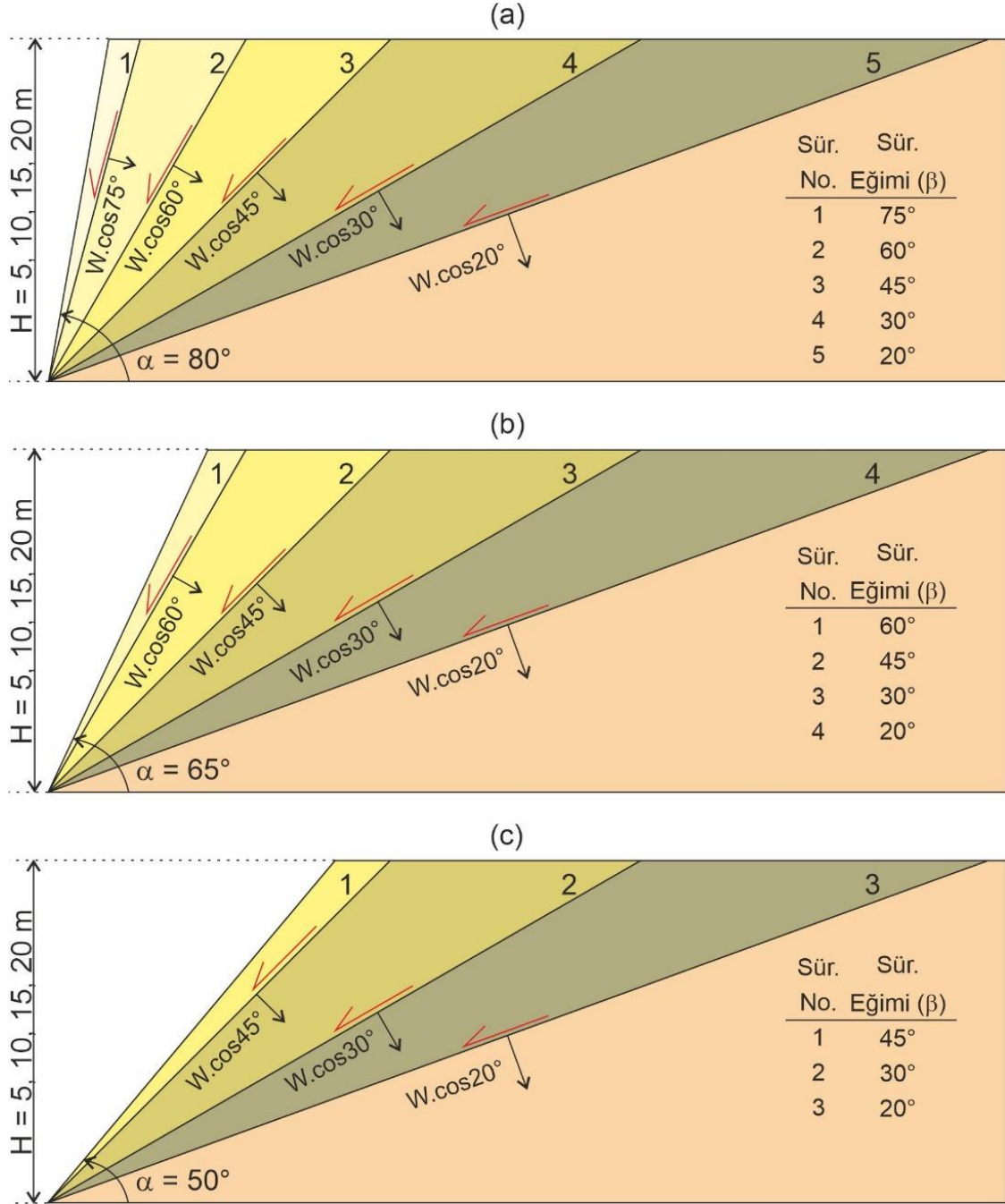


Şekil 5.17: Makaslama deneylerinde izlenecek yolu gösteren akış şeması.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (Eş.5.1)$$

Her deney kendi içerisinde ve bir önceki deney ile karşılaştırılarak olası tutarsızlıkların önlenmesi amaçlanmıştır. Deney esnasında bir sorunla

karşılaştırıldığında veya elde edilen sonuçların önceki deney sonuçlarıyla kıyaslanması sonucu bir tutarsızlık gözleendiğinde deney durdurulmuş ve çözüme yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çözümün bulunmasını takiben yeni bir örnek üzerinde deney tekrar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.18: Kayma yüzeyleri üzerine etkiyen normal gerilmelerin belirlenebilmesi için çizilmiş farklı yükseklik, şev açısı ve süreksizlik eğimi değerlerine sahip şevler.

Çizelge 5.12:Farklı H,  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleriyle oluşturulan şev geometrilerinde kayma yüzeylerine dik olarak etkiyen gerilmeler ( $\sigma_n$ , kPa).

H(m)	5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20	20
$\alpha$ (°)	80	65	50	80	65	50	80	65	50	80	65	50
$\beta$ (°)	$\sigma_n$	$\sigma_n$	$\sigma_n$	$\sigma_n$	$\sigma_n$	$\sigma_n$	$\sigma_n$	$\sigma_n$	$\sigma_n$	$\sigma_n$	$\sigma_n$	$\sigma_n$
75	0.7	-	-	1.4	-	-	2.1	-	-	2.8	-	-
60	5.2	1.4	-	10.4	2.9	-	15.6	4.3	-	20.8	5.8	-
45	12.4	8.0	2.4	24.7	16.0	4.8	37.1	24.0	7.2	49.4	32.0	9.7
30	20.2	16.4	11.6	40.4	32.9	23.2	60.6	49.3	34.8	80.8	65.8	46.4
20	24.8	22.0	18.4	49.6	44.0	36.8	74.4	66.0	55.2	99.2	88.0	73.6

1.07 karışım oranına sahip örnekler üzerinde, JRC'nin 0-2 ve 4-6 olduğu profillerde yapılan deneylerde bir sorun ile karşılaşılmamıştır. Ancak JRC'nin 8-10 olduğu profillerde, yüksek normal gerilmelerin uygulandığı deneyin belirli aşamalarında, örneğin kırıldığını düşündüren sesler duyulmuştur. JRC 14-16 olduğu profillerde ise önlem olarak ses duyulduğu anda deney durdurulmuş ve örnekte meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Deney durdurulduktan sonraki bazı durumlarda, örneğin makaslama kalıbı içerisindeyken kırıldığına dair bir emare gözlenmezken makaslama kalıbından çıkarılırken kırılmalar meydana gelmiştir (Şekil 5.19 a, b). Normal gerilmenin yüksek olduğu durumlarda ise örneğin makaslama kalıbı içerisinde kırılmış bir vaziyette bulunduğu görülmüştür (Şekil 5.19c).

Deneyler esnasında yapılan gözlemlere dayanarak, örneklerdeki kırılmaların belirli bir yer değiştirme miktarından sonra meydana geldiği anlaşılmıştır. Oluşan kırıkların, makaslama kuvvetinin uygulandığı doğrultuya dik yönde geliştiği gözlenmiştir (Şekil 5.19c). Söz konusu kırıkların makaslama gerilmeleri yerine çekilme gerilmelerinden kaynaklanıyor olabileceği ihtimali üzerine, kırıkların gözlendiği örnekler için parametreler (JRC, JCS, E,  $\nu$  vb.) kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Rocscience (2011) tarafından sunulan Phase2 programı yardımıyla sayısal ortamda makaslama deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar

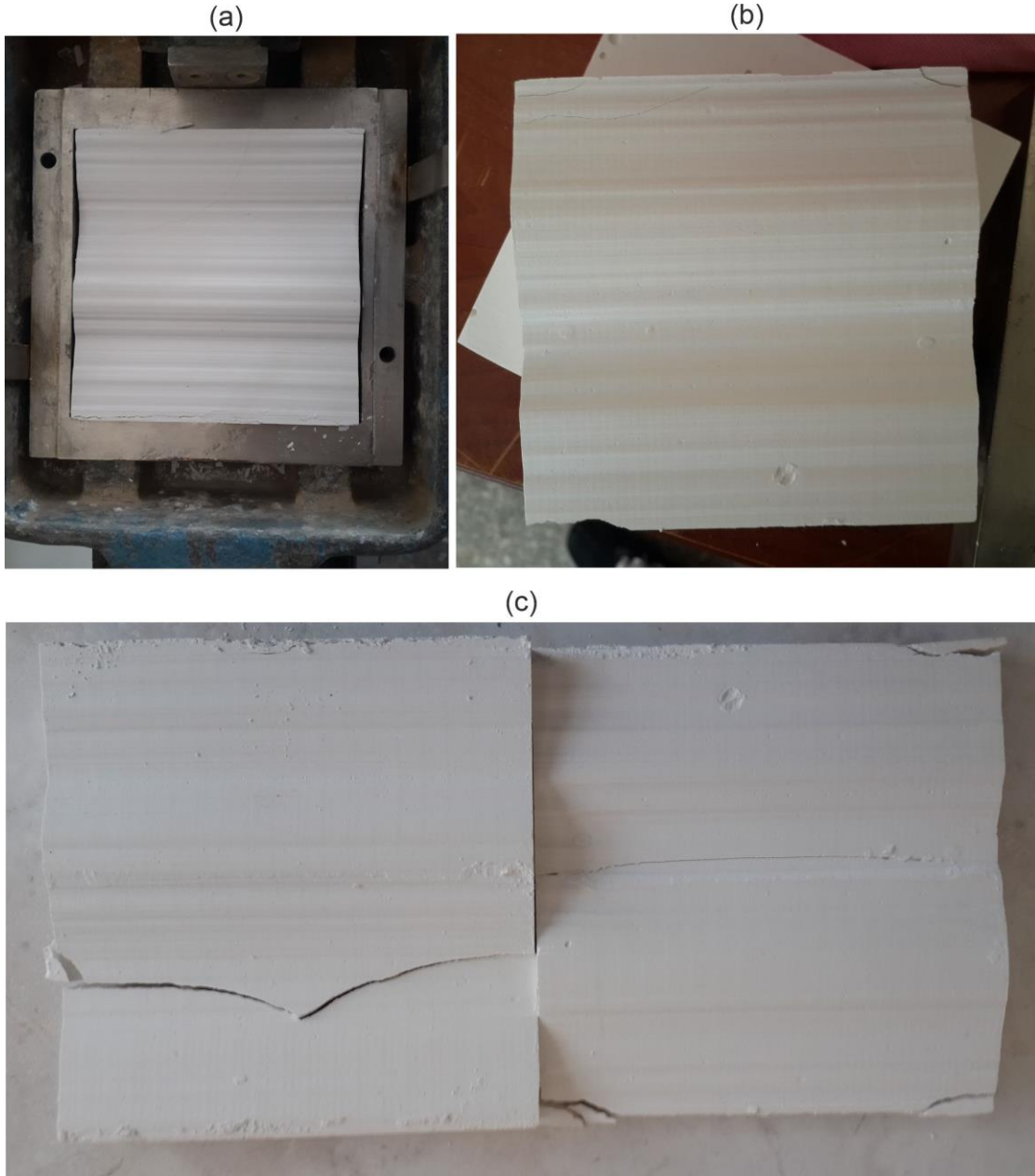
deneylerinde makaslama yer değiştirmesine bağlı olarak ölçümler alındığı için deneylerle uyum sağlanması açısından analizler kademeli şekilde gerçekleştirilmiştir. Her 0.6 mm'lik makaslama yer değiştirmesi bir kademe olacak şekilde ayarlamalar yapılmış ve toplam 25 kademe (15 mm'lik makaslama yer değiştirmesi) ile analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde kullanılan modele ilişkin başlangıç koşulları Çizelge 5.13'te verilmiştir. Oluşturulan modelin görüntüsü Şekil 5.20'de sunulmuştur.

1.07 karışım oranına sahip örneklere ait parametreler kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizlerde, kırılma problemiyle karşılaşılmayan JRC 0-2 ve 4-6 profilli süreksizlikler kullanılmamıştır. Sorunun gözleendiğı JRC 8-10 profiline sahip örnekler üzerinde çalışılmış olup, elde edilen sonuçlar Şekil 5.21'de sunulmuştur. Askı ağırlığı kullanılarak yapılan deneylerde rijitlik parametresinin belirlenememesinden dolayı sayısal analizlerde 4.41 kPa'lık (4.5 kg) normal gerilme aşaması kullanılmamıştır.

Makaslama deneylerinde kullanılan örneklerin kalınlıkları belirlenirken, makaslanacak süreksizlik yüzeyinin makaslama kalıplarına sürtmemesine dikkat edilmelidir. Bu husus ve süreksizliklerin genlikleri dikkate alındığında, örnek kalınlıklarının profilden profile değişeceği anlaşılmaktadır. Sayısal analizlerde kullanılan JRC 8-10 profiline sahip süreksizlik geometrileri incelendiğinde (Şekil 5.21), örneğin sol tarafındaki kalınlıkların alt ve üst yüzey için 10 mm olduğu görülmektedir. Ancak süreksizlik profillerinin yapısı gereği bu kalınlık değerleri profil boyunca değişmektedir ve bu örneklerde soldan sağa gidildikçe üst yüzeyin kalınlığı azalmakta, alt yüzeyin kalınlığı ise artmaktadır. Örnekler hazırlanırken bu kalınlıkların profilin başlangıç noktası için 10 mm olmasına özen gösterilmiştir. 10 mm'lik kalınlık sağlandıktan sonra üst yüzey yatay olacak şekilde düzeltilmeye çalışılmıştır. Profillerin başlangıç noktalarındaki yükseklik ile bitiş noktalarındaki yükseklikler aynı değildir (bkz. Şekil 2.11). Profil boyunca meydana gelen kalınlık değişimlerinin, profilin yapısından kaynaklı olduğu gerçeği kabul edilmiş ve profilden kaynaklı olan sorunlara yönelik düzeltme yapılmamıştır. Şekil 5.21'de verilen sonuçlar incelendiğinde, çekilme yenilmesine maruz kalan (daire şeklinde gösterilen bölgeler) alanların son derece sınırlı alanlar olduğu görülmektedir. Aynı şekildeki 73.08 ve 102.51 kPa'lık normal gerilmeler ile yapılan analizler incelenecek olursa

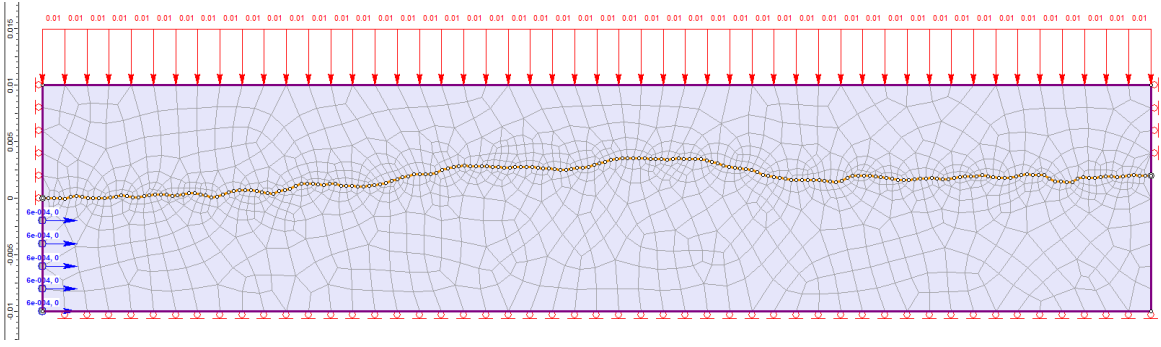


(Şekil 5.21d ve e), üst yüzey kalınlığının azaldığı bölgede çekilme yenilmesine maruz kalan hücreler olduğu görülecektir. Ancak bu durumda bile yenilmiş hücreler birleşerek örneğin üst kesimine ulaşamamıştır. Bir başka deyişle, çekilme yenilmesine uğrayan hücreler birleşerek örneğin kırıldığı bir senaryoyu meydana getirememiştir.



Şekil 5.19: Deney esnasında kırılma sesi geldikten sonra: (a) kalıp içerisindeki alt yüzey, (b) kalıptan çıkarılan üst yüzey, (c) yüksek normal gerilme altında kırılmış örnek.

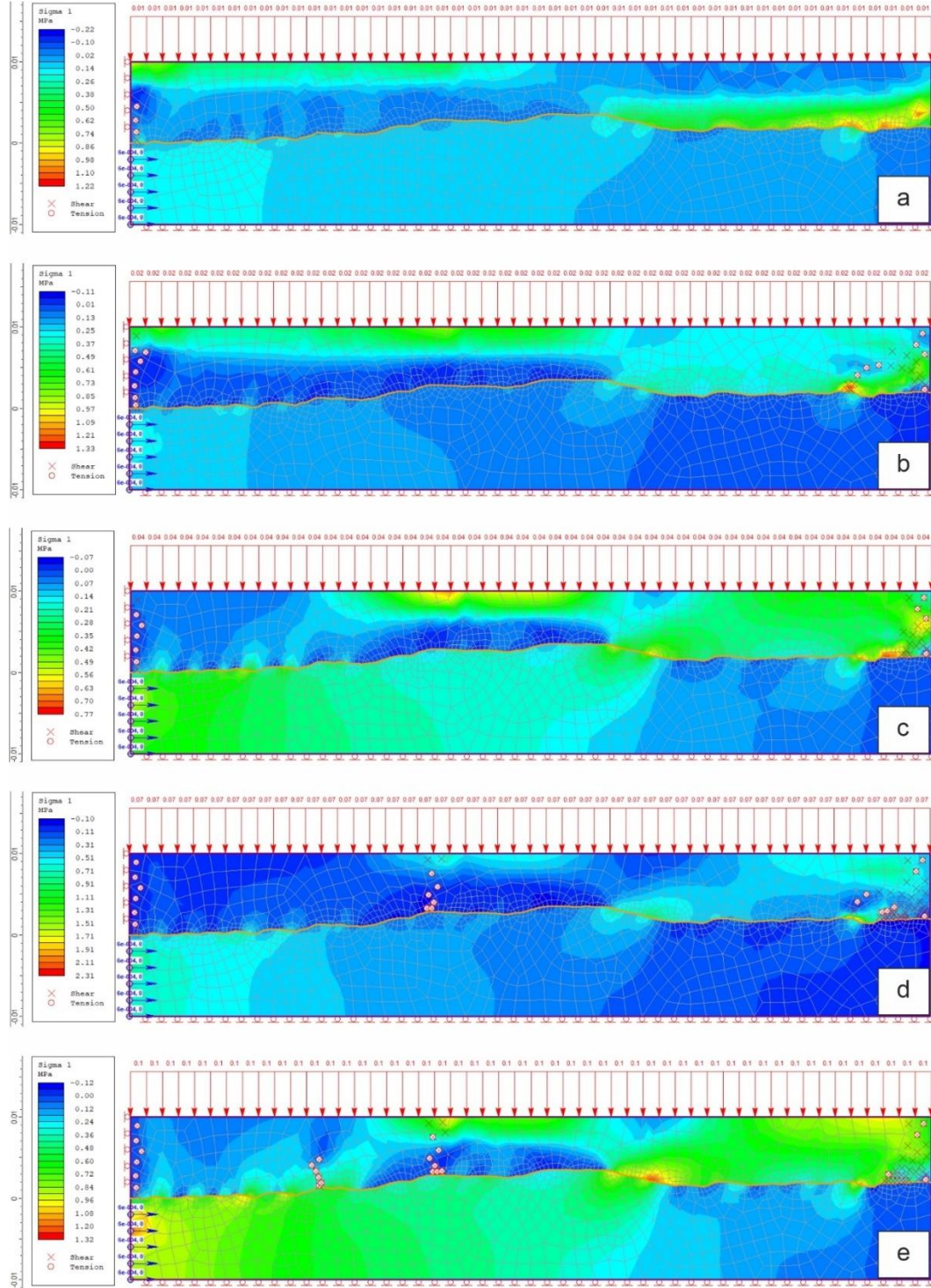
Laboratuvar deneyleri sırasında meydana gelen kırılmaların sebebini belirleyebilmek adına üst yüzey kalınlığı değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. 10 mm olan kalınlık değeri 8 mm'ye düşürüldüğünde; örnekte kalınlığın incelendiği bölgelerde normal gerilme artışına bağlı olarak çekilme yenilmelerinin olduğu görülmektedir (Şekil 5.22). Örnek kalınlığı daha fazla azaltıldıkça, çekilme yenilmeleri baskın hale gelecektir. Aynı işlemler kalınlığın 15 mm'ye çıkarıldığı durum için tekrarlanmıştır (Şekil 5.23). Uygulanan en yüksek normal gerilmede dahi örneğin kırılmasına sebep olacak çekilme yenilmeleri oluşmamıştır. Bu analizler sonucunda 10 mm'den düşük kalınlığa sahip örneklerin deneylerde kullanılmamasına; zorunlu olunan durumlarda ise 10 mm'den düşük kalınlığa sahip örneklerin ancak çok düşük normal gerilmeler altında deneye tabi tutulmasına karar verilmiştir.



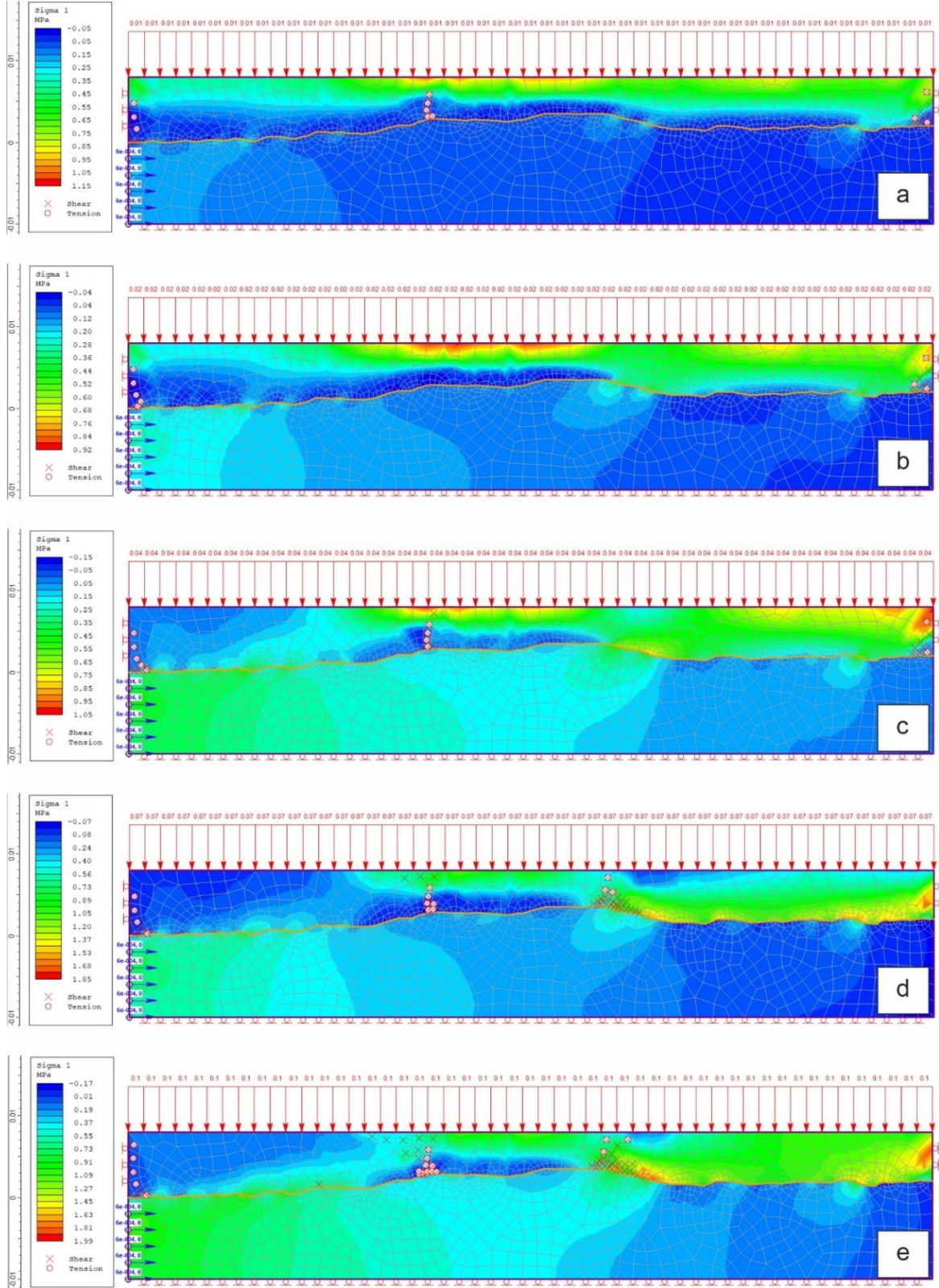
Şekil 5.20: Sayısal analizler için hazırlanan modele ait mesh görüntüsü ve sınır koşulları.

Çizelge 5.13: Sayısal analizlerde kullanılmak üzere oluşturulan modellere ait başlangıç koşulları.

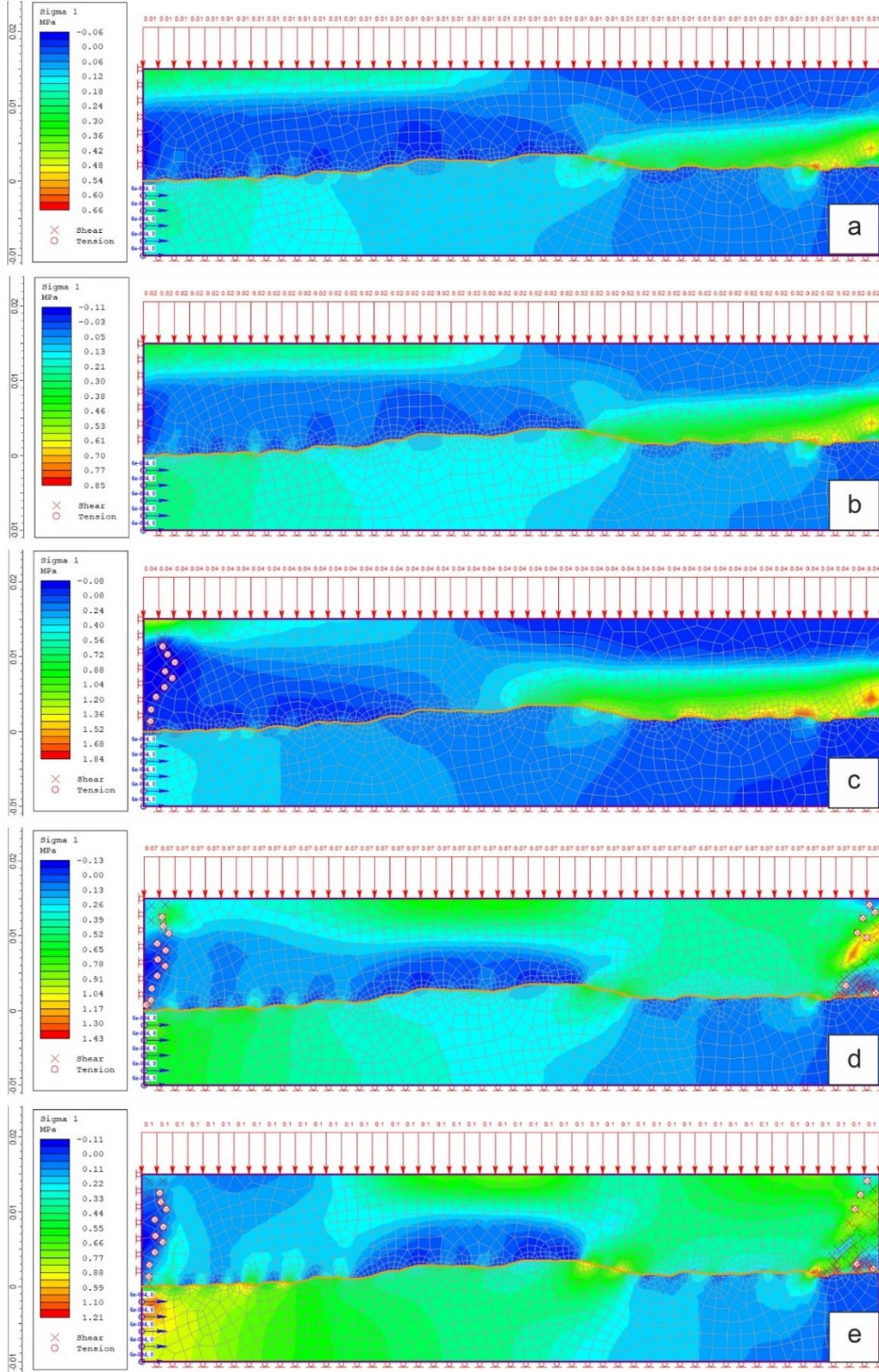
Analiz türü	Plain strain	Element türü	4 düğümlü dörtgen
Aşama sayısı	25	Dış düğüm sayısı	120
İterasyon Sayısı	1000	Element sayısı	1673
Tolerans	0.001	Düğüm sayısı	1732
Mesh türü	Graded	Kısıtlar	Alt yüzey Y-yönü Üst yüzey X-yönü



Şekil 5.21: 1.07 karışım oranlı, JRC 8-10 profile ve 10 mm kalınlığa sahip örnekler üzerinde (a) 14.22, (b) 24.03, (c) 43.65, (d) 73.08 ve (e) 102.51 kPa normal gerilmeler altında gerçekleştirilen sayısal analizlere ait sonuçlar.



Şekil 5.22: 1.07 karışım oranlı, JRC 8-10 profile ve 8 mm kalınlığa sahip örnekler üzerinde (a) 14.22, (b) 24.03, (c) 43.65, (d) 73.08 ve (e) 102.51 kPa normal gerilmeler altında gerçekleştirilen sayısal analizlere ait sonuçlar.



Şekil 5.23: 1.07 karışım oranlı, JRC 8-10 profile ve 15 mm kalınlığa sahip örnekler üzerinde (a) 14.22, (b) 24.03, (c) 43.65, (d) 73.08 ve (e) 102.51 kPa normal gerilmeler altında gerçekleştirilen sayısal analizlere ait sonuçlar.

Sayısal analiz sonuçlarına ait şekillerde, 25 kademede gerçekleşen analizlerin son kademesine ait sonuçlar paylaşılmıştır. Sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, laboratuvar deneylerinde gerçekleşen kırılmaların örnek kalınlıklarındaki azalmadan kaynaklı olduğu çıkarımı yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri sırasında yapılan gözlemlerde, kırılmalara ait seslerin deneyin ortalarında veya sonlarında duyulduğu bilinmektedir. Bu aşamalarda örnekte makaslama yer değiştirmesi meydana gelmekte ve dilatasyon oluşmaktadır. Sayısal analizlerin ve laboratuvar deneylerinin sunduğu veriler ışığında aşağıda belirtilen koşullar altında örnekte kırılmaların gözlenebileceği anlaşılmıştır.

- Örnek kalınlığının 10 mm'den düşük olduğu durumlarda çekilme gerilmelerine bağlı olarak yenilmeler oluşabilmekte ve bu yenilmeler örneğin kırılmasına sebep olabilmektedir.
- Örnek kalınlığı 10 mm ve üzerinde bir değere sahip olsa bile dilatasyondan kaynaklı yüzeylerin birbirleriyle temas ettiği noktaların azalması lokal gerilme artışlarına sebep olmaktadır. Bu gibi durumlarda normal gerilmenin etkisiyle üst yüzeyde kırılmaların oluşabileceği düşünülmektedir. Ancak bu kırılmaların deneyin iptal edilmesini gerektirecek kırılmalar olmadığı kanaatine varılmıştır. Çünkü kırılmalar belirli bir makaslama yer değiştirmesinden sonra gerçekleşmekte ve bu yer değiştirmeye ulaşana kadar örnek doruk makaslama gerilmelerine maruz kalmaktadır. Ek olarak, kırılan örneklere ait deneylerde, kırılma öncesi ulaşılan makaslama gerilmelerinin kırılmadan sonra aşılmadığı gözlenmiştir.

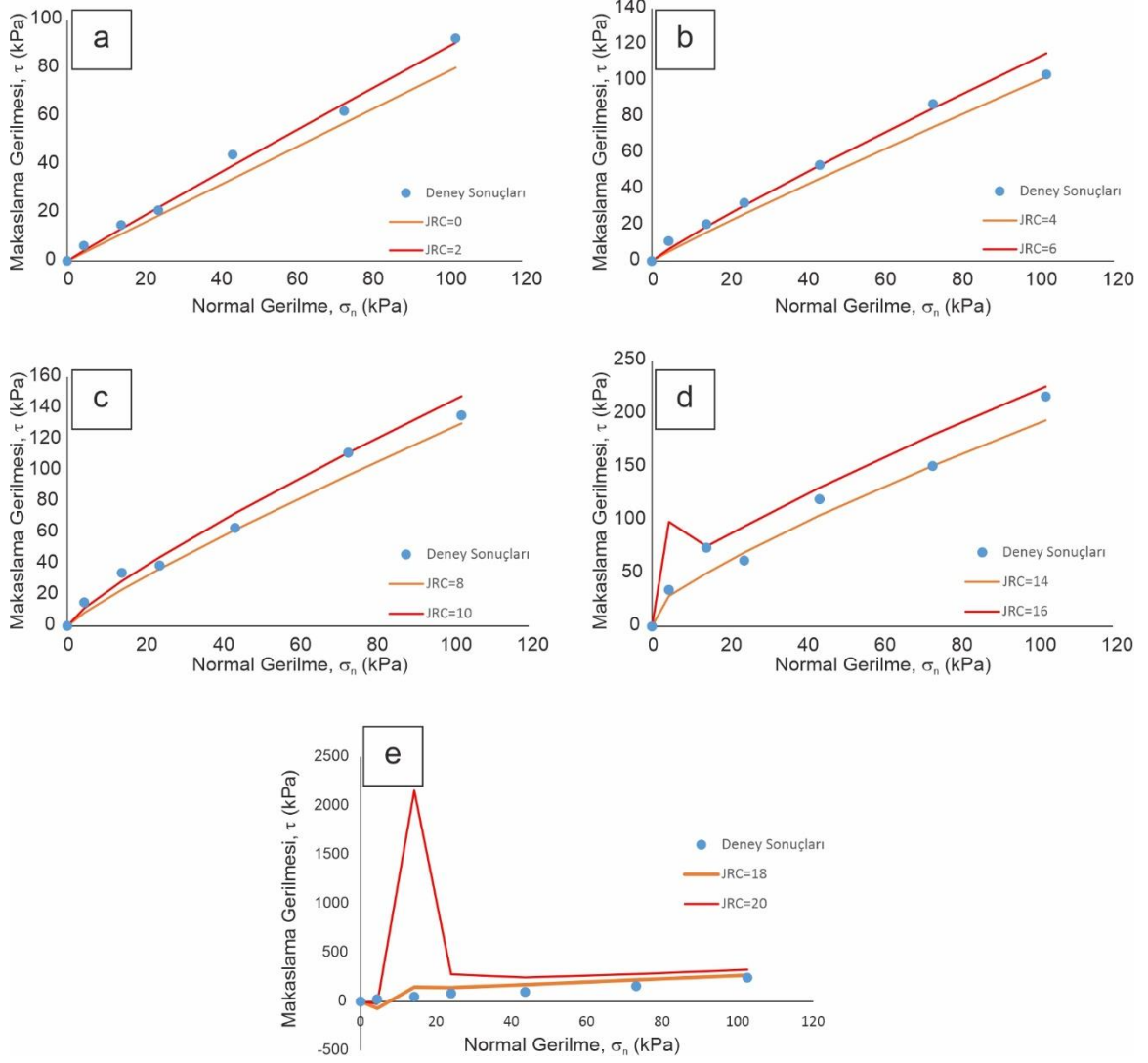
Sayısal analizlerden elde edilen bilgiler ışığında, örnek kalınlıklarına dikkat edilerek makaslama deneylerine devam edilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler ile makaslama yer değiştirmesine ( $\delta$ ) karşılık makaslama gerilmesi ( $\tau$ ) ve dilatasyon ( $d_n$ ) grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler EK-1'de sunulmuştur.

Makaslama deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, deneylerin büyük çoğunluğunda dilatasyon değerlerinin pozitif olduğu görülmektedir. JRC 0-2 profiline sahip örneklerin bir kısmında gözlenen negatif dilatasyona sebep olarak çok düşük genliğe sahip pürüzler gösterilebilir. Başlangıç konumunda birbirine kenetlenmiş olan yüzeyler, ufak makaslama yer değiştirmeleri altında negatif yönde dilatasyon meydana getirmiş olabilirler. Ayrıca deney başlangıcında dilatasyon okumasını

gerçekleştirecek saatin sıfırlanması sırasında meydana gelebilecek hataların da negatif dilatasyon değerlerine sebep olabileceği düşünülmektedir.

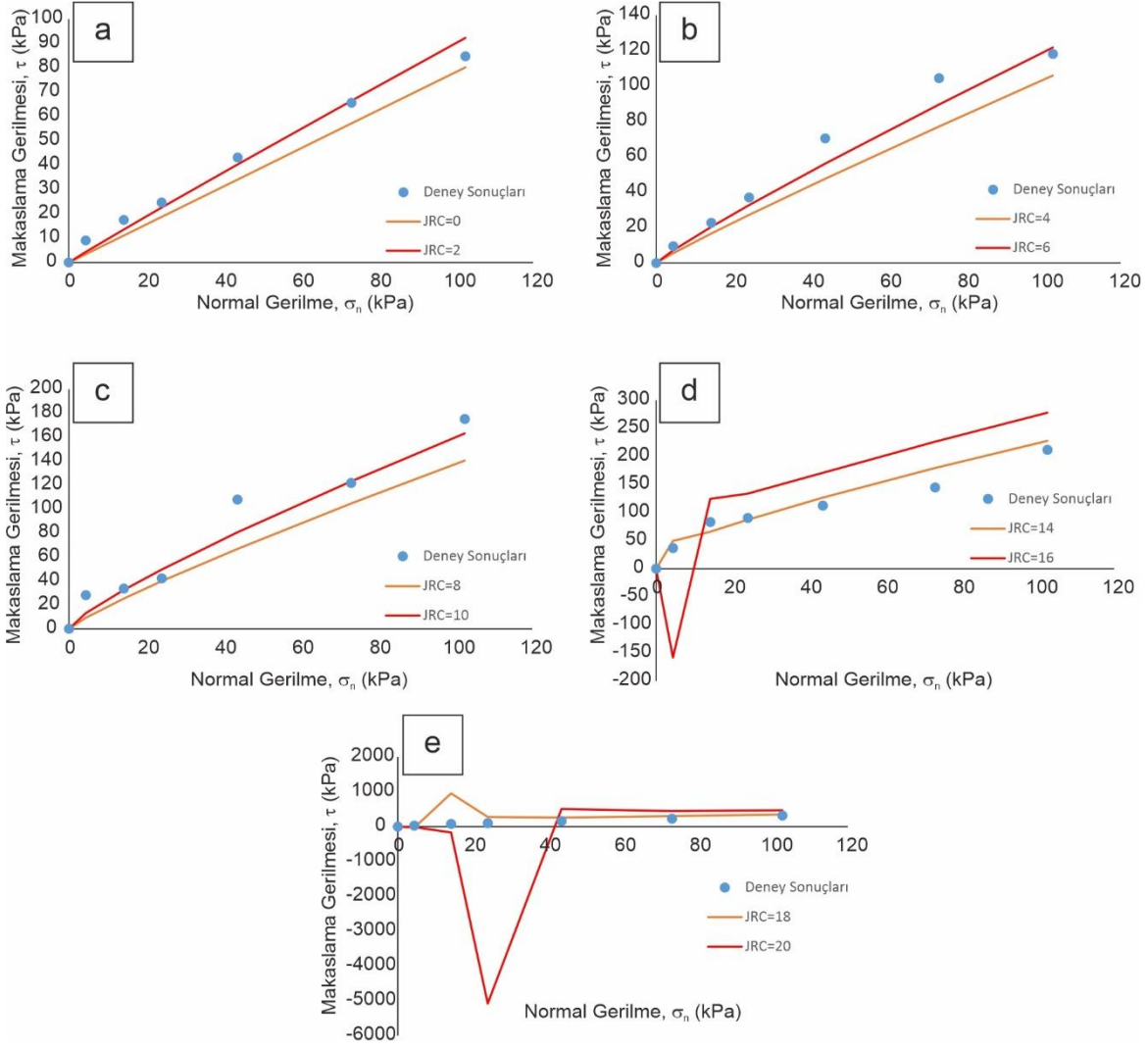
Grafiklerde görülen dilatasyon verileri genel olarak deneyin başlangıcından sonuna doğru devam eden bir artış eğilimi göstermektedir. Örneklerin üst yüzeyleri alt yüzeyler üzerinde yükselmekte ve pozitif dilatasyona sebep olmaktadır. Pürüzlerde meydana gelen kırılmalar dilatasyondaki artışları kesintiye uğratmış olsa bile üst yüzey hem sağlam kalan pürüzlerden kaynaklı hem de kırılan parçaların üzerindeki harekete bağlı olarak pozitif yöndeki dilatasyona devam etmektedir. JRC 4-6 ve 18-20 profile sahip örneklerde yaklaşık 8-10 mm'lik makaslama yer değiştirmeleri sonrasında pozitif yönlü dilatasyon durmakta ya da bir miktar azalmaktadır. Bu durum profillerin yapısından kaynaklanmaktadır. Yaklaşık 10 mm'lik yer değiştirme sonrası, söz konusu profillerde bulunan maksimum genliğe sahip pürüz aşılmakta ve pürüzden aşağı yönde meydana gelen bir yer değiştirmeyle dilatasyon azalmaktadır.

Makaslama gerilmesi eğrilerine bakıldığında, düşük makaslama yer değiştirmeleri sonrasında makaslama gerilmelerinin yükseldiği görülmektedir. Örneklerin maruz kaldığı en yüksek normal gerilmelerde dahi pürüzlerin, makaslama dayanımı üzerinde büyük rol oynadığı görülmektedir. Yüksek pürüzlülüğe sahip örneklerde (JRC 14-16 ve 18-20), makaslama gerilmesi eğrilerinin kırıklı yapıya sahip olduğu dikkat çekmektedir. Pürüzlerin tamamen kırılmamasından veya kırılan pürüzlerin engel oluşturarak makaslama gerilmesini artırmasından kaynaklanan bu durum sonucunda makaslama gerilmesi eğrileri birden çok tepe noktası oluşturabilmektedir. Yenilme zarfları çizilirken makaslama gerilmelerinin doruk noktaya ulaştığı ilk değer hesaba katılmıştır. Uygulanan normal gerilmelere karşılık belirlenen makaslama gerilmeleri ile yenilme zarfları çizilmiştir. 1.07, 1.42, 1.66 ve 2.8 karışım oranına sahip örnekler için çizilen normal gerilme-makaslama gerilmesi grafikleri sırasıyla Şekil 5.24, 5.25, 5.26 ve 5.27'de verilmiştir. Bu grafiklerde üç veri seti bulunmaktadır. Mavi noktalar deney sonuçlarını gösterirken, sarı ve kırmızı çizgiler JRC'nin alt ve üst sınırı için Barton-Bandis kriteri kullanılarak çizilen yenilme zarflarını temsil etmektedir.

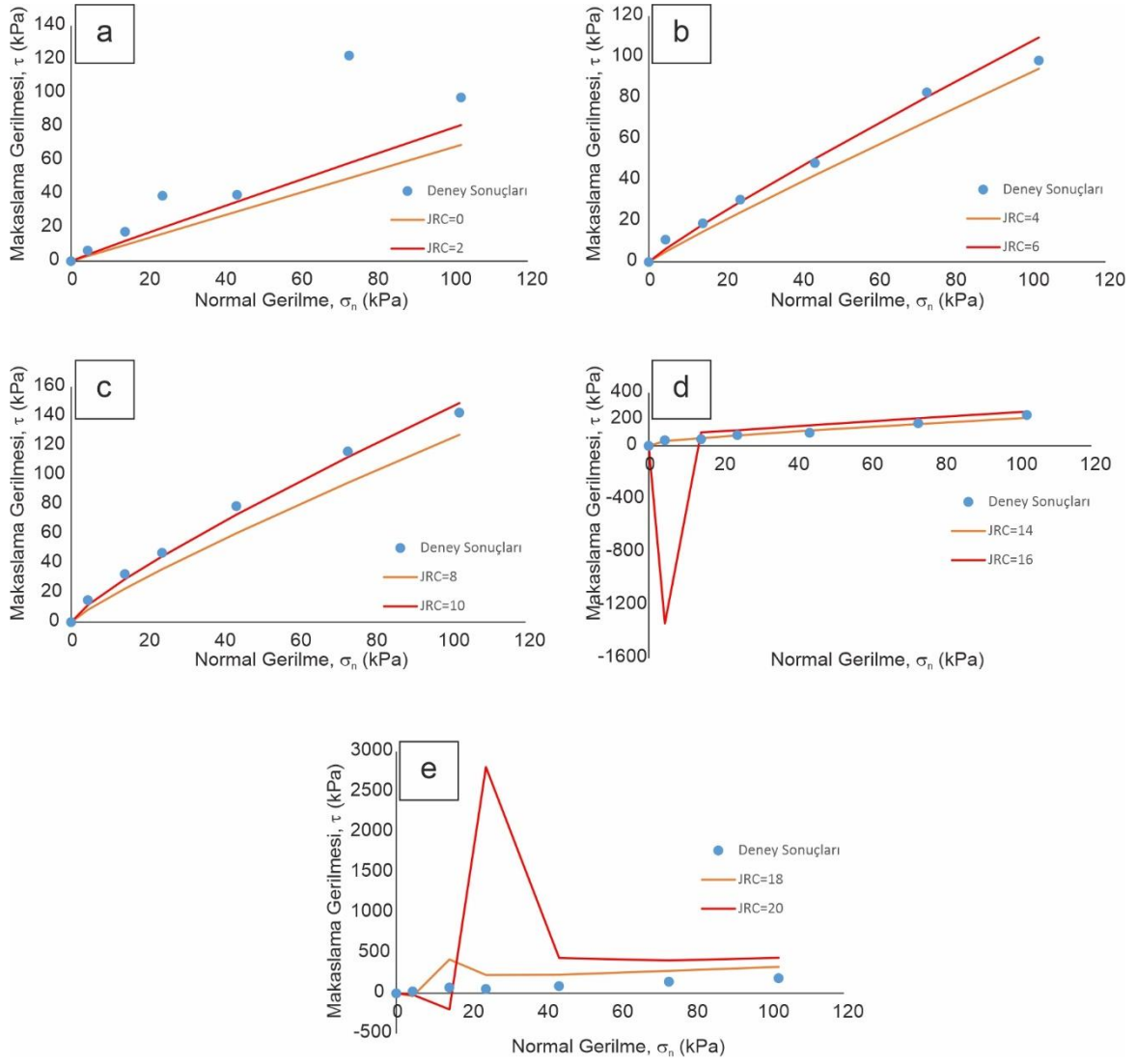


Şekil 5.24: 1.07 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profili değerleri için Barton-Bandis kriteri yardımıyla çizilen teorik yenilme zarfları.

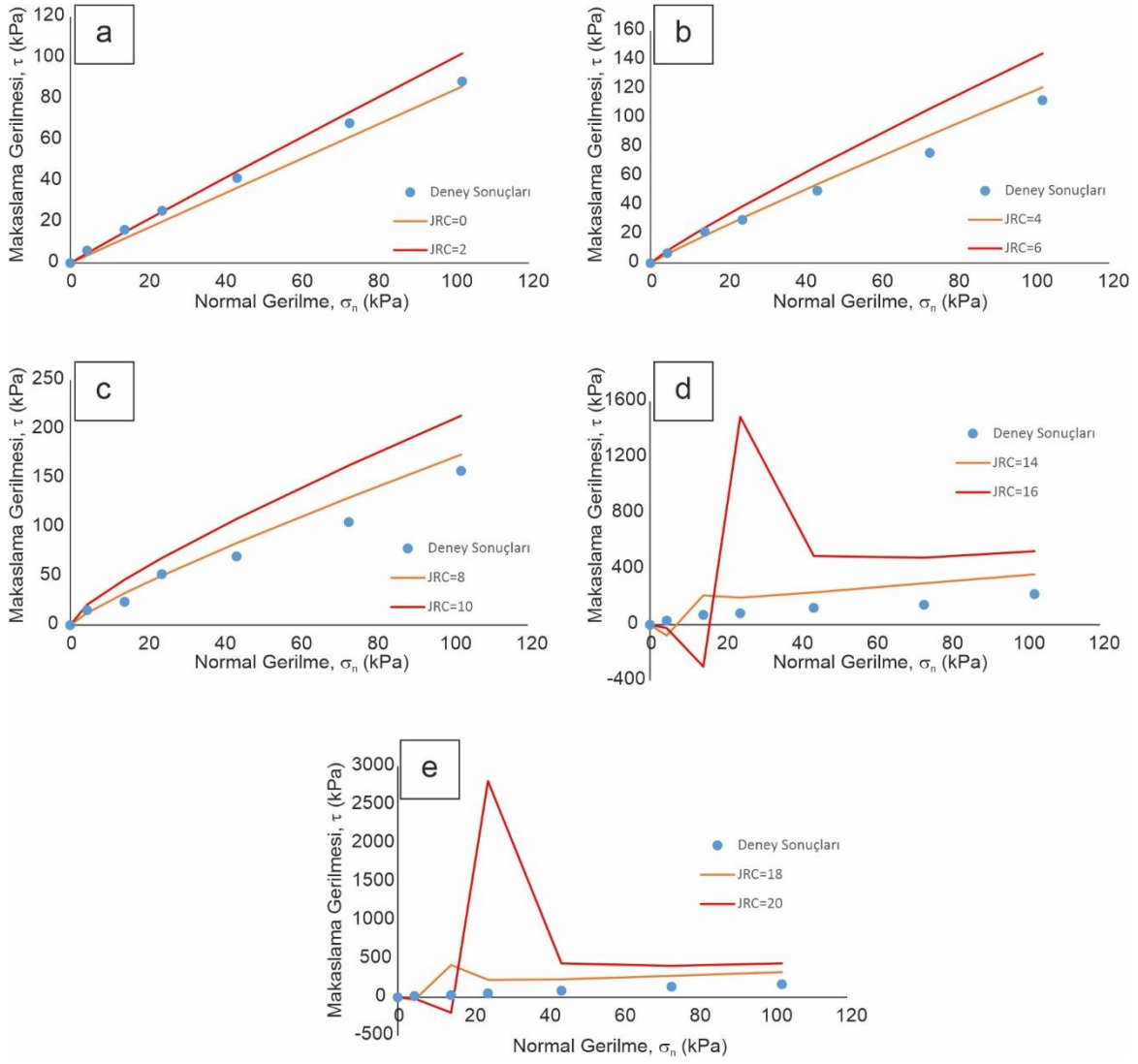




Şekil 5.25: 1.43 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için Barton-Bandis kriteri yardımıyla çizilen teorik yenilme zarfları.



Şekil 5.26: 1.66 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için Barton-Bandis kriteri yardımıyla çizilen teorik yenilme zarfları.



Şekil 5.27: 2.80 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için Barton-Bandis kriteri yardımıyla çizilen teorik yenilme zarfları.

Deney sonuçlarıyla oluşturulan yenilme zarfları ile Barton-Bandis kriteri kullanılarak çizilen yenilme zarfları incelendiğinde, özellikle düşük JRC değerlerinde deneylerden elde edilen sonuçların ölçüt ile büyük ölçüde uyduğu görülmektedir. JRC 0-2, 4-6 ve 8-10 profilleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen yenilme zarfları incelendiğinde, deney sonuçlarının büyük çoğunluğunun deneyde kullanılan JRC profilinin alt ve üst sınırlarına göre çizilen teorik yenilme zarfları arasında kaldığı veya bu zarflara çok yakın şekilde konumlandığı görülmektedir. Ancak JRC 14-16 ve 18-20 profillerine ait sonuçlar incelendiğinde, pürüzlülüğün artmasına bağlı olarak, düşük normal gerilme altında yapılan deney sonuçları ile Barton-Bandis kriteri ile hesaplanan değerlerin uyuşmadığı görülmektedir (bkz. Şekil 5.24, 25, 26 ve 27 (d-e)).

Yenilme zarfları üzerinde yapılan denemeler ile sadece JRC parametresi değiştirilerek düzgün yenilme zarfları elde edilmeye çalışılmıştır. 1.07, 1.43, 1.66 ve 2.80 karışım oranlı örneklerle ait JCS,  $\phi_b$  ve  $\sigma_n$  parametreleri sabit tutulup denemeler gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen karışım oranları için, JRC değerlerinin sırasıyla 14, 13, 12 ve 11 eşik değerlerine kadar Barton-Bandis kriteri ile düzgün eğriselliğe sahip zarfların çizilebildiği görülmüştür. Bu eşik değerleri aşan JRC değerleri kullanıldığında negatif veya çok büyük makaslama dayanımı değerleri elde edildiği görülmüştür. Benzer denemeler JRC, JCS ve  $\sigma_n$  sabit tutulup,  $\phi_b$  değerinin değiştirilmesi ile tekrarlanmıştır.  $\phi_b$  değerinin 20 ile 30 arasında değişen değerleri için eğriselliğin düzgün olduğu zarflar elde edilebilmiştir. Son olarak, JRC, JCS ve  $\phi_b$  sabit tutulup daha yüksek normal gerilmeler uygulandığı senaryo için yenilme zarfları çizilmiştir. Laboratuvar deneylerinde uygulanan normal gerilmelerin on katından büyük normal gerilmelerin uygulanmasıyla zarfların eğriselliğinin düzeldiği görülmüştür. Bu denemeler birlikte değerlendirildiğinde; yapılan değişikliklerin, ölçütün genel formülündeki tanjantı alınması gereken açısız değeri düşürmeye yönelik olduğu görülmektedir. Bu açı değerinin belirli bir eşik değeri aşmaması gerektiği anlaşılmaktadır.

Barton (1973), JCS/ $\sigma_n$  değerinin 100'ün üstünde olduğu durumlarda ölçütün o dönem için önerilmiş olan genel formülünün kullanılamayacağını belirtmiş ve makaslama dayanımının belirlenmesi için farklı bir eşitlik önermiştir (Bkz. Eş. 2.14).

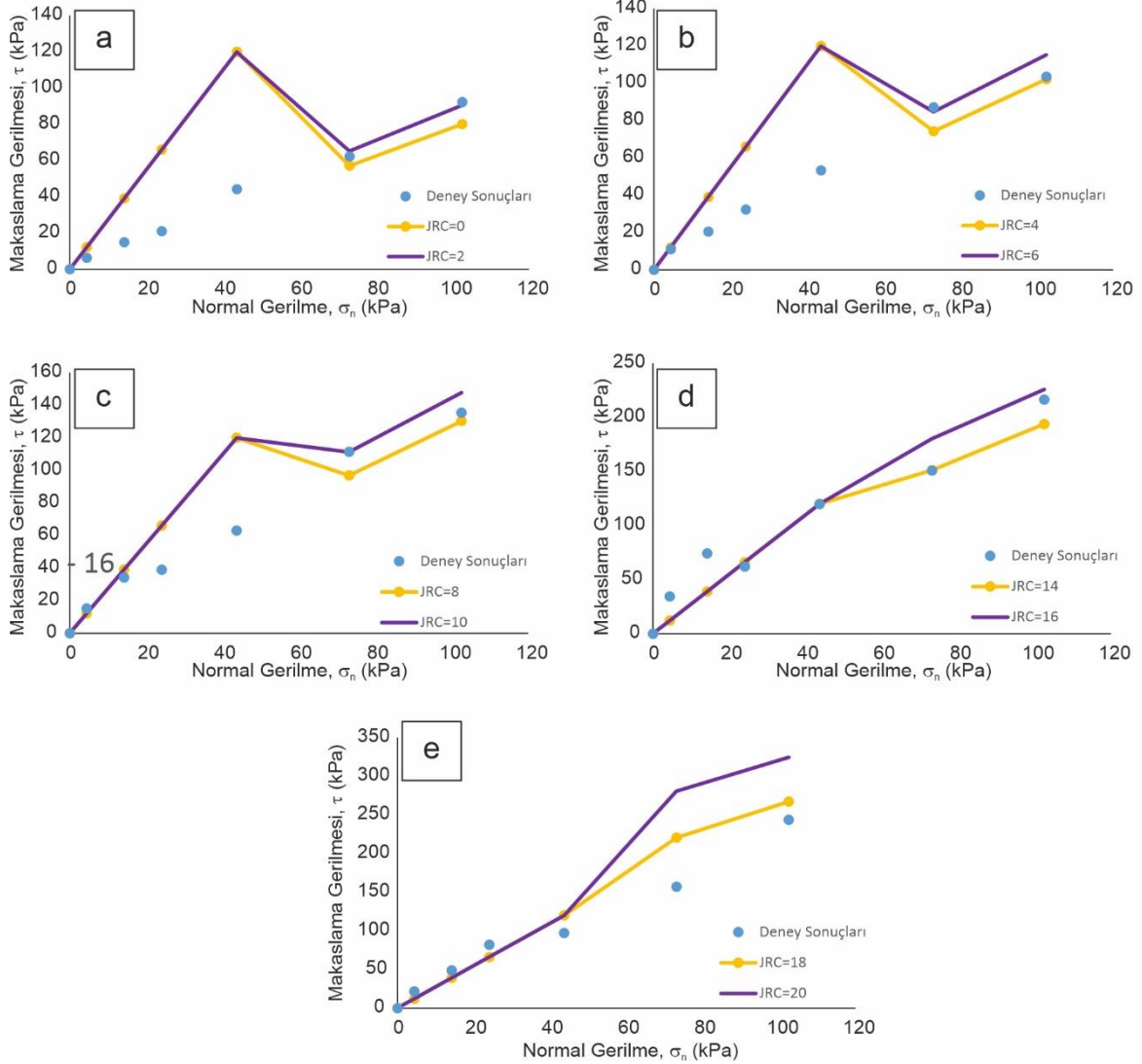
Bu eşitlikte JRC, JCS ve  $\phi_b$  bir girdi parametresi olarak kullanılmamaktadır. Yazarın önerdiği eşitlikte,  $JCS/\sigma_n > 100$  olduğu durum için tanjantı hesaplanacak açılal değerler  $70^\circ$  olarak alınması uygun görülmektedir.  $100 > JCS/\sigma_n \geq 1$  olduğu durumlarda ise ölçüt önerildiği şekilde kullanılabilir. Bu hususlar gözetilerek, Şekil 5.24-27'de verilen yenilme zarfları tekrar çizilmiştir (Şekil 5.28-31). Yeniden çizilen zarflarda,  $70^\circ$  eşik değerine uyan  $JCS/\sigma_n$  değerleri için bu kritere göre hesaplamalar yapılırken, bu eşğin altında kalan değerler için ise ölçütün genel eşitliğine bağlı kalınarak hesaplamalar yapılmıştır. Kullanılan JRC profillerinin alt ve üst değerlerine göre yenilme zarfları çizildiği için,  $JCS/\sigma_n > 100$  olduğu durumlarda  $70^\circ$ 'lik açığa göre çizilen yenilme zarfları JRC'nin alt ve üst sınırları için çakışmaktadır. Çizilen yenilme zarfları,  $100 > JCS/\sigma_n \geq 1$  olduğu durumlarda ölçüte ait genel eşitliğin kullanılmasından kaynaklı olarak birbirinden ayrılmaktadır.

Şekil 5.28 ve 5.29'da verilen grafikler incelendiğinde; JRC'nin 0-2, 4-6 ve 8-10 olduğu durumlarda, yenilme zarflarının  $70^\circ$  eşik değerine uygun olarak çizilen kısımlarının deney sonuçlarından daha yüksek makaslama dayanımı değerleri verdiği görülmektedir. Ölçütün genel eşitliğinin kullanıldığı kısımlarda ise ( $100 > JCS/\sigma_n \geq 1$ ) çizilen yenilme zarflarının deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

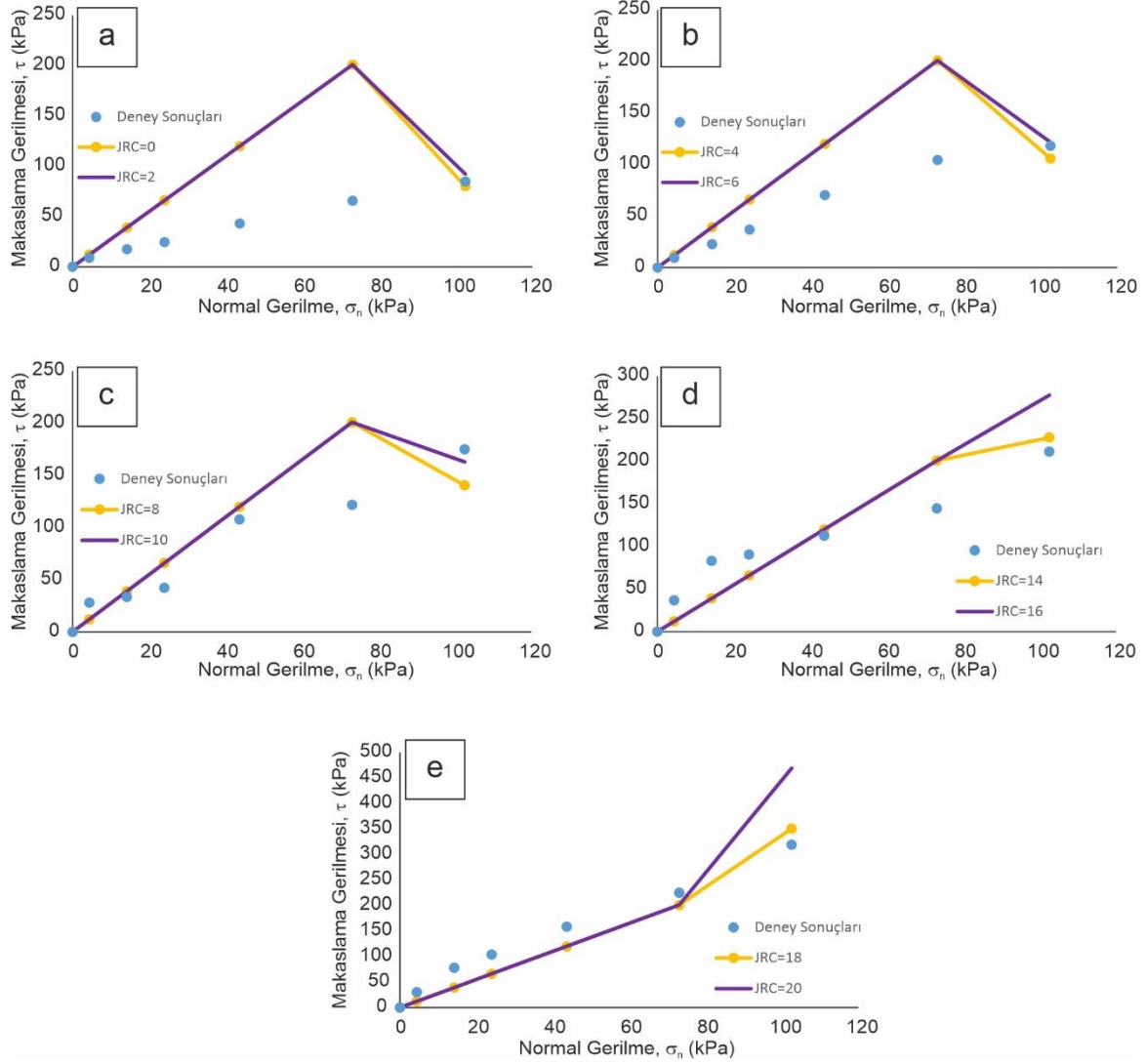
Şekil 5.30 ve 5.31'deki grafikler incelenirse JCS değerinin artmasıyla  $JCS/\sigma_n$  oranının 100'ün üstüne çıktığı görülecektir. Bu nedenle, söz konusu grafiklerdeki bütün yenilme zarfları  $70^\circ$  eşik değerine göre çizilmiştir. Barton-Bandis kriteri genel eşitliği itibarıyla eğrisel bir yenilme zarfı sunarken; 1.66 ve 2.80 karışım oranlı örnekler için  $70^\circ$  eşik değerine göre çizilen yenilme zarfları doğrusal bir karaktere sahiptir. Doğrusal yenilme zarflarının da deney sonuçlarının üzerinde değerler verdiği görülmektedir.

JRC'nin 0-2, 4-6 ve 8-10 değerleri için çizilen yenilme zarfları (Şekil 5.24-27a, b ve c) ile Şekil 5.28-31a, b ve c'de verilen zarflar karşılaştırıldığında;  $70^\circ$  eşik açıl düzeltmesine rağmen, ölçütün genel eşitliği ile hesaplanmış yani düzeltme yapılmamış zarfların deney sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu görülmektedir. JRC'nin 14-16 ve 18-20 olduğu değerler için ölçüte ait genel eşitlik ile çizilen yenilme

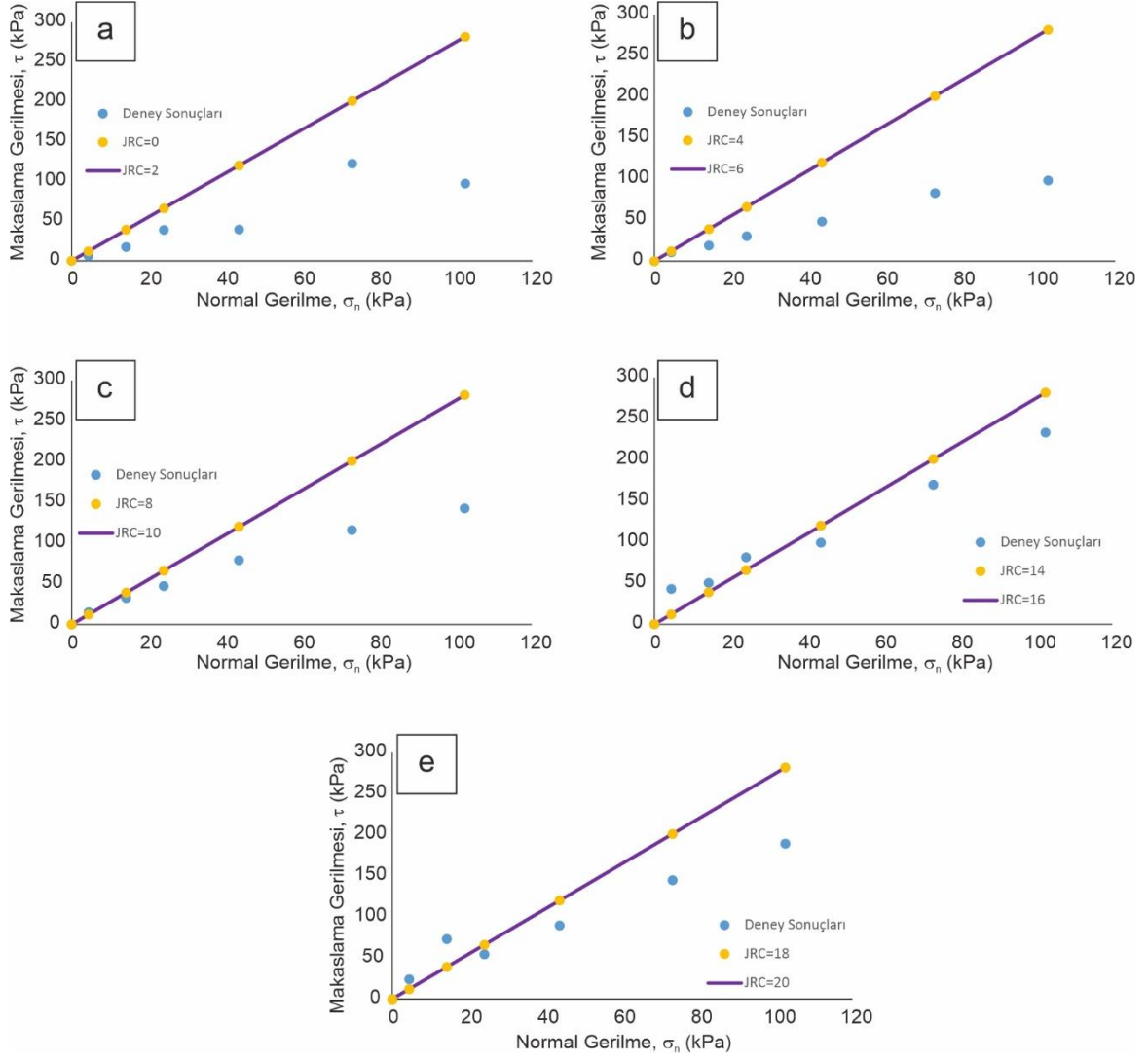
zarflarının (Şekil 5.24-27d, e) düşük normal gerilme seviyelerindeki deney sonuçları ile uyumlu sonuçlar vermediğinden söz edilmişti. Önerilen 70° eşik değerinin de deney sonuçlarına uygun sonuçların elde edilmesinde çözüm olarak kullanılmayacağı görülmüştür.



Şekil 5.28: 1.07 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için JCS/ $\sigma_n$  oranına bağlı olarak yeniden çizilen teorik yenilme zarfları.

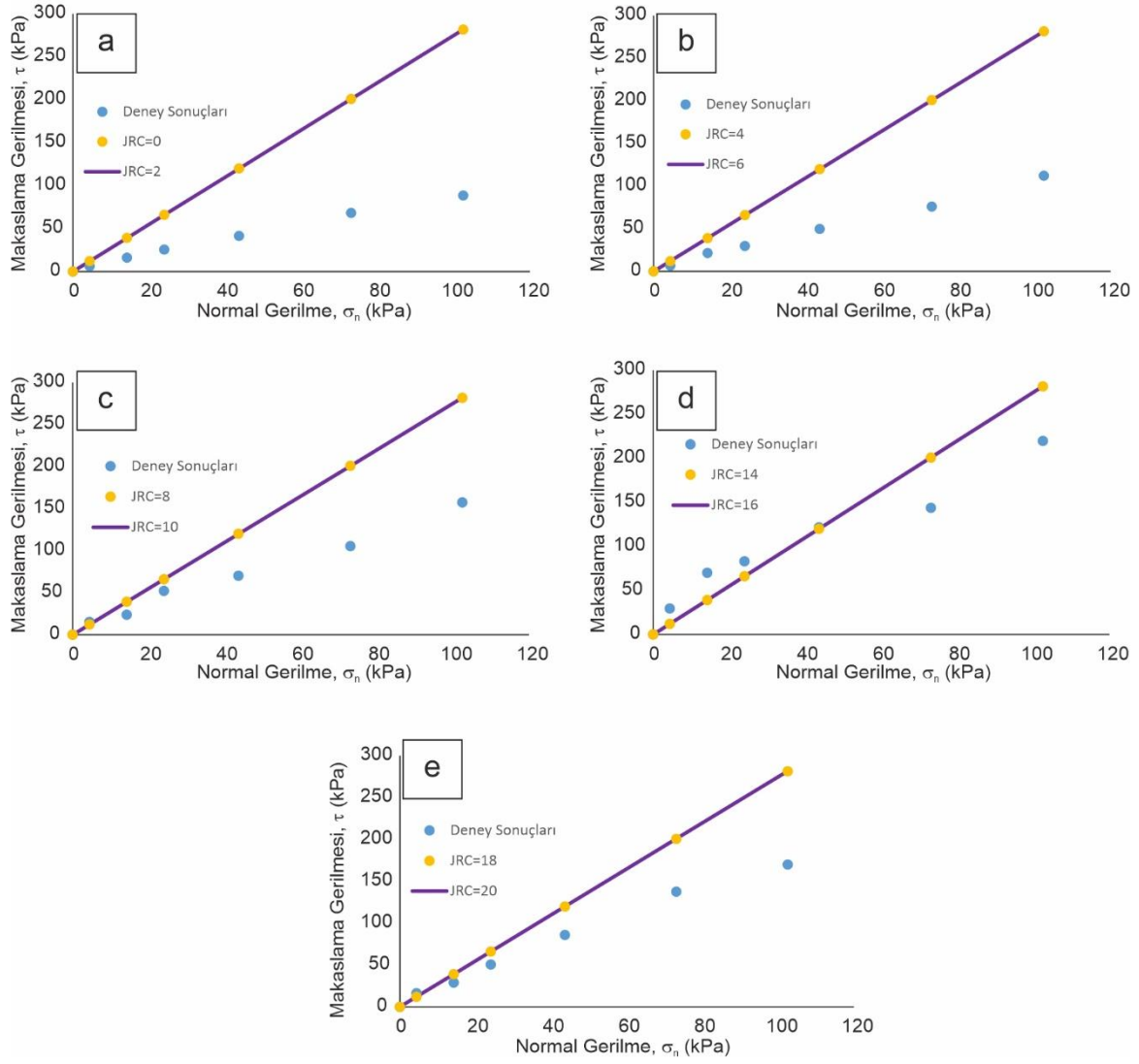


Şekil 5.29: 1.43 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için  $JCS/\sigma_n$  oranına bağlı olarak yeniden çizilen teorik yenilme zarfları.



Şekil 5.30: 1.66 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için  $JCS/\sigma_n$  oranına bağlı olarak yeniden çizilen teorik yenilme zarfları.





Şekil 5.31: 2.80 karışım oranlı örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleri sonucu elde edilen yenilme zarfları ile deney yapılan JRC profilinin alt ve üst değerleri için  $JCS/\sigma_n$  oranına bağlı olarak yeniden çizilen teorik yenilme zarfları.

70° eşik açısı değerinin, ölçüt ile hesaplanan çok yüksek veya negatif makaslama dayanımı değerlerinin önüne geçtiği görülmektedir. Ancak bu durum, söz konusu eşik değeri uygulamasının çok kaba bir yaklaşım olduğu gerçeğini de değiştirmemektedir. 70° eşik açısı yaklaşımıyla, ölçüt ile hesaplanan ve tutarsız denebilecek birkaç sonuç ortadan kalkmakta; ancak buna karşın ölçütün deney sonuçlarına uyumlu olarak hesapladığı birçok değer de deney sonuçları ile olan uyumunu yitirmektedir. Tutarsız sonuçların önüne geçilebilmesi adına bir eşik değeri uygulamanın doğru olduğu görülmektedir. Ancak bu eşik değeri Barton (1973) tarafından önerilen 70°'den daha farklı bir açı değeri olması gerektiğini düşünülmektedir.

Eşik açısı değerinin belirlenebilmesi için 2.8 karışım oranlı örneklerle ait JRC ve  $\phi_b$  değerleri kullanılmış ve farklı normal gerilmeler için makaslama dayanım değerleri hesaplanmıştır. En düşük normal gerilme olarak 1 kPa alınmıştır ve normal gerilme birer birer arttırılmıştır. JRC'nin 10 olduğu değere kadar normal gerilmenin artmasıyla birlikte makaslama gerilmesi de artmaktadır. Bu durumun aksi ilk bulgu JRC'nin 11 değeri ile başlamaktadır.  $\sigma_n$  1 kPa iken elde edilen makaslama gerilmesi,  $\sigma_n$  2 kPa iken elde edilen makaslama gerilmesinden fazladır. 2 kPa'dan sonraki  $\sigma_n$  artışları ile birlikte makaslama gerilmesi de artmaktadır. JRC'nin 12 olduğu durumda;  $\sigma_n$ 'in 1 kPa değeri için negatif makaslama dayanımı elde edilirken  $\sigma_n$ 'in 2, 3 ve 4 kPa değerleri için makaslama dayanımı azalmakta ve 5 kPa  $\sigma_n$  değerinden itibaren makaslama dayanımı normal gerilme artışı ile birlikte artmaktadır. Benzeri durumlar JRC'nin 20 olduğu değere kadar katlanarak devam etmektedir. Bu durumu özetlemek adına Çizelge 5.14 oluşturulmuştur. Bu çizelgede  $\tau$  (kPa) < 0 sütunu negatif makaslama dayanımından pozitif makaslama dayanımına geçilen normal gerilme seviyesini belirtmektedir. Hücre içinde yazılan normal gerilme negatif makaslama dayanımı veren son normal gerilmeyi ifade etmektedir. Bu normal gerilme değerinden itibaren pozitif makaslama dayanımı değerleri elde edilmektedir. Ancak normal gerilmenin artması ile makaslama dayanımı azalmaktadır. Bir başka deyişle,  $\tau$  (kPa) < 0 ile  $\tau$  (kPa) > 0 sütunlarında yazan normal gerilme seviyeleri arasında pozitif ve azalan makaslama dayanımları elde edilmektedir. Bu azalmanın bittiği seviyeyi  $\tau$  (kPa) > 0 sütununda yazan normal gerilme seviyesi göstermektedir. Bu sütundan sonra gelen  $\tau$  (kPa) (+) sütununda yazan normal gerilme değeri ile

birlikte makaslama dayanımı artan bir eğilim içine girmektedir ve sonuçlarda bir tutarsızlık görülmektedir.

Çizelge 5.14:Farklı normal gerilme seviyeleri yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenen ve makaslama dayanım değerlerinin en son negatif değer aldığı ( $\tau$  (kPa) < 0), makaslama dayanımının azalma eğiliminin bittiği ( $\tau$  (kPa) > 0) ve makaslama dayanımının artma eğilimine başladığı ( $\tau$  (kPa) (+)) normal gerilme seviyeleri

JCS=28.05 MPa	Değişimin gerçekleştiği normal gerilme seviyeleri ( $\sigma_n$ , kPa)		
JRC	$\tau$ (kPa) < 0	$\tau$ (kPa) > 0	$\tau$ (kPa) (+)
11	-	1	2
12	1	4	5
13	3	10	11
14	7	20	26
15	13	35	36
16	21	57	58
17	32	87	88
18	46	128	129
19	65	180	181
20	93	244	245

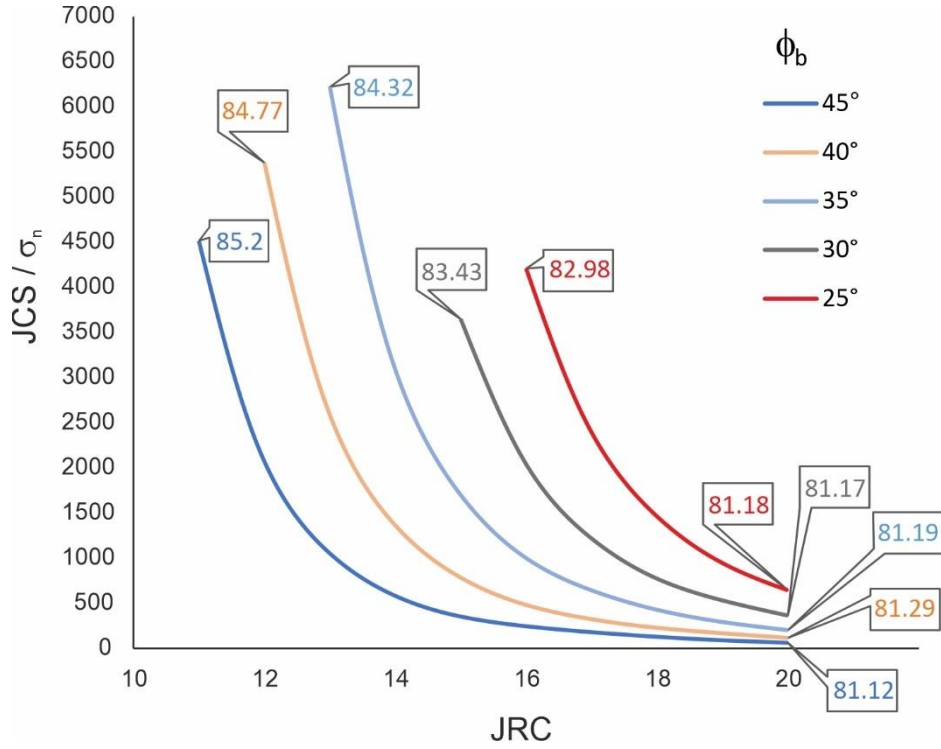
Çizelge 5.14 incelendiğinde; JCS=28.05 MPa olduğu örnekler için JRC değeri arttıkça tutarlı makaslama dayanımı değerlerinin elde edilebilmesi amacıyla yüksek normal gerilmelerin uygulanması gerektiği görülmektedir. Yüksek pürüzlülüğe sahip örneklerde düşük normal gerilmelerin uygulandığı durumlar için makaslama dayanımı belirlenmek istenirse, Barton-Bandis kriterinin bu normal gerilme değerlerinde istenilen sonucu veremeyeceği anlaşılmıştır.

Çizelge 5.14'te verilen normal gerilme değerleri ve JCS değeri kullanılarak JCS/ $\sigma_n$  oranları hesaplanmış ve bu oranlara karşılık gelen açısız eşik değerler belirlenmiştir. Bu işlemler esnasında  $\phi_b$  değeri, 2.8 karışım oranlı örneklere ait açı olan 40° olarak alınmıştır. Barton (1973) tarafından önerilen JCS/ $\sigma_n$ >100 olduğu durumlarda kullanılması önerilen 70° eşik değerinin üzerinde açı değerleri bulunmuştur.  $\phi_b$

değerini değiştirmeden, diğer karışım oranlarına ait JCS değerleri için de bu işlem tekrar edilmiştir (Çizelge 5.15). JCS'nin azalmasının kritik eşik açı değerlerini değiştirmedeği görülmüştür. Çünkü JCS'nin azaldığı oranda Çizelge 5.14'teki tutarsızlığa sebep olan normal gerilme değerleri de azalmaktadır. Bu azalma sonucunda da JCS/ $\sigma_n$  oranı değişmemektedir. Aynı işlemler  $\phi_b$ 'in farklı değerleri için de tekrarlanmış ve sonuçlar grafik halinde sunulmuştur (Şekil 5.32). Grafikte farklı  $\phi_b$  değerleri için eğriler bulunmaktadır. 11 ile 20 arasında değişen JRC seviyeleri için en yüksek ve en düşük eşik açı değerleri verilmiştir. Bu grafikten anlaşılacağı üzere, Barton (1973) tarafından önerilen 70° eşik açı değerinden daha yüksek ve farklı durumlar altında değişen eşik açıların var olduğu görülmektedir. Şekil 5.32'de çizilmiş olan grafik JCS=28.05 MPa değeri için çizilmiş olsa da önceden bahsedildiği gibi JCS/ $\sigma_n$  oranları değişmeyeceğinden ötürü farklı JCS değerleri için de geçerliliğini koruyacaktır. Bu sebeple  $\phi_b$  değerindeki değişimin eşik açı değeri üzerindeki etkisi JCS'den fazladır. Ayrıca grafikten de görüleceği üzere, JRC arttıkça eşik açı değeri azalmakta ve mevcut değişkenler ışığında yaklaşık olarak 81° değeriyle en düşük değeri almaktadır.

Çizelge 5.15:Farklı JCS ve JRC değerleri kullanılarak belirlenen kritik JCS/ $\sigma_n$  oranı ile buna bağlı olarak belirlenen eşik açı değerleri ( $\phi_b=40^\circ$ ).

JRC	JCS							
	28.05 MPa		14.33 MPa		9.87 MPa		5.42 MPa	
	JCS/ $\sigma_n$	Açı (°)	JCS/ $\sigma_n$	Açı (°)	JCS/ $\sigma_n$	Açı (°)	JCS/ $\sigma_n$	Açı (°)
11	-	-	-	-	-	-	-	-
12	5378	84.77°	-	-	-	-	-	-
13	2560	84.31°	2560	84.31°	2560	84.31°	2560	84.31°
14	1360	83.87°	1360	83.87°	1360	83.87°	1360	83.87°
15	786	83.43°	786	83.43°	786	83.43°	786	83.43°
16	486	82.99°	486	82.99°	486	82.99°	486	82.99°
17	318	82.54°	318	82.54°	318	82.54°	318	82.54°
18	218	82.09°	218	82.09°	218	82.09°	218	82.09°
19	156	81.67°	156	81.67°	156	81.67°	156	81.67°
20	116	81.29°	116	81.29°	116	81.29°	116	81.29°

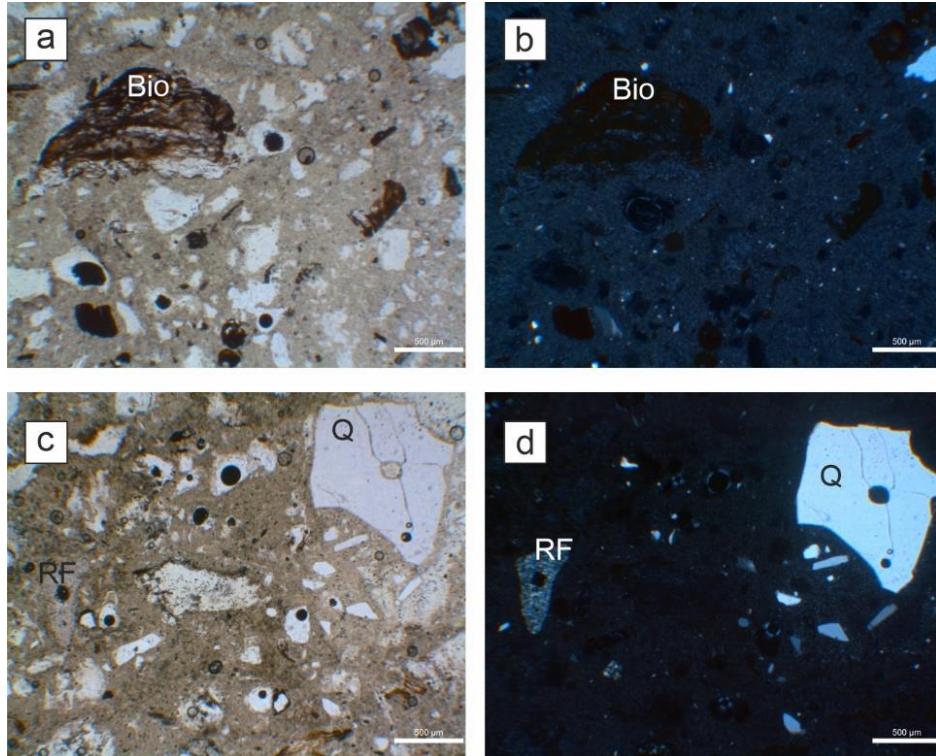


Şekil 5.32: Farklı  $\phi_b$  değerleri için hazırlanmış, JRC'nin değişimine bağlı olarak eşik açısı değerlerini veren kritik JCS/ $\sigma_n$  değerlerini gösteren grafik.

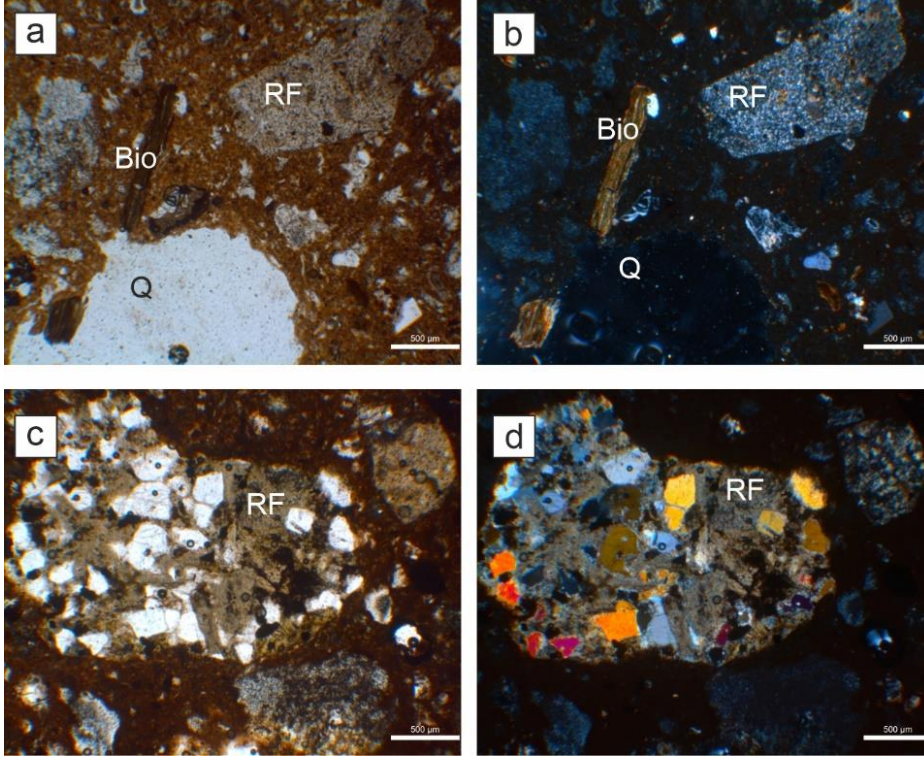
## 5.2. Doğal Örnekler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Yapay örnekler üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçları tasdik etmesi ve doğa koşullarında veya mühendislik projelerinde karşılaşılan sorunları irdelemesi amacıyla doğal örnekler üzerinde de benzer çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Alçı örneklerinde olduğu gibi düşük dayanıma sahip kaya örnekleri araştırılmış ve doğal yapı taşı olarak da kullanılan ignimbirit örnekleri seçilmiştir. Ticari adları sarı, vişne ve bej olarak geçen ignimbiritler Nevşehir bölgesindeki bir taş ocağından 60cm x 28cm x 14cm (UxGxY) ebatlarındaki bloklar halinde temin edilmiştir. Orta Anadolu Volkanik Bölgesi'nde yer alan piroklastik akıntı birimlerinden olan örnekler, Ürgüp formasyonu altında bulunan Kavak üyesine aittir. Birim Pasquare (1968) tarafından adlandırılmıştır ve yaşı Miyosendir (Innocenti ve ark., 1975; Temel, 1992). İgnimbiritlere ait mineralojik incelemenin yapılabilmesi adına ince kesitler alınmıştır (Şekil 5.33, 34 ve 35). Örneklerden alınan ince kesitler incelendiğinde kayaçların porfirik dokuya sahip olduğu görülmüştür. Bej renkli ignimbiritlerde özşekilsiz kuvars ve biyotit mineralleri gözlenirken az miktarda kayaç parçasına rastlanmıştır. Yer yer parçalanmış ve polisentetik ikizlenme göstermeyen plajiyoklazlar ile karşılaşılmıştır.

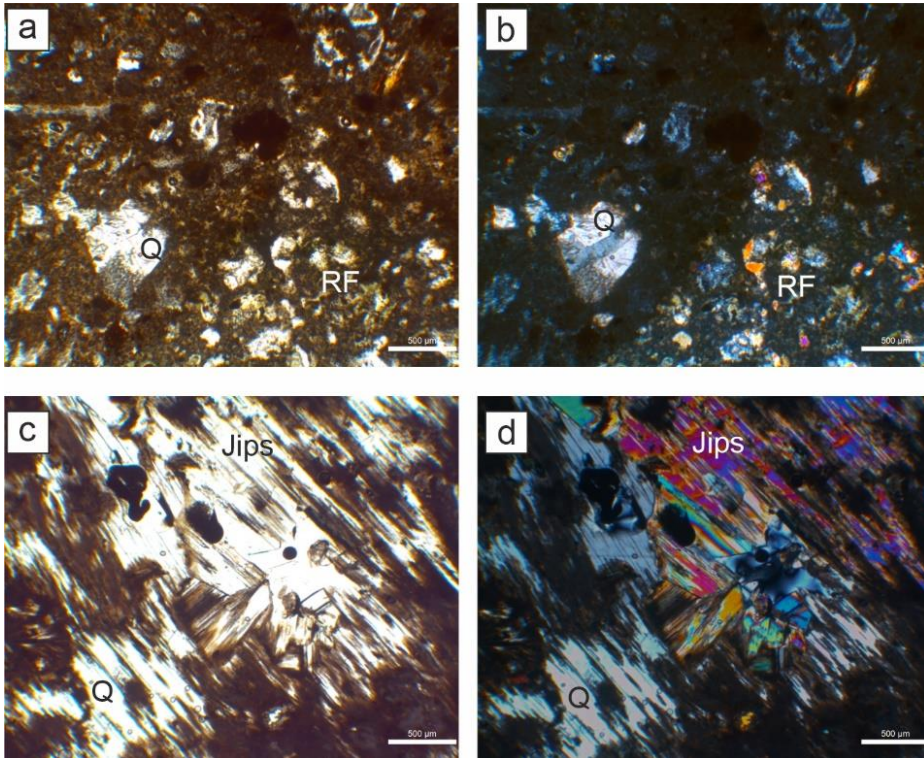
Kesit genelinde hamurun baskın olduğu görülmüştür (Şekil 5.33). Vişne renkli ignimbiritlerde ağırlıklı olarak kayaç parçaları gözlenmektedir. Hamur içinde mikritik kalsitler görülmüştür. Plajiyoklazlarda ileri derecede bozunma izlenirken, biyotitlerde opasitleşmeye rastlanmıştır. Kuvarslar çoğunlukla kayaç parçaları içinde izlenmiştir. Feldispatların kalsitleştiği görülmüştür (Şekil 5.34). Sarı renkli ignimbiritlere ait ince kesitlerde jipslere rastlanmıştır. Bunların arasında kuvarslar görülmüştür. Yer yer kayaç parçaları izlenmiştir. Biyotitler bozunmuş olarak gözlenirken, feldispatlardaki bozunmadan kaynaklı olarak killeşme görülmüştür. Hamur içerisinde yer yer kuvars parçaları görülmüştür. İgnimbiritlerin kimyasal bileşiminin belirlenmesi amacıyla yapılan analizlere ilişkin sonuçlar Çizelge 5.16'da verilmiştir. Kimyasal analiz sonucu elde edilen SiO<sub>2</sub> içeriklerinin %68.36 ile %71.46 arasında değiştiği görülmektedir. Diğer ana oksitler de birbirine yakın değerler almaktadır. Kavak üyesi içinde gözlenen renk farklılıklarının Fe ve K değerlerindeki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir (Koralay ve Kadioğlu, 2008).



Şekil 5.33: Bej renkli ignimbiritlerden alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol görüntüleri (Bio: biyotit, Q: kuvars, RF: kayaç parçası).



Şekil 5.34: Vişne renkli ignimbritlerden alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol görüntüleri (Bio: biyotit, Q: kuvars, RF: kayaç parçası).



Şekil 5.35: Sarı renkli ignimbritlerden alınan ince kesitlere ait (a ve c) tek nikol ve (b ve d) çift nikol görüntüleri (Q: kuvars, RF: kayaç parçası).

Çizelge 5.16: İgnimbiritlerde gerçekleştirilen kimyasal analizlere ait sonuçlar.

%	Bej	Vişne	Sarı
SiO <sub>2</sub>	71.46	68.95	68.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.09	15.45	15.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.85	2.85	3.15
CaO	2.00	4.70	5.53
MgO	0.00	0.32	0.16
SO <sub>3</sub>	0.20	0.08	0.82
K <sub>2</sub> O	0.18	5.12	2.06
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.08	0.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.09	0.08
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Cl	< 0.001	< 0.001	< 0.001
TiO <sub>2</sub>	< 0.50	< 0.50	< 0.50
LOI	9.13	1.04	4.38

Blok örneklerden, alçılarda yapılan deneylerin aynılarını yapmak amacıyla deney örnekleri hazırlanmıştır. İgnimbiritlere ve deneylerde kullanılacak numunelerinin hazırlanmasına ilişkin fotoğraflara Şekil 5.36'da yer verilmiştir. Sarı, bej ve vişne renkli büyük ignimbirit örnekleri (Şekil 5.36a) daha küçük boyutlu bloklar oluşturulması amacıyla kesilmiştir. Öncelikle büyük bloklar yaklaşık 4 cm kalınlıkta levha olacak şekilde kesilmiş (28cm x 4cm x 14cm) (Şekil 5.36b), daha sonrasında ise bu levhalar ortadan ikiye kesilerek kare örnekler oluşturulmuştur (Şekil 5.36c ve 36d). Bu işlemler sırasında su kullanılmıştır. Islanan örneklerin kurutulması aşamasında örneklere zarar verme ihtimali üzerine fırın kullanılmamış ve kesilen örnekler oda sıcaklığında kurumaması amacıyla istiflenmiştir (Şekil 5.36e). Kesilmiş bloklardan dayanım deneylerinde kullanılmak üzere karot alınması sırasında örneklerde suya bağlı olarak meydana gelebilecek hasarların önüne geçilmesi amacıyla su kullanılmamıştır (Şekil 5.36f). Dayanım deneylerinde kullanılacak örnekler için NX çaplı (54.7 mm) karot örnekleri alınmıştır (Şekil 5.36g). Karotların alt ve üst yüzeyleri dairesel testere ile su kullanılmadan kesilerek düzleştirilmiştir. Ancak bu işlem esnasında karotların alt ve üst yüzeylerinde ufak kopmalar meydana

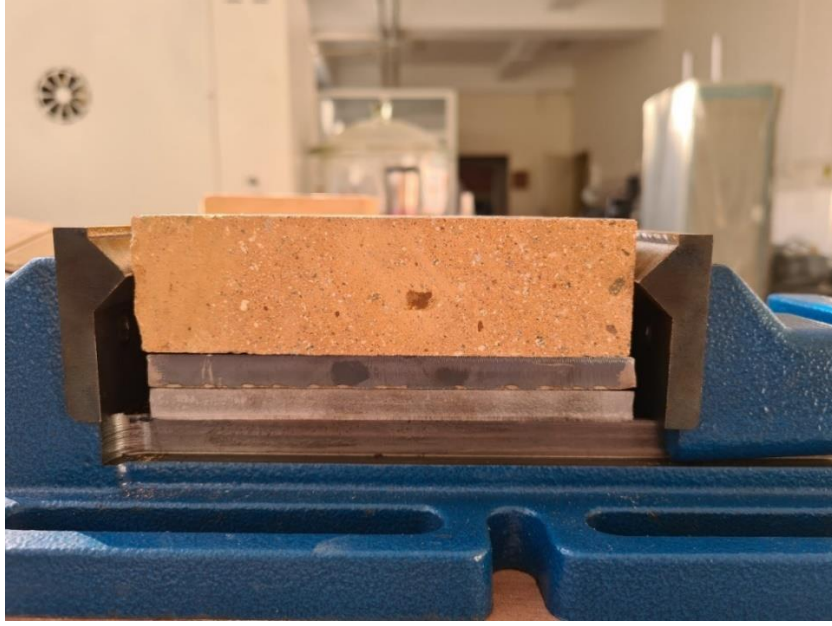


gelmiştir. Düz yüzey elde edilene kadar kesim işlemlerine devam edilmiştir. Karot örnekler üzerinde tek eksenli sıkışma ve çekilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

Makaslama dayanımı deneylerinde yaklaşık kalınlığı 4 cm olacak biçimde kesilen ignimbiritler kullanılacaktır. Alçı örneklerde standart JRC profillerine göre hazırlanan makaslama deneyi örneklerini ignimbiritler için hazırlamak mümkün olmamıştır. Standart profillere uygun örnekler hazırlanamadığı için ignimbirit örneklerinin kırılarak rastgele süreksizlik yüzeylerinin elde edilmesi planlanmıştır. Bu amaçla bir mengene düzeneğinin kullanılması düşünülmüştür. Ancak mingenenin örneği sıkıştırarak standart başlıklarının değiştirilmesi gerekmiştir. Bu başlıklar yerine prizmatik örneğe çizgisel bir hat boyunca geçecek şekilde özel olarak üretilmiş üçgen kesitli kama içeren bir başlığın takılması uygun görülmüştür. Mingenenin karşılıklı başlıkları kapatıldığında kamalar birbirlerinin üstüne gelmektedir ve bu durum kamaların aynı yatay düzlemde olduklarını göstermektedir. Şekil 5.37’de mingenenin başlıkları arasına yerleştirilmiş kare yüzey alanına sahip yaklaşık 4 cm kalınlığa sahip örnek görülmektedir. İgnimbirit bloklarının deney örnekleri haline getirilmesi, gerekli ölçümlerin alınıp analizlerin yapılması ve sonrasında makaslama deneylerinin gerçekleştirilmesi süreci yaklaşık bir yılda tamamlanmıştır.



Şekil 5.36: İgnimbirit bloklarından dayanım ve makaslama deneylerinde kullanılmak üzere örnek hazırlama aşamaları.



Şekil 5.37: Süreksizlik yüzeyi oluşturma amacıyla üretilen başlıklardaki üçgen kesitli kamalar ve düzeneğe yerleştirilen prizmatik kare örnek.

### 5.2.1. Jeomekanik Parametrelerin Belirlenmesi

#### Birim Hacim Ağırlıkların Tayini

Dayanım deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan karot örnekler üzerinde birim hacim ağırlık değerlerinin tayini amacıyla ölçümler yapılmıştır. Örneklerin boy ve çapları belirlenirken, birbirlerine dik iki yönde ölçümler yapılmış ve hesaplama aşamasında bu değerlerin ortalamaları kullanılmıştır. Bu ölçümlere ait sonuçlar Çizelge 5.17’de verilmiştir.

#### Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini

İgnimbiritlerden hazırlanan karotlar üzerinde UCS deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.18’de verilmiştir. Bu deneylerde 50 kN yük kapasitesine sahip bir yük hücresi kullanılmıştır. Boy/çap oranlarının 2’nin üstünde olmasına dikkat edilmiş ve özdeş boyutlara sahip örnekler üzerinde deneyler yapılmıştır (Şekil 5.38).

Çizelge 5.17: İgnimbirit örneklerin boy, çap, ağırlık ölçümleri ve hesaplanan birim hacim ağırlık değerleri.

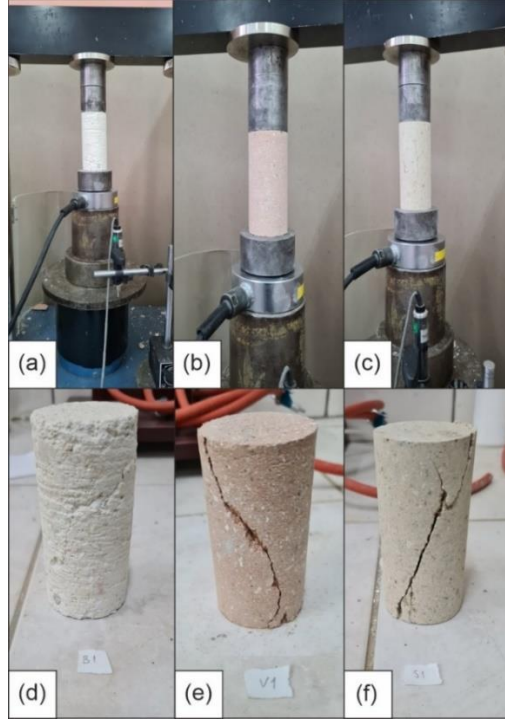
Örnek Türü	Örnek Sayısı	Min. $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Maks. $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Ort. $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Standart Sapma
Bej	10	14.36	14.74	14.5	0.11
Vişne	10	15.23	15.39	15.33	0.05
Sarı	9	16.95	17.14	17.06	0.06

### Schmidt Sertlik Çekici İle Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini

Barton-Bandis kriterindeki girdi parametrelerinden olan JCS değerinin belirlenmesi için ignimbirit örnekleri üzerinde Schmidt çekici deneyi gerçekleştirilmiştir. Schmidt çekici deneyler esnasında düşey düzlemde, aşağı yönde bakacak ve örnek yüzeyine dik olacak şekilde tutulmuştur. Alçı örneklerde olduğu gibi ignimbiritlerdeki birim hacim ağırlık değerleri de abakta verilen alt sınırın (20 kN/m<sup>3</sup>) altındadır. Dolayısıyla abak üzerinden tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesi mümkün değildir. Bu sebeple dayanımın belirlenmesi için Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen eşitlik kullanılmıştır. Schmidt çekici deneyinden elde edilen geri sıçrama değerleri ve bunlara bağlı olarak hesaplanan UCS değerleri Çizelge 5.19'da verilmiştir. Büyük bloklar üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, çekicinin darbesi sonucunda alçı örneklerde görülmüş olan ezilmelere rastlanmamıştır. İgnimbirit örneklerinden Schmidt çekici ile eksiksiz geri sıçrama değerleri elde edilmiştir. Ancak bu çalışmada kullanılan ignimbiritler abakta sunulan en düşük birim hacim ağırlık değerinden daha düşük birim hacim ağırlığa sahiptir. Bu nedenle bu örneklerden Schmidt çekici ile tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesi sakıncalıdır.

Çizelge 5.18: İgnimbiritlerde gerçekleştirilen UCS deneylerine ait sonuçlar.

Örnek Türü	Örnek Sayısı	Min. UCS (MPa)	Maks. UCS (MPa)	Ort. UCS (MPa)	Standart Sapma
Bej	5	1.97	3.24	2.61	0.48
Vişne	4	5.24	7.36	6.36	0.90
Sarı	4	9.44	12.39	11.37	1.34



Şekil 5.38: Bej (a ve d), vişne (b ve e) ve sarı (c ve f) renkli ignimbritlerdeki UCS deneylerine ilişkin fotoğraflar.

### İğne Penetrometresi İle Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Tayini

Düşük dayanımlı yumuşak kayalarda Schmidt çekici kullanımı hatalı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle ignimbritlerde İğne Penetrometresi kullanılarak UCS değerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İgnimbirit örneklerinde gerçekleştirilen İğne Penetrometresi deneylerinde NPI değerleri belirlenmiştir. Bej, vişne ve sarı renkli ignimbritler için NPI değerleri sırasıyla 12.41, 20.99 ve 48.22 olarak bulunmuştur. Belirlenen NPI değerleri farklı araştırmacılar tarafından önerilen eşitliklerde kullanılmış ve bu eşitliklerden hesaplanan UCS değerleri Çizelge 5.20'de verilmiştir. İgnimbritlerdeki NPI değerine karşılık gelen UCS değerlerine ait grafik çizilmiş ve bu değerler arasındaki ilişkiyi gösteren eşitlik türetilmiştir (Şekil 5.39). Türetilen eşitliğin, aynı tür kayalarda çalışan araştırmacıların sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 5.20, 2 ve 4 no'lu araştırmacılar). İğne penetrometresi ile UCS değerleri arasındaki ilişki, kullanılan kaya türlerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ancak benzer kaya türleri üzerinde yapılan çalışmalardan türetilen eşitlikler kullanılarak NPI yardımıyla UCS değeri belirlenebilir.

Çizelge 5.19: İgnimbiritler üzerinde gerçekleştirilen Schmidt çekici deneyinde elde edilen geri sıçrama değerleri ve hesaplanan UCS değerleri.

Okuma No.	Bej	Vişne	Sarı
1	14	20	24
2	14	21	25
3	14	21	25
4	18	21	26
5	14	20	27
6	15	20	24
7	14	22	25
8	16	21	23
9	12	22	25
10	16	21	25
UCS* (MPa)	15.45	19.22	23.85

\* Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen eşitlikten hesaplanmıştır.

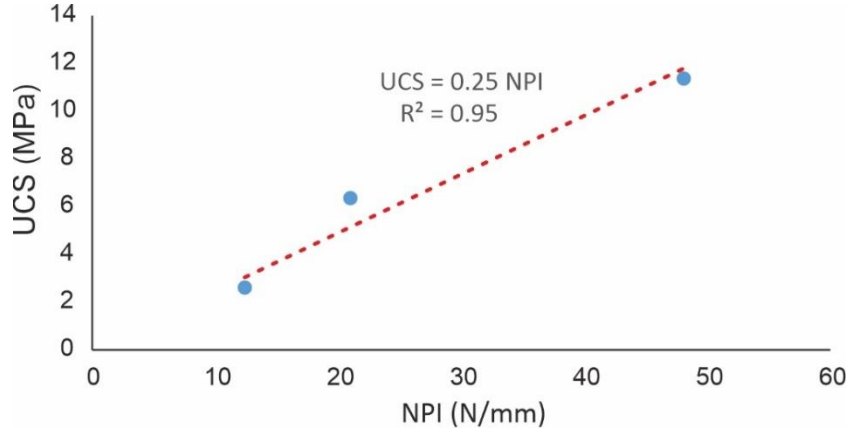
### Brazilian Çekilme Dayanımının Tayini

İgnimbiritlere ait çekilme dayanımının tayini için NX karot çapında ve kalınlığı yarıçapından küçük olmayan örnekler hazırlanmıştır. Örneğin 15-30 saniye arasında yenilmesine sebep olacak bir hızda yükleme yapılmıştır. Düzensiz şekilde kırılan örnekler çıkartılmış ve çekilme dayanımı deneylerinde elde edilen sonuçlar Çizelge 5.21'de verilmiştir.

Çizelge 5.20: İgnimbiritlerde NPI kullanılarak hesaplanan UCS (MPa) değerleri.

Eşitlik	Bej	Vişne	Sarı
$\log UCS = 0.978 \log NPI + 1.599^{(1)}$	4.90	8.20	18.49
$UCS = 0.2 NPI^{(2)}$	2.48	4.20	9.64
$UCS = 0.4 NPI^{0.929^{(3)}}$	4.15	6.76	14.65
$UCS = 0.3 NPI^{(4)}$	3.72	6.30	14.47
$UCS = 0.35 NPI^{(5)}$	4.34	7.35	16.88
$UCS = 0.49 NPI^{(6)}$	6.08	10.29	23.63
<b>Gerçek UCS değerleri (MPa)</b>	<b>2.61</b>	<b>6.36</b>	<b>11.37</b>

(1) Okada ve ark. (1985), (2) Aydan (2012), (3) Ulusay ve Ergüler (2012), (4) Aydan ve Ulusay (2013), (5) Kahraman ve ark. (2017), (6) Rahimi ve ark. (2020).



Şekil 5.39: Bej, vişne ve sarı renkli ignimbiritlerdeki NPI-UCS arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.

Çizelge 5.21:İgnimbiritlerde yapılan Brazilian çekilme dayanımı deneylerine ait sonuçlar.

Örnek Türü	Örnek Sayısı	Min. $\sigma_t$ (MPa)	Maks. $\sigma_t$ (MPa)	Ort. $\sigma_t$ (MPa)	Standart Sapma
Bej	8	0.36	0.58	0.45	0.08
Vişne	8	1.15	1.49	1.31	0.11
Sarı	8	1.47	2.77	2.09	0.53

### 5.2.2. Süreksizlik Yüzeylerinin Hazırlanması

İgnimbiritler üzerinden makaslama dayanımı deneylerinin gerçekleştirilmesi için daha önceden kesilerek kare şeklinde hazırlanmış örnekler kullanılarak rastgele süreksizlik yüzeylerinin oluşturulması planlanmıştır. Şekil 5.37’de gösterilen mengene düzeneği kullanılarak yaklaşık 4 cm kalınlıktaki örneğin ortadan ikiye bölünmesi amaçlanmıştır. Örnek önce mengenenin başlıkları arasına hareket etmeyecek şekilde sabitlenmiş ve tek seferde kırılması amacıyla mengenenin başlıkları sıkıştırılmıştır. Yatay düzlemde karşılıklı olarak konumlanmış kamalar mengenenin sıkıştırılmasıyla birlikte örnek içerisinde çekilme gerilmelerine bağlı olarak bir yenilme düzlemi oluşturmaktadır. Bu işlemin benzeri karşılıklı kesici bıçaklara sahip giyotin benzeri düzenekler kullanılarak da yapılabilir. Literatürde giyotin düzeneğinin kullanıldığı çalışmalara rastlanmıştır. Ancak giyotin düzeneği ile örneğin üzerine normal gerilme uygulanamamaktadır. Farklı pürüzlülüğe sahip yüzeylerin oluşturulması için giyotin düzeneği yerine mengene

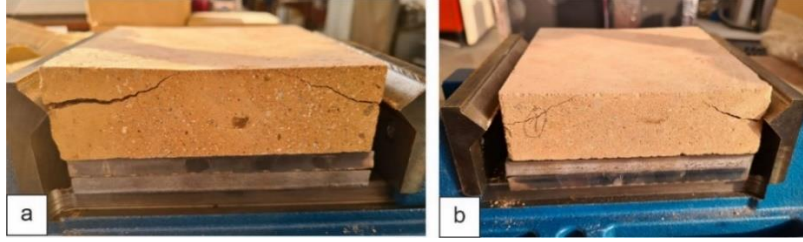
düzeneğinin tercih edilmiştir. Bu işlem ile İlk etapta normal gerilme uygulanmadan, daha sonrasında ise 0.5 MPa ve 1 MPa'lık normal gerilmelerin altında yüzey oluşturulması planlanmıştır.

Normal gerilme uygulamak amacıyla tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde kullanılan 50 ton kapasiteye sahip yükleme ünitesinin kullanılması düşünülmüştür. Ancak yapılan denemeler ünitenin istenilen normal gerilme seviyelerinde yükü sabit tutamadığını göstermiştir. Daha düşük kapasiteye sahip (5 ton) ve nokta yükü dayanım indeksini belirlemede kullanılan düzeneğ ile de denemeler yapılmış ancak bu düzeneğin de yükü sabit tutmada başarısız olduğu görülmüştür. Kaliforniya taşıma gücü oranının (CBR) belirlenmesinde kullanılan deney düzeneğinde yapılan denemelerde, diğer yükleme ünitelerine göre CBR cihazının yükü sabit tutmada daha başarılı olduğu izlenmiştir. Yükleme ünitesi sabit yük altında uzun süre bekledikten basıncını kaybetmekte ve uygulanan yük azalmaktadır. Geçen sürenin örneği kırmak için fazlasıyla yeterli olduğu düşünülmüş ve süreksizlik yüzeyi oluşturmada uygulanacak normal gerilmenin CBR cihazı vasıtasıyla sağlanmasına karar verilmiştir.

İgnimbiritlerden normal gerilme uygulanmadan süreksizlik yüzeyi üretilmesi işlemi sırasında örnekte meydana gelen kırılmalar Şekil 5.40'ta gösterilmiştir. Kamaların örneğe temas ettiği noktalarda kırıklar oluşmaya başlamakta ve örneğin içerisine doğru devam etmektedir. Karşılıklı şekilde gelişen kırıkların örneğin ortasında birleşmesi beklenirken kırık serbest yüzey olan üst kısma doğru ilerlemektedir. Normal gerilmenin uygulanmıyor oluşu bu duruma sebep olarak görülmüş ve örnek üzerine 0.05 MPa'lık normal gerilme uygulanarak kırık oluşturulmaya çalışılmıştır.

Uygulanan 0.05 MPa'lık normal gerilme sonucu oluşan kırıklar Şekil 5.41'de sunulmuştur. Normal gerilme uygulanmasına rağmen oluşan kırık örnek içerisinde karşılıklı kırıkların birleşmesine olanak verecek ölçüde devam etmemiş ve normal gerilmenin uygulandığı üst yüzeye doğru ilerlemiştir. Normal gerilmenin daha da yükseltilmesiyle bu sorunun engellenebileceği düşüncesiyle aynı işlemler 0.5 MPa'lık normal gerilme altında tekrarlanmıştır. Bu işlem sonucu oluşan kırıklar Şekil 5.42'de görülebilmektedir. Normal gerilmenin uygulanmadığı ve 0.05 MPa'lık normal gerilmenin olduğu durumlarda oluşan kırıklara benzer kırıklar 0.5 MPa'lık normal gerilme altında da gelişmiştir.





Şekil 5.40: Normal gerilme uygulanmadan mengene düzeneği yardımıyla süreksizlik yüzeyi oluşturma işleminde meydana gelen kırıklar.

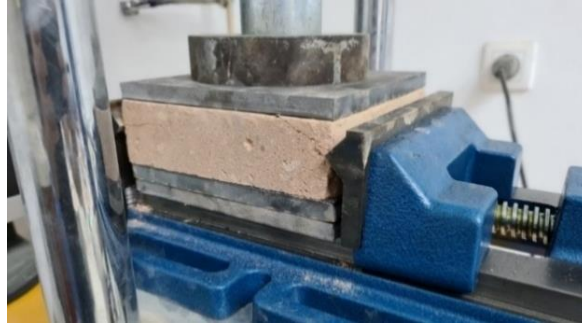
Makaslama deneylerinde kullanılmak üzere 10cm x 10cm ebatlarına sahip örneklerin hazırlanması amacıyla kurulan düzende gelişen kırıklar incelendiğinde, kırıkların örnek boyunca ilerleyemediği görülmektedir. Örnek boyutunun büyük olmasının örnek boyunca istenilen şekilde kırık gelişmesine engel olduğu çıkarımı yapılmıştır. Bu sebeple yatay şekilde konumlandırılan prizmatik örnek dikey şekilde döndürülmüş ve kırılma sonrası oluşacak yüzey alanının azaltılması yoluna gidilmiştir. Bu yolla, kesici başlıklar arasındaki mesafe azalmış, örneğin iki ucundan başlayan kırıkların kısa mesafe kat ettikten sonra birleşmesine olanak tanınmıştır. Normal gerilme uygulamadan yapılan işlem sonucu meydana gelen kırık Şekil 5.43'te sunulmuştur.

Şekil 5.43'te görüldüğü gibi oluşturulan süreksizlik yüzeylerinin genişlikleri daha önceden kesilen kare prizmaların yükseklikleri kadar olmaktadır. Genişlik değerleri 35 mm ile 42 mm arasında değişmektedir. Örnek, süreksizlik yüzeyinin uzunluğu 100 mm olacak şekilde kesilecek ve böylece standart pürüzlülük profillerinin uzunlukları ile uyumlu bir yüzey oluşacaktır. Süreksizlik içeren karot örnekler üzerinde yapılan doğrudan makaslama deneylerinde olduğu gibi, makaslama dayanımının belirlenmesi için yüzey alanı kare olan örnekler dışındaki örneklerin de kullanıldığı bilinmektedir. Muralha ve ark. (2014) kayalardaki süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesinde kullanılacak bir yöntem önermişlerdir ve bu yöntem de ISRM (2015) tarafından önerilen yöntem olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada, makaslama deneylerinde kullanılacak örnek uzunluğunun maksimum süreksizlik genişliğinin 10 katından fazla; örnek genişliğinin ise minimum 48 mm olması gerektiğini belirtmişlerdir. ASTM (1996)'ye göre makaslanacak en düşük yüzey alanının ise minimum 1900 mm<sup>2</sup> olması gerekmektedir. USBR (2009)'ye göre ise makaslanacak alanın minimum 2500 mm<sup>2</sup> olması gerekmektedir. Barton ve

Choubey (1977) makaslama deneylerinde kullanılan örneklere ait fotoğrafları paylaşmışlardır. Bu fotoğraflardan da deney örneklerinin dikdörtgen şekilli olduğu görülmektedir. Tercih edilen yeni yöntem ile 3500 ila 4200 mm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip süreksizliklerin üretilmesi mümkün görünmektedir.



Şekil 5.41: 0.05 MPa'lık normal gerilme altında mengene düzeneği yardımıyla süreksizlik yüzeyi oluşturma işleminde meydana gelen kırıklar.

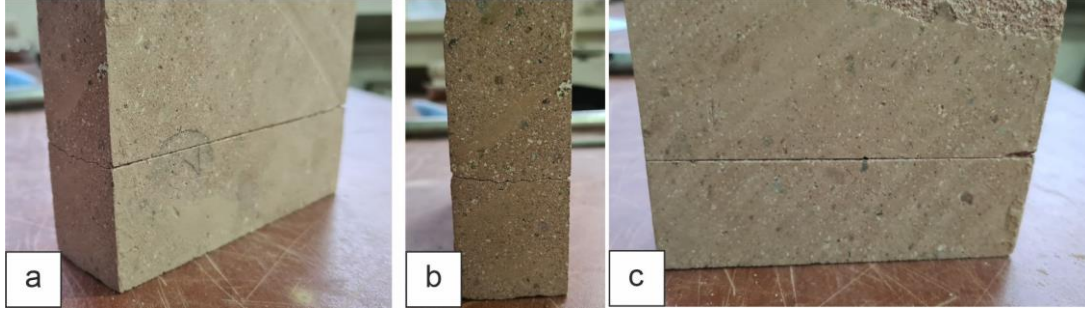


Şekil 5.42: 0.5 MPa'lık normal gerilme altında mengene düzeneği yardımıyla süreksizlik yüzeyi oluşturma işleminde meydana gelen kırıklar.



Şekil 5.43: Normal gerilme uygulanmadan, prizmatik kare örneğin döndürülerek konumlandırılması sonucu mengene düzeneği yardımıyla oluşturulan süreksizlik yüzeyi.

Normal gerilme kullanılmadan sarı ignimbritlerde oluşturulan kırıklara ait fotoğraflar Şekil 5.44'te verilmiştir. Örneğin sertliğinin düşük olmasına bağlı olarak kesici bıçaklar örneğin içine doğru bir miktar batmaktadır (Şekil 5.44b). Bu durum süreksizlik yüzeyinin genişliğini ihmal edilebilecek düzeyde de olsa azaltmaktadır. Hesaplama aşamalarında bu durum göz ardı edilecektir.

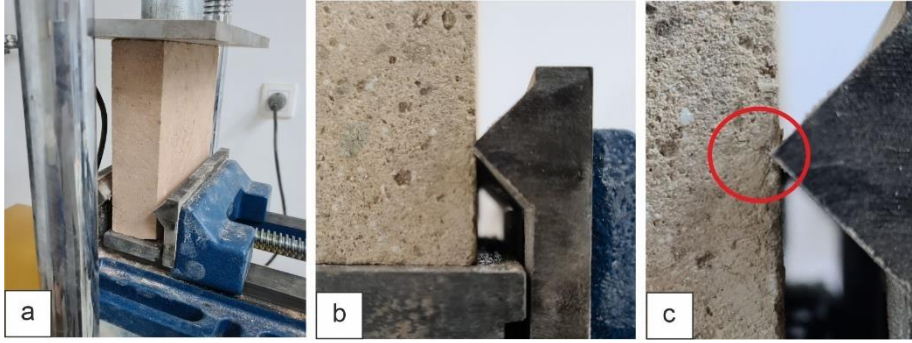


Şekil 5.44: Sarı renkli ignimbritler üzerinde normal gerilme uygulanmadan oluşturulan yapay süreksizlik.

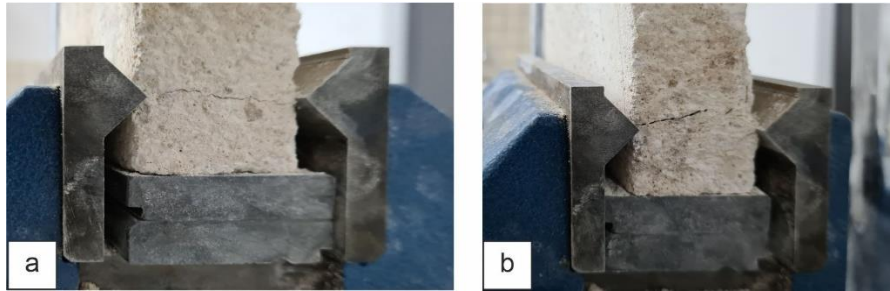
Vişne, sarı ve bej renkli ignimbritler normal gerilme uygulanmadan mengene ile kırılmış ve süreksizlik yüzeyleri oluşturulmuştur. Bu işlemler esnasında izlenen yol, normal gerilmenin 0.5 ve 1 MPa olduğu durumlar için tekrarlanmıştır. Vişne ve sarı renkli ignimbritlerde normal gerilmenin uygulandığı işlemlere ait fotoğraflar Şekil 5.45'te verilmiştir. Bu şekilde sarı renkli ignimbritte kesici başlıktan kaynaklı olarak oluşan kırık başlangıcı da görülebilmektedir (Şekil 5.45c). Bej renkli ignimbritlere göre daha dayanımlı olan vişne ve sarı renkli ignimbritlere 0.5 ve 1 MPa'lık normal gerilmeler uygulanarak süreksizlik yüzeyleri oluşturulabilmiştir. Bej renkli örnekler üzerinde de 0.5 MPa normal gerilme uygulanması ile süreksizlik yüzeyleri üretilmiştir (Şekil 5.46). Ancak uygulanan normal gerilme 1 MPa seviyesine yükseltildiğinde kesici başlıklar arasında bir kırık meydana gelmeden önce, kesici başlıklara dik yönde kırıklar meydana gelmektedir. Bu duruma ait fotoğraflar Şekil 5.47'de verilmiştir.

Bej renkli ignimbritlerde 1 MPa'lık normal gerilme altında süreksizlik yüzeyleri oluşturma işlemi başarılı olamamıştır. 1 MPa normal gerilmeye bağlı yüzey üretilmesi işlemi iptal edildikten sonra bej renkli örneklerde normal gerilmenin 0 ve 0.5 MPa olduğu durumlar için süreksizlik yüzeyleri üretilmesi planlanmıştır. 0.5 MPa normal gerilme altında yapılan yüzey oluşturma işlemlerinde ise süreksizliğe sebep

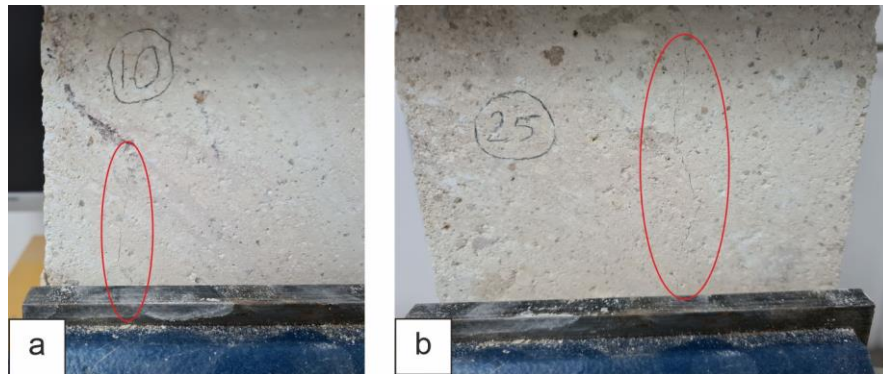
olacak kırık oluşmuş ancak sonraki aşamalarda oluşan düşey yönlü kırıklara bağlı olarak örnekler parçalanmıştır (Şekil 5.48). Bu nedenle bej renkli ignimbiritlerde süreksizlik yüzeyleri yalnızca normal gerilme uygulanmadan oluşturulabilmiştir. Vişne ve sarı renkli ignimbiritlerde ise normal gerilmenin 0, 0.5 ve 1 MPa olduğu durumlar için süreksizlik yüzeyleri oluşturulmuştur. Oluşturulan süreksizlik yüzeylerine ait örnekler Şekil 5.49'da verilmiştir.



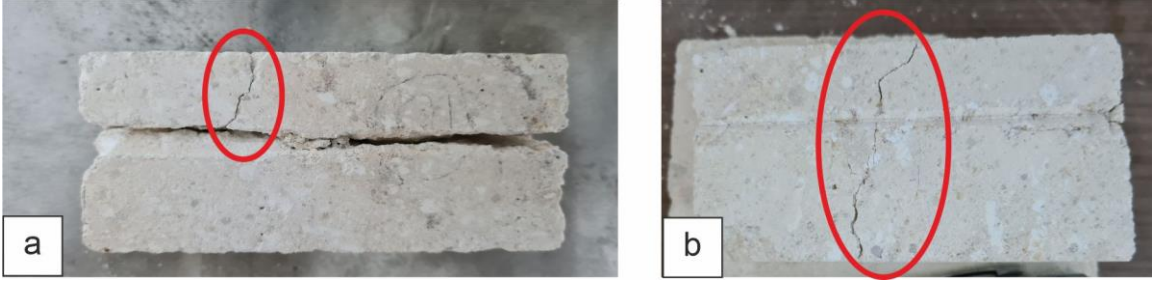
Şekil 5.45: Vişne ve sarı ignimbiritler üzerinde normal gerilme uygulanarak yapay süreksizlik oluşturma aşamaları.



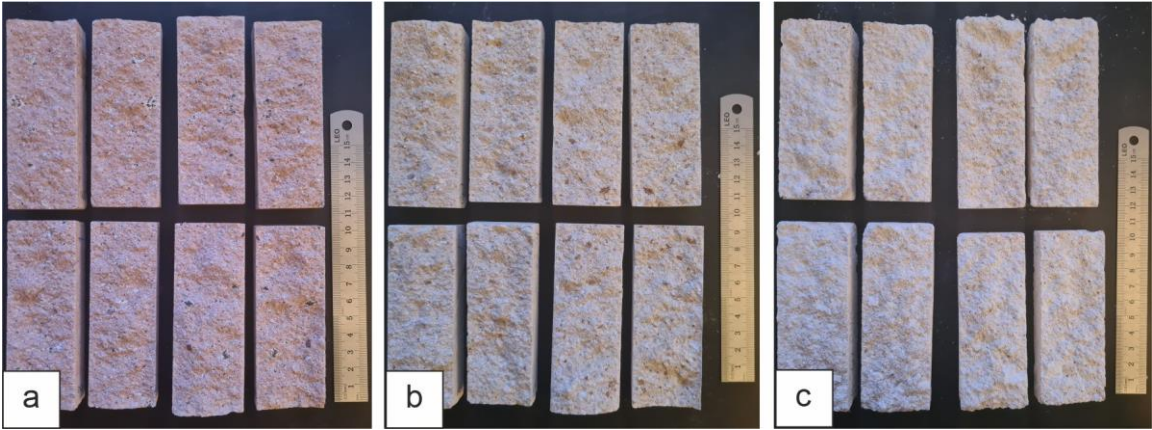
Şekil 5.46: Bej renkli ignimbiritler üzerinde 0.5 MPa normal gerilme uygulanarak oluşturulan süreksizlikler.



Şekil 5.47: Bej renkli ignimbiritler üzerinde 1 MPa normal gerilme uygulanarak süreksizlik oluşturma sürecinde meydana gelen düşey yönlü kırıklar.



Şekil 5.48: Bej renkli ignimbiritler üzerinde 0.5 MPa normal gerilme altında süreksizlik oluşturulduktan sonra meydana gelen düşey yönlü kırıklar.



Şekil 5.49: Mengene yardımıyla oluşturulan vişne (a), sarı (b) ve bej (c) renkli ignimbiritlere ait süreksizlik yüzeylerinden örnek görüntümler.

İgnimbiritlere ait süreksizlik yüzeyleri hazırlandıktan sonra alçılarda olduğu gibi makaslama deneyleri gerçekleştirilmemiştir. Standart profile sahip alçılarda makaslama deneylerinin sonrasında dahi sayısallaştırma işlemi için örnek hazırlama şansı vardır. Ancak ignimbiritlerde makaslama deneyleri sonrasında süreksizlik yüzeyleri bozulacağından, orijinal süreksizlik yüzeyine dair sayısallaştırma işlemi yapmak mümkün olmayacaktır. Bu nedenle süreksizlik yüzeyleri oluşturulduktan sonra ilk etapta sayısallaştırma işlemleri gerçekleştirilmiş, ardından sayısallaştırılmış veriler ile istatistiksel parametreler hesaplanarak JRC değerleri tayin edilmiştir. JRC değerlerinin belirlenmesinden sonra aynı tür ignimbiritler kendi aralarında JRC değerlerine göre gruplandırılarak deney setleri belirlenmiştir. Bu deney setleri üzerinde makaslama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlere ait detaylara ilerleyen bölümlerde değinilmiştir.

## 6. SÜREKSİZLİK YÜZEYLERİNİN SAYISALLAŞTIRILMASI

Makaslama dayanımı deneylerinde kullanılacak bütün örneklerin deney öncesindeki yüzey pürüzlülüğünün JRC parametresi yardımıyla ifade edilmesi gerekmektedir. Alçı örnekler standart JRC profilleri kullanılarak üretildiği için bu örnekler için JRC değerleri tam olarak bilinmektedir. Ancak bu profiller başka bir araştırmacı tarafından sayısallaştırıldığı için hazırlanan örnekler tekrar sayısallaştırılıp bu örneklerden elde edilen profil ile orijinal sayısal verinin karşılaştırılması yapılacaktır. Böylelikle standart JRC profillerine uygun olacak şekilde yüzey üretme işleminin performansı da değerlendirilebilecektir.

Alçı örneklerin taranmasında farklı hassasiyetlere sahip ölçüm yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler optik tarayıcı, fotogrametrik yaklaşım ve telli profilometre olarak üçe ayrılmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan optik tarayıcılar düşünüldüğünde, ölçüm hassasiyeti bakımından optik tarayıcı ile sayısallaştırma işleminin fotogrametrik yöntemlerden daha hassas sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Ancak optik tarayıcının çok özel ve pahalı bir ekipman olması dolayısıyla fotogrametrik yöntemlerin daha pratik bir yaklaşım olacağı tahmin edilmektedir. Ölçütün önerildiği ilk zamanlardan beri kullanılan telli profilometreler ise JRC'nin belirlenmesi sürecinde yararlanılan pratik bir yöntemdir. Ancak bahsedilen ölçüm yöntemleri ile kıyaslandığında en düşük hassasiyete sahip yöntem olduğu da unutulmamalıdır. Yararlanılacak üç ölçüm yönteminden elde edilecek sonuçlar ile JRC'nin en doğru ve pratik şekilde nasıl belirleneceğine yönelik bir karara varılacaktır.

İgnimbirit örneklerinden rastgele süreksizlik yüzeyleri oluşturulduğu için bu örneklerin JRC değerlerinin deney öncesinde belirlenmesi ve hata payının en düşük seviyede tutulması çok önemlidir. İgnimbiritlerden belirlenecek JRC değerlerine göre makaslama deneylerinde kullanılacak örnek setleri oluşturulacağı için JRC'nin yanlış belirlenmesi Barton-Bandis kriteri ile hesaplanacak makaslama dayanımlarını önemli ölçüde etkileyecektir. Alçı örneklerde olduğu gibi standart profillerin kullanılmıyor oluşu; JRC belirlenirken oluşabilecek hataların makaslama deneyleri sonrasında telafisini imkânsız hale getirecektir. Bu nedenle ilk etapta farklı ölçüm

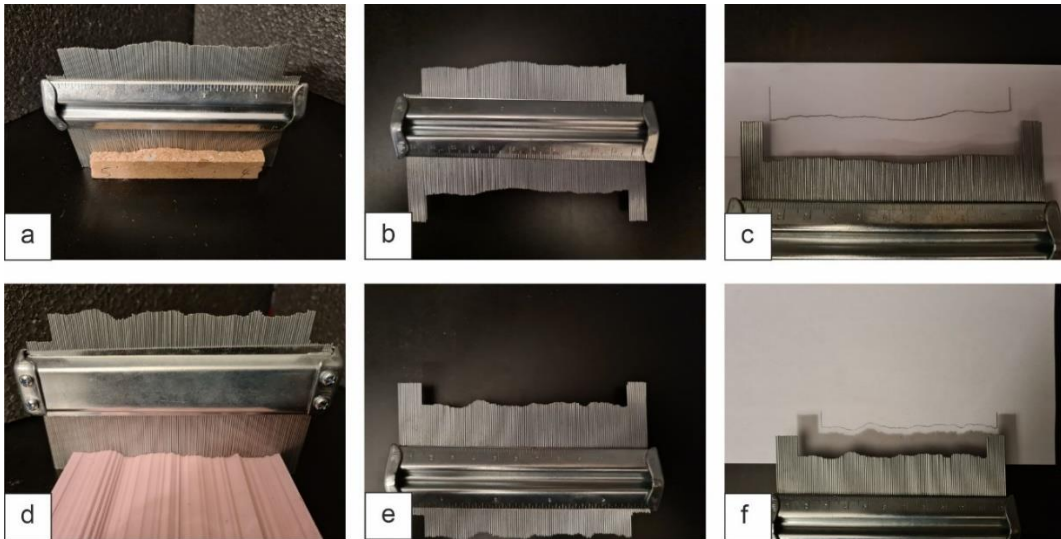
yöntemleri kullanılarak ignimbritlere ait süreksizlik yüzeylerinden JRC değerleri belirlenecek ve daha sonra bu değerler birbirleriyle karşılaştırılacaktır. Farklı yöntemlerden birbirleriyle tutarlı sonuçların elde edildiğine kanaat getirildikten sonra ignimbritlere ait JRC değerlerine bağlı deney setleri oluşturulacaktır. Daha sonra bu setler üzerinde makaslama dayanımı deneyleri gerçekleştirilecektir.

### **6.1. Profilometre İle Sayısallaştırma**

Barton-Bandis kriterinin önerildiği ilk zamanlardan beri kullanılan telli profilometre, yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde son derece pratik bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Profilometre ile belirlenen süreksizlik profili standart profiller ile görsel olarak karşılaştırılıp JRC değeri belirlenmektedir. Her ne kadar pratik bir yaklaşım olsa da bu yöntemde JRC'nin belirlenmesinde kullanıcının etkisi çok yüksektir. Bu etkiyi minimuma indirmek adına birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerin uygulanabilmesi için öncelikle profilometre ile belirlenen profilin sayısallaştırılması gerekmektedir. Sayısallaştırılan profiller kullanılarak çeşitli istatistiksel parametrelerin hesabı yapılmakta ve bu parametreler ile JRC değeri arasında bir ilişki kurulmaktadır. Çalışma kapsamında öncelikle süreksizlik yüzeyinden elde edilen profiller görsel bir karşılaştırmaya tabi tutulup JRC değeri belirlenecektir. Sonrasında ise profiller sayısallaştırılıp istatistiksel yaklaşımlar ile JRC değeri hesaplanacaktır. Alçı örnek standart profillere göre üretildikleri için örnek üzerinden tek bir hat üzerinde profilometre ölçümü yapılması yeterlidir. Ancak ignimbrit örneklerinde örneği temsil edecek JRC değerinin belirlenebilmesi için birden çok hat üzerinde ölçümler yapılacaktır. Daha sonra bu ölçümler yardımıyla belirlenen JRC değerlerinin ortalaması alınacaktır. Şekil 6.1'de profilometre ile yapılan ölçümlere ait örnek fotoğraflar verilmiştir. Profilometre ile elde edilen süreksizlik profili kâğıt üzerine çizilmiştir. Profilin sayısallaştırılması işleminde bu çizimler 600 dpi çözünürlük ile taranarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır (Şekil 6.2). Taranmış profiller daha sonra JPEG formatında AutoCAD programına aktarılmıştır. AutoCAD programında sayısallaştırmada kullanılmak üzere 0.25 mm aralıklarla düşey çizgiler çizilmiştir (Şekil 6.3). Taranmış profillerin düşey çizgileri kestiği noktalar birleştirilerek profiller sayısallaştırılmıştır. 0.25 mm ilerleme aralığı ile çizilen pürüzlülük profillerine ait koordinatlar bir tablo halinde dışarı aktarılmıştır. X-Y formatındaki koordinatlar ilk etapta 0.25 mm, sonrasında da 0.5 mm ilerleme

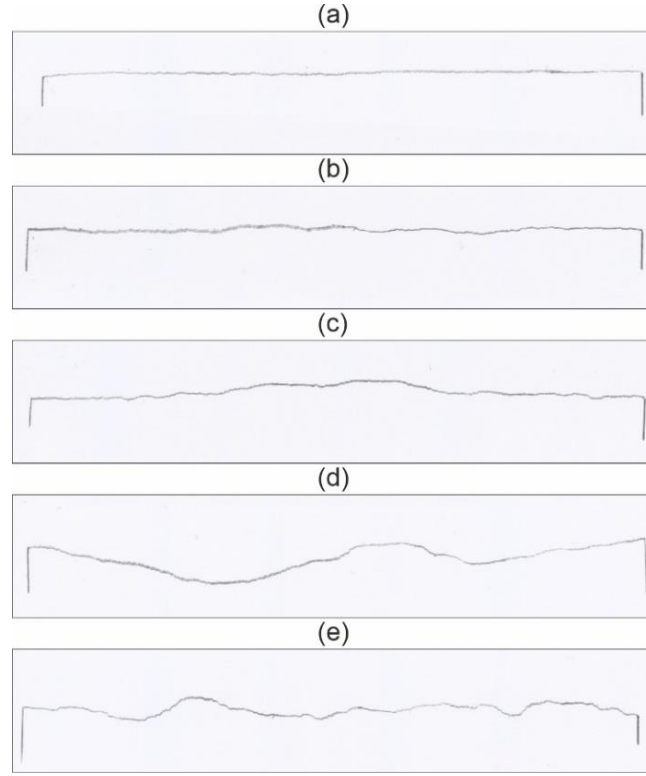
aralığına sahip olacak şekilde düzenlenmiştir. AutoCAD üzerinde çizilen düşey çizgiler 0.25 mm aralıklı olarak sınıflandırılınca X değerleri 0, 0.25, 0.5 mm vb. şekilde artarken; 0.5 mm aralıkla sınıflandırıldığında ise 0, 0.5, 1 mm vb. şekilde artmaktadır. Bu nedenle beş farklı JRC sınıfına göre oluşturulan standart örneklerden 0.25 ve 0.5 mm ilerleme aralıklarına sahip ikişer profil çıkartılmış ve alçılarda profilometre ile toplam 10 profil elde edilmiştir.

Standart profillerin sayısallaştırılmasından sonra kullanılacak ignimbiritler üzerinde çalışılmıştır. Örneklerin makaslama yönündeki uzunlukları 10 cm iken, makaslama yönüne dik yöndeki genişlikleri ise 3.5 ile 4 cm arası değişmektedir. İgnimbiritlerde 3. boyutta da pürüzlülük gözlemlendiğinden, alçı örneklerde olduğu gibi tek bir profil örneğe ait pürüzlülüğü temsil etmede yetersiz kalacaktır. Bu nedenle örnek üzerinden belirli aralıklarda makaslama yönüne paralel olacak şekilde dört tane profilometre ölçümü yapılmıştır. Alınan ölçümler alçı örneklerde olduğu şekilde taranıp, AutoCAD programı yardımıyla sayısallaştırılmıştır. Dört profil üzerinden hesaplanacak JRC değerlerinin ortalamasının süreksizlik yüzeyini temsil edecek JRC değeri olacağı düşünülmüştür. İgnimbirit örnekleri üzerinden alınan profiller 0.25 ve 0.5 mm ilerleme aralıklarına uyacak şekilde sınıflandırılmıştır. Her örnekte dört profilometre ölçümü ve her ölçümde de iki farklı ilerleme aralığı seçilmiştir. Sayısallaştırma işlemlerinde kullanılan 45 ignimbirit örneğinden toplamda 360 adet profil çıkartılmış ve bunlara ait koordinat verileri kaydedilmiştir.

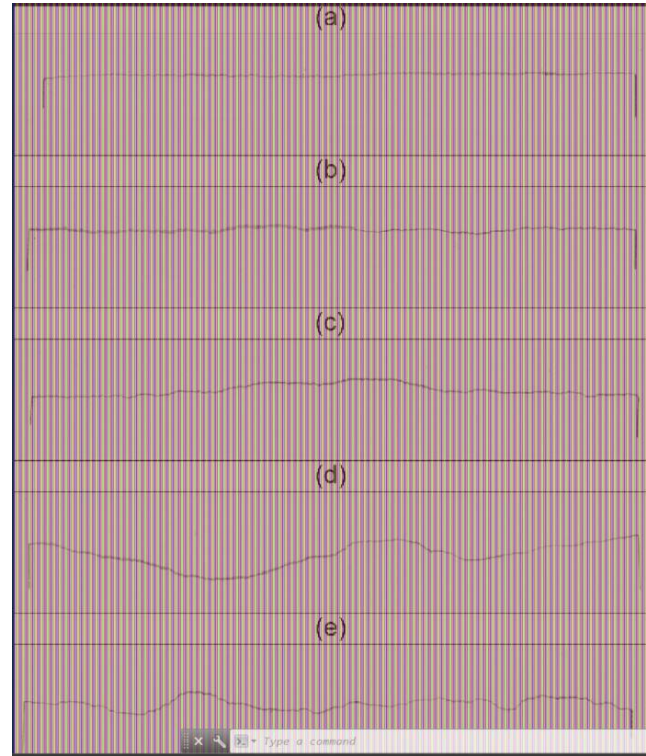


Şekil 6.1: Telli profilometre ile yapılan süreksizlik profili ölçümlerine ait görüntüler.





Şekil 6.2: Profilometre ile sayısallaştırılan (a) 0-2, (b) 4-6, (c) 8-10, (d) 14-16 ve (e) 18-20 JRC değerlerine sahip standart profiller.



Şekil 6.3: Standart JRC profillerinin AutoCAD programında sayısallaştırılmasında kullanılan 0.25 mm aralıklı düşey çizgiler.

## 6.2. Üç Boyutlu Optik Tarayıcı İle Sayısallaştırma

Süreksizlik yüzeylerinin taranması için ticari adı Artec Eva olan üç boyutlu optik tarayıcı kullanılmıştır (Şekil 6.4). Literatürde SLS (Structured Light Scanner) tipi olarak anılan tarayıcının özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Tarayıcı elde taşınabilmekte ve pratik şekilde tarama işlemleri gerçekleştirebilmektedir. Bağlantı kablosu ile bilgisayara bağlanmakta ve tarama işlemleri gerçekleştirilirken bilgisayar üzerinden süreci takip etmek mümkün olmaktadır. Tarayıcı, taranacak objenin görüntüsünü saniyede 16 kareye kadar anlık olarak depolamaktadır. Tarama işlemleri sırasında tarayıcı örnek etrafında döndürülmektedir. Tarayıcı, bulunduğu ilk konumda örneğe ait görüntüleri belleğine kaydetmektedir. Tarayıcıyı kullanan kişi tarayıcıyı hareket ettirip yeni konuma getirdiğinde, tarayıcı yeni çektiği görüntülerle bir önceki konumda depoladığı görüntüleri karşılaştırmakta ve aynı olduğuna karar verdiği görüntüleri üst üste getirmektedir. Anlık olarak tekrarlanan bu işlemler, taranacak objeye ait yeterli görüntü alınana dek devam etmektedir. Tarama işleminin ne zaman durdurulacağını tarayıcıyı kullanan kişi karar vermektedir.



Şekil 6.4: Örneklerin sayısallaştırılmasında kullanılan Artec Eva isimli üç boyutlu optik tarayıcı ([www.artec3d.com](http://www.artec3d.com)).

Çizelge 6.1: Artec Eva isimli üç boyutlu optik tarayıcının teknik özellikleri (www.artec3d.com).

Özellikler	Artec Eva Optik Tarayıcı
Tarayıcı türü	Portatif / Elde taşınabilen
Üç boyutlu ölçüm doğruluğu	0.1 mm'ye kadar
Üç boyutlu ölçüm çözünürlüğü	0.2 mm'ye kadar
Mesafeye bağlı üç boyutlu ölçüm doğruluğu	0.1 mm + 0.3 mm/m
Taranacak obje boyutu	≥ 10 cm
Yüksek çözünürlük modu	Var
Geometri ve doku tarama özelliği	Var
Çalışma aralığı	0.4 – 1 m
Doku çözünürlüğü	1.3 megapiksel
Işık kaynağı	12 adet sıralı LED
Saniyede yakalanan kare sayısı	16 kareye kadar

Tarama işlemlerinde yararlanılan bilgisayar programı tarayıcıyı üreten firma tarafından kullanıma sunulmaktadır. Artec Studio Professional 12 isimli program güncel bir versiyon olmadığı için tarayıcının mevcut özelliklerinden bazıları teknik özelliklerde belirtildiği şekilde çalışmamaktadır. Doku tarama özelliği programın bu versiyonunda çalışmadığı için programın kayıt dosyalarında üreticinin belirttiği bir değişikliğin yapılması gerekmiştir. Bu değişiklik sayesinde doku tarama özelliği aktifleşmiştir ancak saniyede yakalanan kare sayısı 16'dan 11-12 seviyelerine düşmüştür.

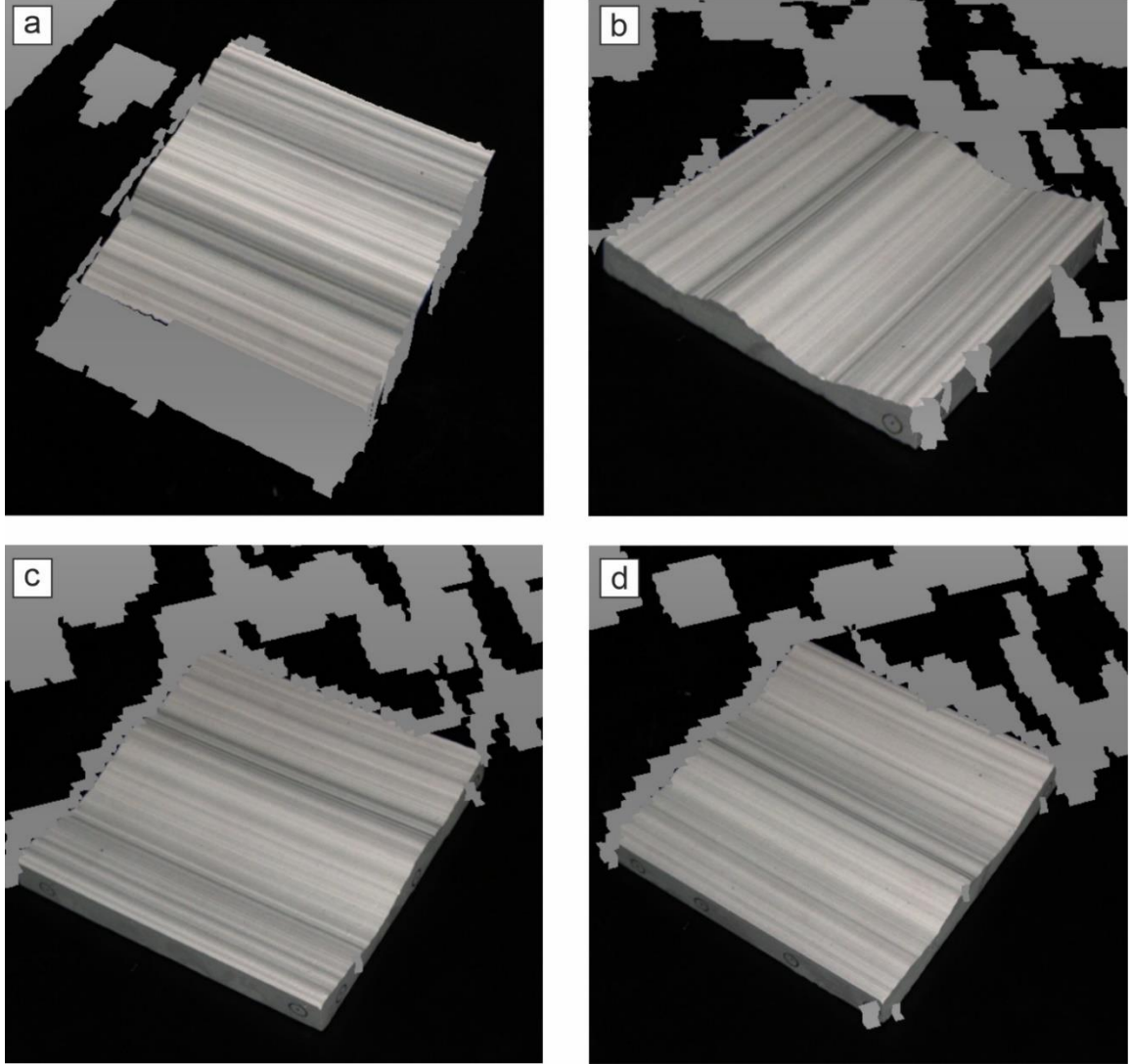
Tarayıcı ilk olarak standart profile sahip alçı örneklerin taranmasında kullanılmıştır ve süreksizlik yüzeyine ait en fazla detayı kaydedebilmesi adına örnekten yaklaşık 50 cm uzaklıkta tutulmuştur. Tarama işlemine başlanmış ve ilk konumda yeterli görüntü alındığına emin olunduktan sonra örneğe olan uzaklık korunarak tarayıcı örnek etrafında döndürülmüştür. Örneğin kenar uzunluğu tarayıcıda taranabilecek en küçük örnek ebadına eşit olduğu için, tarayıcının detayları yakalamakta zorlandığı görülmüştür. Örneğe ait detayları tam anlamıyla tarayabilmek için mümkün olan en fazla görüntünün farklı açılardan alınması gerekmektedir. Ancak tarayıcının bazı yer değiştirmelerinde, eski görüntü ile yeni görüntünün eşlenememesi sorunu ortaya çıkmıştır. Süreksizlik yüzeyinin üçüncü boyutta tek bir

profile sahip olmasından ve çizgisel yapıya sahip olmasından ötürü programın yanlış çizgisellikleri eşleştirdiği durumlar olmuştur. Boyutları 10cm x 10cm olan kare örneğin yanlış eşleştirmelerden kaynaklı olarak boyutlarının arttığı görülmüştür. Hareketli bir şekilde yapılan tarama işleminde örneğe ait detayların tam anlamıyla yakalanamadığı anlaşılmıştır. Bu sebeple tarayıcı bir tripod üzerine yerleştirilip sabit bir noktadan görüntü alması sağlanmış, yani tarayıcı örnek etrafında döndürülmemiştir. Örneğin yerleştirildiği merkez etrafında kullanıcı tarafından döndürülmesiyle tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tarayıcı, örneğe ait görüntüleri eşzamanlı olarak bilgisayar ekranına gönderdiği için örneği temsil edecek uygun görüntü elde edilene kadar tarama işlemine devam edilmiştir. Taranan örneğe ait detayların yeterli olduğuna karar verildikten sonra tarama işlemi duraklatılmış ve örnek saat yönünde döndürülerek yeni konumuna getirilmiştir. Bu konumda tarama işlemine tekrar başlanmış ve görüntüler elde edildikçe döndürme işlemi tekrarlanmıştır. Örnek, döndürme işlemi için aynı anda iki kenarı ve süreksizlik yüzeyi tam olarak görünecek şekilde konumlandırılmıştır. Böylelikle en fazla sayıda görüntünün çakışması sağlanmıştır. Bu şekilde yapılan tarama işlemlerinde en az dört farklı açıdan görüntüleme yapılması gerekmektedir. Örnek kenarlarında taranmamış alan bulunması durumunda görüntüleme yapılan açılarının sayısı arttırılmalıdır. Her bir döndürme işlemi sonunda örneğe ait tarama görüntüleri incelenmiş ve üç boyutlu modeli oluşturacak yeterli görüntü olduğuna kanaat getirildiği an ilgili yüzeyin tarama işlemi sonlandırılmıştır. Bu yöntem ile sabit noktada bulunan tarayıcının örneği farklı açılardan görüntülemesi sağlanmıştır. Böylelikle tarayıcının döndürülmesi sırasında meydana gelen görüntülerin çakışmama problemi ortadan kalkmıştır. Bu şekildeki bir yaklaşım örneğin farklı açılardan fotoğrafının çekildiği bir duruma benzetilebilir. Tarayıcının sağlıklı bir şekilde görüntü alması ve bu görüntülerin doğru şekilde işlenebilmesi ancak bu yolla sağlanabilmiştir. Şekil 6.5'te tarama işlemi sonrasında elde edilen görüntülere ait örnekler sunulmuştur. Bu görüntülerdeki gri kısımlar program arka planını göstermektedir. Bir başka deyişle tarama verisinin olmadığı boşluklar gri renkle görülmektedir. Siyah kısımlar ise tarama işleminin yapıldığı masaya aittir. Tarayıcı sabit bir noktadan örneğe ait verileri kaydederken, örneğin tarayıcıya yakın olan kısımlarını kaydetmektedir. Örneğin arka tarafında kalan tarayıcıya uzak kısımları doğal olarak kaydedilememektedir. Şekil 6.5a'da tarayıcıya yakın olan iki kenarın taranamadığı görülmektedir. Bu durum tarayıcının konumlandırıldığı yükseklikten

kaynaklanmaktadır. Tarayıcının yüksekliği alçaltıldığında, tarayıcıya yakın kenarlara ait detaylar yakalanmakta, fakat tarayıcıya uzak olan kısımlardan görüntü elde edilememektedir (Şekil 6.5b,c ve d). Bu nedenle örnek tarayıcının görüntü elde edemediği kısımlardan da görüntü alabilmesine olanak verecek şekilde her görüntüleme adımından sonra yeniden konumlandırılmıştır. Şekil 6.5b'de örneğin görünen kenarlarından birinden tam görüntü alınmışken, diğer kenarda ise taranamamış alanların varlığı dikkat çekmektedir. Süreksizlik profiline dik olan bu kenarlarda taranamamış noktaların olması, ileride alınacak süreksizlik profilinde eksik veri olmasına sebep olacaktır. Bu nedenle süreksizlik profiline dik yöndeki taranamamış bölgeler için örnek yeniden konumlandırılmış ve yeniden görüntüleme yapılmıştır. Şekil 6.5c ve d'de örneğin iki zıt köşesine ait tarama görüntüleri vardır. Tarama işlemlerinde elde edilen görüntülerin bu şekilde olmasına özen gösterilmiştir.

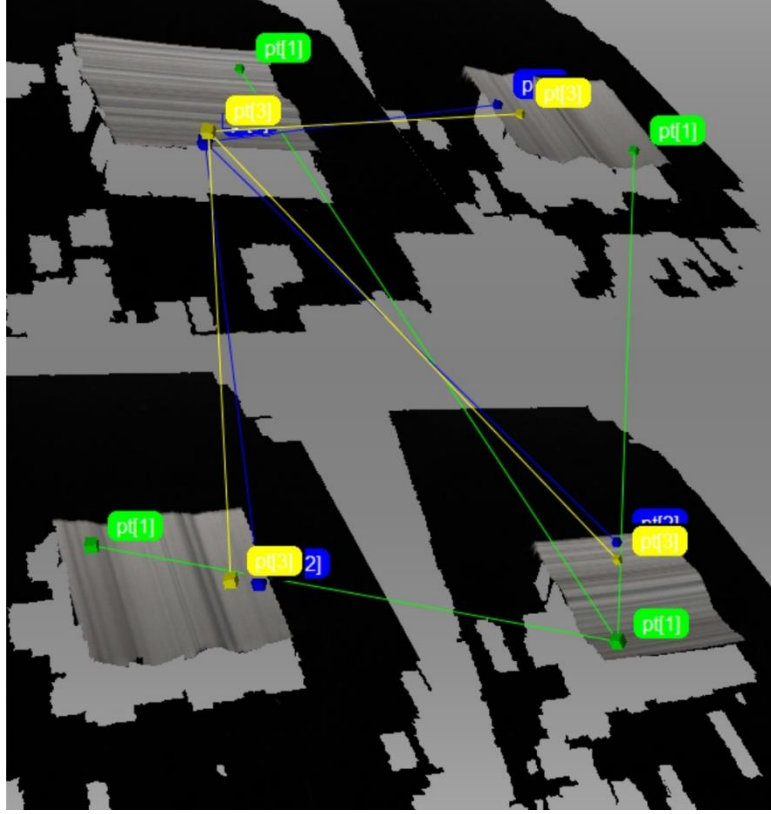
Bütün sayısal modellerde olduğu gibi, SLS yöntemi ile oluşturulmak istenen modellerde de elde edilen görüntülerin hizalanması gerekmektedir. Bu işlem için her görüntüde ortak olan noktalar belirlenmiş ve bu noktalar referans nokta olarak işaretlenmiştir (Şekil 6.6). Programın bu noktaları baz alarak görüntüleri hizalaması sağlanmıştır. Örnek üzerinde belirlenebilen referans nokta sayısı arttıkça hizalama işleminin daha başarılı olduğu görülmüştür. Süreksizlik yüzeyindeki ayırt edilebilen referans noktalar haricinde, örnek kenarlarına işaretlenmiş referans noktalar da kullanılmıştır. Ancak süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük hesaplamalarındaki önemi düşünüldüğünde, mümkün olduğunca süreksizlik yüzeyi üzerinde bulunan ve ayırt edici özellikteki noktaların hizalama işlemlerinde kullanılmasına özen gösterilmiştir. Her bir tarama görüntüsü üzerinde en az üç referans noktasının olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca tarama esnasında oluşan istenmeyen noktaların, nokta bulutundan ayıklanması gerekmektedir. Süreksizlik yüzeyine yakın olan istenmeyen noktalardan elle silinebilenler silinmiş, silinemeyen noktalar program vasıtasıyla silinmek üzere bırakılmıştır (Şekil 6.7a). Hizalanan görüntülerden oluşan tarama çıktıları üzerinde sırasıyla "global registration" ve "sharp fusion" işlemleri yapıp katı model elde edilmiştir (Şekil 6.7b ve c). Daha sonrasında küçük nesnelere filtrelenerek istenmeyen noktaların yok edilmesi amaçlanmıştır. Ancak bu işlem sırasında süreksizlik yüzeyine ait bazı noktaların da silindiği görülmüştür. Bu nedenle bu işlemin kullanılmamasına karar verilmiştir. Bütün işlemlerin bitiminde model üzerinde

kalan boşlukların kapatılması için nokta doldurma fonksiyonu çalıştırılmıştır. Bu işlem ile katı model kapalı bir geometriye sahip olmuştur. Böylece kapalı geometriye sahip üç boyutlu model dışa aktarılıp kesit alınabilir hale gelmiştir.

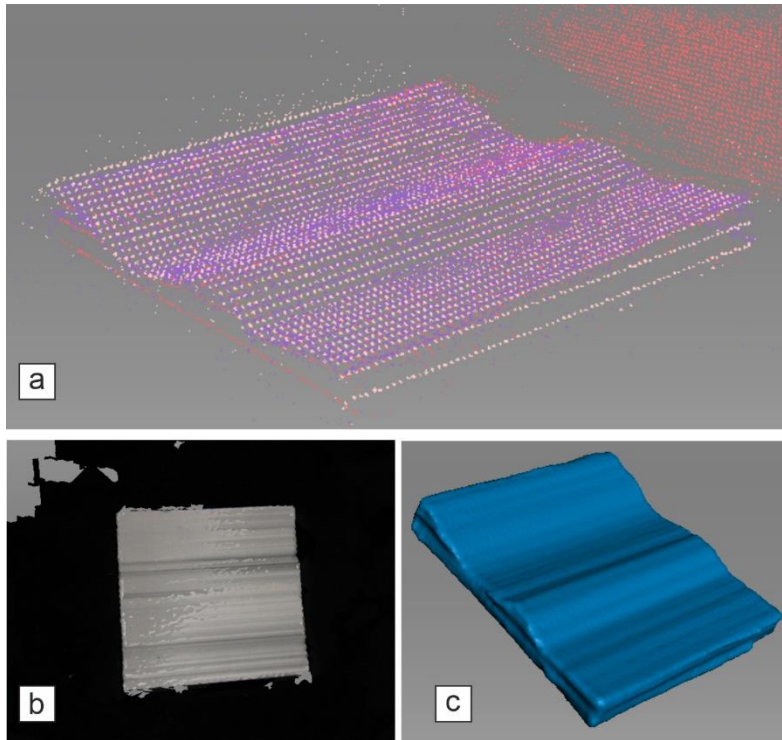


Şekil 6.5: Optik tarayıcının (a) yüksek ve (b, c ve d) alçak konumdan farklı örnek konumlandırmalarına göre kaydettiği görüntüler.

Tarama işlemleri sonucu elde edilen görüntüler Şekil 6.8'de sunulmuştur. Hareketli tarama sonucu elde edilen ve JRC belirlenmesi işlemlerinde kullanılmayacak model Şekil 6.8a'da görülmektedir. Sabit bir noktadan gerçekleştirilen tarama işlemleri sonucu elde edilen model görüntüleri JRC'nin 0-2, 4-6, 8-10, 14-16 ve 18-20 değerleri için sırasıyla Şekil 6.8b, c, d, e ve f'de verilmiştir. Üretilen modellere ait görüntüler incelendiğinde, sabit tarama işleminin performansının bu boyut ve dokudaki örnekler için daha başarılı olduğu görülmektedir.



Şekil 6.6: SLS yönteminde hizalama yapılırken kullanılan referans noktalara örnek görüntüler.



Şekil 6.7: Taramalar ile üretilen nokta bulutu üzerinde yapılan (a) istenmeyen noktaların silinmesi, (b) global registration ve (c) sharp fusion işlemleri.

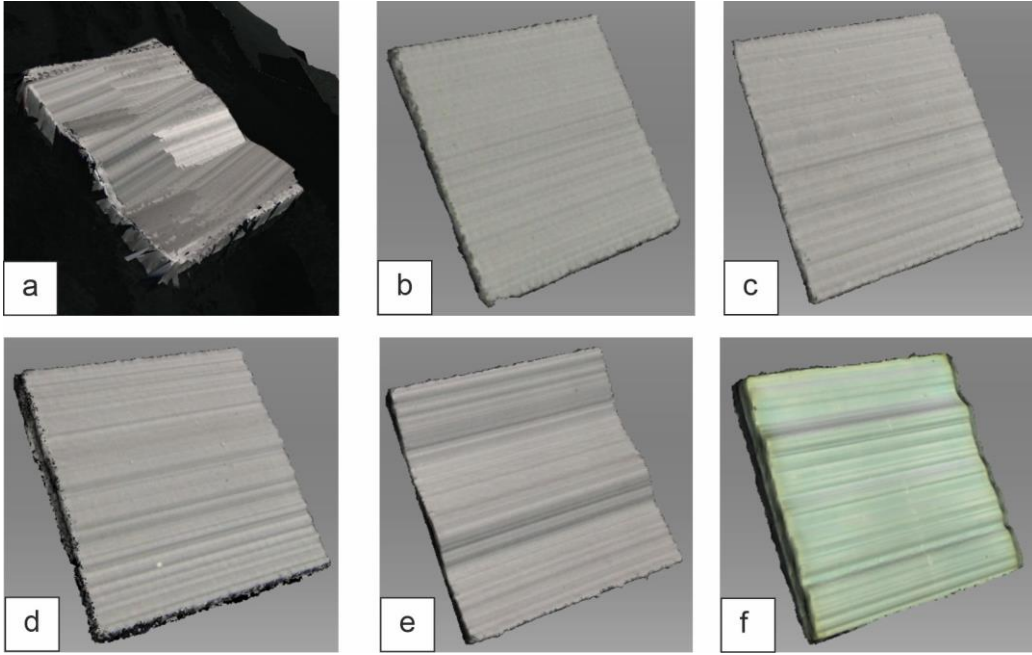
Alçı örneklerin taranmasında uygulanan yöntem ignimbiritlerin taranması sırasında da kullanılmıştır. İgnimbiritlerin hazırlanmasında karşılaşılan zorluklardan ötürü, süreksizlik yüzeylerinin alçı örneklerden daha küçük tutulması gerektiği önceki bölümlerde açıklanmıştı. Tarayıcının özelliği gereği taranacak obje boyutunun 10 cm ve daha büyük olması önerilmektedir. İgnimbirit örneklerin bir kenarı bu uzunluğu karşılarken, kısa kenar ise karşılayamamaktadır. Bu kısıtlamaya rağmen optik tarayıcı ile ignimbirit örneklerin taranması işlemi gerçekleştirilmiştir. Tarayıcı, tarama işlemleri sırasında örneğin bir kısa kenarı ile bir uzun kenarını aynı anda görüntüleyecek şekilde konumlandırılmıştır. Tarayıcının çalışma mesafesinin de görülebildiği, ignimbirit örneklerin taranmasına ilişkin görüntü Şekil 6.9'da verilmiştir. Vişne, sarı ve bej renkli ignimbiritlerin taranması işlemi, kurulan düzenek bozulmadan gerçekleştirilmiştir.

Optik tarayıcı ile ignimbirit örnekleri üzerinde yapılan taramalar sonucu elde edilen modellere ait örnekler Şekil 6.10'da sunulmuştur. Normal gerilme uygulanmadan oluşturulan süreksizlik yüzeylerine ait modeller bej, sarı ve vişne renkli ignimbiritler için sırasıyla Şekil 6.10a, 6.10b ve 6.10c'de verilmiştir. Optik tarayıcının led ışıkları sebebiyle bej renkli ignimbiritlerin taranması sırasında zorluklarla karşılaşılmıştır. Örnek yüzeyine vuran led ışıklar parlamalara sebep olmuş ve yeterli detaya sahip görüntülerin alınmasına engel olmuştur. Bu nedenle tarama programı üzerinden parlaklık ayarı yapılması gerekmiştir. Elde edilen ham görüntülerin işlenip model oluşturulduğu aşamada da detayların daha belirgin olması amacıyla parlaklık düzeltmeleri yapılmıştır. 0.5 MPa normal gerilme altında oluşturulan süreksizlik yüzeylerine ait örnek modeller sarı ve vişne renkli ignimbiritler için sırasıyla Şekil 6.10d ve 6.10e'de verilmiştir. 1 MPa normal gerilme altında oluşturulmuş süreksizlik yüzeylerine ait modeller ise Şekil 6.10f ve 6.10g'de görülmektedir.

Alçı ve ignimbirit örnekler için oluşturulan katı modellerin çeşitli formatlarda dışa aktarılarak AutoCAD, CloudCompare gibi programlarda kullanılması amaçlanmıştır. Ancak dışa aktarılan dosyalardan elde edilen sayısallaştırma hassasiyeti olması gerekenden çok daha düşük bulunmuştur. Tercihen 0.1mm mertebesinde olması istenen sayısallaştırma hassasiyeti bazı modellerde 1mm'nin üzerinde bulunmuştur. Ölçüm hassasiyetindeki bu kaybın, modelin dışa aktarımı sırasındaki format değişikliklerinden kaynaklı olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle Artec Studio



içerisinde bulunan ölçüm aletleri kullanılarak kesitler alınmıştır (Şekil 6.11). Söz konusu kesitler doğrudan program vasıtasıyla .dxf formatında dışa aktarılmıştır.

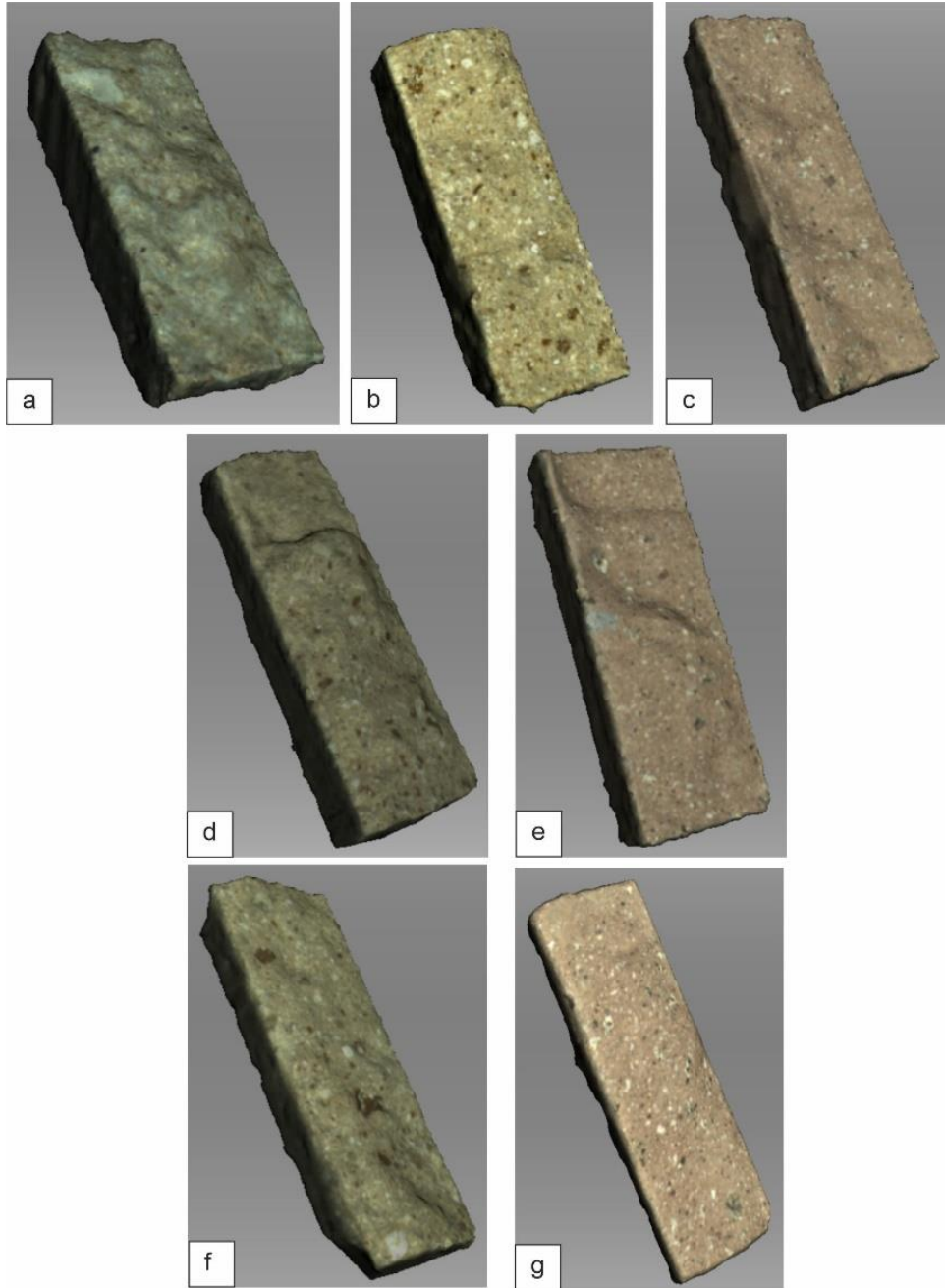


Şekil 6.8: (a) Hareketli tarama ile elde edilen görüntü ve JRC'nin (b) 0-2, (c) 4-6, (d) 8-10, (e) 14-16 ve (f) 18-20 değerleri için elde edilen tarama görüntüleri.

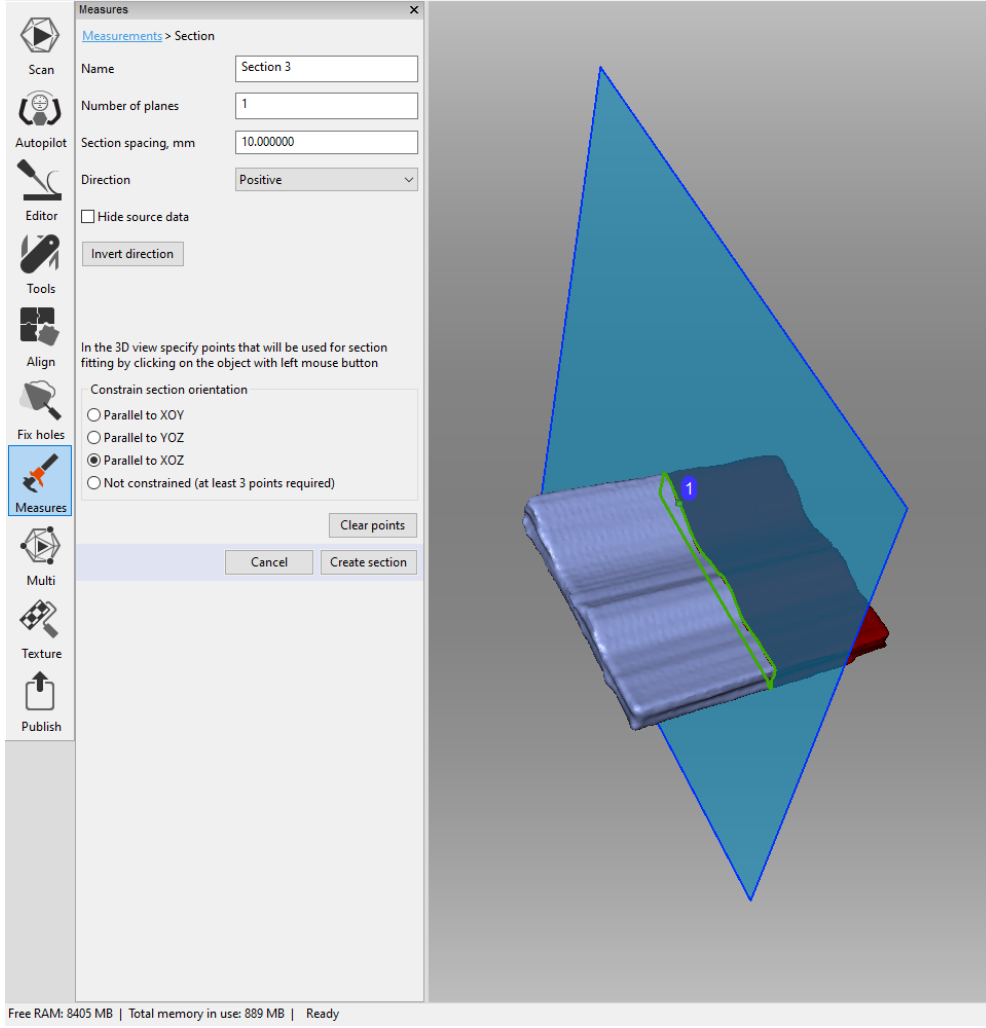


Şekil 6.9: İğnimbirit örneklerin optik tarayıcı ile taranmasına ilişkin görüntü.

AutoCAD ile açılan kesitler düzenlenerek MS Excel formatında koordinat verilerini içerecek şekilde dışa aktarılmıştır. Bu yolla elde edilen koordinatlardaki hassasiyet istenilen düzeyde olmuştur. Optik tarayıcı ile yapılan taramalar sonucu, standart profile sahip alçı örneklerin her birinden 0.5 mm'lik ilerleme aralıklarına uyacak şekilde birer kesit alınmıştır. İgnimbiritlerde ise her örneğe ait dört kesit dışa aktarılmıştır. Dört kesit üzerinde yine 0.5 mm'lik ilerleme aralıkları kullanılarak profil oluşturulmuştur. Toplamda alçı örneklerden 5 ve ignimbiritlerden ise 180 kesit oluşturulmuştur.



Şekil 6.10: Optik tarayıcı ile taranan ignimbiritlere ait örnek modeller.



Şekil 6.11: Artec Studio programı kullanılarak gerçekleştirilen kesit alma işlemi.

### 6.3. Fotogrametrik Yöntem İle Sayısallaştırma

Optik tarayıcı, üç boyutlu modellerin oluşturulmasında yaygın şekilde kullanılan yöntemlerden biridir. Ancak tarayıcının maliyeti göz önüne alındığında, herkes tarafından kolay erişilebilir bir yöntem olmadığı düşünülmektedir. Bu nedenle, üç boyutlu model oluşturmada kullanılan fotogrametrik yaklaşımlar alternatif yöntemlerden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda fotogrametrik yöntemler ile yapılan çalışmalar artmaktadır (Oglesby ve ark., 2017; Marsch ve ark., 2020; An ve ark., 2021; Garcia-Luna ve ark., 2021 vb.). Bu çalışmalarda küçük veya büyük ölçekteki örnekler modellenmiş ve bu süreçte izlenen yollar açıklanmıştır. Tez çalışması kapsamında akıllı telefon yardımıyla örnekler modellenecektir. Literatürde SfM (Structure from Motion) kısaltmasıyla anılan bu yöntemde, dijital fotoğraflar

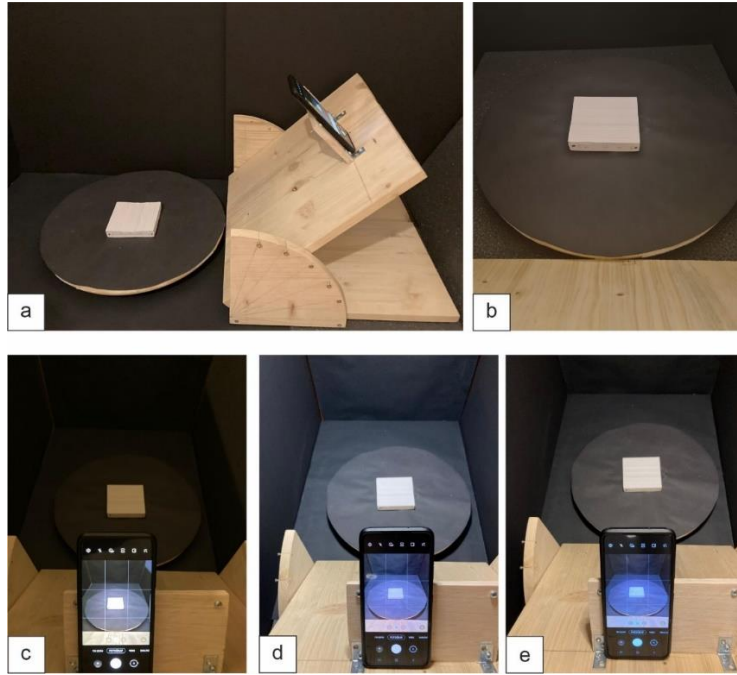
kullanılarak küçük ölçekli objelerden veya büyük ölçekli yer şekillerine kadar üç boyutlu modellerin oluşturulması mümkün olmaktadır.

Alçı ve ignimbiritlerin SfM yöntem ile sayısallaştırılmasında kullanılacak düzener ile ilgili olarak literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalardan öğrenilenler bilgiler ışığında pratik bir düzener tasarlanmıştır. Bu tasarımda döner bir tabla ve eğimli bir platformu bulunmaktadır. Örnek, döner tablanın orta noktasına yerleştirilmekte ve eğimli platform üzerine yerleştirilen kamera ile örneğin farklı açı ve yüksekliklerden fotoğrafı çekilmektedir. Düzenerdeki eğimli kısım 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°'lik açılarda sabitlenebilmekte ve farklı açılardan örneğin fotoğrafı çekilebilmektedir. Kameranın bulunduğu konumdan örneğin orta noktasına, eğimli platformun bulunduğu açıya bağlı olarak 30-50 cm arasında değişen bir uzaklık bulunmaktadır. Düzenerde ait fotoğraflar Şekil 6.12'de verilmiştir. Şekil 6.12'deki düzener incelendiğinde, yeterli kontrastın elde edilmesi adına örnek etrafındaki bölgelerin siyah renkli olduğu görülmektedir. Şekil 6.12c, 6.12d ve 6.12e'de sırasıyla ışık kullanılmadan, beyaz ışık altında ve sarı ışık altında çekilmiş fotoğraflar görülmektedir.

Fotoğraf çekim işlemlerinde literatürdeki benzeri çalışmalarda da kullanılan akıllı telefonlardan yararlanılması planlanmıştır. Bu çalışmada akıllı telefon olarak Samsung S20+ modeli seçilmiştir. Model üzerinde dört farklı kamera bulunmaktadır. Ana kamera olarak adlandırılan kamera ile fotoğraflar çekilmiştir. Bu kamera ile yapılan çekimlerde, makro çekim özelliği kullanılmamış ve herhangi bir yakınlaştırma işlemi uygulanmamıştır. Telefonun ana kamerasına ait özellikler Çizelge 6.2'de sunulmuştur.

İlk etapta alçı örnekler üzerinde denemeler yapılmıştır. Kurulan düzenerde yapılan deneme çekimlerinde birtakım sorunlarla karşılaşmıştır. Beyaz ve sarı ışık altında yapılan çekimlerde, alçıların renginden kaynaklı olarak fotoğraflar çok parlak çıkmış ve gerekli detaylar elde edilememiştir. Işık şiddeti azaltılarak denemeler yapıldığında ise parlaklığın azaldığı ancak görüntü kalitesinin de düştüğü görülmüştür. Döner tablanın siyah renkte olması ve ışığı yansıtması nedeniyle, bütün ışığın alçı örnek tarafından yansıtıldığı düşünülmüştür. Bu nedenle örnek üzerine doğrudan ışık vurmadiği koşullar altında çekimlerin yapılmasına karar

verilmiştir. Bu şekilde yapılan çekimlerde de düşük görüntü kalitesine sahip fotoğraflar elde edilmiştir. Bu denemeler sonunda siyah zemin üzerinde yapılan çekimler yerine daha açık renkli yüzeyde çekim yapılmasına karar verilmiştir. Süreksizlik yüzeylerine ait modellerin gerçeğe en yakın şekilde oluşturulabilmesi adına olabildiğince çok sayıda fotoğraf çekilmesi gerekmektedir. Ancak fotoğraf sayısındaki artış işlem hacmini de arttırmaktadır. Bu nedenle örneğe ait detayları içerecek yeterli sayıda fotoğraf ile modelleme işlemlerinin gerçekleştirilmesi önemlidir.



Şekil 6.12: Fotogrametrik analiz için hazırlanan düzenden görüntüler.

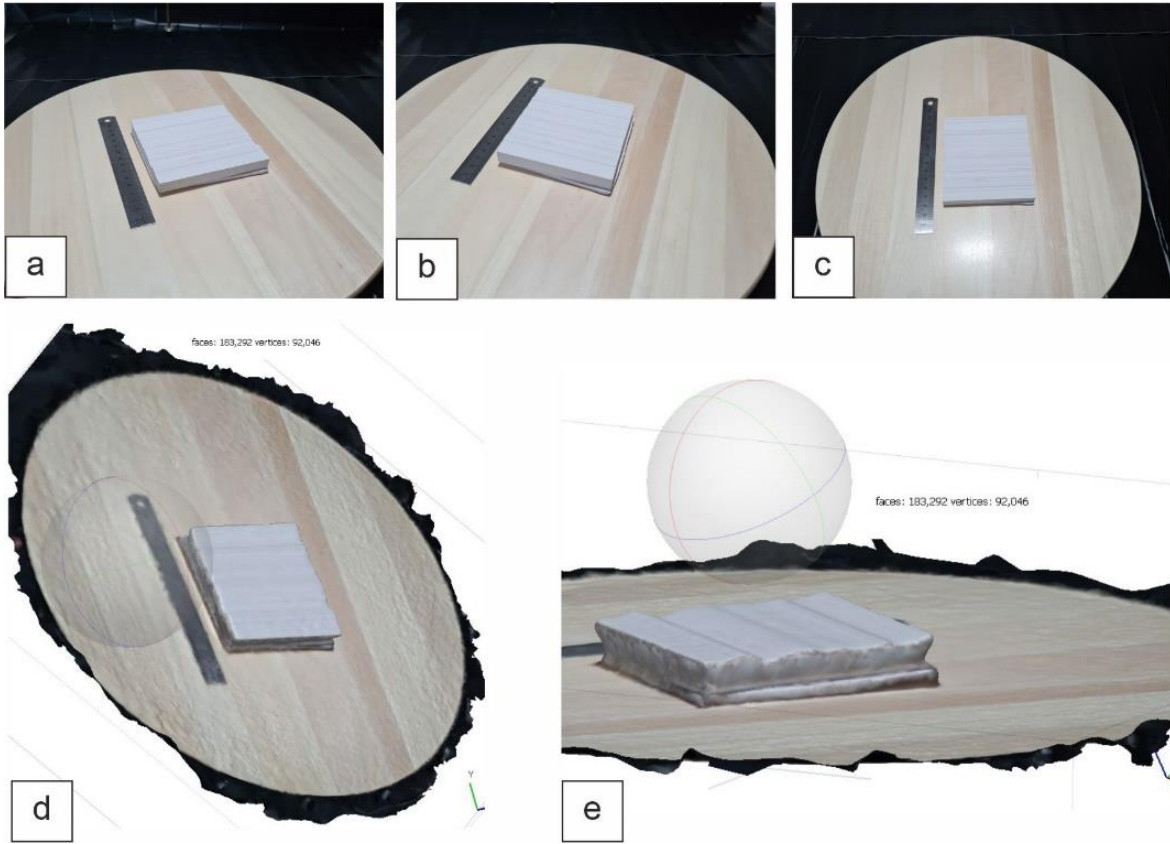
Çizelge 6.2: Fotoğraf çekiminde kullanılan akıllı telefon kamerasına ait özellikler.

Kamera	Samsung S20+
Kamera çözünürlüğü	12 Megapiksel
Sensör boyutu	1/1.76 inç
Piksel boyutu	1.8 $\mu\text{m}$
Fotoğraf çözünürlüğü	4032 x 3024
Odak mesafesi	26 mm
Açıklık	f / 1.8
Otomatik odaklama	Var
Çıktı formatı	JPG

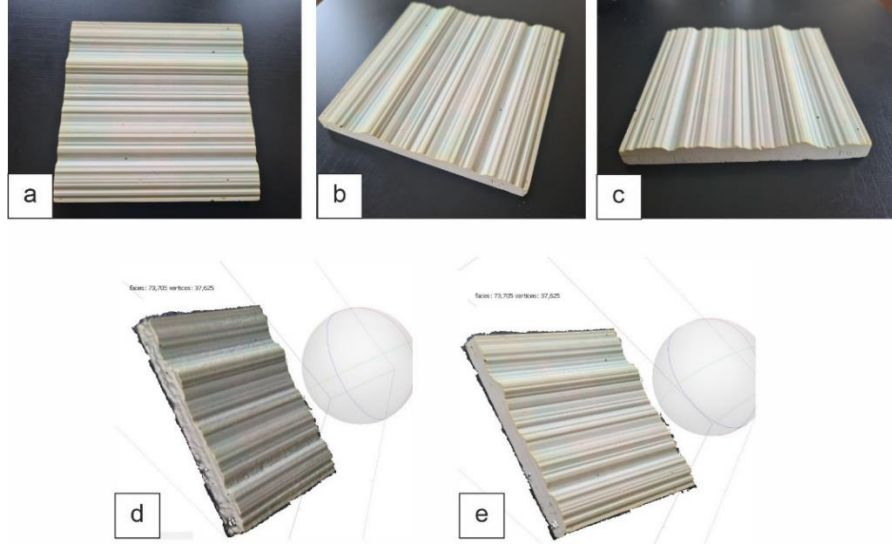
Kurulan düzenekteki platform farklı eğim açlarına getirilerek fotoğraflar çekilmiştir. Her bir aç değeriinde örneğin yerleştirildiği tabla döndürölmüş ve örneğe ait çok sayıda görüntü elde edilmiştir. Tablanın 360 derecelik tam bir dönüşü sekiz adımda tamamlanmıştır. Eğimli platformun dört veya beş farklı eğimdeki konumu için fotoğraflar çekildiğinde 32 ila 40 fotoğraf elde edilmektedir. Her seviyede çekilen fotoğraf sayısını arttırmak mümkündür. Ancak pratik şekilde modellerin oluşturulabilmesi adına fotoğraf sayısını düşük tutmak, bir başka deyişle gereğinden fazla fotoğraf çekmemek gerekmektedir. En uygun fotoğraf sayısı örnek modellerin performansına göre anlaşılacaktır.

Fotogrametrik yöntemler ile üç boyutlu modellerin oluşturulması için çeşitli görüntü işleme programları bulunmaktadır. Bu programlar fotoğraflardan üç boyutlu modeller oluşturan algoritmalara sahiptir. Bu çalışma kapsamında eski adı Agisoft Photoscan olan Agisoft Metashape programı kullanılmıştır ([www.agisoft.com](http://www.agisoft.com)). Deneme amaçlı yapılan çekimlerle elde edilen fotoğraflarla örnek model oluşturma aşamasına geçilmiştir. İlk olarak çekilen fotoğrafların Agisoft Metashape programı kullanılarak hizalanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Fotoğraflar hizalandıktan sonra örneği temsil etmesi amacıyla nokta bulutu oluşturma işlemi yapılmıştır. Bu işlem üç boyutlu modelin oluşturulabilmesi için çok önemli bir aşamadır. Ne kadar yoğun bir nokta bulutu oluşturulabilirse, o kadar detaylı bir model üretilebilir. Ancak çekilen fotoğrafların sayısı ne kadar arttırılırsa arttırılsın, program bu fotoğraflardan yeterli noktayı çıkarmayı başaramamıştır. Yeterli yoğunluğa sahip bir nokta bulutu oluşturulamadığı için süreksizlik yüzeyindeki detaylar gerektiği şekilde temsil edilememiştir. Örnek taramaya ilişkin görüntüler şekil 6.13'te verilmiştir. şekilde eğimli platformun farklı açlara konumlandırıldığı durumlarda çekilen üç fotoğraf görölmektedir (şekil 6.13a, 6.13b ve 6.13c). Benzeri şekilde çekilmiş toplam 37 fotoğraf ile model oluşturulmaya çalışılmıştır. Yaklaşık bir milyon nokta içeren nokta bulutu oluşturulmuştur. Ancak bulutun içerisinde döner tabla ve siyah fona ait noktalar da bulunmaktadır. Bu noktalar çıkartıldığında geriye yaklaşık seksen bin nokta kalmaktadır. Sadece örneği temsil eden bu noktalardan meydana gelen modele ait görüntü şekil 6.13d ve 6.13e'de görölmektedir. Modelin örneği temsil etmede yetersiz kaldığı düşünölmektedir.

Örneğin açık renkli oluşunun bu duruma sebep olduğu düşünülerek farklı renklere sahip cisimler ve hatta renklendirilmiş alçı karışımı ile hazırlanan süreksizlik yüzeyleri de düzeneğe yerleştirilmiş, fotoğrafları çekilmiştir. Ancak yine de yeterli yoğunluğa sahip nokta bulutları elde edilememiştir. Yeniden yapılan değerlendirme sonucunda, örnek boyutunun görece küçük oluşu ve kameranın örneğe olan uzaklığının fazla oluşunun bu probleme neden olduğu düşünülmüştür. Bu sorunun çözümü için, üretilen düzenek vasıtasıyla sabit uzaklıktan fotoğraf çekimi uygulamasından vazgeçilmiştir. Telefonun farklı konumlarda ve örneğe yakın mesafede tutulması suretiyle fotoğraf çekimleri gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde yapılan çekimler ile yoğun nokta bulutları oluşturulabilmiştir. Yeni yöntemle yapılan denemelere ait fotoğraflar Şekil 6.14a, 6.14b ve 6.14c'de görülürken; oluşturulan model ve bu modelin üstüne dokunun işlendiği görüntü sırasıyla Şekil 6.14d ve 6.14e'de verilmiştir. Bu model oluşturulurken kullanılan nokta bulutunun yaklaşık 500 bin nokta içermektedir.



Şekil 6.13: Düzeneğin performansını test etmek amacıyla gerçekleştirilen fotogrametrik analiz denemesine ilişkin görüntüler.

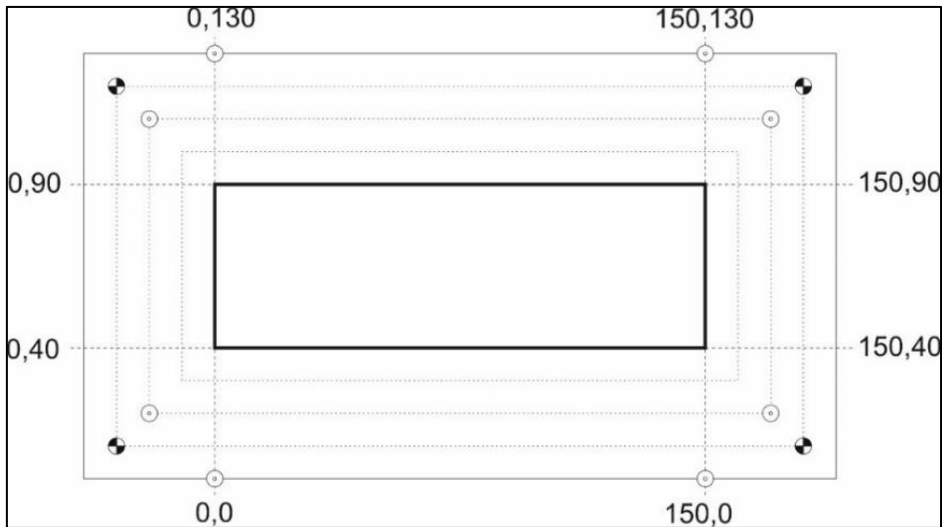


Şekil 6.14: Kameranın sabit olmadığı ve fotoğrafların yakından çekildiği yeni yöntem ile oluşturulan modele ilişkin görüntüler.

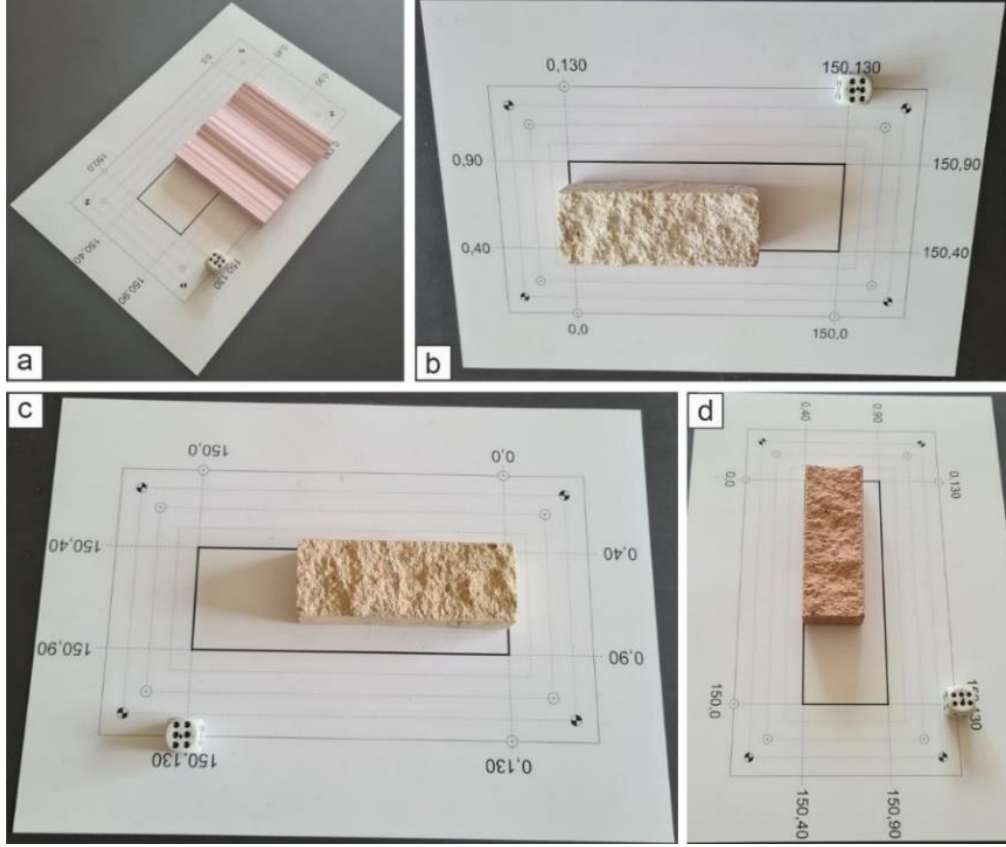
Sabit bir düzeneden fotoğraf çekerek oluşturulan modeller yeterli hassasiyette olmadığı için örnek etrafında rastgele konumlardan fotoğraflar çekilerek model oluşturulması yöntemi benimsenmiştir. Sabit düzenede kamera ile örnek arasındaki uzaklık 30-50 cm iken, rastgele konumlardan çekilen fotoğraflardaki kamera ve örnek arası uzaklık 20-40 cm arasında değişmektedir. Örneğin doğru şekilde sayısallaştırılabilmesi için örneğin boyutlarının analizlerde kullanılacak Agisoft Metashape programına tanıtılması gerekmektedir. Bu işlem örnek üzerindeki koordinatları belirli referans noktalar vasıtasıyla yapılabildiği gibi, örnek haricinde bir referans sistemi kullanılarak da yapılabilmektedir. Bu amaçla SfM yöntemi ile sayısallaştırma işlemlerinde kullanılmak üzere ölçekli bir çizim yapılmıştır (Şekil 6.15). Bu çizimin çıktısı alınarak sayısallaştırılacak örnek çizim üzerine yerleştirilmiş ve fotoğraf çekimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.15'te de görüleceği üzere, çizim üzerinde referans noktalar belirtilmiş ve söz konusu koordinatlar program üzerinde tanımlanan kontrol noktalarına işlenmiştir. Ölçekli çizim plan görünümünde olduğu için, iki boyutta bir konumlandırmaya olanak tanımaktadır. Örnekler için yükseklik verilerinin de programa tanıtılması amacıyla boyutları bilinen üç boyutlu bir objenin de ölçekli çizime entegre edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılmak üzere boyutları elektronik kumpas ile ölçülmüş bir zar kullanılmıştır. Daha sonra zar ölçekli çizim üzerinde koordinatı bilinen bir noktaya yerleştirilmiş ve referanslama işlemlerinde ihtiyaç duyulan yükseklik parametresi de programa tanıtılmıştır.



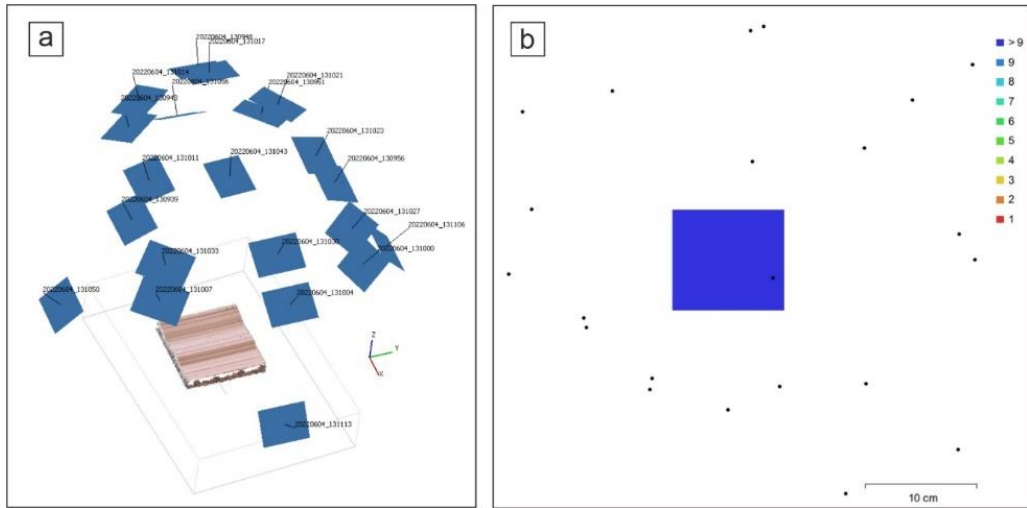
Profilometre ile yapılan sayısallaştırma işlemlerinde olduğu gibi ilk etapta alçı örneklerin analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı açılardan çekilmiş 20-25 fotoğraf kullanılarak örneklere ait sayısal modellerin oluşturulması amaçlanmıştır. Alçı ve ignimbritlerdeki fotoğraf çekimlerine ait örnek görüntüleri Şekil 6.16'da sunulmuştur. Bu şekildeki fotoğraflarda, yükseklik değerinin belirlenmesinde kullanılan zarın (150,130) koordinatında konumlandırıldığı görülmektedir. Rastgele konumlardan çekilen fotoğraflarda kamera konumları ve görüntülerin üst üste bindirme sayıları bir alçı örneği için Şekil 6.17'de verilmiştir. Fotoğraflar çekilirken kameranın örnekten 40 cm'den uzak olmamasına özen gösterilmiştir. SfM yöntemi ile sayısallaştırma işlemlerinde hem alçı hem de ignimbrit örnekleri için 20 fotoğraftan az olmamak şartıyla fotoğraflar çekilmiştir. Bu fotoğraflar için örnek bazında üst üste bindirme oranları her zaman dokuz fotoğrafın üstünde olacak şekilde raporlanmıştır. Örneğin her tarafından görüntü alacak şekilde kamera kullanıcı tarafından yeniden konumlandırılmıştır. Akıllı telefon ile yapılan çekimlerde fotoğrafçılık ekipmanları (tripod, harici aydınlatma, gimbal vb.) kullanılmamış, kapalı bir ortamda güneş ışığı etkisiyle örnekler aydınlatılmıştır. Fotoğrafların benzer güneş ışığı koşullarında çekilmesine özen gösterilmiştir. Akıllı telefon herhangi bir kurala göre (kamera yüksekliği, kamera açısı vb.) konumlandırılmamış, rastgele konumlardan fotoğraf çekecek şekilde örnek etrafında döndürülmüştür. İzlenecek bu yöntem ile profesyonel ekipmanlar kullanılmadan, arazi şartlarında da uygulanabilecek bir fotoğraf çekim süreci oluşturulmaya çalışılmıştır.



Şekil 6.15: Fotogrametrik yöntemde referanslama amacıyla kullanılan ölçekli çizim.



Şekil 6.16: Fotogrametrik yöntemde kullanılmak üzere çekilen fotoğraflar: (a) JRC'nin 14-16 olduğu alçı örnek; (b) bej, (c) sarı ve (d) vişne renkli ignimbirit.



Şekil 6.17: SfM yönteminde kullanılacak fotoğrafların çekimi esnasındaki (a) kamera konumları ve (b) çekilen fotoğraflardaki görüntü üst üste bindirme sayıları.

Çekilen fotoğraflar analiz programına yüklendikten sonra ilk olarak fotoğrafların hizalanması gerekmektedir. Program her bir fotoğrafta bulunan ortak noktaları belirleyerek bu noktalara göre hizalama işlemini gerçekleştirmektedir. Hem hassas hizalamanın gerçekleştirilmesi hem de referanslamanın yapılabilmesi amacıyla fotoğraflar üzerinde kontrol noktaları belirlenmiştir. Şekil 6.15'te görülen iç içe geçmiş halkalardan oluşan alanlar kontrol noktalarıdır. Bu noktalar her bir fotoğrafta görülmekte olup, ilgili noktalara ait koordinatlar da programa girilmiştir.

Hizalama işleminden önce bir fotoğraf üzerinde kontrol noktalarının tanıtılması yeterli olmaktadır. Hizalama işlemi gerçekleştirildikten sonra program kontrol noktalarını otomatik olarak konumlandırmaktadır. İç içe halkalardan oluşan kontrol noktalarının içindeki halka 1 mm çapa sahip iken dıştaki halka ise 5 mm çapa sahiptir. Program kontrol noktalarını küçük halka içerisinde konumlandırır ise 0.5 mm'ye varan maksimum hata payı ile konumlandığı düşünülebilir. Dışardaki halkaya göre benzer bir yaklaşım yapılırsa, bu sefer de 2.5 mm'ye varan maksimum hata payının olduğundan söz edilebilir. Program, fotoğrafların açısına bağlı olarak, bazı durumlarda halkaların merkezinden farklı noktalara kontrol noktalarını konumlandırmaktadır. Bu gibi sapmaların önüne geçmek amacıyla kontrol noktalarının her biri elle konumlandırılmıştır. Bu konumlandırma işlemlerini takiben yapılan hizalama sonucunda elde edilen GSD (Ground Sampling Distance), RMSE (Root Mean Square Error) ve hata (Reprojection Error) değerleri alçı örnekler için Çizelge 6.3'te, farklı renkli ignimbiritler içerisinde seçilmiş birer örneğe ait değerler ise Çizelge 6.4'te sunulmuştur. Bu çizelgeler incelendiğinde, kontrol noktalarına ait RMSE değerlerinin ortalamasının 0.26 mm olduğu görülmektedir. Modelleme sonucu oluşan hata alçı ve ignimbirit örnekler için sırasıyla ortalama 1.1 ve 0.579 piksel (px) olarak belirlenmiştir. GSD değerleri incelendiğinde 1 pikselin ortalama olarak yaklaşık 0.1 mm'ye denk geldiği anlaşılmaktadır. Bu durumda standart alçı örnekler için modelleme hassasiyetinin yaklaşık 0.1 mm olduğu söylenebilir. Çizelge 6.4'te gösterilen ignimbirit örnekler için ise modelleme hassasiyeti yaklaşık olarak 0.05 mm'dir. Üç boyutlu modeli oluşturulan diğer ignimbirit örneklerinde de benzer modelleme başarısına ulaşılmıştır.

Hizalama işleminden sonraki aşamada nokta bulutu üretimi yapılmaktadır (Şekil 6.18a). Nokta bulutu üretiminde beş farklı kalitede nokta bulutları

oluşturulabilmektedir. Orta ve düşük kalitelerde nokta bulutu üretmenin işlem hızı açısından avantajları bulunmaktadır ancak kalite düştükçe nokta bulutu yoğunluğu azalmaktadır. Bu nedenle yüksek ve en yüksek kalitede nokta bulutu üretimi üzerinde durulmuştur. Çok yüksek kaliteli nokta bulutları oluşturulurken orijinal fotoğraflar kullanılmaktadır. Ancak yüksek kaliteli nokta bulutlarında ise orijinal fotoğraflar en ve boy olarak toplamda dört kat küçültülmektedir. Bu nedenle orijinal fotoğrafların çözünürlüğü düşmekte ve dolayısıyla fotoğraflardan elde edilebilecek veri de azalmaktadır. Herhangi bir veri kaybı olmaması için orijinal fotoğrafların kullanılmasına ve analizlerin olabilecek en yüksek kalitede gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Kullanılan bilgisayar donanımına bağlı olarak işlem süresi değişiklik göstermektedir. Yapılan analizlerde çok yüksek kaliteli nokta bulutunun oluşturulması ortalama olarak 45 dakika sürmüştür.

Nokta bulutu üretiminden sonra üç boyutlu katı modelin oluşturulması amacıyla mesh üretimi aşamasına geçilmiştir (Şekil 6.18b). Bu işlem de en yüksek kalitede gerçekleştirilmiştir. Üretilen model üzerine örneğe ait doku ve renklerin işlenmesi amacıyla programda doku üretimi fonksiyonu kullanılmıştır. Bu işlem ile üretilen model üzerine örneklerin gerçek görüntüleri eklenmiştir. Daha hassas ve yüksek çözünürlüklü bir modelin üretilmesi amacıyla "tiled model" üretim seçeneği kullanılmıştır (Şekil 6.18c). Bu işlem de yüksek kalite seçeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tiled modelin üretilmesinden sonra sayısal yükseklik modelinin üretimine geçilmiştir (Şekil 6.18d). Sayısal yükseklik modeli oluşturulurken tiled model girdi olarak kullanılmıştır.

Çizelge 6.3: Alçı örnekler için SfM yöntemiyle üç boyutlu model oluşturma işlemine ait performans parametreleri.

JRC	GSD (mm/px)	Kontrol noktaları için toplam RMSE (mm)	Hata (px)
0-2	0.0953	0.212	1.39
4-6	0.115	0.211	1.08
8-10	0.115	0.25	0.952
14-16	0.118	0.224	1.27
18-20	0.111	0.258	0.899

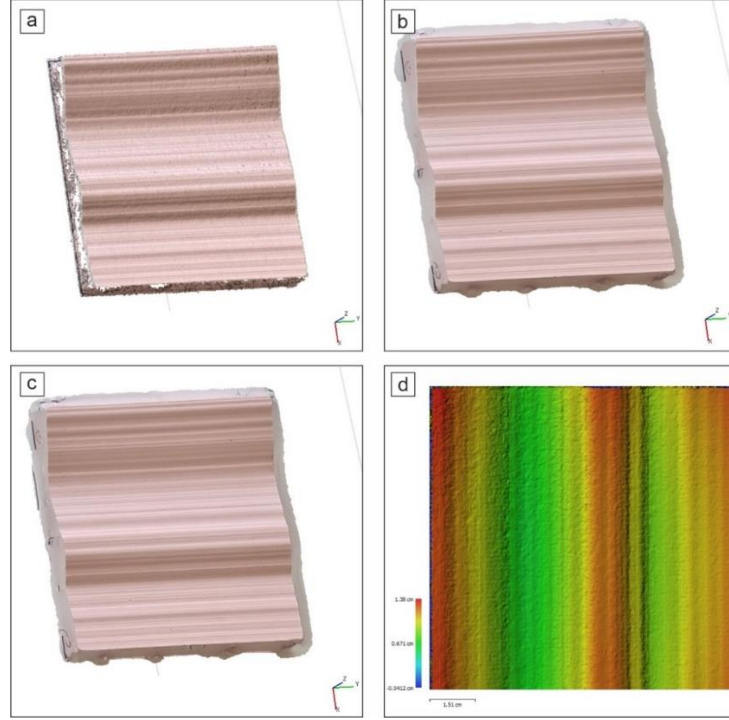
Çizelge 6.4: İgnimbiritler için SfM yöntemiyle üç boyutlu model oluşturma işlemine ait performans parametreleri.

İgnimbirit	GSD (mm/px)	Kontrol noktaları için toplam RMSE (mm)	Hata(px)
Bej	0.106	0.29	0.605
Sarı	0.102	0.31	0.624
Vişne	0.082	0.33	0.508

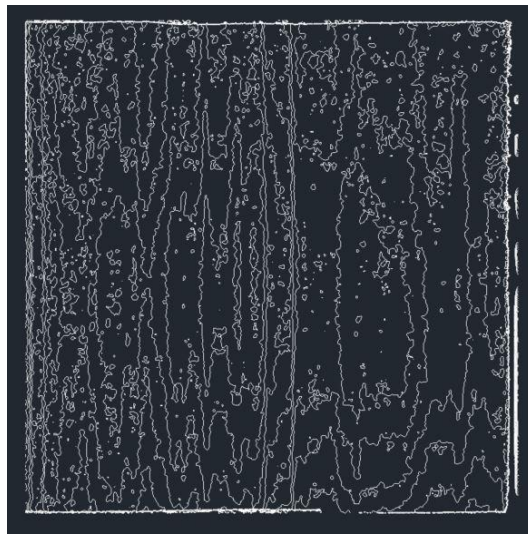
Fotogrametrik yöntem ile üretilen sayısal yükseklik modeli “.XYZ” formatında kaydedilmiştir. Daha sonra bu dosya CloudCompare ([www.danielgm.net/cc/](http://www.danielgm.net/cc/)) isimli bilgisayar programına aktarılmış ve süreksizlik profillerinin elde edilmesi amacıyla işlemler gerçekleştirilmiştir. Dışa aktarılan süreksizlik profilleri incelendiğinde yükseklik verilerinin beklenenden daha düşük hassasiyete sahip olduğu görülmüştür. 0.1 mm ve daha düşük hassasiyette yükseklik verisinin elde edilmesi amaçlanırken, bahsedilen yöntemle dışarı aktarılan koordinat verilerindeki hassasiyetin 1 mm mertebesinde olduğu görülmüştür. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla Agisoft Metashape programında sayısal yükseklik modelinin üzerine istenilen hassasiyette yükseklik konturları eklenmiştir. İlk etapta alçı örnekler üzerinde gerçekleştirilen bu işlem ile homojen konturların oluşması beklenmiştir. Ancak sayısal yükseklik modeli kullanılarak yapılan bu işlem sonucu beklenen hassasiyete erişilememiştir. Standart profillerde gözlenen 3. boyuttaki sabit pürüzlülüğü temsil edecek biçimde bir kontur oluşumu gözlenmemiştir (Şekil 6.19).

Şekil 6.19'dan görüleceği üzere, standart profillerde bile tutarlı olmayan yükseklik değerleri gözlenmektedir. Bu nedenle örneklerin sayısallaştırılmış katı modelleri kullanılarak işlem yapmanın yanlış sonuçlar verebileceği üzerinde durulmuş ve hesaplamaların nokta bulutları yardımıyla yapılmasına karar verilmiştir. Bu durumun bir avantajı da işlem süresinin bir miktar daha kısalacak olmasıdır. Agisoft Metashape kullanılarak üretilen nokta bulutları dosya boyutunun büyümesinin önüne geçilmesi amacıyla “.PLY” formatında kaydedilmiştir. Nokta bulutu dosyaları CloudCompare programına aktarılarak kesit alma işlemlerine geçilmiştir. JRC'nin 18-20 aralığına sahip alçı örnek için fotogrametrik yöntem ile oluşturulan nokta bulutu Şekil 6.20'de verilmiştir. Alçı örneklerde üçüncü boyutta farklı bir pürüzlülük gözlenmediği için tek bir kesit üzerinden profil çıkartılması pürüzlülüğün tayini için

yeterlidir. Buna karşın, ignimbritlerde üç boyutlu bir pürüzlülük söz konusu olduğu için (Şekil 6.21), bu örnekler üzerinde farklı konumlardan kesitler çıkartılması gerekmektedir. Bu kesitlerden elde edilecek profiller ile ortalama JRC değeri belirlenmelidir.

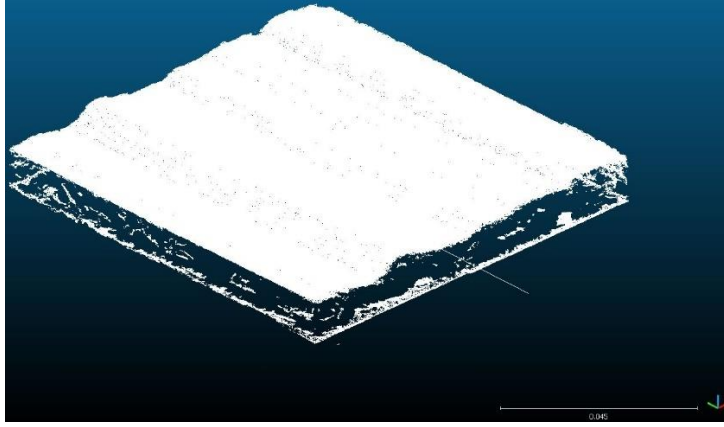


Şekil 6.18: SfM yöntemi ile oluşturulan (a) yüksek yoğunluklu nokta bulutu, (b) mesh, (c) tiled model ve (d) sayısal yükseklik modeli.

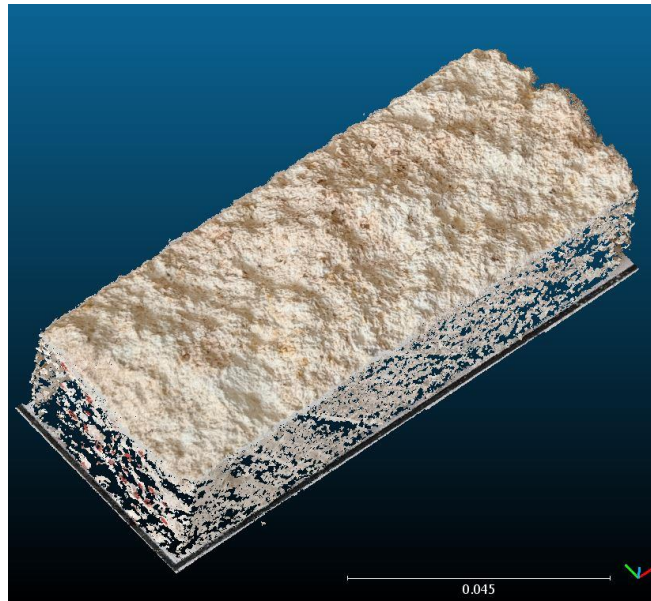


Şekil 6.19: Sayısal yükseklik modeli kullanılarak oluşturulan 0.1 mm aralıktaki yükseklik konturları.

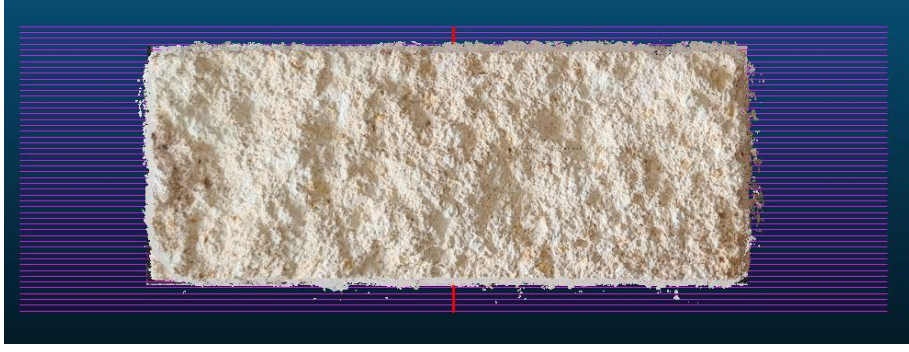
CloudCompare programında kesit alma işlemi için kesit alınması istenilen doğrultuya dik yönde bir hat çizilmesi gerekmektedir. Makaslama doğrultusunda kesit almak istenildiği için, bu doğrultu ile olan paralelliğin bozulmaması gerekmektedir. Makaslama doğrultusuna tam dik olacak şekilde doğru çizmek maksadıyla nokta bulutu AutoCAD programına aktarılmış ve makaslama doğrultusuna dik yönlü bir hat çizilmiştir (Şekil 6.22 kırmızı hat). Bu hattı içeren dosya daha sonra CloudCompare programına aktarılarak kesit alma işlemine devam edilmiştir. Nokta bulutu üzerinde, AutoCAD programı ile çizilmiş doğruya dik yönde, 0.1 mm aralıklarla kesitler hatları oluşturulmuştur (Şekil 6.22 mor renkli hatlar).



Şekil 6.20: JRC'nin 18-20 aralığına sahip alçı örnek için fotogrametrik yöntem ile oluşturulan nokta bulutu.



Şekil 6.21: Bej renkli bir ignimbirit örneğine ait çok yüksek kaliteli nokta bulutu.



Şekil 6.22: CloudCompare programı kullanılarak oluşturulan mor renkli kesit hatları.

Alçı örneklerden bir kesit hattı boyunca profil çıkarılmıştır. Ancak ignimbiritlere ait profilometre ölçümlerinde örneği temsil etmesi amacıyla dört profil ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu profil ölçümlerinin yapıldığı noktalara denk düşecek biçimde Şekil 6.22'de görülen profil hatları ayıklanmış ve profilometre ölçümlerine yakın konumlardan kesitler çıkartılmıştır. İgnimbiritlerde gerçekleştirilen profilometre ölçümlerinde olduğu gibi her örnekten dört kesit alınmıştır.

Katı model kullanılmadığı için, kesit hattı boyunca aynı X değerine sahip farklı Y noktalarının olduğu görülmüştür. Bu noktalar sayısallaştırma işlemi sırasında oluşan istenmeyen noktalar olarak göze çarpmaktadır. İstenmeyen noktaları sayısallaştırma esnasında temizlemek mümkündür ancak bu durum nokta bulutunun yoğunluğunun azalmasına ve pürüzlülüğü temsil eden noktaların programın karar mekanizması vasıtasıyla silinmesine sebep olmaktadır. Bu maksatla istenmeyen noktaların temizlenmesi işlemi kesitler çıkartıldıktan sonra kullanıcı kontrollü gerçekleştirilmiştir.

İstenmeyen Y noktalarının temizlenmesinden sonraki aşama X yönündeki ilerleme aralıklarının düzenlenmesi işlemidir. Nokta bulutundan elde edilen kesitlere ait koordinatlar incelendiğinde, 0.1 mm'nin altında ilerleme aralıklarının olduğu görülmüştür. X değerlerinin 0.5 mm ilerleme aralığında olabilmesi amacıyla MS Excel üzerinden filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Seçilen ilerleme aralığı içine düşen değerlere ait kusurlar ilerleme aralıklarına bağlı olarak yuvarlanmış ve koordinatlar sadeleştirilmiştir. Daha sonrasında sadeleştirilmiş X değerleri incelenmiş ve aynı ilerleme aralıklarına sahip olan değerlere karşılık gelen Y



değerlerinin ortalaması alınmıştır. Bu şekilde 3000 ila 5000 arasında değişen nokta çiftine sahip olan nokta bulutu, ilerleme aralığına bağlı olarak 200 veri çiftine indirgenmiştir. Bu durum veri sayısında bir azalmaya sebep olmakta birlikte, analizlerin yapılması için gereklidir. Bu işlemler her bir ignimbirit örneği üzerinden alınan dört kesitte 0.5 mm ilerleme aralığı için yapılmış olup, toplamda 180 kesit oluşturulmuştur.

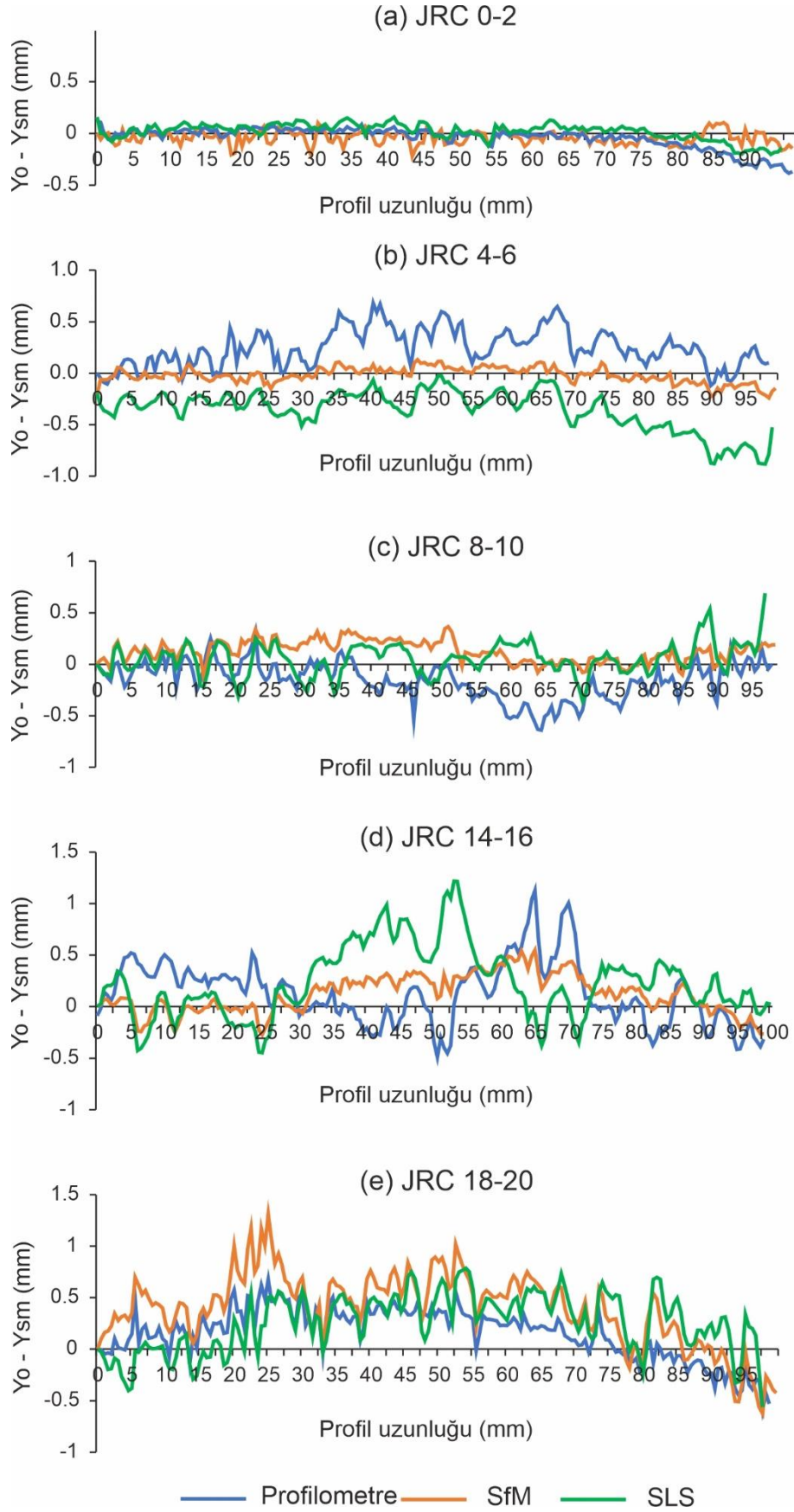
#### **6.4. Sayısallaştırma Yöntemlerinin Değerlendirilmesi**

Çalışma kapsamında standart JRC profillerine ait Tatone (2009) tarafından sunulmuş sayısal veriler kullanılmıştır. Bu referans veriler ile detayları önceki bölümlerde anlatılan yapay örnekler üretilmiştir. Referans veriler ile sayısallaştırma sonucu elde edilen veriler karşılaştırılarak, sayısallaştırma işlemlerine ait performans değerlendirmesi yapmak mümkündür. Bu amaçla çalışmada kullanılan her bir standart JRC profili için referans veri ile profilometre, SLS ve SfM yöntemlerinden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Tatone (2009) tarafından referans veriler 0.5 mm ilerleme aralığına sahip olacak şekilde oluşturulduğu için bu çalışma kapsamında da aynı ilerleme aralığına sahip veriler kullanılmıştır. Profillere ait koordinat verilerinde, yatay yöndeki (X-yönü) değerler aynı iken, düşey yöndeki (Y-yönü) değerler ise farklılık göstermektedir. Bu farklar dört farklı veri seti ile her bir profil için ayrı ayrı hesaplanmış ve yatay yöndeki uzunluğa bağlı olarak değişim grafikleri çizilmiştir (Şekil 6.23). Bu grafiklerde düşey eksen referans veri ( $Y_0$ ) ile sayısallaştırma işlemi sonucu belirlenen verinin ( $Y_{sm}$ ) farkı bulunurken, yatay eksen ise profil uzunluğu yer almaktadır. Şekil 6.19'daki farklar incelendiğinde, JRC'nin 0-2 aralığı için maksimum farkın 0.4 mm olduğu görülmektedir. 4-6 ve 8-10 JRC değerine sahip profillerde ise genel olarak 0.5 mm'nin altındaki farklar dikkat çekmektedir. JRC'nin 14-16 ve 18-20 aralığı için maksimum farklar bir miktar artmaktadır. Ancak oluşan en büyük farkın yaklaşık 1.4 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 6.23e). Çalışmada kullanılan bütün sayısallaştırma yöntemleri için pürüzlülük arttıkça referans veri ile sayısal modele ait yükseklik verisi arasındaki farkın arttığı söylenebilir. Ancak bu farkın, birkaç istisnai nokta haricinde genel olarak 1 mm'nin altında olduğu görülmektedir. Açılarda oluşturulan fark grafiklerinin benzerleri ignimbiritler için de oluşturulacaktır. Bir sonraki bölümde ignimbiritlerdeki JRC sınıflarının oluşturulma aşamalarına değinilecektir. Belirlenen JRC sınıflarına göre

fark grafikleri oluşturulacağı için igrimbirirlere ait söz konusu grafikler bir sonraki bölümde verilecektir.

Sayısallaştırma yöntemleri ayrı ayrı incelendiğinde, bir yöntemin diğer bir yöntemle karşı belirgin bir üstünlüğünün olduğunu söylemek oldukça güçtür. Referans profillere ait maksimum ve minimum yükseklik ile genliğe ilişkin veriler Çizelge 6.5'te sunulmuştur. Buradaki genlik miktarları incelendiğinde, sayısallaştırma yöntemlerine bağlı olarak her bir profil özelinde oluşan yükseklik farklarının maksimum genliğe oranla oldukça düşük kaldığı anlaşılmıştır. Ayrıca bu farkların süreksizlik profili boyunca yerel birkaç bölgede meydana geldiği de Şekil 6.23'te görülmektedir.

Farklı sayısallaştırma yöntemleri ile elde edilen veriler ile referans veri arasındaki farkın daha anlaşılabilir olması adına, bu verilere ait RMSE değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 6.6'da sunulan değerler incelendiğinde, profilometre, SfM ve SLS yöntemleri için ortalama RMSE değerleri sırasıyla 0.247, 0.218 ve 0.288 olmaktadır. SfM yöntemi diğer iki yöntemle göre daha başarılı görünmekle birlikte, sonuçlar genel itibarıyla birbirine çok yakındır. Sayısallaştırma süreçlerinde kullanılan ekipmanlar ve harcanan işgücü hesaba katıldığında, profilometre ile sayısallaştırma en pratik yöntem olarak düşünülmektedir. Ancak bu yöntem sadece iki boyutlu profillerin analizinin yapılmasına olanak vermektedir. Üç boyutlu modelleme imkânı da sunan SfM ve SLS yöntemleri arasında hem ekonomik olması hem de yüksek hassasiyete sahip veriler sunması sebebiyle SfM yöntemi, SLS yöntemine göre bir adım önde görünmektedir.



Şekil 6.23: Alçılarda farklı JRC aralıkları için sayısallaştırma yöntemlerinden elde edilen veriler ile referans veriler arasındaki yükseklik farkları.

Çizelge 6.5: Referans olarak kullanılan standart profillere ait maksimum ve minimum yükseklik ile genlik değerleri.

JRC	Maksimum Yükseklik (mm)	Minimum Yükseklik (mm)	Genlik (mm)
0-2	0.6	-0.03	0.63
4-6	1.07	-0.4	1.47
8-10	3.54	-0.05	3.59
14-16	0.19	-6.3	6.49
18-20	2.51	-1.66	4.17

Çizelge 6.6: Referans veri kullanılarak üretilen örnekler üzerinde farklı sayısallaştırma yöntemleriyle elde edilen verilere göre hesaplanan RMSE değerleri.

JRC	Profilometre	SfM Yöntemi	SLS Yöntemi
0-2	0.0762	0.1104	0.0793
4-6	0.3030	0.0776	0.4053
8-10	0.2355	0.1606	0.1623
14-16	0.3283	0.2182	0.4115
18-20	0.2902	0.5228	0.3794

## 7. SÜREKSİZLİK YÜZEYLERİNE AİT SAYISAL PARAMETRELER

Standart profillere ait sayısallaştırma işlemlerinin performansı yeterli bulunduktan sonra, söz konusu profillere ait pürüzlülüğü tanımlayacak parametrelerin hesaplanması aşamasına geçilmiştir. Literatürde pürüzlülüğü tanımlamak amacıyla yaygın şekilde kullanılan çeşitli istatistiksel parametreler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları ortalama pürüz yüksekliği ( $R_a$ ), ortalama yüzey yüksekliği ( $Z_1$ ), pürüz eğimlerinin karelerinin ortalamasının karekökü ( $Z_2$ ), yapı fonksiyonu (SF), ortalama eğim açısı ( $i_{ave}$ ), gerçek profil uzunluğu ( $R_L$ ) ve normalize edilmiş uzunluk yöntemi ( $L_{\theta^*}$ ) olarak sıralanabilir. Bu parametrelere ait detaylara önceki bölümlerde değinilmişti (Bkz. Bölüm 3). Ayrıca bu istatistiksel parametreler kullanılarak Barton-Bandis kriterinde girdi parametresi olarak kullanılan JRC'nin belirlenmesi de mümkündür. Bu amaçla üç farklı sayısallaştırma yönteminden elde edilen sayısal veriler kullanılarak ilk etapta istatistiksel parametreler hesaplanmıştır. Sayısal veriler Magsipoc ve ark. (2020) tarafından literatüre sunulan SRC (Surface Roughness Calculator) isimli programda analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesinden sonra pürüzlülüğü tanımlamada kullanılacak parametreler belirlenmiştir. Karar verme aşamasında bu parametrelerin standart profillere ait pürüzlülüğü temsil etmedeki performansları ön planda tutulmuştur.

### 7.1. Standart Profillere Ait İstatistiksel Parametreler ve JRC Değerleri

#### 7.1.1. Profilometre Yöntemi

Standart profillere ait 0.25 mm ve 0.5 mm ilerleme aralıklarına sahip profillere ait koordinatlar kullanılarak  $R_a$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$ , SF,  $i_{ave}$ ,  $R_L$  ve  $L_{\theta^*}$  istatistiksel parametreleri hesaplanmıştır.  $L_{\theta^*}$  parametresi yardımıyla pürüzlülük hesaplamalarında kullanılan  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi belirlenmiştir. Bu parametrelere ait sonuçlar Çizelge 7.1'de sunulmuştur. Çizelgenin üst kısmında 0.25 mm, alt kısmında ise 0.5 mm ilerleme aralığına göre hesaplanan istatistiksel parametreler görülmektedir. Çizelge 7.1'deki sonuçlar incelendiğinde, pürüzlülüğün artmasına rağmen azalan parametrelerin olduğu görülmektedir (koyu renkli değerler). Bu şekilde azalan parametrelerin büyük

çoğunluğu 0.25 mm ilerleme aralığı ile sayısallaştırılan kısımda görülmektedir.  $R_a$  ve  $Z_1$  parametreleri 0.25 mm ve 0.5 mm'lik ilerleme aralıkları için JRC'nin 14-16 değişim aralığına kadar artmakta, ancak JRC'nin 18-20 aralığı için bir önceki pürüzlülük aralığına ait değerden daha düşük bir değer almaktadır. JRC'nin en yüksek değer aralığı için bu parametrelerde gözlenen bu düşüşün ilerleme aralığından bağımsız olduğu anlaşılmıştır. Bu iki parametrenin artan pürüzlülüğü belirli bir seviyeye kadar temsil edebildiği görülmüştür. 0.25 mm ilerleme aralığına ait parametreler içinde  $R_a$  ve  $Z_1$  parametreleri dışında kalan bütün parametreler, JRC'nin 8-10 değerleri için bir önceki pürüzlülük seviyesine ait parametrelerden daha düşük değerler sunmaktadır. Benzeri bir durum 0.5 mm ilerleme aralığına sahip değerlerde gözlenmediği için bu durumun parametrelerden bağımsız; ancak ilerleme aralıklarına bağlı olduğu düşünülmektedir. Yu ve Vayssade (1991) çalışmalarında yararlandıkları  $Z_2$ , SF,  $SD_i$  ve  $R_L$  parametrelerinin ilerleme aralıklarındaki değişimlere duyarlı olduğunu belirtmişlerdir.  $SD_i$  parametresi,  $i_{ave}$  parametresinin standart sapması şeklinde hesaplandığı için  $i_{ave}$  parametresinin de ilerleme aralıklarındaki değişimlerden etkilendiği söylenebilir. Bu araştırmacılar 0.25 mm, 0.5 mm ve 1 mm'lik ilerleme aralıklarına göre çalışmalar gerçekleştirmiş ve farklı JRC eşitlikleri önermişlerdir. Benzer şekilde Tatone ve Grasselli (2010)  $\theta_{max}/(C+1)$  ve  $R_L$  parametrelerini kullanarak yaptıkları çalışmada farklı ilerleme aralıklarından yararlanmışlardır. 0.5 mm ve 1 mm'lik ilerleme aralıkları için hem istatistiksel parametreleri hesaplamışlar hem de bu parametrelerden JRC'nin hesaplanmasını sağlayan eşitlikler önermişlerdir.

Literatürde  $Z_2$ , SF,  $R_L$  ve  $\theta_{max}/(C+1)$  parametrelerine ait JRC dönüşüm eşitlikleri bulunmakta ve bu parametreler JRC'nin hesaplandığı çalışmalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak  $i_{ave}$  parametresine bağlı olarak JRC hesaplanmasına olanak veren bir eşitlik bulunamamıştır. Bu nedenle  $R_a$  ve  $Z_1$  parametrelerinin yanı sıra  $i_{ave}$  parametresinin de pürüzlülük tanımlama sürecinde kullanılmamasına karar verilmiştir. Bundan sonraki aşamalarda hangi ilerleme aralığı ve parametrelerin kullanılması gerektiğini belirlemek amacıyla istatistiksel parametreler kullanılarak sayısallaştırılmış profillere ait JRC değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.2). Farklı ilerleme aralıkları için uygun olan JRC formülleri kullanılmış ve ilgili eşitlikler çizelge altında sunulmuştur.

Çizelge 7.2 incelendiğinde, 0.25 mm ilerleme aralığına sahip profillerden hesaplanan JRC değerlerinin, standart JRC değişim aralıkları ile çoğunlukla uyumlu olmadığı görülmektedir. Özellikle standart profillerin 0-2 ve 4-6 değerleri için yüksek JRC değerleri hesaplanmıştır. JRC'nin 0-2 ve 4-6 olduğu örneklerde 0.25 mm'lik ilerleme aralığı için hesaplanan istatistiksel parametrelerin 0.5 mm'lik ilerleme aralığı için hesaplanan parametrelerden yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 7.1). JRC değerlerinin bu nedenle yüksek olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 7.1: Standart profiller kullanılarak profilometre ölçümleri sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler.

<b>0.25 mm</b>	$R_a$	$Z_1$	$Z_2$	$i_{ave}$	$R_L$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.	SF
0-2	0.1086	0.1371	0.17095	0.1150	1.04410	6.62614	0.00183
4-6	0.2484	0.3059	0.21359	0.1545	<b>1.02180</b>	8.67952	0.00285
8-10	0.7939	0.9087	<b>0.20838</b>	<b>0.1529</b>	<b>1.02076</b>	<b>8.61579</b>	<b>0.00271</b>
14-16	1.4530	1.7730	0.28083	0.2092	1.03695	11.93080	0.00493
18-20	<b>0.6909</b>	<b>0.8420</b>	0.40370	0.2741	1.07075	16.18850	0.01019
<b>0.5 mm</b>	$R_a$	$Z_1$	$Z_2$	$i_{ave}$	$R_L$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.	SF
0-2	0.1097	0.1403	0.08398	0.0637	1.00351	3.55466	0.00176
4-6	0.2510	0.3080	0.13493	0.1110	1.00900	6.18592	0.00455
8-10	0.7934	0.9083	0.18672	0.1359	1.01588	7.68986	0.00816
14-16	1.4500	1.7690	0.26775	0.2018	1.03341	11.62631	0.01760
18-20	<b>0.6889</b>	<b>0.8397</b>	0.36168	0.2550	1.05821	14.76745	0.03228

JRC'nin 8-10 değişim aralığında, 0.25 mm ilerleme aralığı ile hesaplanan istatistiksel parametrelerin 0.5 mm ilerleme aralığı için hesaplanan istatistiksel parametrelerden yüksek olduğu görülmektedir (SF parametresi hariç). Yüksek değere sahip istatistiksel parametrelerle hesaplanan JRC değerlerinin yüksek olacağı öngörülmüştür. Ancak  $Z_2$  ve  $R_L$  parametresi ile hesaplanan JRC değerlerinde, istatistiksel parametreler arasındaki büyüklük farkının tam tersi bir tablo ile karşılaşılmıştır. 0.25 mm'den 0.5 mm'lik ilerleme aralığına geçildiğinde  $Z_2$  ve  $R_L$  parametrelerinin değerleri azalmış; ancak bu parametrelerle hesaplanan JRC değerleri ufak da olsa artmıştır. 0.25 mm ile 0.5 mm'lik ilerleme aralıkları için SF parametresi ile hesaplanan JRC değerindeki artış, istatistiksel parametrelerdeki

artışla uyumludur.  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi ile 0.5 mm'lik ilerleme aralığına göre JRC parametresi belirlenebilmektedir. Bu parametre için 0.25 mm ilerleme aralığına göre bir JRC eşitliği önerilmemiştir. Buna rağmen 0.5 mm'lik ilerleme aralığı için önerilen JRC eşitliği 0.25 mm'lik ilerleme aralığı için de kullanılmıştır. İlerleme aralığındaki artışa bağlı  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresinin değerinde azalma vardır. 0.5 mm ilerleme aralığı için eşitlik ile hesaplanan JRC değerleri incelendiğinde, istatistiksel parametredeki azalmaya karşılık JRC değerinde de azalma izlenmiştir. Ayrıca bu ilerleme aralığı için önerilen eşitliğin, 0.25 mm'lik ilerleme aralığı için de kabul edilebilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çizelge 7.2: Çizelge 7.1'de sunulan istatistiksel parametreler kullanılarak hesaplanan JRC değerleri.

0.25 mm		Hesaplanan JRC Değerleri		
JRC	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0-2	5.80	5.72	13.74	6.86
4-6	8.37	8.27	7.61	9.95
8-10	8.06	7.95	7.32	9.86
14-16	12.43	12.28	11.78	14.42
18-20	19.84	19.64	20.98	19.76
0.5 mm		Hesaplanan JRC Değerleri		
JRC	$Z_2(5)$	SF(6)	$R_L(7)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0-2	1.72	1.76	2.52	1.61
4-6	4.86	5.25	5.7	6.16
8-10	8.07	8.39	8.76	8.49
14-16	13.07	14.2	13.84	14.02
18-20	18.88	20.65	17.84	18.03

(1)  $JRC = 60.32(Z_2) - 4.51$  (Yu ve Vayssade, 1991)

(2)  $JRC = 239.27(SF)^{0.5} - 4.51$  (Yu ve Vayssade, 1991)

(3)  $JRC = 558.68(R_L)^{0.5} - 557.13$  (Yu ve Vayssade, 1991)

(4)  $JRC = 3.95[\theta_{max}^*/(C + 1)_{2D}]^{0.7} - 7.98$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

(5)  $JRC = 61.79(Z_2) - 3.47$  (Yu ve Vayssade, 1991)

(6)  $JRC = 137.1739(SF)^{0.5} - 3.9998$  (Li ve Zhang, 2015)

(7)  $JRC = (0.0336 + 0.00124/\ln R_L)^{-1}$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

JRC'nin 14-16 değişim aralığı için SF parametresi dışında kalan üç parametreye ait değerler 0.25 mm'den 0.5 mm'lik ilerleme aralığına geçildiğinde azalmıştır. SF



parametresinde ise yine tam tersi bir durum gözlenmiştir.  $Z_2$  ve  $R_L$  parametreleri için ilerleme aralığına bağlı olarak istatistiksel parametrelerdeki azalışa karşın JRC değerinde artış görülmüştür. SF parametresi için ilerleme aralığı arttıkça istatistiksel parametrenin değeri ve buna bağlı olarak hesaplanan JRC değeri de artmaktadır. İlerleme aralığındaki artışla beraber  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresine ait istatistiksel değer ve JRC değeri azalmıştır.

JRC'nin 18-20 değişim aralığı için yine SF parametresi dışında kalan üç parametreye ait istatistiksel değerler 0.25 mm'den 0.5 mm'lik ilerleme aralığına geçildiğinde azalmıştır.  $Z_2$ ,  $R_L$  ve  $\theta_{max}/(C+1)$  parametreleri için ilerleme aralığına bağlı olarak istatistiksel parametrelerdeki azalışla beraber JRC değeri de azalmıştır. Bir önceki JRC değişim aralığında olduğu gibi SF parametresi için ilerleme aralığı arttıkça istatistiksel parametrenin değeri ve buna bağlı olarak hesaplanan JRC değeri de artmıştır.

İstatistiksel parametreler hesaplanırken kullanılan 0.25 mm'lik ilerleme aralığı düşük pürüzlülüğe sahip profillerde örneği olduğundan daha pürüzlü olarak göstermektedir. Bu durum hem istatistiksel parametrelerde hem de hesaplanan JRC değerlerinde görülmektedir. Pürüzlülük arttıkça JRC değişim aralıklarına yakın sonuçlar elde edilmektedir. 0.5 mm'lik ilerleme aralığına ait sonuçlar incelendiğinde ise istatistiksel parametreler pürüzlülüğün artmasına bağlı olarak artmaktadır. Hesaplanan JRC değerleri de JRC değişim aralıklarına büyük çoğunlukla uymaktadır. Uyumsuz olan değerlerdeki farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğu düşünülmektedir. Literatürde karşılaşılan çalışmalarda ağırlıklı olarak 0.5 mm'lik ilerleme aralıklarının tercih edildiği görülmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan referans verinin de 0.5 mm ilerleme aralığına sahip olduğu düşünüldüğünde; 0.25 mm'lik ilerleme aralığında karşılaşılan uyumsuzluklar üzerine bu ilerleme aralığı ile hesaplamalara devam etmenin uygun olmayacağı kanaatine varılmıştır. Çizelge 7.2'de gösterilen parametrelere bağlı hesaplanan JRC değerleri standart profillere ait değişim aralıkları ile tutarlıdır. Bu durum söz konusu istatistiksel parametrelerin pürüzlülüğü temsil etmedeki iyi performansını ortaya koymaktadır. Ayrıca bu sonuçlar, profilometre ile gerçekleştirilen sayısallaştırma işleminin de başarılı olduğuna işaret etmektedir.

### 7.1.2. SLS Yöntemi

Profilometre ile sayısallaştırma işleminden elde edilen verilerle hesaplanan istatistiksel parametrelere ait sonuçların ışığında, SLS yönteminde sadece 0.5 mm'lik ilerleme aralığına sahip profiller üzerinde çalışılmış ve dört parametre hesaplanmıştır (Çizelge 7.3). Düşük pürüzlülük seviyelerinde SLS yöntemiyle hesaplanan JRC değerleri standart profillere ait değişim aralıklarına yakındır (Çizelge 7.4). Pürüzlülük arttıkça JRC değerleri standart profillere ait JRC değişim aralıklarından uzaklaşmaktadır. JRC'nin 14-16 aralığı için hesaplanan istatistiksel parametreler, JRC 18-20 aralığı için hesaplanandan büyüktür. SLS yöntemine göre JRC'nin 14-16 aralığına ait profiller daha pürüzlü görülmekte ve dolayısıyla JRC değeri de daha yüksek çıkmaktadır. Taranmak istenen örnek boyutunun makine ile taranabilecek en küçük örnek boyutuna yakın olması ve tarayıcı ile örnek arasındaki mesafenin bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Artan JRC değerleri ile birlikte tarayıcı pürüzlülüğe ait detayları yeterli hassasiyette kaydedememiştir. JRC'nin 14-16 profilinde gözlenen dalgalılık tarayıcı tarafından kaydedilmiş ancak 18-20 profilinde gözlenen mikro ölçekteki pürüzlülükler yeterli hassasiyette kaydedilememiştir. Bunun sonucunda pürüzlülük farkı oluşmuş ve JRC değerleri olması gereken değer aralığından uzaklaşmıştır.

Çizelge 7.3: Standart profiller kullanılarak SLS yöntemi ile sayısallaştırma sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler.

0.5 mm	$Z_2$	SF	$R_L$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.
0-2	0.06259	0.00098	1.00194	2.17145
4-6	0.13463	0.00453	1.00885	5.23542
8-10	0.16663	0.00694	1.01347	6.86832
14-16	0.33371	0.02784	1.05155	14.60435
18-20	0.27863	0.01941	1.03598	11.60753

Çizelge 7.4: Çizelge 7.3'te sunulan istatistiksel parametreler kullanılarak hesaplanan JRC değerleri.

0.5 mm	Hesaplanan JRC Değerleri			
	JRC	Z <sub>2</sub> (1)	SF(2)	R <sub>L</sub> (3)
0-2	0.40	0.29	1.45	-1.18
4-6	4.85	5.23	5.62	4.61
8-10	6.83	7.43	7.78	7.24
14-16	17.15	18.89	16.99	17.83
18-20	13.75	15.11	14.38	13.99

(1)  $JRC = 61.79(Z_2) - 3.47$  (Yu ve Vayssade, 1991)

(2)  $JRC = 137.1739(SF)^{0.5} - 3.9998$  (Li ve Zhang, 2015)

(3)  $JRC = (0.0336 + 0.00124/\ln R_p)^{-1}$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

(4)  $JRC = 3.95[\theta_{max}^*/(C + 1)_{2D}]^{0.7} - 7.98$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

### 7.1.3. SfM Yöntemi

SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu elde edilen modellerden üretilen kesitler kullanılarak hesaplanan istatistiksel parametreler Çizelge 7.5'te verilmiştir. SLS yönteminde olduğu gibi dört parametre hesaplanmıştır. Bu parametreler yardımıyla hesaplanan JRC değerleri ise Çizelge 7.6'da sunulmuştur. SLS yönteminin aksine, pürüzlülük arttıkça hesaplanan istatistiksel parametreler de artmaktadır. Çizelge 7.5'teki sonuçlar JRC'nin 18-20 aralığına sahip profilin 14-16 aralığından daha pürüzlü olduğunu göstermektedir. Bu durum SLS yöntemiyle zıt düşmekte ve profilometre ile gerçekleştirilen sayısallaştırma yönteminden elde edilen sonuçlara benzemektedir. SfM yöntemi SLS yöntemine kıyasla JRC'nin 18-20 profiline ait pürüzlülük detaylarını daha iyi kaydedebilmiştir. SfM yöntemiyle belirlenen JRC değerlerine bakıldığında, istatistiksel parametreler yardımıyla hesaplanan iki değer hariç bütün değerlerin ait oldukları JRC değişim aralıklarının altında kaldığı görülmektedir. Bütün JRC değerlerinde gözlenen bu farklılık, SLS yöntemindeki gibi bazı değişim aralıklarını ilgilendiren ve kullanılan ekipmana bağlı gelişen bir durum değildir. SfM yöntemiyle hesaplanan istatistiksel parametreler, profilometre ile sayısallaştırma sonucu elde edilen parametrelerden daha düşüktür. Sistematik olduğu anlaşılan bu düşüklüğün, sayısallaştırma yönteminden kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır. SfM yöntemi SLS yöntemine göre artan pürüzlülüğü daha iyi temsil

edebilmekte ancak profilometre ile sayısallaştırma işlemine kıyasla daha düşük pürüzlülük değerleri vermektedir.

Çizelge 7.5: Standart profiller kullanılarak SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler.

0.5 mm	$Z_2$	SF	$R_L$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.
0-2	0.05752	0.00083	1.00164	2.31598
4-6	0.10201	0.00260	1.00517	4.68111
8-10	0.15047	0.00566	1.01110	6.47828
14-16	0.24789	0.01536	1.02962	11.35129
18-20	0.29196	0.02131	1.03990	12.47945

Çizelge 7.6: Çizelge 7.5'te sunulan istatistiksel parametreler kullanılarak hesaplanan JRC değerleri.

0.5 mm	Hesaplanan JRC Değerleri			
JRC	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0-2	0.08	-0.05	1.24	-0.87
4-6	2.83	3.00	3.57	3.66
8-10	5.83	6.32	6.73	6.63
14-16	11.85	13.00	12.97	13.65
18-20	14.57	16.02	15.14	15.14

(1)  $JRC = 61.79(Z_2) - 3.47$  (Yu ve Vayssade, 1991)

(2)  $JRC = 137.1739(SF)^{0.5} - 3.9998$  (Li ve Zhang, 2015)

(3)  $JRC = (0.0336 + 0.00124/\ln R_p)^{-1}$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

(4)  $JRC = 3.95[\theta_{max}^*/(C + 1)_{2D}]^{0.7} - 7.98$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

## 7.2. İgnimbirit Örneklerine Ait İstatistiksel Parametreler ve JRC Değerleri

### 7.2.1. Profilometre Yöntemi

Standart örneklerde olduğu gibi referans olarak kabul edilebilecek verinin bulunmaması sebebiyle sayısallaştırma işlemlerinden sonra ignimbirit örneklere ait JRC değerlerini karşılaştırmak mümkün değildir. Bu nedenle, ignimbiritler üzerinde profilometre yöntemi ile JRC belirleme işlemlerinde iki farklı yöntem izlenmiştir. Bu yöntemlerin ilkinde, süreksizlik yüzeylerinden alınan profiller görsel bir

karşılaştırmaya tabi tutulurken; ikinci yöntemde ise profiller sayısallaştırılarak JRC değerleri belirlenmiştir. Referans veri eksikliğini gidermek adına, standart profillerle görsel olarak karşılaştırma işleminden elde edilen JRC değerleri referans JRC değerleri olarak kabul edilmiştir. Sayısallaştırma yöntemlerinden elde edilen verilerle istatistiksel parametreler hesaplanmış ve bu parametreler kullanılarak JRC değerlerine geçiş yapılmıştır. Hesaplanan bu JRC değerleri ile görsel karşılaştırma sonucu belirlenen JRC değerleri kıyaslanmıştır.

JRC değerleri belirlenirken yararlanılan ilk yöntemde, ignimbirit örneklerden alınan dörder profil görsel olarak standart profillerle karşılaştırılmış ve bir ignimbirit örneğini temsil eden dört JRC sınıfı belirlenmiştir. Dört JRC sınıfına karşılık gelen ortalama değer bulunarak ilgili ignimbirit örneğinin JRC değişim aralığı saptanmıştır. Daha sonra belirlenen JRC aralıklarına göre farklı ignimbirit örnekleri kendi içerisinde gruplandırılmıştır. Bazı örneklere ait süreksizlik yüzeyleri sayısallaştırma işlemleri esnasında hasar görmüştür. Ayrıca deneylerde kullanılmak üzere hazırlanan ancak JRC gruplandırması sırasında aykırı JRC değerlerine sahip oldukları için elimine edilen örnekler de bulunmaktadır. Bütün bu kayıplardan sonra deneylerde kullanılacak toplam örnek sayısı 37 olmuştur. Üç farklı ignimbirit türüne ait deney setleri oluşturulabilmesi adına her bir tür ignimbiritten beşer örnek seçilmiştir. Sonrasında elde kalan örnekler tekrar sınıflandırılmış ve sarı ve vişne renkli ignimbiritler için beşer örnek daha seçilerek toplamda 25 örnek üzerinden makaslama deney grupları oluşturulmuştur. Görsel karşılaştırma ile belirlenen JRC değerlerine göre oluşturulan deney setleri ve bu setlere ait ortalama JRC değerleri Çizelge 7.7'de sunulmuştur.

Çizelge 7.7'de oluşturulan JRC sınıfları incelendiğinde, standart profillere ait iki birimlik JRC değişim aralıklarının bir birim ile sınırlandırıldığı görülmektedir. Farklı jeomekanik özelliklere sahip ignimbiritlerin aynı JRC değişim aralığına sahip olmaması adına bu şekilde bir yaklaşım tercih edilmiştir. JRC sınıfları içerisinde farklı normal gerilmeler uygulanarak oluşturulan örnekler bulunmaktadır. Süreksizlik yüzeyi oluşturulurken uygulanan normal gerilmelerin farklı pürüzlülük sınıfları yaratacak seviyede olmadığı görülmüştür. Standart profillerle karşılaştırma sonucu belirlenen JRC değişim aralıklarının orta noktası ilgili profilin JRC değeri olarak kaydedilmiştir. Örneğin JRC'nin 12-14 değişim aralığı için JRC=13 olarak alınmıştır.

Böylece her örnek için dört tane JRC değeri elde edilmiştir. Bu dört değer in ortalaması söz konusu örneğin genel JRC değeri olarak kabul edilmiştir. Farklı İgnimbiritlere ait örnekler önce kendi içlerinde genel JRC değerlerine göre sıralanmıştır. Daha sonra farklı JRC değişim aralıklarına sahip deney setlerini oluşturabilmek adına beşerli gruplar oluşturulmuştur. Çizelge 7.7'deki ortalama JRC değeri, beş örnekten oluşan deney grubundaki örneklerin genel JRC değerlerinin ortalamasıdır.

İgnimbiritlere ait JRC'nin belirlenmesinde kullanılan ikinci yol profilometre ile sayısallaştırma yöntemidir. İgnimbiritlerden profilometre yardımıyla alınan profillerin sayısallaştırılması sonucu oluşturulan koordinat verileri ile  $Z_2$ , SF,  $R_L$  ve  $\theta_{max}/(C+1)$  parametreleri hesaplanmıştır. Bu parametreler, Çizelge 7.7'de belirtilen JRC değişim aralıklarına uyacak şekilde düzenlenmiş ve Çizelge 7.8'de sunulmuştur. Çizelge 7.8'de sunulan parametreler kullanılarak JRC değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.9).

Çizelge 7.9'da sunulan JRC değerleri incelendiğinde, SF parametresi ile hesaplanan JRC değerlerinin belirlenen JRC değişim aralıklarına uymadığı görülmektedir. Standart profillere ait iki birimlik değişim aralıklarının uygulandığı koşulda bile; birkaç istisna hariç SF parametresi ile belirlenen JRC değerleri bu değişim aralıklarına uyum sağlayamamaktadır. Birkaç aykırı JRC değeri haricinde, diğer parametreler ile hesaplanan JRC değerlerinin ilgili aralıklarla uyumlu olduğu görülmektedir. JRC'nin beş farklı değişim aralığı için farklı parametrelere bağlı hesaplanan JRC değerlerinin ortalamaları alınmıştır (Çizelge 7.10). Ortalama JRC değerlerine göre  $Z_2$  ve  $R_L$  parametreleri sırasıyla JRC'nin 17-18 ve 13-14 değişim aralıkları için öngörülen değişim aralığından farklı sonuçlar vermiştir. SF parametresi ise sadece JRC'nin 14-15 değişim aralığına uyacak sonuçlar vermiş, geri kalan aralıklarda ise olması beklenenden daha büyük JRC değerleri vermiştir.  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi ile bütün JRC değişim aralıklarına uyacak şekilde JRC değerleri hesaplanabilmiştir.

Çizelge 7.7: İgnimbritlerde profilometre ile alınan profillerin standart profillerle karşılaştırılması sonucu belirlenen JRC sınıfları.

<b>JRC 13-14</b>	<b>1. Profil</b>	<b>2. Profil</b>	<b>3. Profil</b>	<b>4. Profil</b>	<b>Genel JRC</b>	<b>Ort. JRC</b>
0 MPa V5	12-14	12-14	12-14	12-14	13	
0.5 MPa V2	12-14	12-14	12-14	12-14	13	
1 MPa V2	14-16	14-16	14-16	12-14	14.5	13.3
1 MPa V5	12-14	12-14	12-14	12-14	13	
1 MPa V6	12-14	12-14	12-14	12-14	13	
<b>JRC 14-15</b>	<b>1. Profil</b>	<b>2. Profil</b>	<b>3. Profil</b>	<b>4. Profil</b>	<b>Genel JRC</b>	<b>Ort. JRC</b>
0 MPa S1	12-14	12-14	12-14	12-14	13	
0 MPa S3	14-16	14-16	12-14	12-14	14	
1 MPa S1	12-14	18-20	12-14	12-14	14.5	14.1
1 MPa S2	16-18	16-18	12-14	12-14	15	
1 MPa S3	16-18	12-14	12-14	12-14	14	
<b>JRC 15-16</b>	<b>1. Profil</b>	<b>2. Profil</b>	<b>3. Profil</b>	<b>4. Profil</b>	<b>Genel JRC</b>	<b>Ort. JRC</b>
0 MPa V1	12-14	18-20	12-14	18-20	16	
0 MPa V3	12-14	12-14	14-16	14-16	14	
0 MPa V7	14-16	12-14	12-14	12-14	13.5	15
0.5 MPa V3	14-16	14-16	14-16	14-16	15	
1 MPa V4	12-14	18-20	16-18	16-18	16.5	
<b>JRC 16-17</b>	<b>1. Profil</b>	<b>2. Profil</b>	<b>3. Profil</b>	<b>4. Profil</b>	<b>Genel JRC</b>	<b>Ort. JRC</b>
0 MPa S5	16-18	16-18	16-18	16-18	17	
0.5 MPa S2	16-18	16-18	18-20	18-20	18	
0.5 MPa S3	16-18	16-18	14-16	14-16	16	16.3
0.5 MPa S5	12-14	16-18	16-18	12-14	15	
0.5 MPa S6	14-16	14-16	14-16	16-18	15.5	
<b>JRC 17-18</b>	<b>1. Profil</b>	<b>2. Profil</b>	<b>3. Profil</b>	<b>4. Profil</b>	<b>Genel JRC</b>	<b>Ort. JRC</b>
0 MPa B1	16-18	16-18	16-18	16-18	17	
0 MPa B2	16-18	16-18	18-20	16-18	17.5	
0 MPa B3	18-20	16-18	16-18	16-18	17.5	17.8
0 MPa B5	18-20	18-20	18-20	18-20	19	
0 MPa B6	18-20	18-20	16-18	16-18	18	

Çizelge 7.8: İgnimbiritlerde profilometre ile sayısallaştırma işlemi sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler.

<b>0.5 mm</b>		<b>İstatistiksel Parametreler</b>		
JRC 13-14	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.
0 MPa V5	0.27468	0.01886	1.03505	11.28696
0.5 MPa V2	0.29943	0.02241	1.04055	11.97145
1 MPa V2	0.28480	0.02028	1.03794	11.86629
1 MPa V5	0.26972	0.01819	1.03419	11.22168
1 MPa V6	0.26574	0.01795	1.03338	11.43157
JRC 14-15	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.
0 MPa S1	0.29110	0.02118	1.03968	12.09241
0 MPa S3	0.28736	0.02064	1.03815	11.80237
1 MPa S1	0.28282	0.02000	1.03721	11.68289
1 MPa S2	0.27605	0.01905	1.03573	11.74041
1 MPa S3	0.28520	0.02034	1.03777	11.82214
JRC 15-16	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.
0 MPa V1	0.31491	0.02479	1.04506	12.88339
0 MPa V3	0.30641	0.02347	1.04346	12.76881
0 MPa V7	0.31069	0.02413	1.04421	12.71615
0.5 MPa V3	0.31302	0.02450	1.04530	13.16226
1 MPa V4	0.30273	0.02291	1.04201	12.58295
JRC 16-17	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.
0 MPa S5	0.32959	0.02716	1.04866	13.37108
0.5 MPa S2	0.33285	0.02770	1.05051	13.70793
0.5 MPa S3	0.33859	0.02866	1.05058	13.59494
0.5 MPa S5	0.31870	0.02539	1.04685	13.20308
0.5 MPa S6	0.31659	0.02506	1.04671	13.20720
JRC 17-18	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.
0 MPa B1	0.33236	0.02762	1.05004	13.75511
0 MPa B2	0.32527	0.02645	1.04820	13.44883
0 MPa B3	0.34850	0.03036	1.05203	13.50278
0 MPa B5	0.39470	0.03895	1.06909	16.41239
0 MPa B6	0.38675	0.03739	1.06405	14.88004



Çizelge 7.9: İgnimbiritlerde profilometreyle sayısallaştırma sonucu belirlenen istatistiksel parametrelerden hesaplanan JRC değerleri.

<b>0.5 mm</b>		Hesaplanan JRC Değerleri		
JRC 13-14	Z <sub>2</sub> (1)	SF(2)	R <sub>L</sub> (3)	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.(4)
0 MPa V5	13.5	14.84	14.19	13.57
0.5 MPa V2	15.03	16.54	15.26	14.47
1 MPa V2	14.13	15.53	14.77	14.34
1 MPa V5	13.2	14.5	14.01	13.48
1 MPa V6	12.95	14.23	13.83	13.76
JRC 14-15	Z <sub>2</sub> (1)	SF(2)	R <sub>L</sub> (3)	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.(4)
0 MPa S1	14.8	15.97	15.10	14.63
0 MPa S3	14.61	15.71	14.81	14.25
1 MPa S1	14.39	15.40	14.63	14.09
1 MPa S2	14.05	14.93	14.33	14.17
1 MPa S3	14.51	15.56	14.74	14.28
JRC 15-16	Z <sub>2</sub> (1)	SF(2)	R <sub>L</sub> (3)	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.(4)
0 MPa V1	15.99	17.6	16.02	15.66
0 MPa V3	15.46	17.02	15.76	15.51
0 MPa V7	15.73	17.31	15.88	15.44
0.5 MPa V3	15.87	17.47	16.06	16.02
1 MPa V4	15.24	16.76	15.51	15.27
JRC 16-17	Z <sub>2</sub> (1)	SF(2)	R <sub>L</sub> (3)	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.(4)
0 MPa S5	16.55	18.61	16.58	16.28
0.5 MPa S2	16.69	18.83	16.84	16.71
0.5 MPa S3	16.93	19.22	16.85	16.56
0.5 MPa S5	16.07	17.86	16.3	16.07
0.5 MPa S6	15.98	17.71	16.28	16.07
JRC 17-18	Z <sub>2</sub> (1)	SF(2)	R <sub>L</sub> (3)	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.(4)
0 MPa B1	17.07	18.80	16.78	16.77
0 MPa B2	16.63	18.31	16.51	16.38
0 MPa B3	18.06	19.90	17.05	16.45
0 MPa B5	20.92	23.07	19.01	20.02
0 MPa B6	20.43	22.53	18.50	18.17

(1)  $JRC = 61.79(Z_2) - 3.47$  (Yu ve Vayssade, 1991)

(2)  $JRC = 137.1739(SF)^{0.5} - 3.9998$  (Li ve Zhang, 2015)

(3)  $JRC = (0.0336 + 0.00124/\ln R_L)^{-1}$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

(4)  $JRC = 3.95[\theta_{max}^*/(C + 1)_{2D}]^{0.7} - 7.98$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

Çizelge 7.10: İgnimbiritlerde profilometreyle sayısallaştırma sonucu belirlenen ortalama JRC değerleri.

0.5 mm	Hesaplanan Ortalama JRC Değerleri			
	Z <sub>2</sub> (1)	SF(2)	R <sub>L</sub> (3)	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
JRC 13-14	13.76	15.13	14.41	13.92
JRC 14-15	14.11	15.51	14.72	14.29
JRC 15-16	15.66	17.23	15.85	15.58
JRC 16-17	16.75	18.45	16.57	16.34
JRC 17-18	18.62	20.52	17.57	17.56

### 7.2.2. SLS Yöntemi

SLS yöntemi ile sayısallaştırılan ignimbiritlerden alınan profillere ait koordinat verileri kullanılarak dört istatistiksel parametre belirlenmiştir (Çizelge 7.11). Bu istatistiksel parametreler kullanılarak ignimbiritlere ait JRC değerleri hesaplanmış ve Çizelge 7.12’de sunulmuştur.

Çizelge 7.11’de verilen sonuçlar Çizelge 7.8 ile karşılaştırıldığında, SLS yönteminden elde edilen istatistiksel parametrelerin bir kısmının, profilometre ile sayısallaştırma sonucu bulunan parametrelerden yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle pürüzlülük arttıkça SLS yöntemi ile belirlenen parametrelerin değerleri artmaktadır. Bu durumun SLS yöntemine ait birtakım kısıtlamalardan (örnek boyutu, tarama mesafesi vb.) kaynaklı olduğu düşünülmektedir. İstatistiksel parametrelerin yüksek değerlere sahip olmasından dolayı Çizelge 7.12’de sunulan JRC değerlerinin birçoğu beklenen değişim aralıklarına uyum sağlayamamıştır. Öngörülen JRC değişim aralıkları için farklı parametrelere bağlı hesaplanan JRC değerlerinin ortalamaları alınmış ve Çizelge 7.13’te sunulmuştur. Z<sub>2</sub>, SF ve R<sub>L</sub> parametreleri ile hesaplanan ortalama JRC değerleri her değişim aralığı için beklenenden yüksek çıkmıştır. Buna karşılık  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi ile hesaplanan ortalama JRC değerleri üç JRC değişim aralığı için beklenen sonuçları verebilmiştir.

Çizelge 7.11:İgnimbiritlerde SLS yöntemi ile sayısallaştırma sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler.

<b>0.5 mm</b>		<b>İstatistiksel Parametreler</b>		
JRC 13-14	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.
0 MPa V5	0.28434	0.02021	1.03831	11.38449
0.5 MPa V2	0.27077	0.01833	1.03388	10.25496
1 MPa V2	0.29433	0.02166	1.04034	11.61614
1 MPa V5	0.25522	0.01628	1.03062	10.56641
1 MPa V6	0.38017	0.03613	1.06425	14.21404
JRC 14-15	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.
0 MPa S1	0.39213	0.03844	1.06884	15.36195
0 MPa S3	0.29955	0.02243	1.04155	12.21624
1 MPa S1	0.29212	0.02133	1.03854	11.11709
1 MPa S2	0.29040	0.02108	1.03431	10.23319
1 MPa S3	0.25763	0.01659	1.03108	9.87488
JRC 15-16	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.
0 MPa V1	0.44798	0.05017	1.08959	15.97191
0 MPa V3	0.33572	0.02818	1.05253	13.59594
0 MPa V7	0.30636	0.02346	1.04567	11.88854
0.5 MPa V3	0.40055	0.04011	1.07643	15.27701
1 MPa V4	0.40383	0.04077	1.07010	14.98888
JRC 16-17	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.
0 MPa S5	0.35220	0.03101	1.05635	12.73846
0.5 MPa S2	0.29000	0.02102	1.03914	12.97546
0.5 MPa S3	0.37816	0.03575	1.06764	14.22941
0.5 MPa S5	0.34622	0.02997	1.05347	12.05223
0.5 MPa S6	0.33408	0.02790	1.05339	15.89945
JRC 17-18	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.
0 MPa B1	0.30610	0.02342	1.04347	12.74246
0 MPa B2	0.38239	0.03655	1.06878	15.44238
0 MPa B3	0.39933	0.03987	1.07224	15.72198
0 MPa B5	0.44631	0.04980	1.08536	17.39031
0 MPa B6	0.54512	0.07429	1.12092	21.25799

Çizelge 7.12: İgnimbritlerde SLS yöntemi ile belirlenen istatistiksel parametrelerden hesaplanan JRC değerleri.

<b>0.5 mm</b>		<b>Hesaplanan JRC Değerleri</b>		
JRC	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
<hr/>				
JRC 13-14	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0 MPa V5	14.10	15.50	14.84	13.70
0.5 MPa V2	13.26	14.57	13.94	12.17
1 MPa V2	14.72	16.19	15.22	14.01
1 MPa V5	12.30	13.50	13.21	12.60
1 MPa V6	20.02	22.07	18.52	17.34
<hr/>				
JRC 14-15	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0 MPa S1	20.76	22.89	18.98	18.76
0 MPa S3	15.04	16.55	15.43	14.79
1 MPa S1	14.58	16.04	14.88	13.34
1 MPa S2	14.47	15.92	14.04	12.14
1 MPa S3	12.45	13.67	13.32	11.64
<hr/>				
JRC 15-16	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0 MPa V1	24.21	26.73	20.66	19.50
0 MPa V3	17.27	19.03	17.12	16.57
0 MPa V7	15.46	17.01	16.12	14.37
0.5 MPa V3	21.28	23.47	19.67	18.65
1 MPa V4	21.48	23.70	19.10	18.30
<hr/>				
JRC 16-17	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0 MPa S5	18.29	20.16	17.62	15.47
0.5 MPa S2	14.45	15.89	15.00	15.78
0.5 MPa S3	19.90	21.94	18.87	17.36
0.5 MPa S5	17.92	19.75	17.25	14.58
0.5 MPa S6	17.17	18.91	17.24	19.41
<hr/>				
JRC 17-18	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0 MPa B1	15.44	16.99	15.76	15.48
0 MPa B2	20.16	22.23	18.98	18.85
0 MPa B3	21.20	23.39	19.30	19.19
0 MPa B5	24.11	26.61	20.36	21.18
0 MPa B6	30.21	33.39	22.36	25.58

(1)  $JRC = 61.79(Z_2) - 3.47$  (Yu ve Vayssade, 1991)

(2)  $JRC = 137.1739(SF)^{0.5} - 3.9998$  (Li ve Zhang, 2015)

(3)  $JRC = (0.0336 + 0.00124/\ln R_L)^{-1}$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

(4)  $JRC = 3.95[\theta_{max}^*/(C + 1)_{2D}]^{0.7} - 7.98$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

Çizelge 7.13:İgnimbiritlerde SLS yöntemi ile sayısallaştırma sonucu belirlenen ortalama JRC değerleri.

0.5 mm	Hesaplanan Ortalama JRC Değerleri			
	Z <sub>2</sub> (1)	SF(2)	R <sub>L</sub> (3)	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
JRC 13-14	14.88	16.37	15.15	13.96
JRC 14-15	15.46	17.01	15.33	14.13
JRC 15-16	19.94	21.99	18.53	17.48
JRC 16-17	17.55	19.33	17.20	16.52
JRC 17-18	22.22	24.52	19.35	20.06

### 7.2.3. SfM Yöntemi

SfM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısallaştırma işlemlerinden elde edilen sayısal veriler ile istatistiksel parametreler hesaplanmıştır (Çizelge 7.14). Bu parametreler kullanılarak ignimbiritlere ait JRC değerleri hesaplanmış ve Çizelge 7.15'te sunulmuştur.

İgnimbiritlerde SfM yöntemiyle hesaplanan istatistiksel parametrelerin profilometre yöntemiyle belirlenen parametrelerden genel itibarıyla düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu parametreler kullanılarak hesaplanan JRC değerleri de beklenen değişim aralıklarının altında kalmıştır. Çizelge 7.16'da değişim aralıklarına bağlı olarak hesaplanan ortalama JRC değerleri sunulmuştur. Bütün JRC değerleri ait oldukları değişim aralıklarının altında kalmıştır. Ortalama olarak JRC değerlerinde üç birimlik sapmalar gözlenmektedir.

Çizelge 7.14: İgnimbritlerde SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu hesaplanan istatistiksel parametreler.

<b>0.5 mm</b>		<b>İstatistiksel Parametreler</b>		
JRC 13-14	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.
0 MPa V5	0.20675	0.01069	1.02073	9.02278
0.5 MPa V2	0.21997	0.01210	1.02345	9.60547
1 MPa V2	0.20820	0.01084	1.02113	9.12821
1 MPa V5	0.21747	0.01182	1.02278	9.48741
1 MPa V6	0.22026	0.01213	1.02358	9.74244
JRC 14-15	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.
0 MPa S1	0.22972	0.01319	1.02597	10.33147
0 MPa S3	0.22421	0.01257	1.02414	9.49368
1 MPa S1	0.20986	0.01101	1.02156	7.95899
1 MPa S2	0.22140	0.01225	1.02364	9.68625
1 MPa S3	0.23111	0.01335	1.02539	9.57097
JRC 15-16	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.
0 MPa V1	0.24706	0.01526	1.02957	11.01163
0 MPa V3	0.23614	0.01394	1.02687	10.36017
0 MPa V7	0.22809	0.01301	1.02512	9.94654
0.5 MPa V3	0.26459	0.01750	1.03294	11.50763
1 MPa V4	0.23527	0.01384	1.02661	10.11486
JRC 16-17	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.
0 MPa S5	0.24595	0.01512	1.02919	10.66276
0.5 MPa S2	0.24570	0.01509	1.02895	10.68189
0.5 MPa S3	0.27057	0.01830	1.03479	11.55881
0.5 MPa S5	0.23149	0.01340	1.02580	10.02770
0.5 MPa S6	0.27793	0.01931	1.03685	12.16286
JRC 17-18	Z <sub>2</sub>	SF	R <sub>L</sub>	θ <sub>max</sub> /(C+1) Ort.
0 MPa B1	0.26816	0.01798	1.03434	11.77778
0 MPa B2	0.29166	0.02127	1.03837	11.90735
0 MPa B3	0.28082	0.01971	1.03692	11.78378
0 MPa B5	0.41428	0.04291	1.07220	16.10773
0 MPa B6	0.28888	0.02086	1.03856	12.13084

Çizelge 7.15: İgnimbiritlerde SfM yöntemi ile belirlenen istatistiksel parametrelerden hesaplanan JRC değerleri.

<b>0.5 mm</b>		<b>Hesaplanan JRC Değerleri</b>		
JRC	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
JRC 13-14	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0 MPa V5	9.31	10.18	10.47	10.44
0.5 MPa V2	10.12	11.09	11.31	11.27
1 MPa V2	9.39	10.28	10.60	10.59
1 MPa V5	9.97	10.92	11.11	11.10
1 MPa V6	10.14	11.11	11.35	11.46
JRC 14-15	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0 MPa S1	10.72	11.76	12.03	12.27
0 MPa S3	10.38	11.38	11.51	11.11
1 MPa S1	9.50	10.39	10.74	8.89
1 MPa S2	10.21	11.19	11.37	11.38
1 MPa S3	10.81	11.85	11.87	11.22
JRC 15-16	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0 MPa V1	11.80	12.95	12.96	13.20
0 MPa V3	11.12	12.20	12.27	12.31
0 MPa V7	10.62	11.64	11.79	11.74
0.5 MPa V3	12.88	14.15	13.74	13.86
1 MPa V4	11.07	12.14	12.20	11.98
JRC 16-17	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0 MPa S5	11.73	12.87	12.86	12.73
0.5 MPa S2	11.71	12.85	12.81	12.75
0.5 MPa S3	13.25	14.56	14.14	13.93
0.5 MPa S5	10.83	11.88	11.98	11.86
0.5 MPa S6	13.70	15.06	14.56	14.73
JRC 17-18	$Z_2(1)$	SF(2)	$R_L(3)$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
0 MPa B1	13.10	14.39	14.04	14.22
0 MPa B2	14.55	16.00	14.85	14.39
0 MPa B3	13.88	15.26	14.57	14.23
0 MPa B5	22.13	24.41	19.30	19.66
0 MPa B6	14.38	15.81	14.89	14.68

(1)  $JRC = 61.79(Z_2) - 3.47$  (Yu ve Vayssade, 1991)

(2)  $JRC = 137.1739(SF)^{0.5} - 3.9998$  (Li ve Zhang, 2015)

(3)  $JRC = (0.0336 + 0.00124/\ln R_L)^{-1}$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

(4)  $JRC = 3.95[\theta_{max}^*/(C + 1)_{2D}]^{0.7} - 7.98$  (Tatone ve Grasselli, 2010)

Çizelge 7.16: İgnimbiritlerde SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu belirlenen ortalama JRC değerleri.

0.5 mm	Hesaplanan Ortalama JRC Değerleri			
	Z <sub>2</sub> (1)	SF(2)	R <sub>L</sub> (3)	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.(4)
JRC 13-14	9.79	10.72	10.97	10.97
JRC 14-15	10.32	11.31	11.50	10.97
JRC 15-16	11.50	12.62	12.59	12.62
JRC 16-17	12.24	13.44	13.27	13.20
JRC 17-18	15.61	17.17	15.53	15.44

### 7.3. İgnimbirit Örneklerde Üç Boyutlu İstatistiksel Parametreler

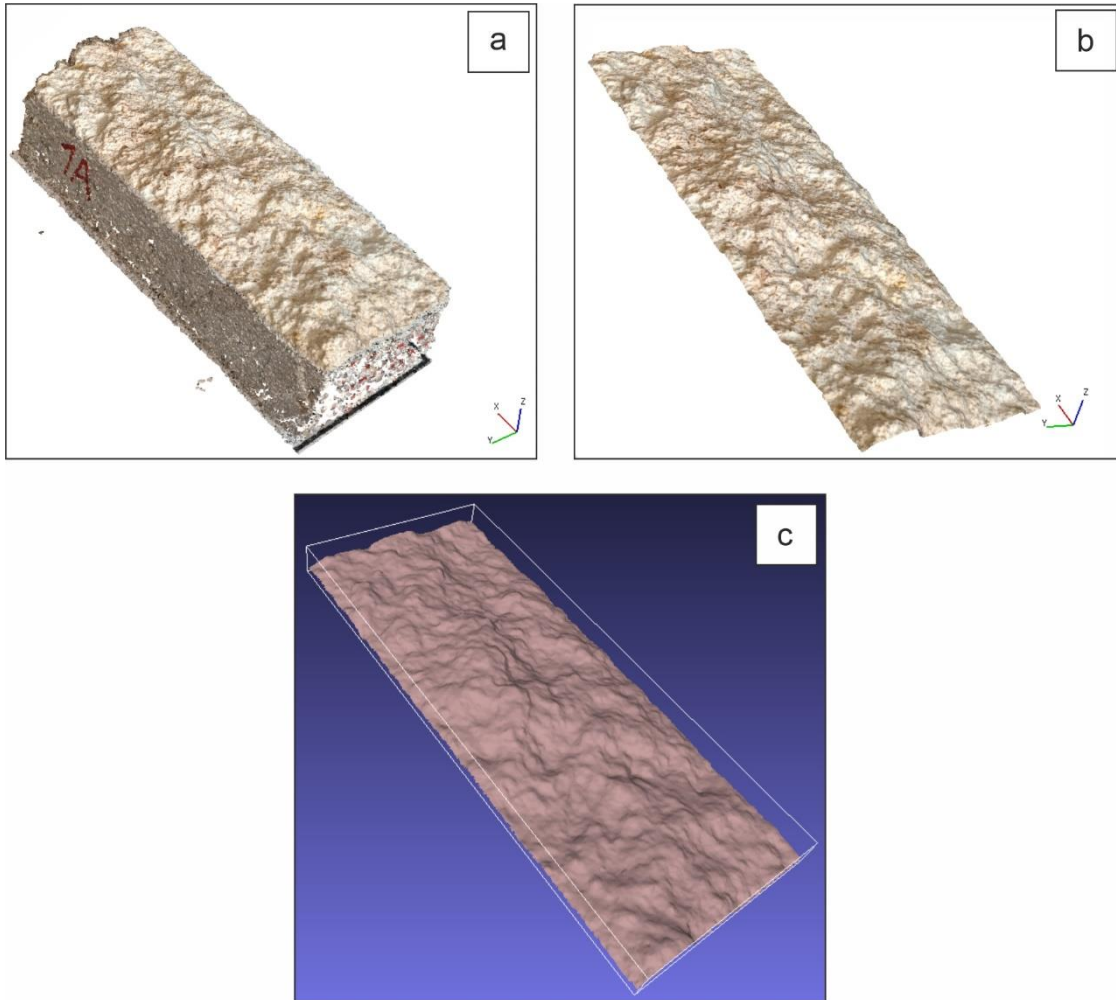
İgnimbiritler üzerinde gerçekleştirilen iki boyutlu analizlere ek olarak üç boyutta pürüzlülüğü tanımlamaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. SfM yöntemiyle sayısallaştırılan süreksizlik yüzeyleri SRC programına aktarılmış ve yüzeyler analiz edilmiştir. İki boyutlu analizlerde süreksizlik yüzeyi için üretilen nokta bulutu üzerinden profiller alınmıştır. Ancak üç boyutlu analizlerde nokta bulutu yerine katı model kullanılması gerekmektedir. Bej renkli bir ignimbirit örneğine ait nokta bulutu Şekil 7.1a'da görülmektedir. Nokta bulutunun SRC programında analize uygun hale getirilmesi için süreksizlik yüzeyi haricinde kalan noktalar silinmiştir (Şekil 7.1b). Daha sonra sadeleştirilmiş nokta bulutundan üç boyutlu katı model üretilmiştir (Şekil 7.1c). Bu işlem iki boyutlu analizde kullanılan bütün örneklerde tekrarlanmıştır.

SRC programı ile üç boyutlu pürüzlülük analiz işlemlerinde, R<sub>L</sub> parametresinin üç boyutlu karşılığı olan R<sub>S</sub> parametresi ile  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi hesaplanmıştır. R<sub>S</sub> parametresi yüzeyi temsil eden tek bir parametre olarak hesaplanırken,  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi 0° ile 360° arasında 5°'lik aralıklara değişen Azimuth doğrultuları için hesaplanmaktadır.  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi iki boyutta hesaplanırken makaslama doğrultusuna denk düşecek şekilde alınan kesitler kullanılmıştır. İki boyutlu analizlerle kıyaslama yapabilmek adına, üç boyutta yapılan hesaplamalarda da makaslama doğrultusu ile aynı yöndeki Azimuth değerleri için  $\theta_{max}/(C+1)$  parametreleri hesaplanmıştır. İgnimbiritlere ait R<sub>S</sub> parametresi ile 0° ve 180°'lik



Azimuth doğrultularına karşılık gelen  $\theta_{max}/(C+1)$  parametreleri Çizelge 7.17’de sunulmuştur. Çizelgede ayrıca görünür çözünürlük değerleri de paylaşılmıştır.

Çizelge 7.17’de sunulan görünür çözünürlük değerleri, katı model oluşturulurken süreksizlik yüzeyi genelinde kullanılan üçgenlere ait alanların ortalaması kullanılarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla bu değerler ne kadar küçük olursa, katı modelin gerçek yüzeyi temsil etme başarısı o kadar yüksek olacaktır. Görünür çözünürlük değerlerinin ortalaması 0.25 mm olarak hesaplanmıştır. JRC değişim aralıklarına göre iki ve üç boyutlu analizler sonucu elde edilen  $R_L$ ,  $R_S$  ve  $\theta_{max}/(C+1)$  parametrelerine ait ortalama değerler Çizelge 7.18’de sunulmuştur.



Şekil 7.1: Bej renkli bir ignimbirite ait (a) yoğun nokta bulutu, (b) süreksizlik yüzeyini temsil eden sadeleştirilmiş nokta bulutu ve (c) süreksizlik yüzeyine ait üç boyutlu katı model.

Çizelge 7.17: İgnimbritlerde SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu oluşturulan yüzeylerden elde edilen üç boyutlu istatistiksel parametreler.

JRC	İstatistiksel Parametreler		Görünür Çözünürlük
	$R_s$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.	(m)
<b>JRC 13-14</b>			
0 MPa V5	1.04283	8.87693	0.00024
0.5 MPa V2	1.06719	9.85672	0.00023
1 MPa V2	1.06248	9.37176	0.00024
1 MPa V5	1.05187	9.55064	0.00024
1 MPa V6	1.06427	9.46168	0.00024
<b>JRC 14-15</b>			
0 MPa S1	1.06352	10.20175	0.00024
0 MPa S3	1.04563	9.38651	0.00024
1 MPa S1	1.07550	9.59597	0.00024
1 MPa S2	1.04236	9.29782	0.00002
1 MPa S3	1.05904	9.41962	0.00024
<b>JRC 15-16</b>			
0 MPa V1	1.05293	10.13055	0.00047
0 MPa V3	1.04579	9.31368	0.00025
0 MPa V7	1.04658	9.30876	0.00024
0.5 MPa V3	1.07580	10.89215	0.00025
1 MPa V4	1.07770	10.12424	0.00024
<b>JRC 16-17</b>			
0 MPa S5	1.05270	10.25322	0.00024
0.5 MPa S2	1.06458	10.23210	0.00024
0.5 MPa S3	1.06744	11.11650	0.00024
0.5 MPa S5	1.06648	10.44374	0.00024
0.5 MPa S6	1.08949	11.56485	0.00024
<b>JRC 17-18</b>			
0 MPa B1	1.07697	11.60610	0.00024
0 MPa B2	1.07771	12.20570	0.00040
0 MPa B3	1.08041	12.25780	0.00025
0 MPa B5	1.13138	16.08155	0.00026
0 MPa B6	1.09886	12.54905	0.00029

Çizelge 7.18:İgnimbitlerde SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu profiller ve yüzeylerden elde edilen iki ve üç boyutlu istatistiksel parametreler.

	İstatistiksel Parametreler			
	İki Boyutlu		Üç Boyutlu	
	$R_L$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.	$R_s$	$\theta_{max}/(C+1)$ Ort.
JRC 13-14	1.02233	9.39726	1.05773	9.42354
JRC 14-15	1.02414	9.40827	1.05721	9.58033
JRC 15-16	1.02822	10.58817	1.05976	9.95387
JRC 16-17	1.03112	11.01880	1.06814	10.72208
JRC 17-18	1.04408	12.74150	1.09307	12.94004

#### 7.4. İstatistiksel Parametrelere İlişkin Genel Değerlendirme

Sayısallaştırma yöntemlerinden elde edilen RMSE değerleri (Çizelge 6.6) incelendiğinde, profilometre ile sayısallaştırma yönteminin başarılı olduğu görülmektedir. Standart profillerin profilometre ile sayısallaştırılması sonucu elde edilen istatistiksel parametreler kullanılarak hesaplanan JRC değerleri, standart profillerin değişim aralıklarına uymaktadır. Bu durum hem sayısallaştırma yönteminin hem de istatistiksel parametreler vasıtasıyla JRC hesaplama aşamalarının iyi performans gösterdiğine işaret etmektedir. Standart profillerde SLS ve SfM yöntemleriyle gerçekleştirilen sayısallaştırma işlemlerinde RMSE değerleri oldukça düşüktür. Ancak istatistiksel parametreler yardımıyla hesaplanan JRC değerlerinin, standart profillere ait JRC değişim aralıklarıyla tam anlamıyla uyummadığı görülmektedir. Bu durumda sayısallaştırma işlemleri başarılı olarak kabul edilebilir. Ancak pürüzlülüğe ilişkin parametrelerin hesaplanması aşamasında JRC değerlerinin olması gereken değerlerden daha düşük bulunmasına neden olacak birtakım eksiklikler olmuştur. Donanımsal eksikliklerden kaynaklanan problemler RMSE değerleri üzerinden yorumlanabilir. Ancak JRC değerlerinde gözlenen farkın parametrelerin ve JRC değerlerinin belirlenmesinde kullanılan eşitliklerden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Profilometre ile elde edilen profiller üzerinden görsel karşılaştırma yaklaşımı esas alınarak belirlenen JRC değerleri ile ignimbirit örneklerinde uygulanan sayısallaştırma yöntemlerine ilişkin değerlendirme yapılmıştır. Profilometre karşılaştırmaları sonucu belirlenen JRC değerleri kullanılarak JRC değişim aralıkları belirlenmiş ve farklı sayısallaştırma yöntemleri ile hesaplanan JRC'lerin değişim aralıklarına ne kadar uyum sağladığı incelenmiştir. Profilometre ile sayısallaştırma işlemi sonucu hesaplanan JRC değerleri ile referans olarak kabul edilen ve karşılaştırmaya bağlı belirlenen JRC değerlerinin birbirleriyle büyük oranda uyumlu olduğu görülmüştür. Kullanılan istatistiksel parametrelerden  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi öngörülen JRC değişim aralıklarına uyacak şekilde JRC değerlerinin hesaplanmasına olanak vermiştir. SLS yöntemiyle sayısallaştırma işlemleri sonucunda hesaplanan JRC değerleri, öngörülen değişim aralıklarının üstünde kalmıştır.  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi diğer parametrelere oranla daha başarılı sonuçlar vermiştir. SfM yöntemi ile hesaplanan JRC değerleri ise bütün değişim aralıkları için öngörülen değerlerin altında kalmıştır. SLS ve SfM yöntemlerinde karşılaşılan bu sapmaların JRC hesaplamalarında kullanılan eşitliklerden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

Üç boyutlu pürüzlülük parametreleri üretilen katı modeller üzerinden belirlenmiştir. JRC değişim aralıklarına bağlı ortalama değerler düşünüldüğünde,  $R_s$  parametresinin ortalama değerleri  $R_L$  parametresine ait ortalama değerlerden yüksektir. Bu durum iki boyuttan üç boyuta geçildiğinde pürüzlülüğün artması şeklinde yorumlanabilir.  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresine ait ortalama değerler incelendiğinde, JRC'nin 15-16 ve 16-17 değişim aralıkları haricinde parametrelerin sayısal değerlerinde benzeri bir artışın olduğu görülmektedir. Süreksizlik yüzeyinin tümü değerlendirildiği için üç boyutlu pürüzlülük parametrelerinin iki boyutlu parametrelere kıyasla daha yüksek olması normal kabul edilmiştir.

## **7.5. İgnimbiritlerdeki Sayısallaştırma Performansının Değerlendirilmesi**

İgnimbiritlerde gerçekleştirilen sayısallaştırma yöntemlerinin karşılaştırılması işlemi açılarda olduğu şekilde yapılmıştır. Açıklar standart profillere göre hazırlandığı için referans olarak kullanılabilir bir veri seti bulunmaktaydı. Ancak ignimbiritlerde

referans olarak kabul edilecek bir veri seti bulunmamaktadır. Bu nedenle ignimbitlerdeki sayısallaştırma performansının değerlendirilebilmesi adına profilometre ile ölçülen süreksizlik profilleri sayısallaştırılmış ve bu değerler referans veri olarak kabul edilmiştir. Profilometre ölçümleri ile belirlenen  $Y_0$  değerleri ile SfM ve SLS yöntemlerinden belirlenen  $Y_{sm}$  değerleri arasındaki fark belirlenmiş ve alçılarda olduğu gibi fark grafikleri çizilmiştir. İgnimbitlerde beş farklı JRC sınıfına göre fark grafikleri ayrı ayrı oluşturulmuştur (Şekil 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 ve 7.6). Her bir ignimbitten alınan dört kesit ve beş ignimbitten oluşan JRC sınıfları dikkate alındığında, fark grafiklerinin olduğu her şekilde toplam 20 grafiğin bulunduğu görülecektir.

JRC'nin 13-14 aralığı içine giren örnekler için oluşturulan fark grafikleri incelendiğinde referans veri ile sayısallaştırma yöntemleri sonucu elde edilen yükseklik verileri arasındaki farkın oldukça düşük olduğu görülmektedir (Şekil 7.2). Özellikle SfM yöntemi ile gerçekleştirilen sayısallaştırma işleminden elde edilen yükseklik değerleri ile referans veriye ait yükseklik değerleri arasındaki farkın büyük çoğunlukla 1 mm'nin altında olduğu görülmektedir. Hatta Şekil 7.2a'daki ikinci profil ve Şekil 7.2c'deki birinci profil dışındaki bütün profillerde yükseklik farklarının 0.5 mm civarında değiştiği görülmektedir. SLS yöntemi ile elde edilen yükseklik değerleri ile referans veri arasındaki farklar incelendiğinde, farkların SfM yönteminde elde edilen sonuçlarla benzerlik gösterdiği söylenebilir. Ancak 1 mm'ye yakın yükseklik farklarının SLS yönteminde SfM yöntemine oranla daha fazla bulunduğu dikkat çekmektedir. Ancak bütün profilin küçük bir kesiminde bu tarz yüksek farkların ortaya çıktığı düşünüldüğünde, tekil sayılabilecek bu farklara çok fazla anlam yüklenmemesi gerektiği düşünülmektedir. Şekil 7.2c'deki SLS yöntemi ile elde edilen yükseklik verilerinin referans veriden oldukça uzak olduğu görülmektedir. Bu istisna haricinde her iki sayısallaştırma yönteminin de sayısallaştırma performansı açısından başarılı olduğu söylenebilir.

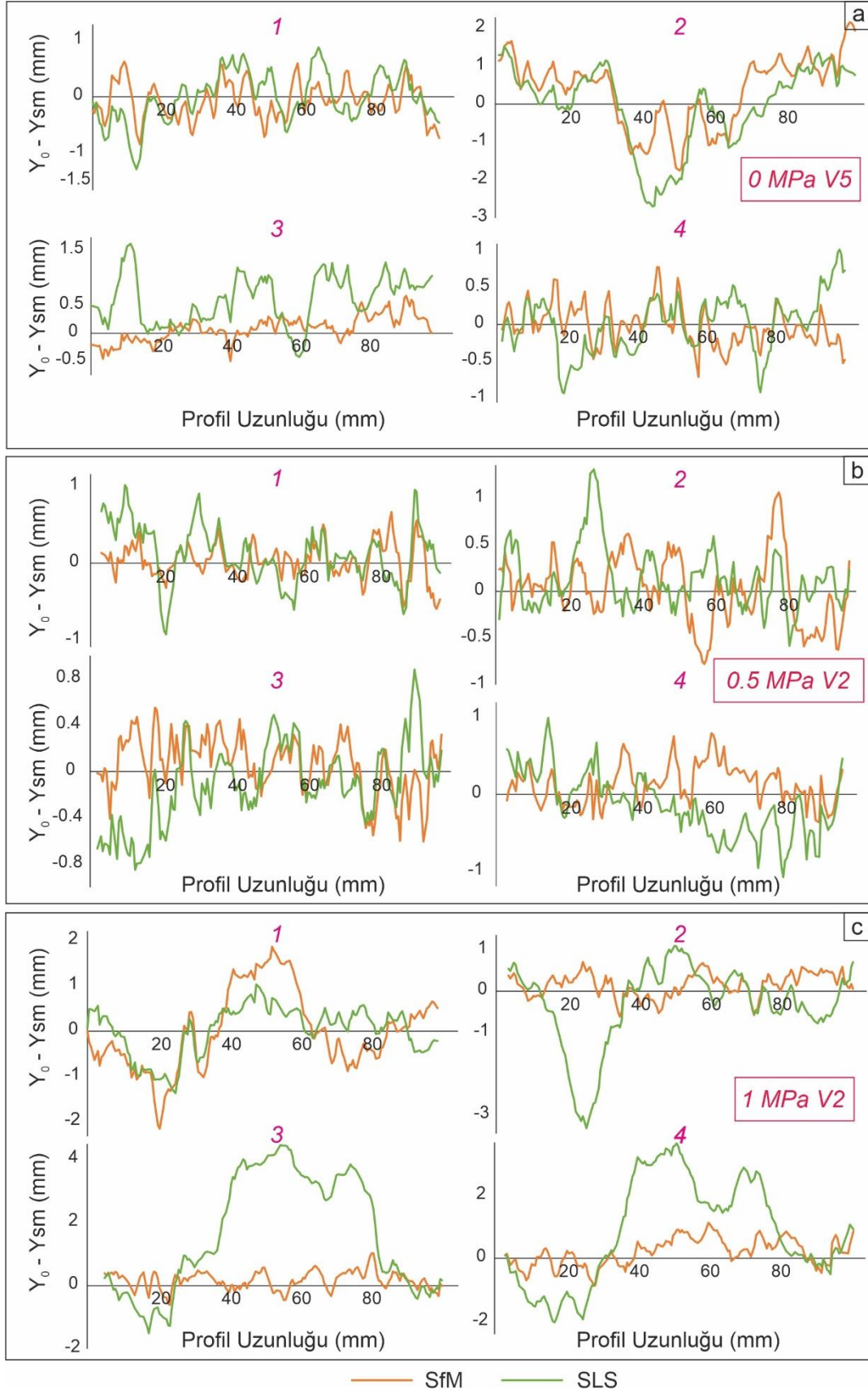
JRC'nin 14-15 aralığı için oluşturulan fark grafikleri incelendiğinde (Şekil 7.3) SfM yöntemi ile elde edilen yükseklik verileri ile referans veri arasındaki farkın 1 mm altında olduğu görülmektedir. Yükseklik farkları çoğunlukla 0.5 mm mertebelerinde gözlenmektedir. SLS yöntemi ile elde edilen yükseklik verileri ile referans veri arasındaki farkların bir örnek hariç (Şekil 7.3a) maksimum 1 mm seviyelerinde

olduğu anlaşılmaktadır. Grafikler detaylı incelendiğinde, 1 mm'nin altındaki yükseklik farklarının çoğunlukta olduğu görülmektedir. Her iki sayısallaştırma yöntemi de referans veriye yakın yükseklik verilerinin elde edilmesini sağlamıştır.

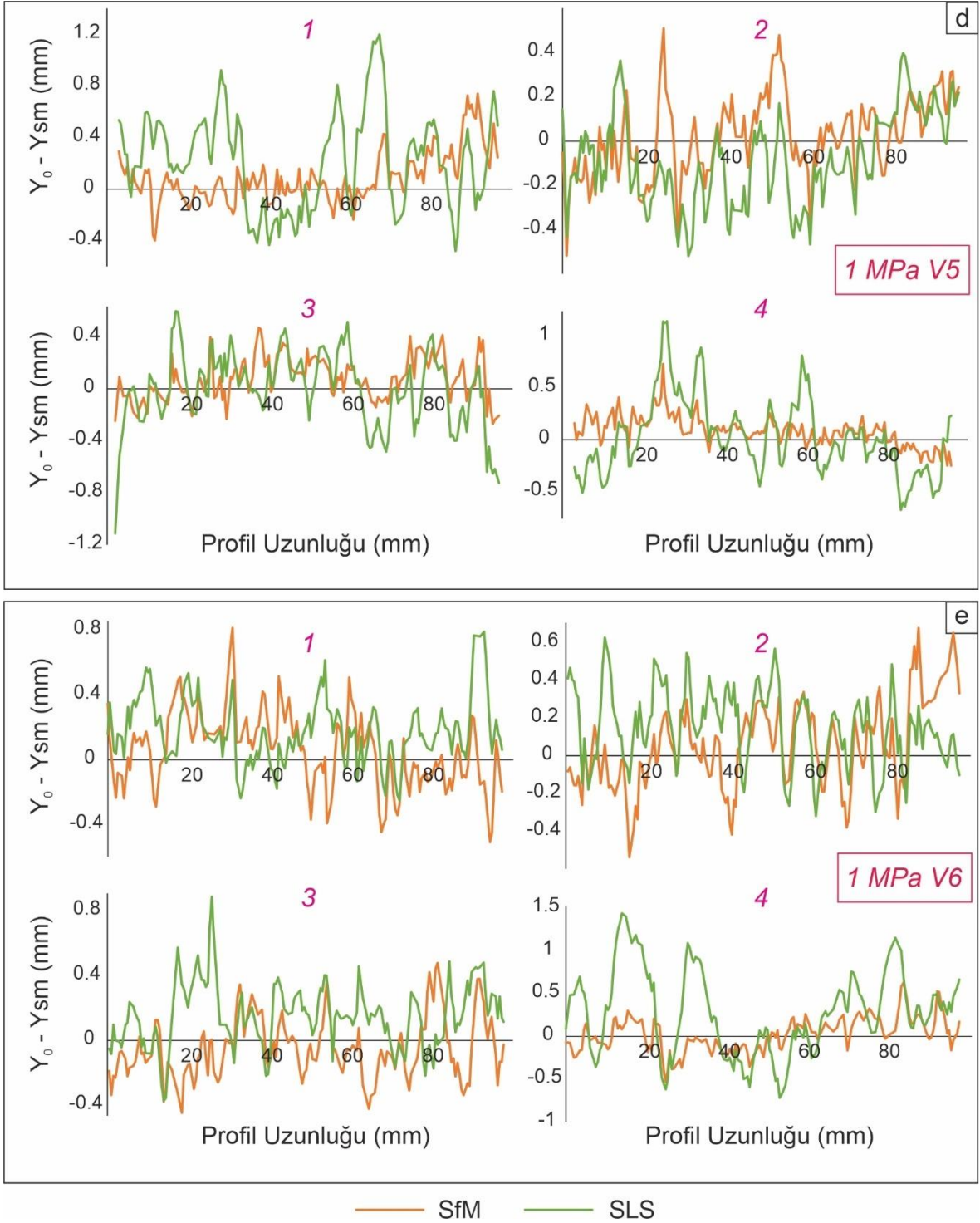
JRC'nin 15-16 aralığı için oluşturulan fark grafiklerinde (şekil 7.4) SfM yönteminden elde edilen farklar büyük çoğunlukla 0.5 mm seviyelerindedir Bazı profillerde (şekil 7.4a'da birinci ve şekil 7.4e'de ikinci profil vb.) 1 mm ve üzerinde yükseklik farkları görülüyor olsa da profilin tamamı düşünüldüğünde çok kısıtlı bir alanda bu farklara rastlandığı anlaşılmıştır. SLS yönteminden elde edilen farkların da genel olarak 1 mm'nin altında olduğu görülmektedir. şekil 7.4e'deki dördüncü profilde 1.5 mm'nin üstünde farklar gözlenmiştir. Ancak genel itibarıyla referans veriye oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

JRC'nin 16-17 aralığı için çizilen grafiklerde (şekil 7.5) SfM yönteminden elde edilen maksimum farkların genel olarak 0.5 mm seviyelerinde olduğu görülmektedir. şekil 7.5c'deki profillerde farkların 2 mm seviyelerine kadar çıktığı görülmüştür. Ancak bu yüksek değerlerle profil üzerindeki lokal noktalarda karşılaşılmıştır. SLS yönteminden elde edilen farkların da genel olarak 1 mm'yi geçmediği tespit edilmiştir. şekil 7.5c'de yine yüksek fark değerleriyle karşılaşılmıştır. Profillerin genelinde sayısallaştırma performansının başarılı olduğu yorumu yapılmıştır.

JRC'nin 17-18 aralığı için çizilen fark grafiklerinde hem SfM hem de SLS yöntemleri için ortalama maksimum farkların 1 mm mertebesinde olduğu görülmektedir. Diğer yorumlanan profillerde olduğu gibi bu profillerde de lokal olarak yüksek fark değerleri gözlenmiştir. Ancak sayısallaştırma performansı açısından bakıldığında oldukça başarılı sonuçların elde edildiği kanaatine varılmıştır.

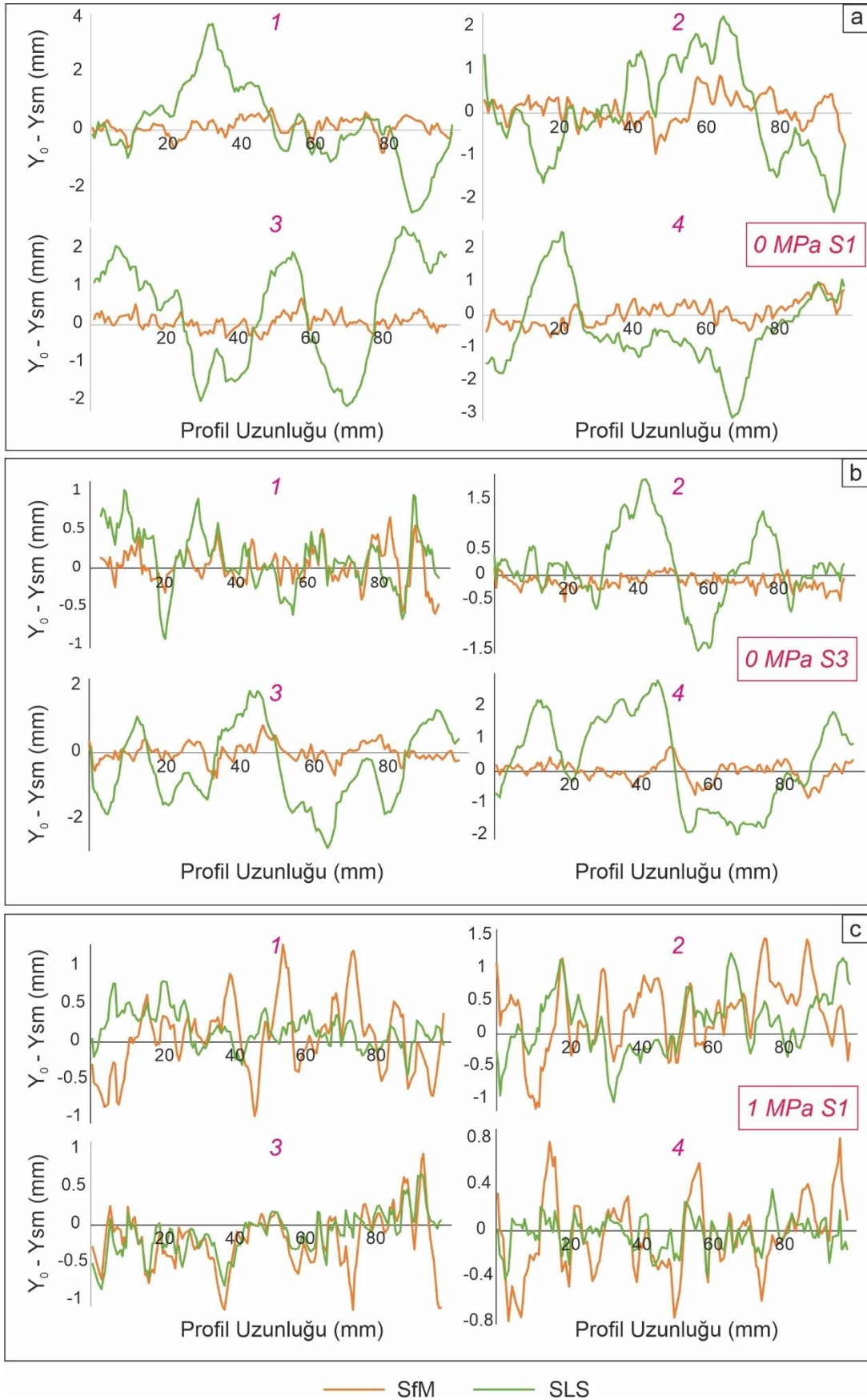


Şekil 7.2: JRC'nin 13-14 aralığında bulunan ıgımbiritlerde sayısallaştırma performansının değerlendirilmesi adına oluşturulan fark grafikleri.

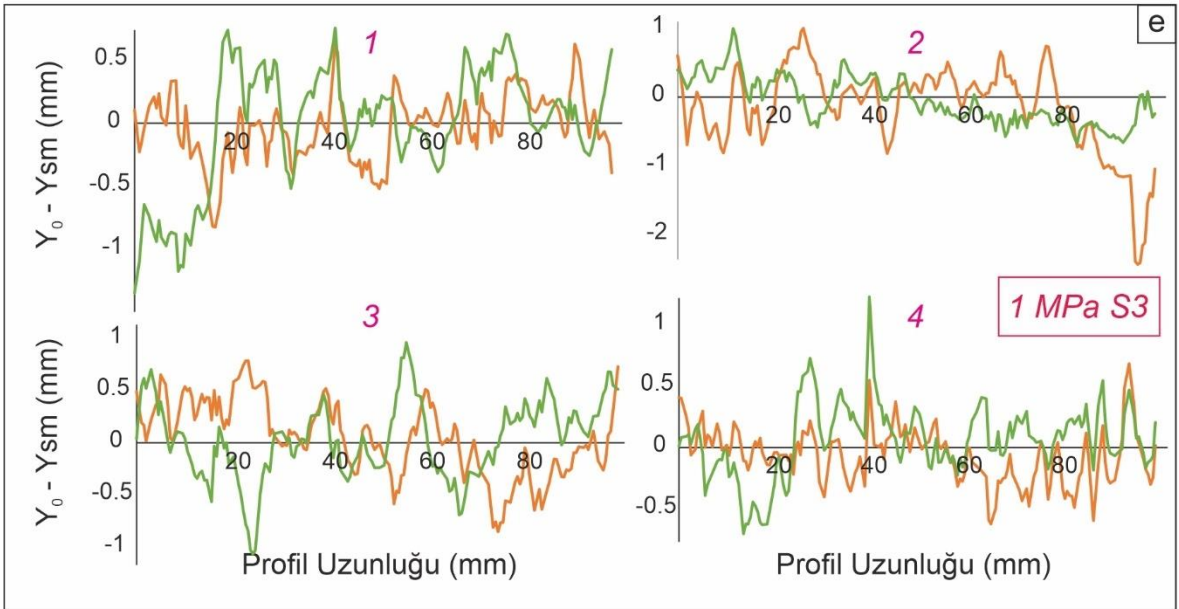
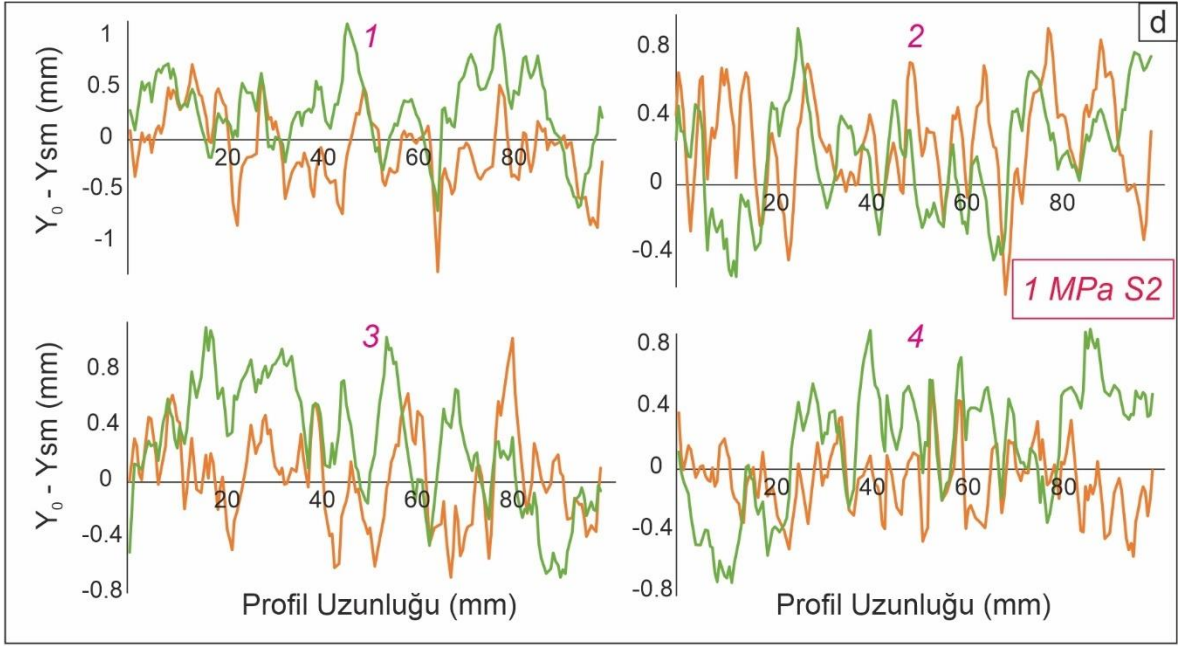


Şekil 7.2 devamı.

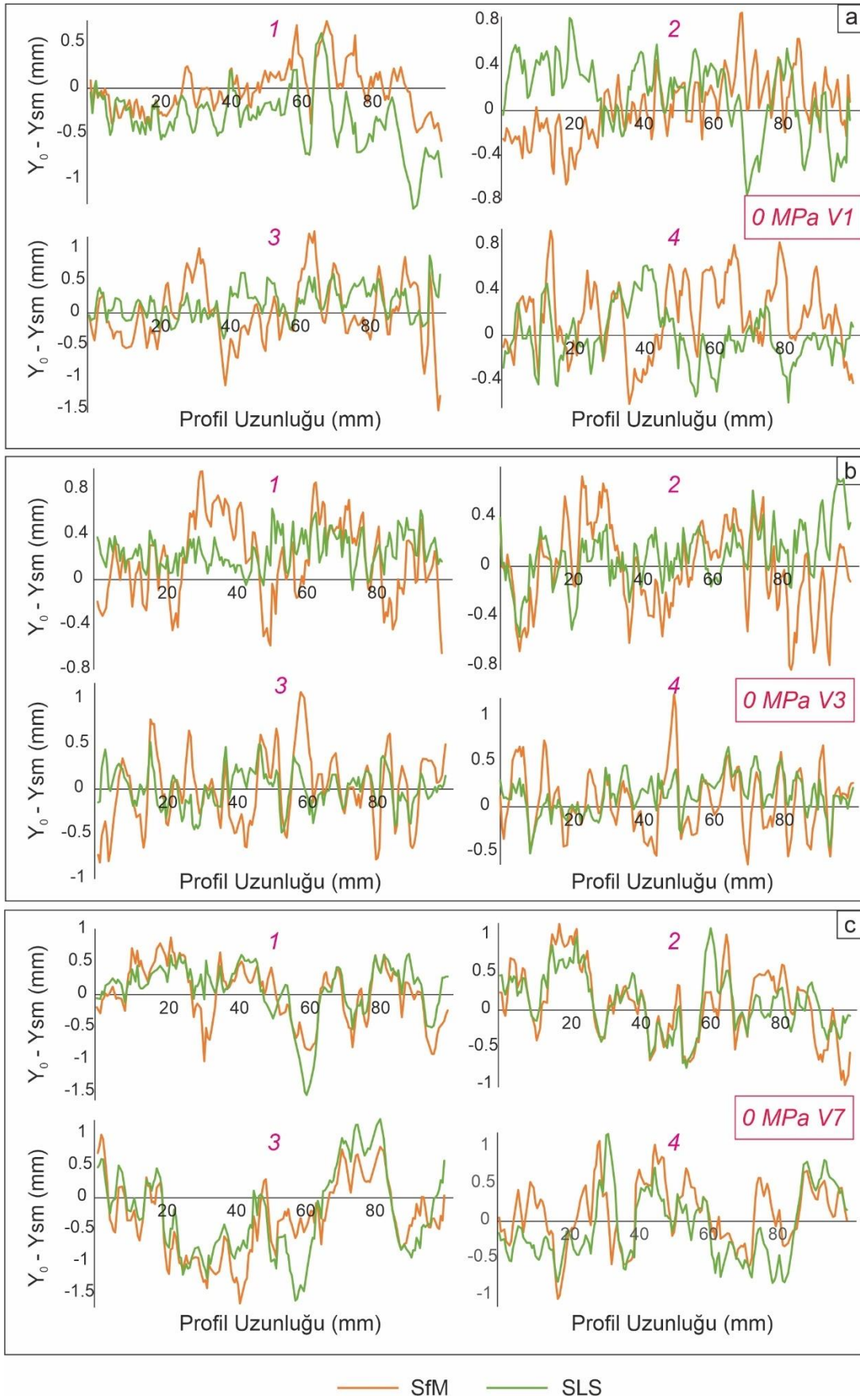




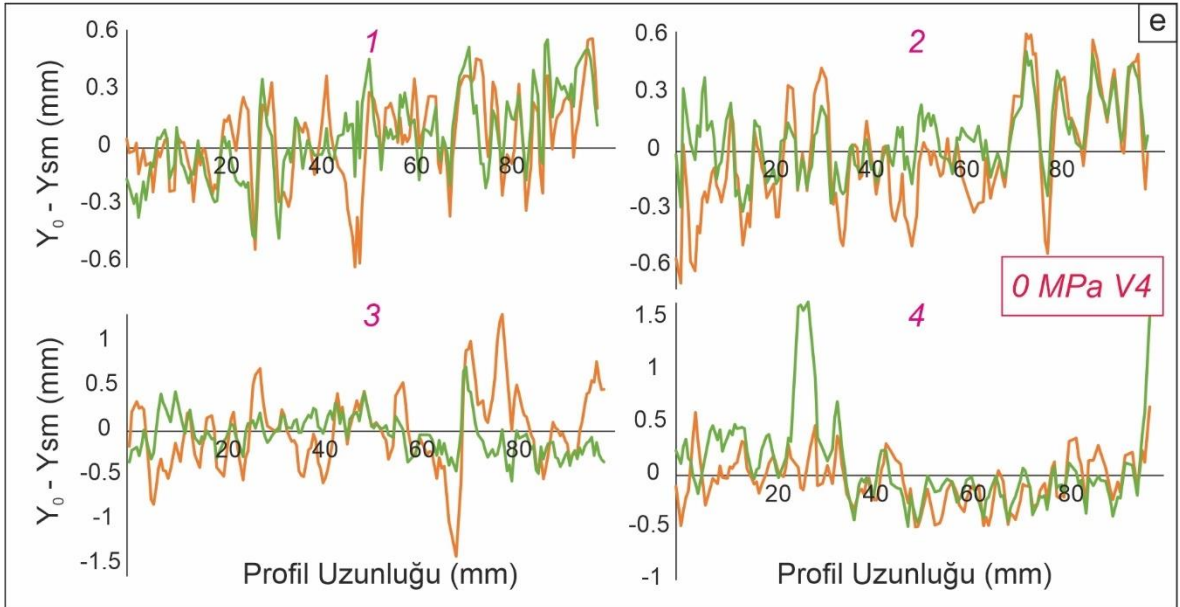
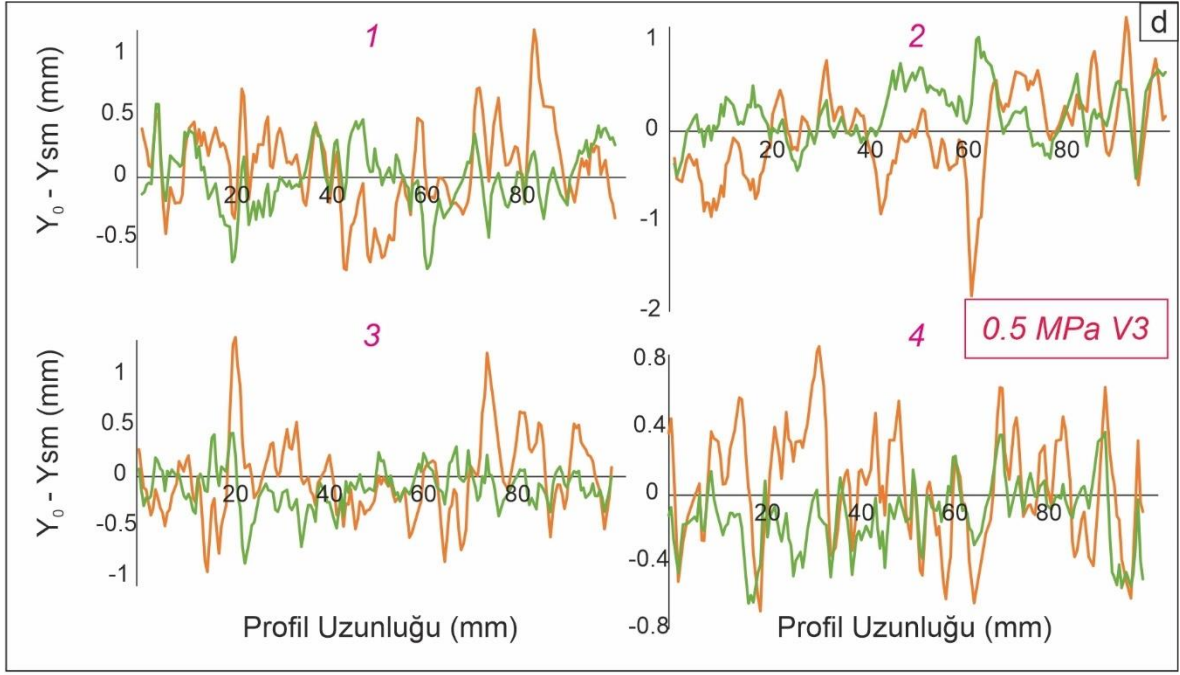
Şekil 7.3: JRC'nin 14-15 aralığında bulunan ignimbritlerde sayısallaştırma performansının değerlendirilmesi adına oluşturulan fark grafikleri.



Şekil 7.3 devamı.

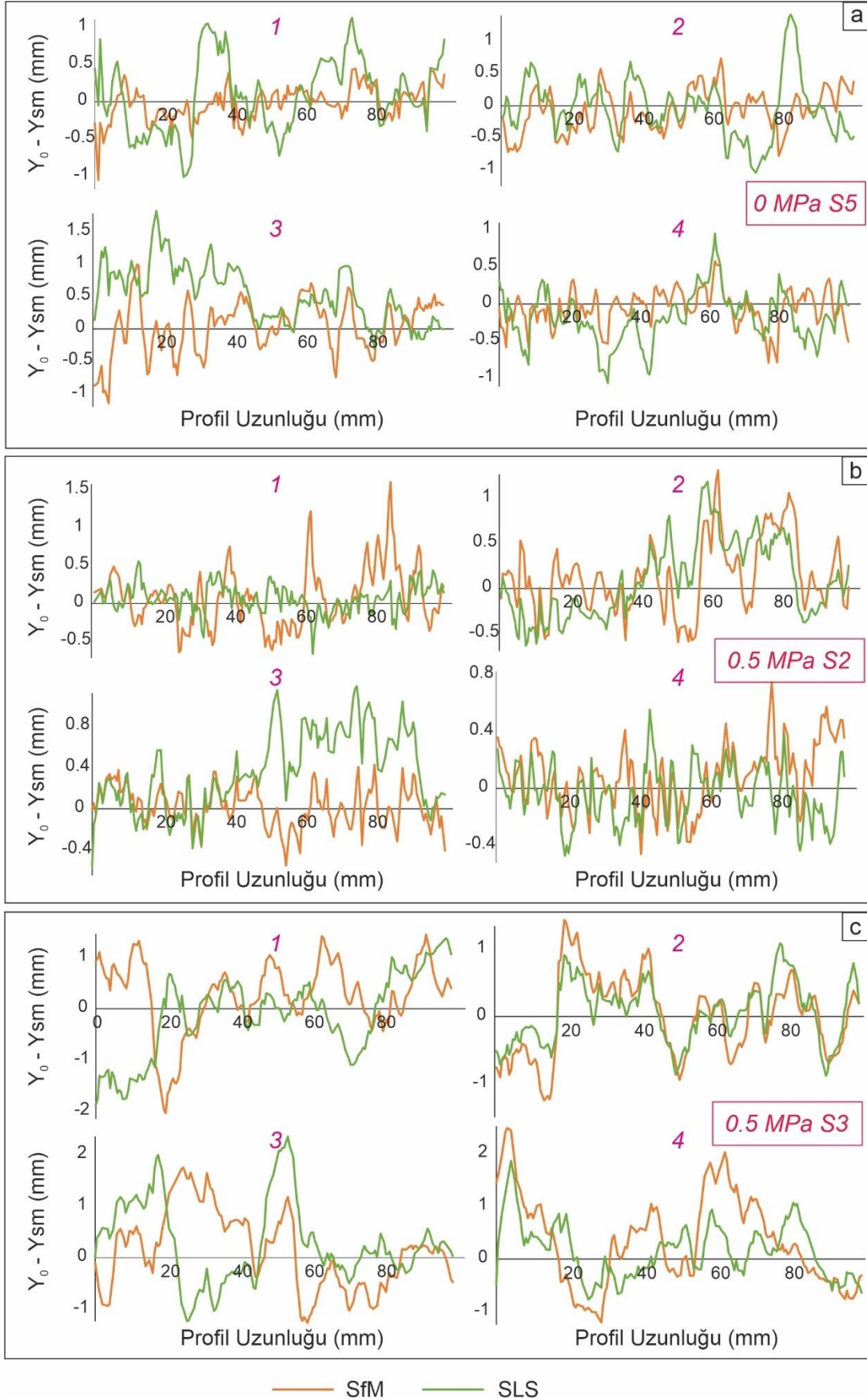


Şekil 7.4: JRC'nin 15-16 aralığında bulunan ignimbritlerde sayısallaştırma performansının değerlendirilmesi adına oluşturulan fark grafikleri.

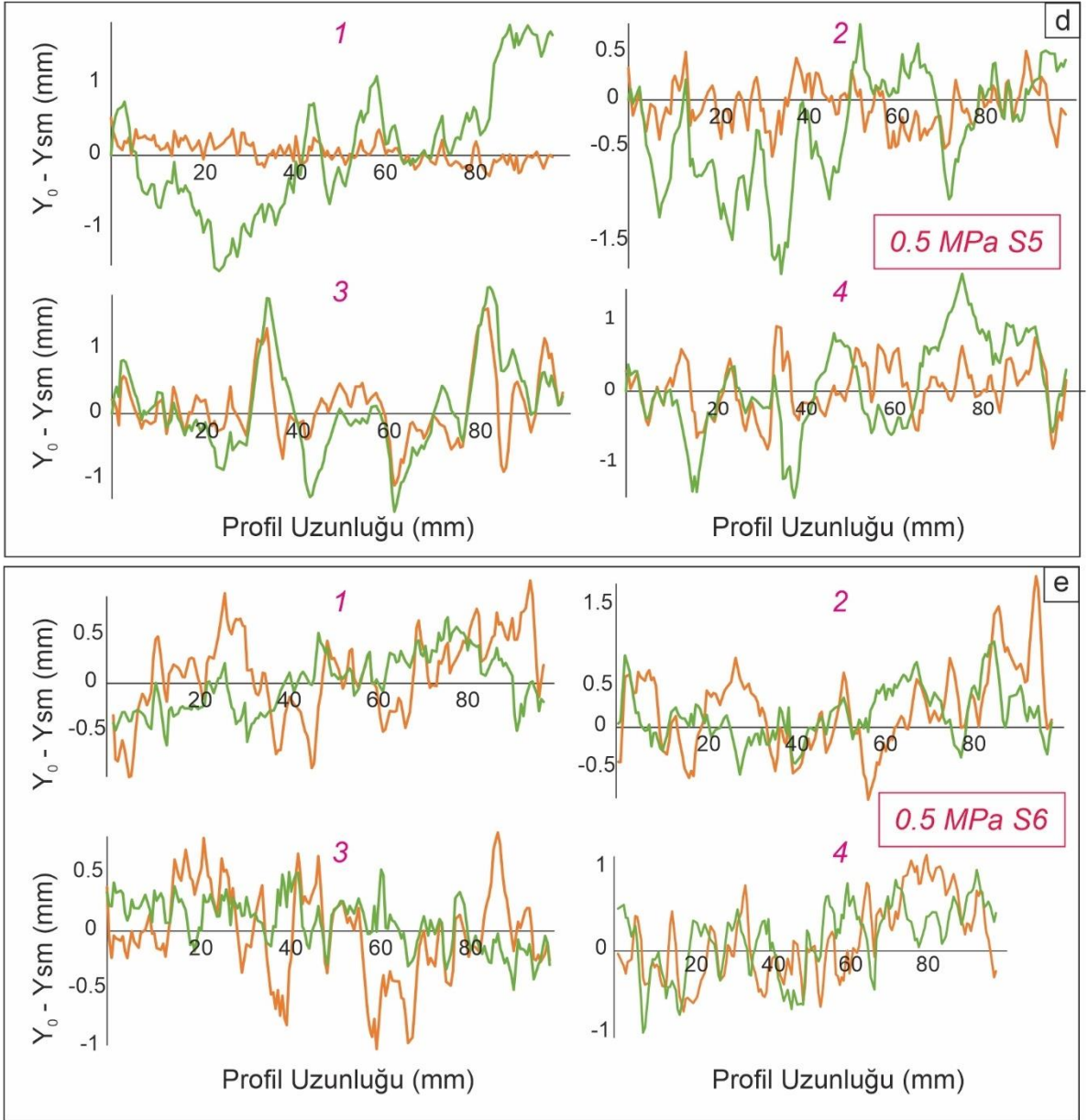


— SfM — SLS

Şekil 7.4 devamı.

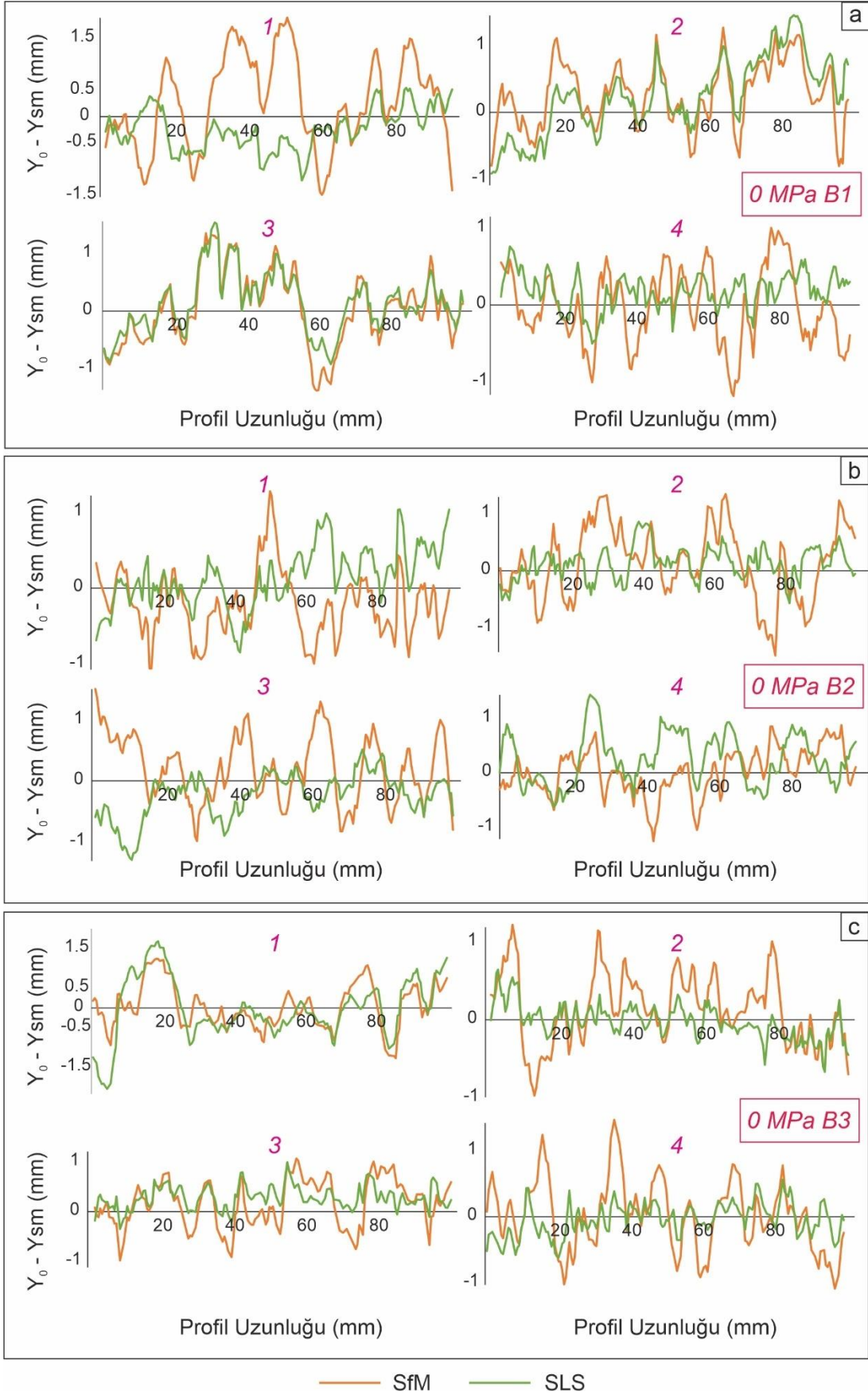


Şekil 7.5: JRC'nin 16-17 aralığında bulunan ignimbiritlerde sayısallaştırma performansının değerlendirilmesi adına oluşturulan fark grafikleri.

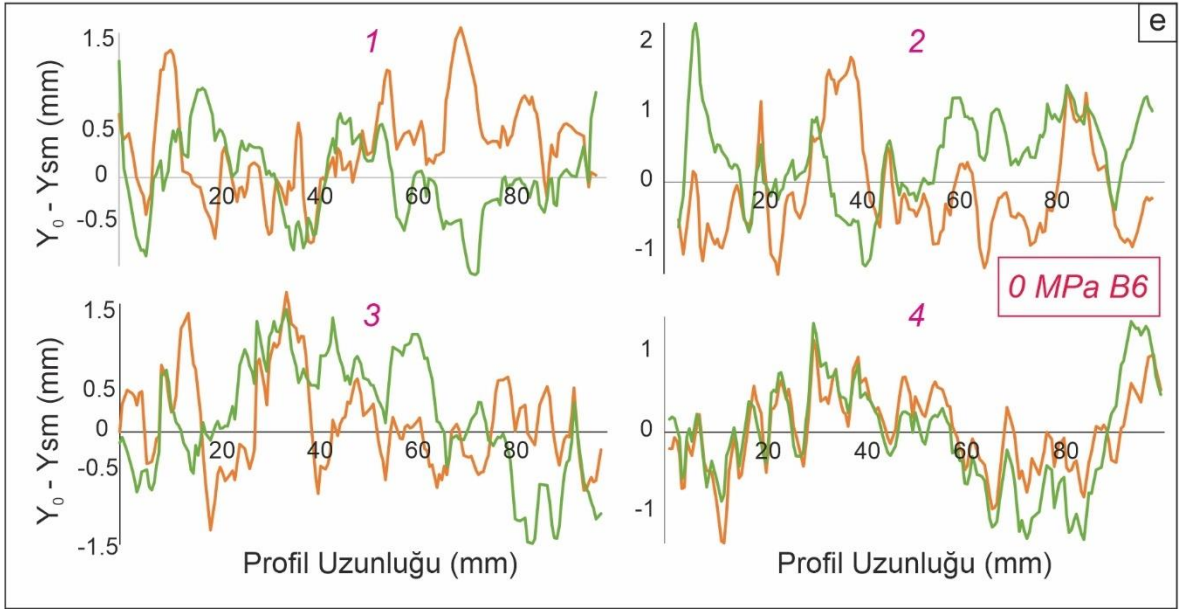
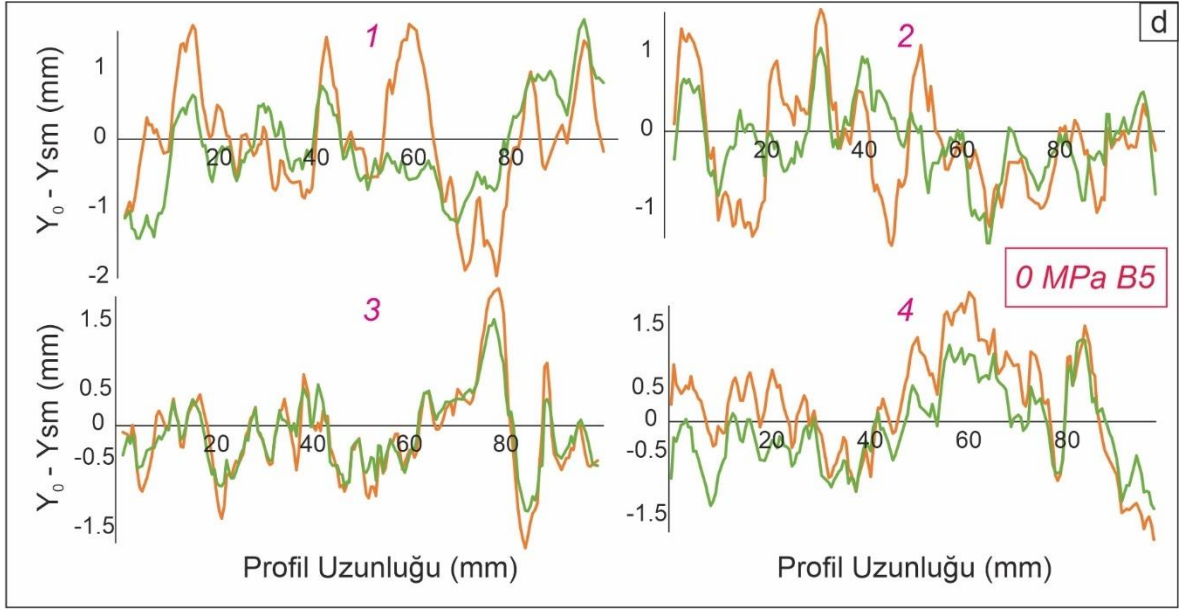


— SfM — SLS

Şekil 7.5 devamı.



Şekil 7.6: JRC'nin 17-18 aralığında bulunan ignimbritlerde sayısallaştırma performansının değerlendirilmesi adına oluşturulan fark grafikleri.



— SfM — SLS

Şekil 7.6 devamı.



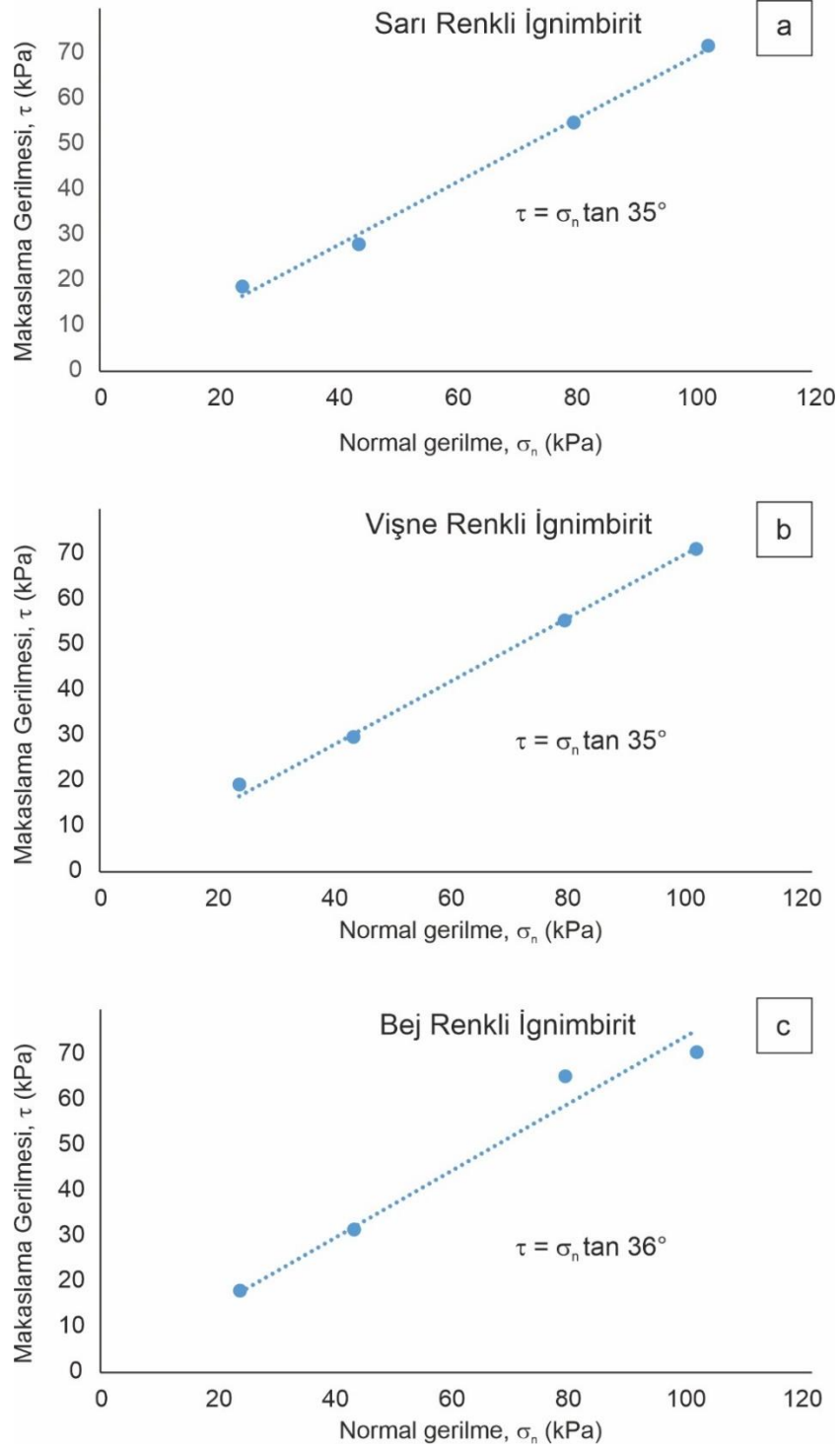
## 8. İGNİMBİRİTLERDE MAKASLAMA DAYANIMI DENEYLERİ

İgnimbiritler üzerinde gerekli sayısallaştırma işlemleri yapıldıktan ve örneklere ilişkin JRC değişim aralıkları belirlendikten sonra makaslama deneyleri aşamasına geçilmiştir. İlk etapta Barton-Bandis kriterinde girdi parametresi olarak kullanılan  $\phi_b$  değerini belirlemek amacıyla düz ve pürüzsüz yüzeyler oluşturulmuştur. Farklı ignimbirit türleri için dörder makaslama örneği hazırlanmış ve bu örnekler farklı normal gerilmeler altında makaslama deneylerine tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar Şekil 8.1'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre sarı, vişne ve bej renkli ignimbiritlerde  $\phi_b$  parametresine ait değerler sırasıyla 35°, 35° ve 36° olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin ortalaması alçı örneklerde hesaplanan  $\phi_b$  değerlerinin (34°-40°) değişim aralığı içerisinde kalmaktadır. Barton ve Choubey (1977) çoğu düz ve bozunmamış kaya yüzeyleri için  $\phi_b$  değerlerinin ortalama olarak 25° – 35° arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan ignimbirit örnekleri için  $\phi_b$  değerlerinin, söz konusu araştırmacılar tarafından önerilen değerlerin üst sınırına yakın olduğu görülmektedir.

### 8.1. Barton-Bandis Kriteri İle Oluşturulan Yenilme Zarfları

Çalışma kapsamında kullanılan farklı ignimbirit örneklerine ait makaslama deney örneklerinin oluşturulma aşaması önceki bölümlerde anlatılmıştı (Bkz. Bölüm 5.2.2). Oluşturulan süreksizlik yüzeyleri sayısallaştırılmış ve sayısallaştırma işlemleri sonucu belirlenen JRC değerlerine göre deneyde kullanılacak JRC değişim aralıkları belirlenmişti. Bu değişim aralıklarına ait makaslama deneyi örnekleri beş farklı normal gerilme altında makaslama deneylerine tabi tutulmuştur. Deneylerde uygulanan normal gerilmeler, alçı örneklerde kullanılan normal gerilme seviyelerine uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Deneyler sırasında örnek uzunluğunun %15'i kadar bir yer değiştirme uygulanmıştır. Sarı renkli bir ignimbirit örneğinin deney öncesi ve sonrasına ait görüntüleri Şekil 8.2'de verilmiştir. Deney esnasında genel itibarıyla ufak bölgelerde deformasyonlar meydana gelmiştir (Şekil 8.2c ve d). Pürüzlülük genliği yüksek olan bölgelerde gerilmelerin biriktiği ve dolayısıyla deformasyonların olduğu gözlenmiştir. Süreksizlik yüzeyleri yapay olarak oluşturulduğu ve karşılıklı olarak eşleştiği için uygulanan ufak miktardaki yer

değişiklikler sonrasında (0.6 ile 1.8 mm arasında) doruk makaslama gerilmelerine ulaşılmıştır. Yer değiştirme miktarları arttıkça doruk makaslama değerlerinden artık makaslama değerlerine düşüş gerçekleşmiştir.



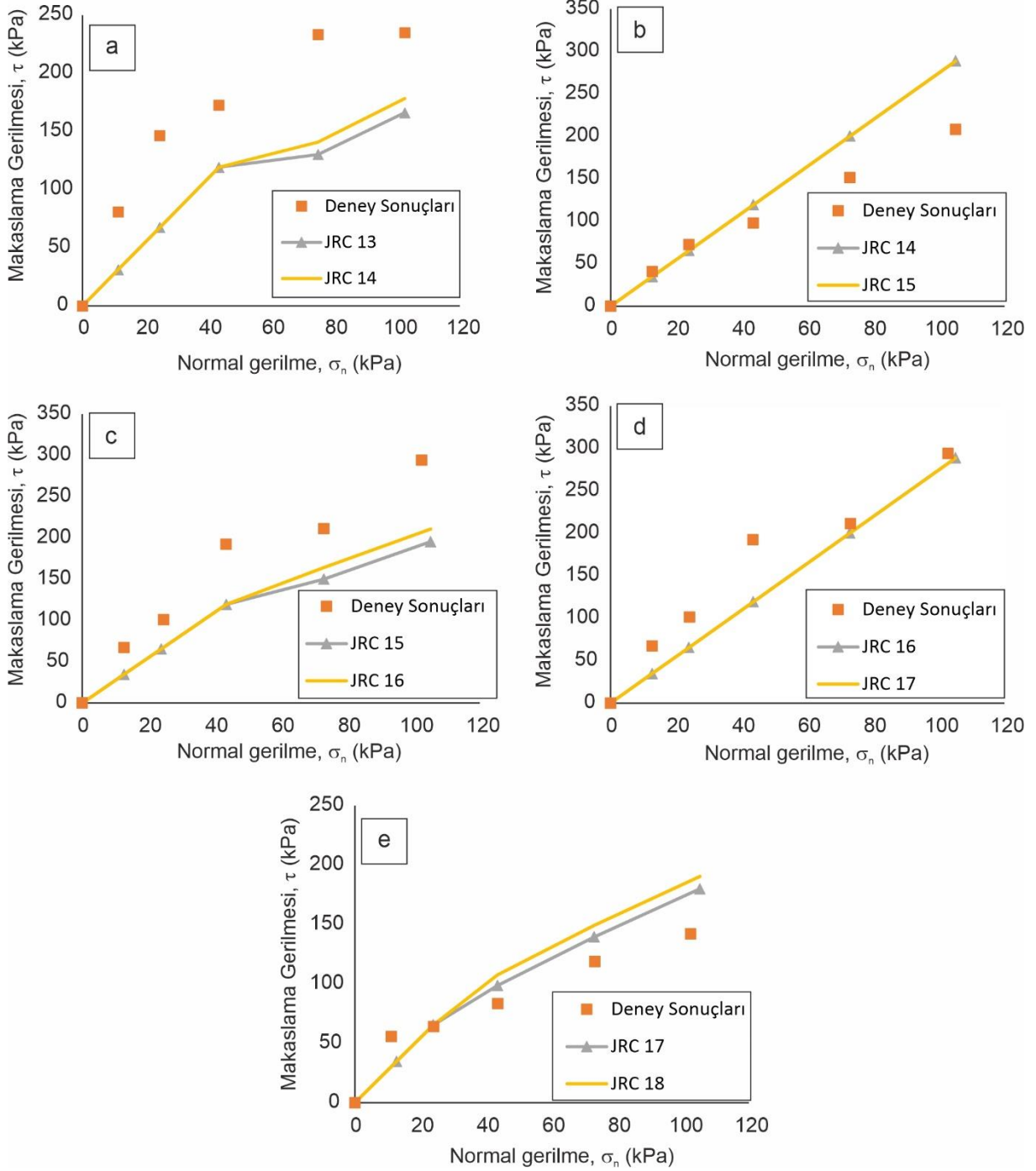
Şekil 8.1:  $\phi_b$  parametresinin belirlenmesi amacıyla (a) sarı, (b) vişne ve (c) bej renkli ignimbritlerde gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar.



Şekil 8.2: Sarı renkli bir ıgnımbırit örneğinin makaslama düzeneği içerisindeki (a) deney öncesi, (b) deney sonrası görüntüleri ile (c) - (d) deney sonrasında oluşan deformasyonlara ilişkin görüntüler.

Deneylerde uygulanan yer değiştirmeler sırasında meydana gelen makaslama kuvvetleri kaydedilmiş ve uygulanan yer değiştirmeye karşılık makaslama gerilmesi grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerden doruk makaslama gerilmesi değerleri belirlenmiştir. Normal gerilmeye karşılık doruk makaslama gerilmesi değerleri ile yenilme zarfları çizilmiştir. Ayrıca JRC değişim aralıklarının alt ve üst sınırlarını temsil eden JRC değerleri için Barton-Bandis kriteri yardımıyla her bir deney seti içi ikişer yenilme zarfı daha çizilmiştir. Makaslama deneylerinden elde edilen sonuçlar ve farklı JRC değerleri için kriter yardımıyla belirlenen yenilme zarfları Şekil 8.3'te sunulmuştur.

Şekil 8.3'te verilen yenilme zarfları incelendiğinde, deney sonuçlarına ait noktaların eğrisel bir eğilime sahip olduğu görülmektedir. Ancak Barton-Bandis kriteri ile çizilen yenilme zarfları eğrisel karaktere sahip değildir. Bu duruma Barton (1973) tarafından önerilen eşitlik sebep olmuştur (Bkz. Eş. 2.14). Araştırmacı,  $JCS/\sigma_n \geq 100$  olduğu durumlar için 70°'lik eşik açı değerinin kullanılması gerektiğini bildirmiştir. Geri kalan durumlarda ise orijinal eşitliğin kullanılabileceğini belirtilmiştir. Yenilme zarflarının iki farklı eşitlik ile çizilmesi kriteri eğrisel yapıdan uzaklaştırmıştır.



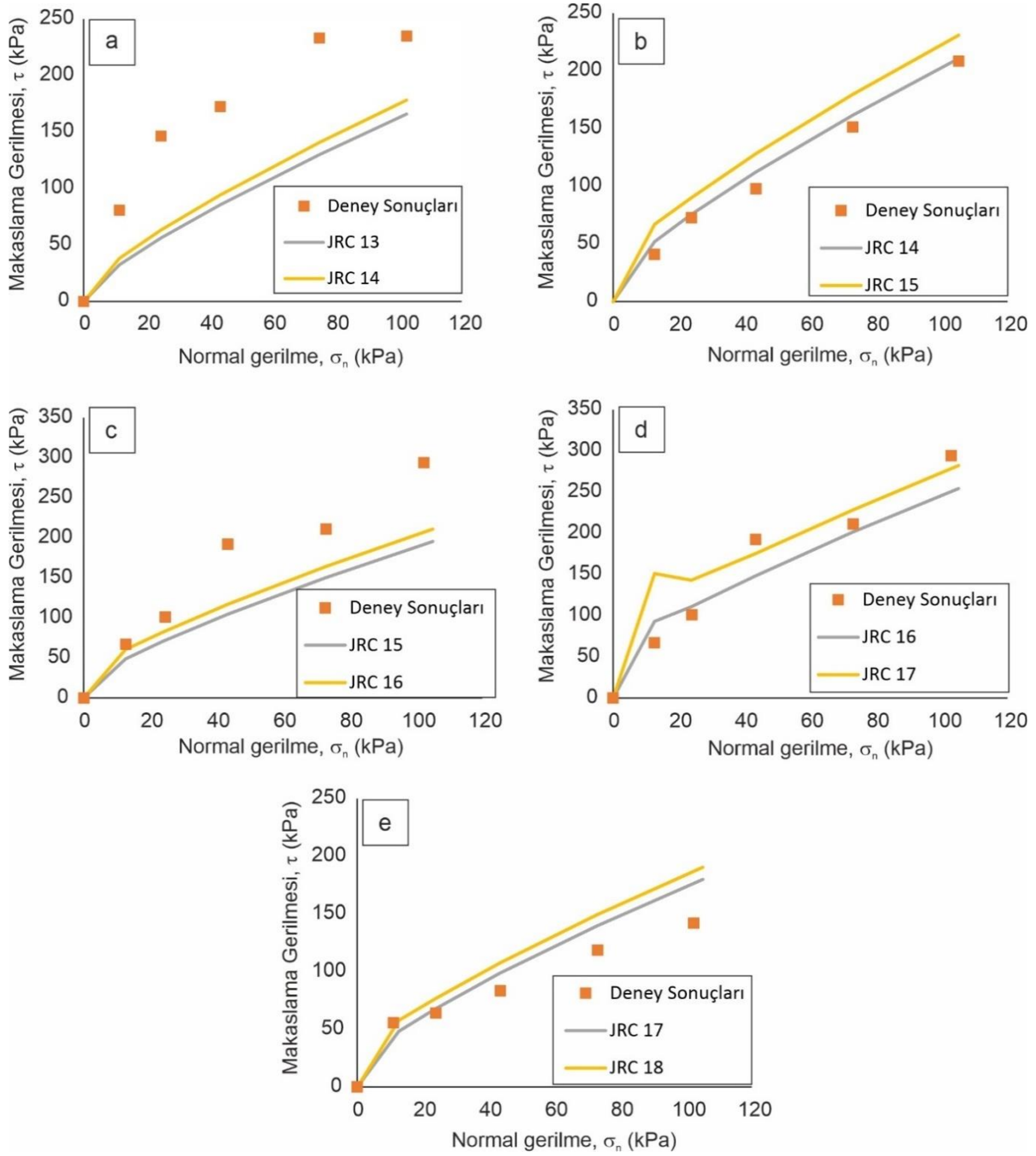
Şekil 8.3: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar ve aynı aralıklar için eşik açısı değeri kullanılarak Barton-Bandis kriterinden belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).

Şekil 8.3'teki vişne ve bej renkli ignimbiritlere ait yenilme zarfları (a, c ve e) incelendiğinde,  $JCS/\sigma_n$  oranına bağlı olarak ilk 2-3 normal gerilme seviyesine karşılık gelen makaslama gerilmelerinin eşik açısı değeri ile hesaplandığı görülmektedir. Sarı renkli ignimbiritlere ait yenilme zarflarında (b ve d) ise bütün normal gerilme seviyeleri için eşik açısı değeri kullanılmıştır. Eşik açısı ile çizilen yenilme zarflarının deney sonuçları ile uyuşmadığı görülmektedir.  $JCS/\sigma_n \geq 100$  olduğu durumlarda gözlenen ani makaslama gerilmesi değişimlerinin önüne geçmek adına önerilmiş eşik açısı yaklaşımı düşük normal gerilmelerdeki eğrisel eğilimi ortadan kaldırmaktadır.

Eşik açısı kullanılmadan, Barton-Bandis kriterine ait orijinal eşitlik ile yenilme zarfları tekrar çizilmiştir (Şekil 8.4). Çizilen yenilme zarfları ile deney sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Vişne renkli ignimbiritlerde gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçların kriterden belirlenen sonuçlardan daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 8.4a ve 8.4c). Şekil 8.4d'de ise  $JCS/\sigma_n$  değerine bağlı uygulanan ilk normal gerilme seviyesinde ani bir artış gözlenmiştir. Bu artış sarı renkli ignimbiritlerdeki JCS ve JRC'nin görece yüksek değere sahip olması ile açıklanabilir. Düşük normal gerilme altında JCS değeri yüksek olan sarı ignimbiritlerde makaslama dayanımında ani bir artış gerçekleşmiş ancak normal gerilmenin artması ile eğrisel yenilme zarfı formuna dönüş olmuştur. Şekil 8.4e'deki bej renkli ignimbiritlerde her ne kadar JRC yüksek olsa da JCS değerinin düşük oluşu  $JCS/\sigma_n$  oranını daha düşük kalmasına neden olmuştur. Bu nedenle bej renkli ignimbiritlerdeki düşük  $\sigma_n$  seviyelerindeki makaslama gerilmelerinde ani artışla karşılaşılmasıdır. Ani artış yalnızca  $JCS/\sigma_n$ 'nin yüksekliği ile değerlendirilmemeli, hesaplamalarda JCS, JRC ve  $\phi_b$  değerleri tümüyle göz önünde bulundurulmalıdır. Gözlenen bu davranış haricinde Barton-Bandis kriteri ile eşik açısı kullanmadan belirlenen yenilme zarfları deney sonuçları ile büyük bir uyum içerisindedir.  $JCS/\sigma_n \geq 100$  olduğu durumlarda bile eşik açısı kullanılmadan çizilen yenilme zarfları deney sonuçlarına daha yakın değerler vermiştir. Kritik  $JCS/\sigma_n$  değerini belirlemek üzere üretilen grafik (Bkz. Şekil 5.32) kullanılarak makaslama gerilmelerinde ani artışların olabileceği şartlar incelenip, bu şartların dışında kalan durumlarda orijinal eşitlik kullanılabilir. Böylece Barton-Bandis kriteri kullanılarak deney sonuçlarıyla daha uyumlu yenilme zarfları çizilebilir.

İgnimbiritlerde Barton-Bandis kriteri ile çizilen yenilme zarfları, görsel karşılaştırma sonucu belirlenen JRC değişim aralıklarının alt ve üst sınırına ait JRC değerleri ile çizilmiştir. JRC değişim aralıkları için dört istatistiksel parametre ile belirlenen JRC değerleri önceki bölümde sunulmuştu (Bkz. Çizelge 7.10, 7.13 ve 7.16). Profilometre, SLS ve SfM yöntemiyle sayısallaştırma sonucu belirlenen bu JRC değerleri kullanılarak ignimbiritler için yenilme zarfları tekrar çizilmiştir. Vişne renkli ignimbiritlerde JRC'nin 13-14 ve 15-16 değişim aralıkları için çizilen yenilme zarfları Şekil 8.5'te, sarı renkli ignimbiritlerde JRC'nin 14-15 ve 16-17 değişim aralıkları için çizilen yenilme zarfları Şekil 8.6'da ve bej renkli ignimbiritler için JRC'nin 17-18 değişim aralığı için çizilen yenilme zarfları Şekil 8.7'de sunulmuştur. Bu şekillerde ilgili JRC değişim aralığı için elde edilen makaslama deney sonuçları ile profilometre, SLS ve SfM yöntemlerinden belirlenen JRC'ler ile çizilmiş yenilme zarfları bulunmaktadır. Üç sayısallaştırma yönteminden elde edilen verilerle dört istatistiksel parametre ( $Z_2$ , SF,  $R_L$  ve  $\theta_{max}/(C+1)$ ) belirlenmiş ve bunlara bağlı JRC değerleri hesaplanmıştır. Bu grafiklerdeki yenilme zarfları Pro, SLS ve SfM kısaltmaları ile sayısallaştırma yöntemlerine göre adlandırılmıştır. Sonrasında gelen 1, 2, 3 ve 4 rakamları sırasıyla  $Z_2$ , SF,  $R_L$  ve  $\theta_{max}/(C+1)$  parametrelerini temsil etmektedir. En sonda bulunan JRC değerleri ise ilgili parametreler ile hesaplanan JRC değerleridir. Her bir grafikte üç farklı sayısallaştırma yöntemine ve dört farklı istatistiksel parametreye ait toplam 12 yenilme zarfı bulunması gerekmektedir. Ancak negatif ve/veya çok yüksek makaslama gerilmesi içerdiği için hatalı olduğu kabul edilen yenilme zarfları silinmiştir.

JRC'nin 13-14 değişim aralığı için Şekil 8.5a'da sunulan grafik incelendiğinde, farklı yöntemlerle belirlenen JRC değerleri ile çizilen yenilme zarflarının tamamı deney sonuçlarının altında kalmaktadır. Düşük pürüzlülük değerlerinden ötürü yenilme zarflarında herhangi bir olumsuz değerle karşılaşmamıştır. Şekil 8.5b'de sunulan grafikte ise negatif makaslama gerilmesi değerlerinden ötürü iki yenilme zarfı silinmiştir. 17.23, 17.48 ve 18.53 JRC değerlerine sahip yenilme zarflarında ise düşük normal gerilme seviyelerinde ani artışlar gözlenmiştir (Pro 2, SLS 3 ve SLS 4). Ancak bu zarflar deney sonuçlarına en yakın sonuçları vermiştir. Geri kalan yenilme zarflarının deney sonuçlarını temsil etmede yetersiz kaldığı görülmektedir. Özellikle SfM yöntemiyle sayısallaştırma işleminde belirlenen JRC'ler ile çizilen zarflar deney sonuçlarının oldukça uzağında kalmıştır.



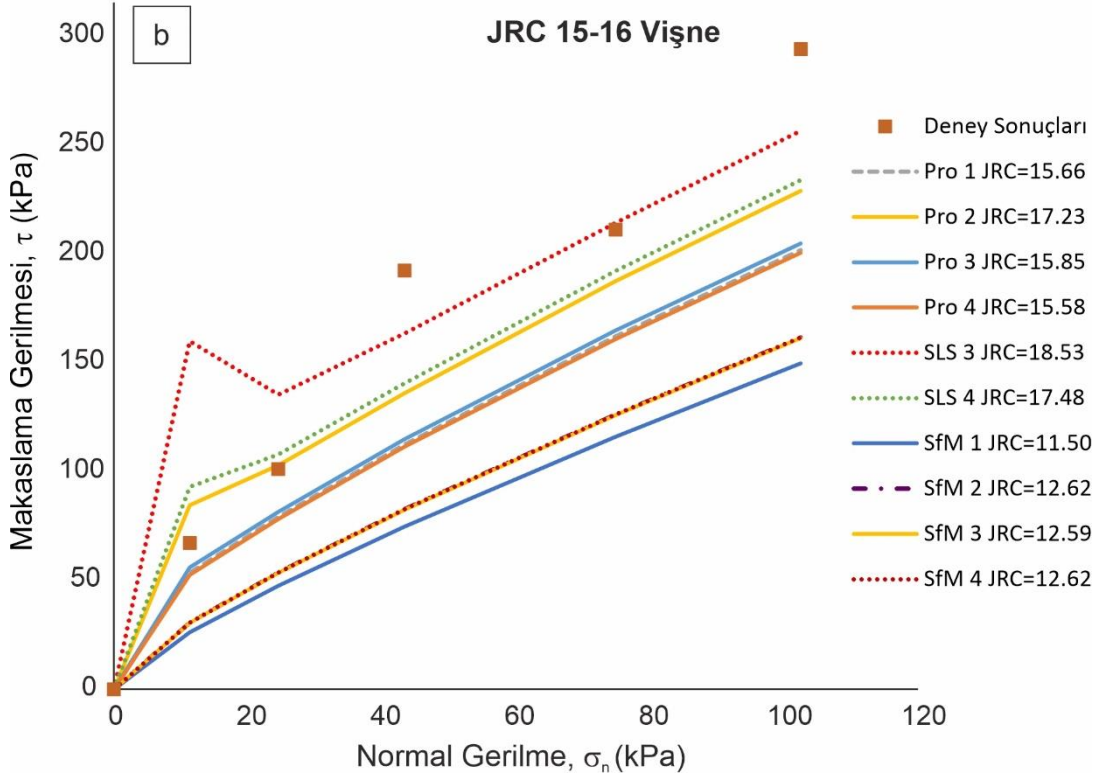
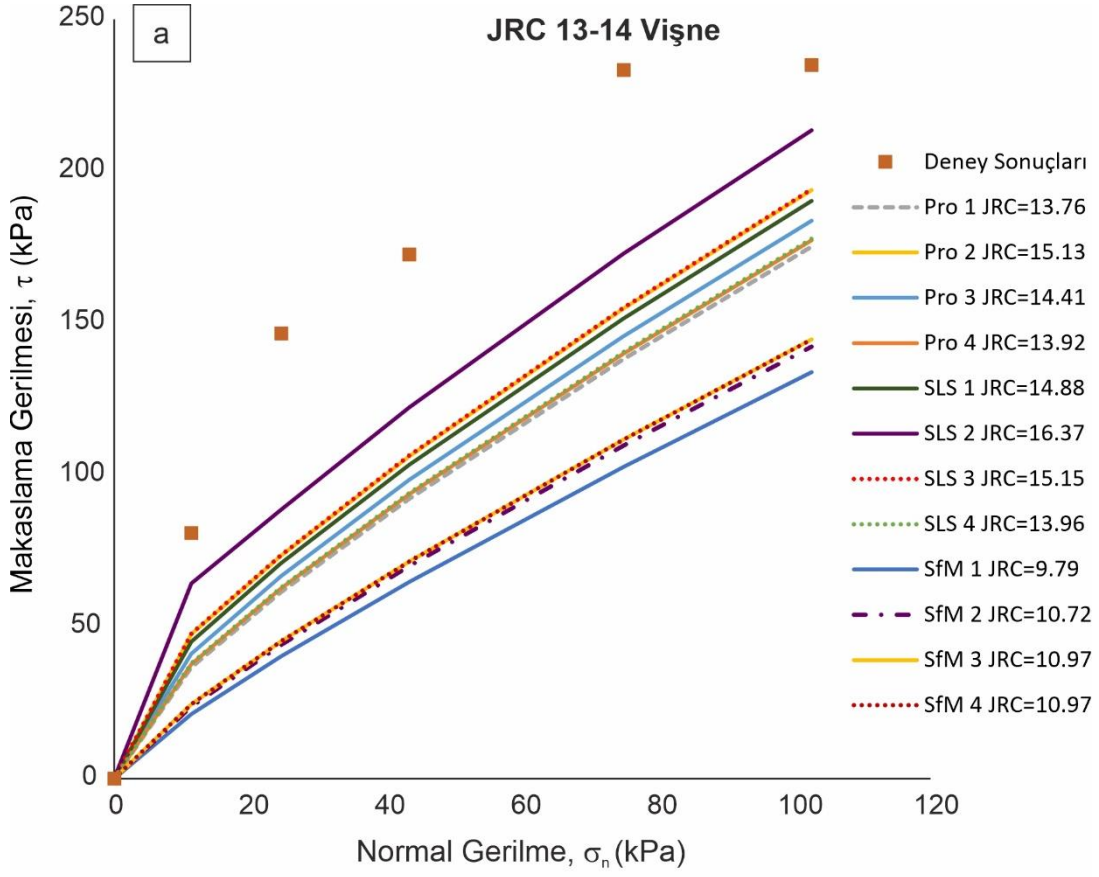
Şekil 8.4: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar ve aynı aralıklar için Barton-Bandis kriterinden belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).

Sarı renkli ignimbitlerde JRC'nin 14-15 ve 16-17 değişim aralıkları için çizilen yenilme zarfları Şekil 8.6'da görölmektedir. Şekil 8.6a'da negatif makaslama gerilmesi veren yenilme zarfı bulunmamaktadır. Ancak bir yenilme zarfındaki (SLS 2) düşük normal gerilme altında hesaplanan makaslama gerilmesinde ani bir artış gözlenmiştir. Şekil 8.6b'de ise iki yenilme zarfında (Pro 2 ve SLS 2) negatif makaslama dayanımları elde edildiği için bu yenilme zarflarına çizimlerde yer verilmemiştir. Ayrıca bu grafikteki SfM yöntemi ile çizilen yenilme zarfları haricindeki bütün zarflar için, düşük normal gerilmeler altındaki makaslama gerilmelerinde ani artışlarla karşılaşılmıştır.

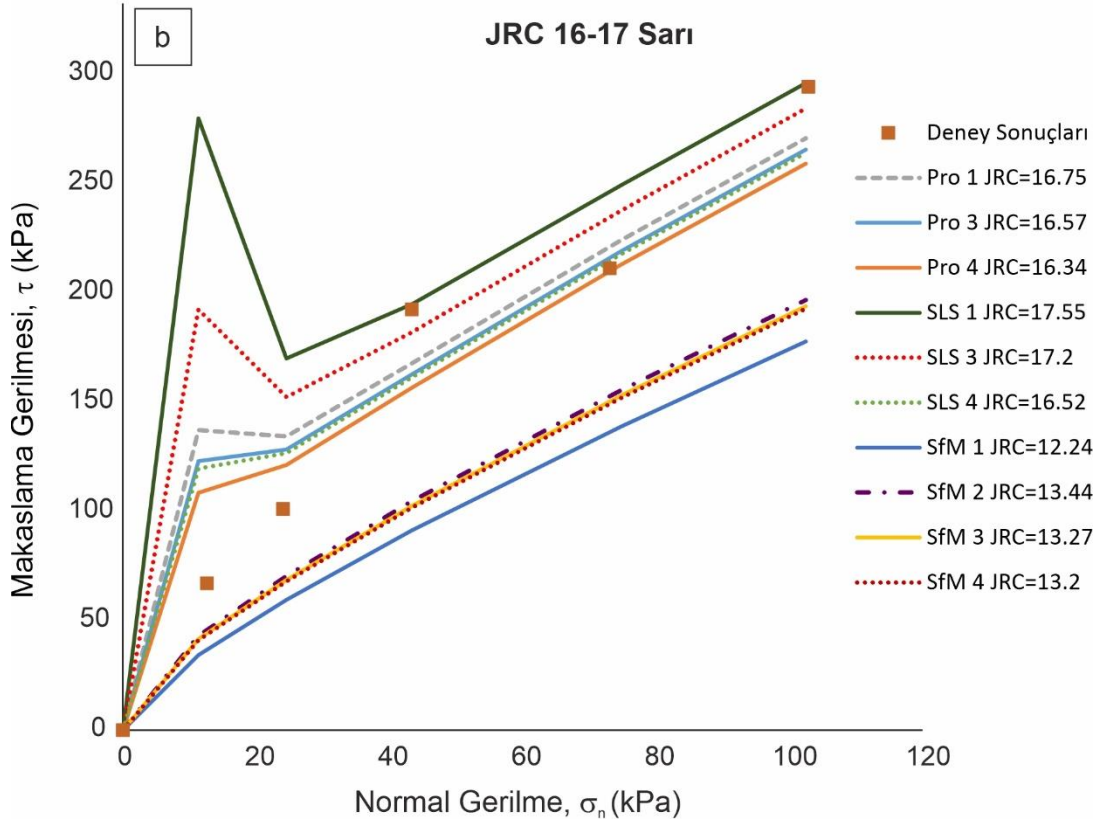
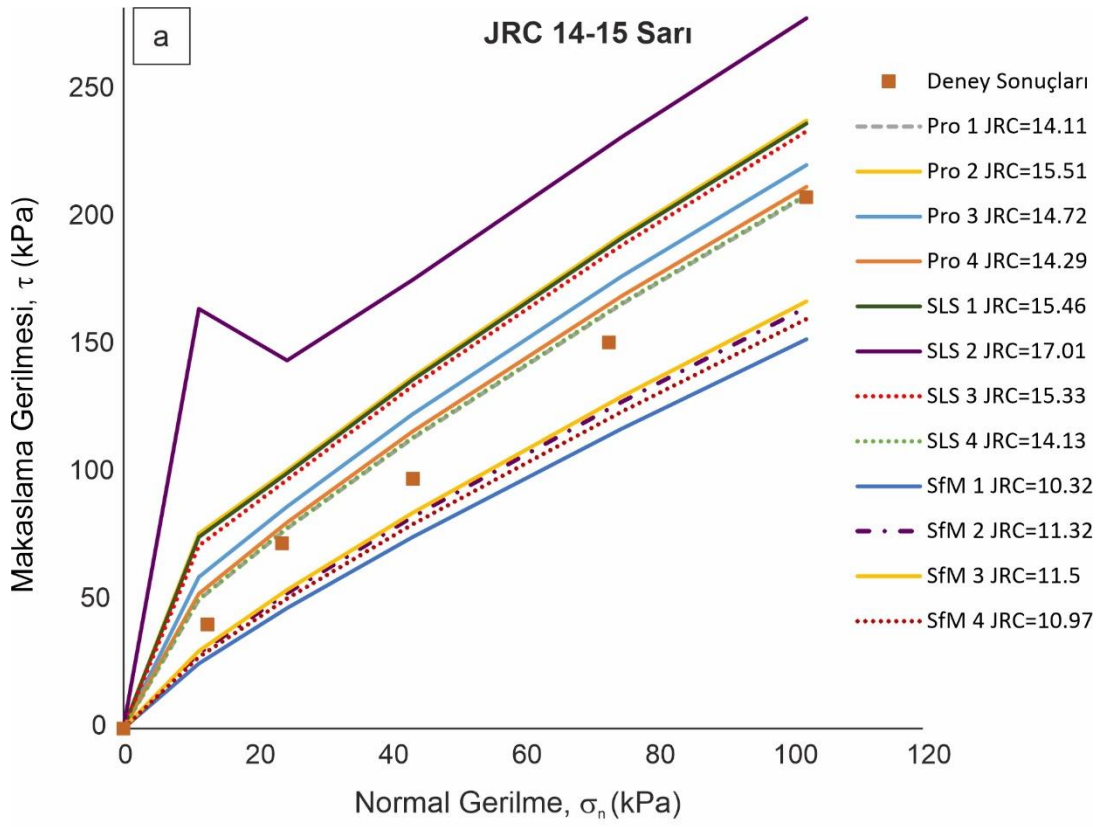
Her iki JRC değişim aralığı için SfM yöntemiyle belirlenen yenilme zarfları deney sonuçlarının altında kalmaktadır. Şekil 8.6a'daki yenilme zarflarından üçü deney sonuçlarına oldukça yakın değerler vermiştir (Pro1, Pro 4 ve SLS 4). Şekil 8.6b'de ise düşük normal gerilmelerdeki ani makaslama gerilmesi artışları göz ardı edilirse, SfM yöntemi dışında kalan altı yenilme zarfı da deney sonuçlarına ait değişim aralığını temsil edecek konumdadır. Bu yenilme zarfları içerisinde iki tanesinin deney sonuçlarının ortalamasını temsil edecek yapıda olduğu yorumu yapılabilir (Pro 1 ve SLS 3).

Şekil 8.7'de bej renkli ignimbitler için çizilen yenilme zarfları görölmektedir. SLS yöntemi ile çizilen yenilme zarfları negatif makaslama gerilmesi değerleri verdiği için grafikte gösterilmemiştir. Sekiz zarf arasında bir tanesi düşük normal gerilme altında ani makaslama gerilmesi artışı göstermiştir (Pro 2). Bu yenilme zarfı haricinde kalanlar deney sonuçlarına yakın sonuçlar vermektedir. Ancak normal gerilme arttıkça deney sonuçlarından uzaklaşma eğilimi görölmektedir.

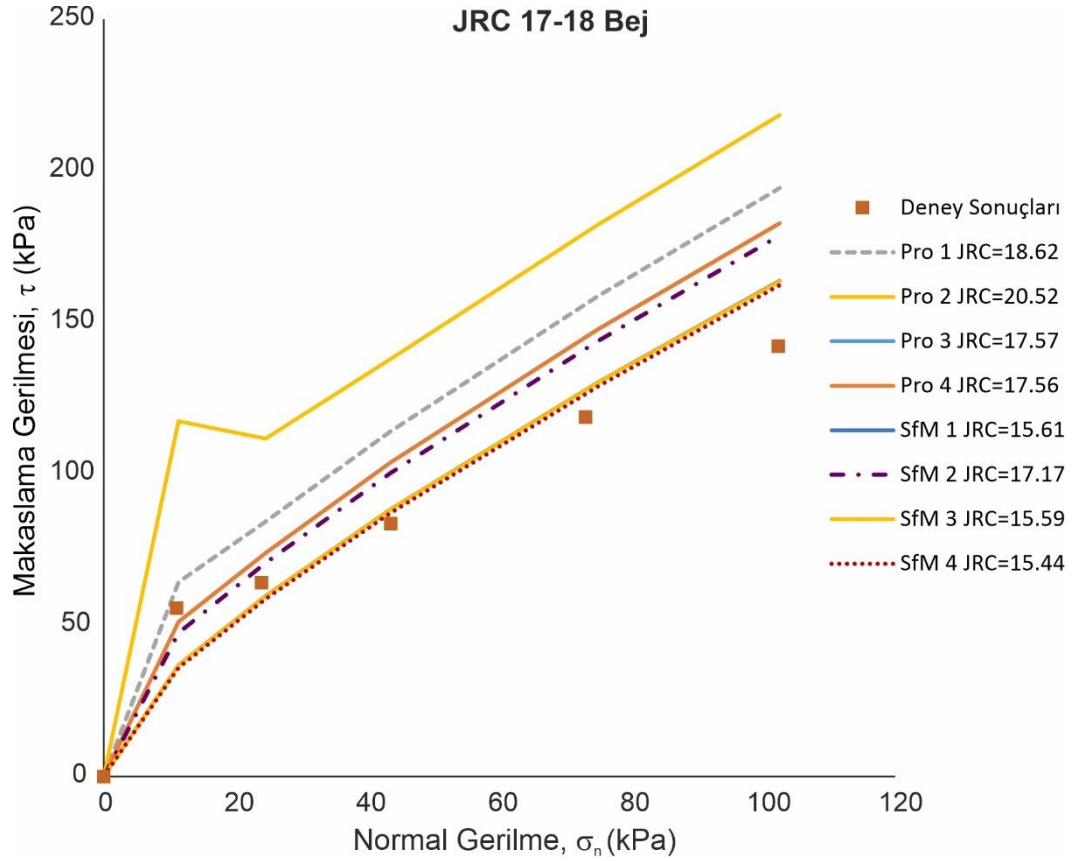




Şekil 8.5: Vişne renkli ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14 ve (b) 15-16 değişim aralıkları için farklı JRC değerleri kullanılarak çizilen yenilme zarfları.



Şekil 8.6: Sarı renkli ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 14-15 ve (b) 16-17 değişim aralıkları için farklı JRC değerleri kullanılarak çizilen yenilme zarfları.



Şekil 8.7: Bej renkli ignimbirit örneklerinde JRC'nin 17-18 değişim aralığı için farklı JRC değerleri kullanılarak çizilen yenilme zarfları.

## 8.2. Alternatif Yenilme Kriterleri İle Oluşturulan Yenilme Zarfları

Barton-Bandis kriteri ile çizilen yenilme zarflarındaki eşik açısı uygulamasından dolayı deney sonuçlarının yeterince temsil edilemediği durumlar olmuştur. Eşik açısı uygulanmadığı koşullarda ise bir yenilme zarfında makaslama gerilmesinde ani artış gözlenmiştir. Karşılaşılan bu tarz eksikliklerin giderilmesine yönelik bir yaklaşım olarak alternatif yenilme kriterleri kullanılmıştır. Detayları önceki bölümlerde (bkz. Bölüm 2) anlatılan yenilme kriterleri içerisinde, bu çalışmada kullanılan parametrelerle uyumlu olan yenilme kriterleri seçilmiştir. Tatone ve Grasselli (2009), Ghazvinian ve ark. (2012), Tang ve ark. (2014) ve Xia ve ark. (2014) tarafından sunulan ve sırasıyla Eşitlik 2.37, 2.39, 2.41 ve 2.43 ile temsil edilen yenilme kriterleri kullanılmıştır. Pürüzlülük, bu yenilme kriterleri içerisinde sadece Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından sunulan kriterde JRC parametresi ile tanımlanmaktadır. Geri kalan kriterlerde ise pürüzlülüğü tanımlamak için  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi kullanılmaktadır.  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi hem iki boyutta hem de üç boyutta

pürüzlülük tanımlamaya olanak verdiği için araştırmacılar tarafından sunulan eşitliklerde iki ve üç boyut için belirlenen  $\theta_{max}/(C+1)$  parametreleri ayrı ayrı kullanılarak yenilme zarfları çizilmiştir.

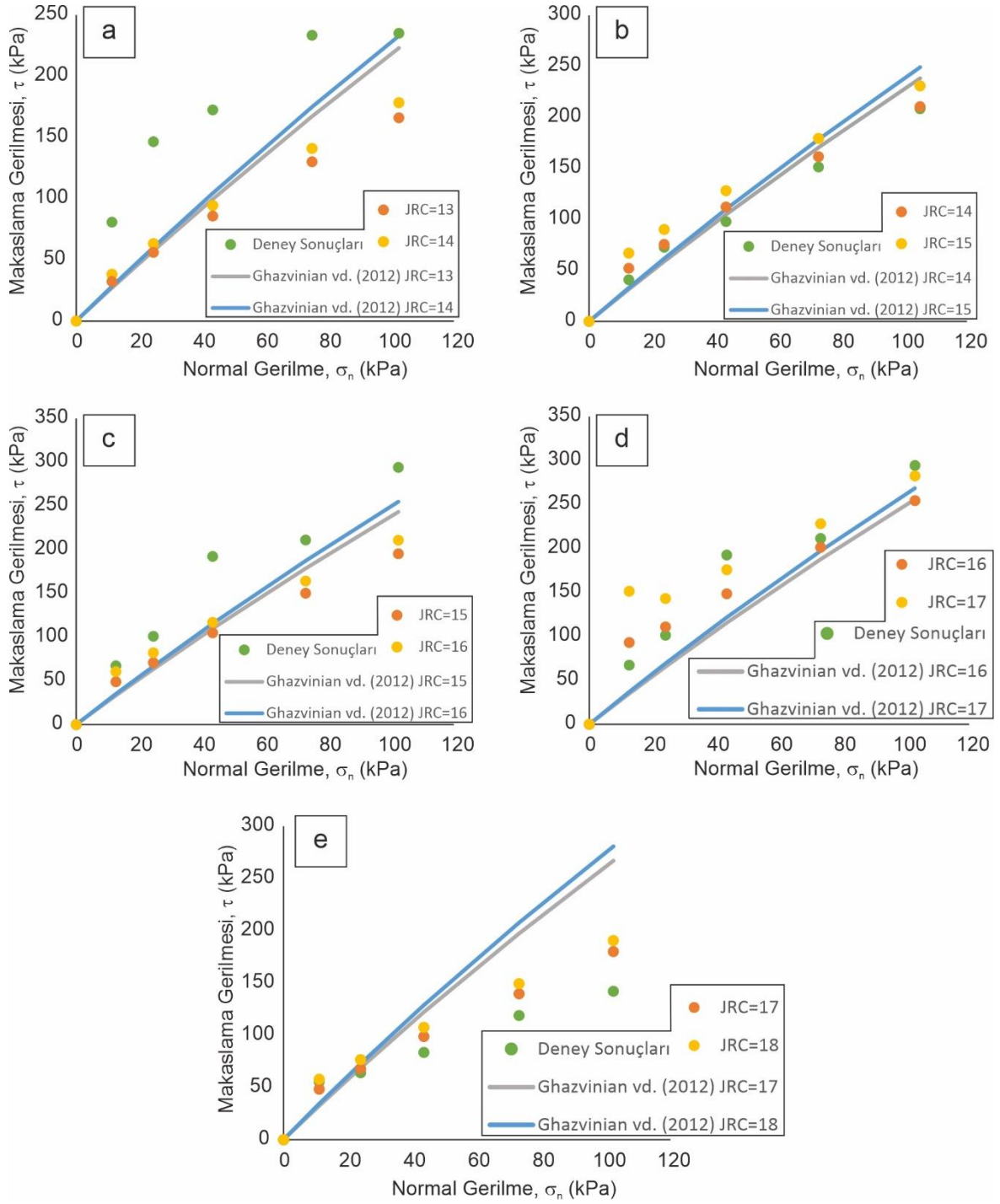
Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından sunulan eşitlikte, JCS değeri yerine  $\sigma_t$  değeri dayanım parametresi olarak kullanılmaktadır. Bu değişiklik ile Barton-Bandis kriterinde görülen sorunların önüne geçileceği düşünülmüştür. Önerilen eşitlik ile belirlenen yenilme zarfları Şekil 8.8'de sunulmuştur. Bu şekilde önceki sonuçlarda olduğu gibi beş farklı JRC değişim aralığına ait sonuçlara yer verilmiştir. Her bir grafikte beş farklı veri seti bulunmaktadır. Bunlar deney sonuçlarını temsil eden daireler (yeşil), Barton-Bandis kriteri ile eşik açısı kullanılmadan farklı JRC'ler için çizilen daireler (sarı ve turuncu) ve Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından önerilen eşitlik ile farklı JRC değerleri için çizilen yenilme zarflarıdır (mavi ve gri). Şekil 8.8a ve 8.8c'deki vişne renkli ignimbiritler için verilen sonuçlar incelendiğinde, Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından sunulan eşitlikten belirlenen yenilme zarfları Barton-Bandis kriterinden belirlenen değerlere benzer sonuçlar vermiştir. Düşük normal gerilmelerde Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar deney sonuçlarına yakinken; normal gerilme arttıkça araştırmacıların önerdiği eşitliğe göre çizilen yenilme zarflarının deney sonuçlarına yaklaştığı görülmektedir. Sarı ve bej renkli ignimbiritlere ait sonuçlarda ise deney sonuçlarını temsil etmede Barton-Bandis kriterinin öne çıktığı düşünülmektedir (Şekil 8.8b, 8.8d ve 8.8e).

Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından önerilen eşitlik ile belirlenen yenilme zarflarında Barton-Bandis kriterinde karşılaşılan ani makaslama dayanımı artışları görülmemektedir. Şekil 8.8d'deki Barton-Bandis kriterine ait 11 kPa'lık normal gerilme seviyesi için sonuçlarda görülen bu ani artış, aynı normal gerilme seviyesinde alternatif eşitlik ile belirlenen yenilme zarflarında görülmemektedir. Eşik açısı uygulaması açısından incelendiğinde, Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından önerilen eşitliğin bu tarz bir eşik değere ihtiyaç duymadığı görülmektedir. Ancak deney sonuçlarını temsil etmede Barton-Bandis kriterine kıyasla önemli ölçüde bir avantaj sağlamamaktadır.

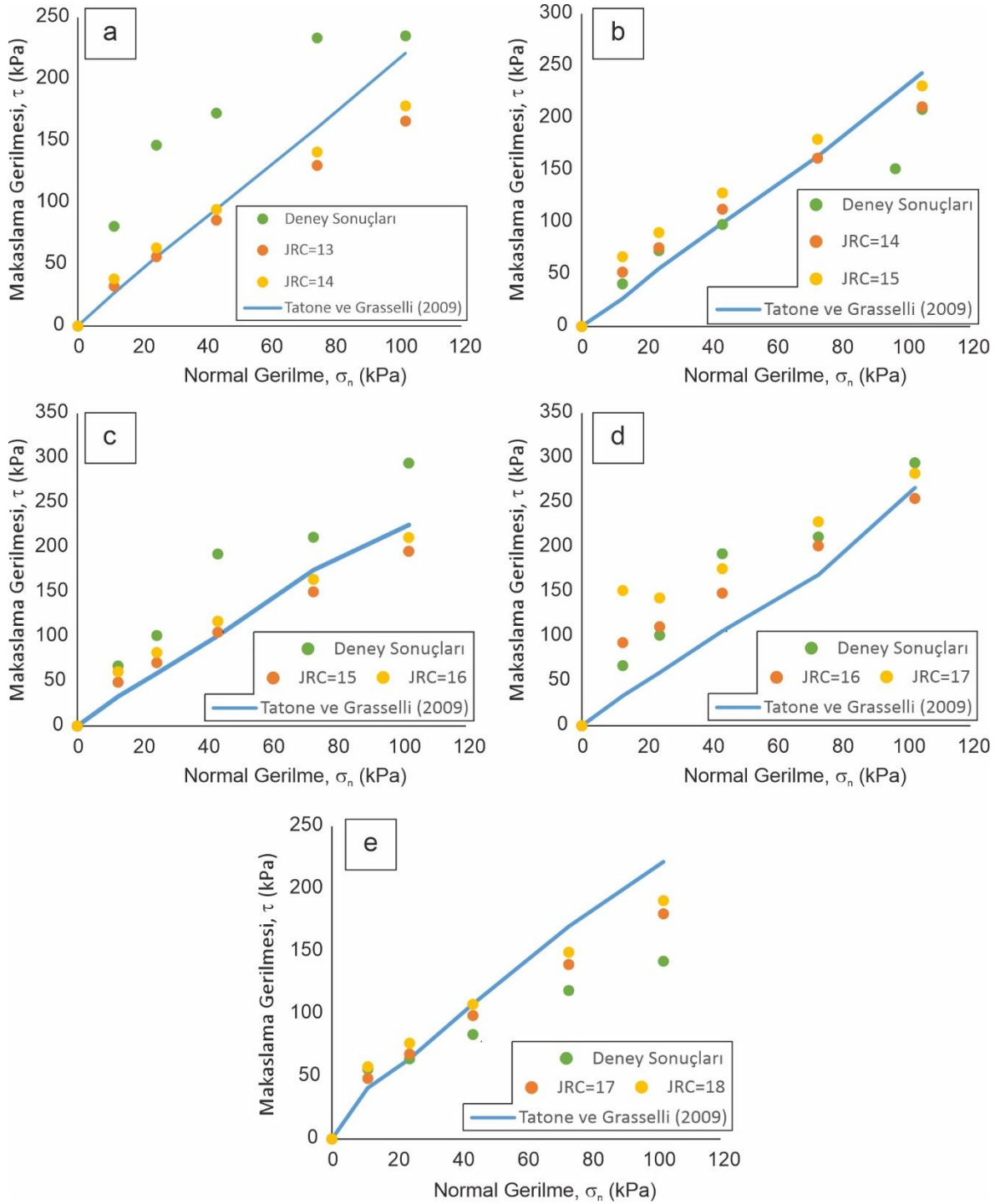
Tatone ve Grasselli (2009)  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresini kullanan bir eşitlik önermiştir. Bu eşitlikte de JCS yerine  $\sigma_t$  kullanılmaktadır.  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi iki ve üç boyutta hesaplanabilen bir parametre olduğu için; iki boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi için elde edilen sonuçlar Şekil 8.9'da, üç boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi için elde edilen sonuçlar ise Şekil 8.10'da verilmiştir. Bu şekillerde deney sonuçlarını temsil eden daireler yeşil, Barton-Bandis kriteri ile eşik açı kullanılmadan farklı JRC'ler için çizilen daireler sarı ve turuncu renkte gösterilirken, Tatone ve Grasselli (2009) tarafından önerilen eşitlik ile çizilen yenilme zarfı mavi renkte sunulmuştur.

Deney sonuçlarının gösterdiği eğrisel eğilimin aksine, Tatone ve Grasselli (2009) tarafından önerilen eşitlik ile iki boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi kullanılarak çizilen yenilme zarfları doğrusala yakın bir eğilim göstermektedir. Alternatif eşitliğe ait sonuçlarda, Barton-Bandis kriterinde gözlenen ani makaslama dayanımı artışlarına rastlanmamaktadır. Bu çalışmaya ait sonuçlar düşünüldüğünde; Barton-Bandis kriterine çoğu normal gerilme seviyesi için yakın sonuçlar sunan eşitlik, neredeyse doğrusal olarak nitelendirilebilecek bir yenilme zarfı sunmasından ötürü kullanıcıya bir avantaj sağlamamaktadır.

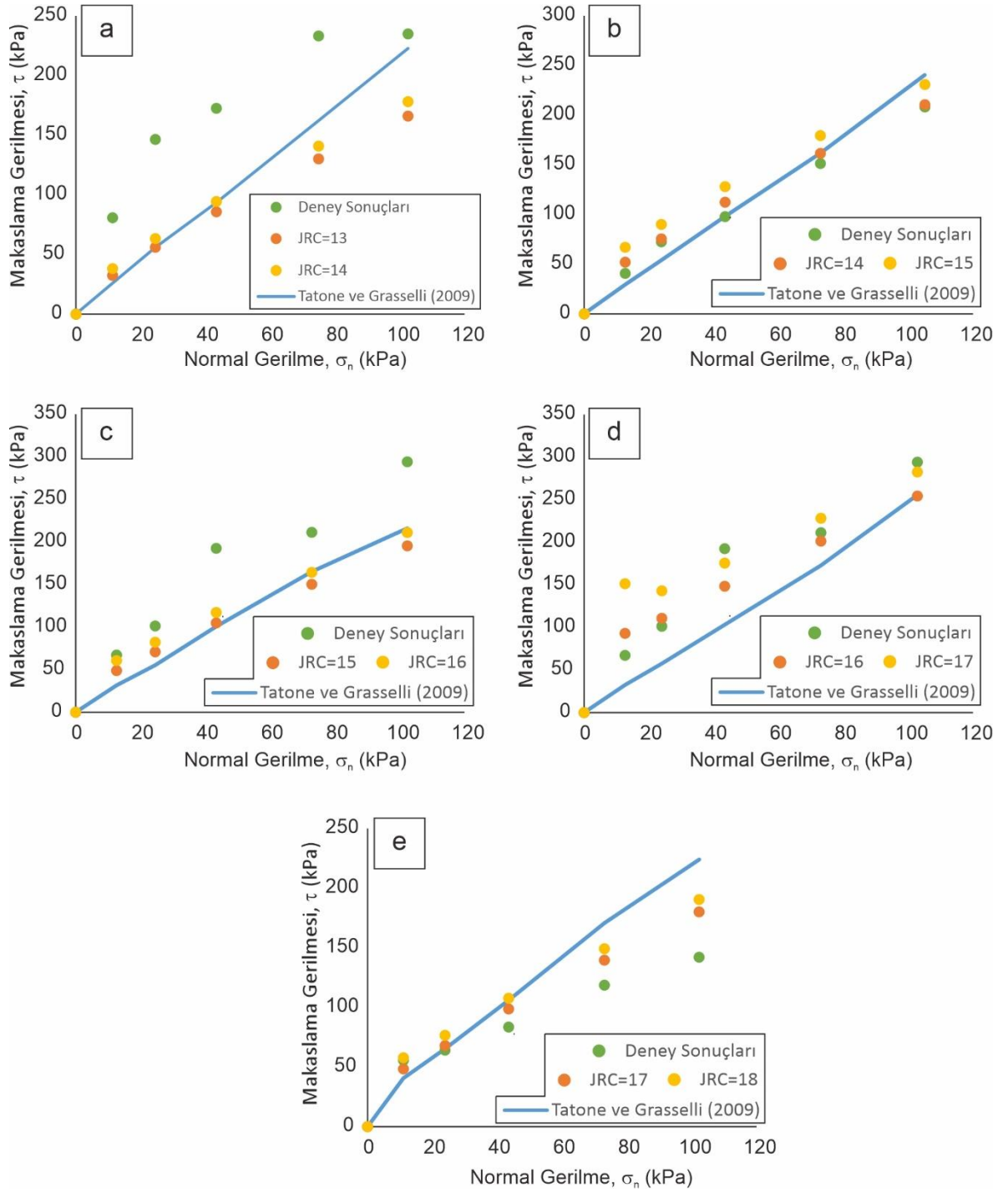
Üç boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresini kullanarak çizilen yenilme zarflarında Şekil 8.6'da görülen doğrusal eğilim değişmemiştir. Şekil 8.10'da sunulan yenilme zarfları için çizilen doğrusal eğilim çizgilerine ait korelasyon katsayıları 0.985 ile 0.999 arasında değişmektedir. Tatone ve Grasselli (2012) tarafından sunulan eşitliğin bu çalışmadaki deney şartları altında doğrusal yenilme zarfları ürettiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 8.8: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından önerilen eşitlik ile belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).



Şekil 8.9: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Tatone ve Grasselli (2009) tarafından önerilen eşitlikte  $\theta_{max}/(C+1)$  (2D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).



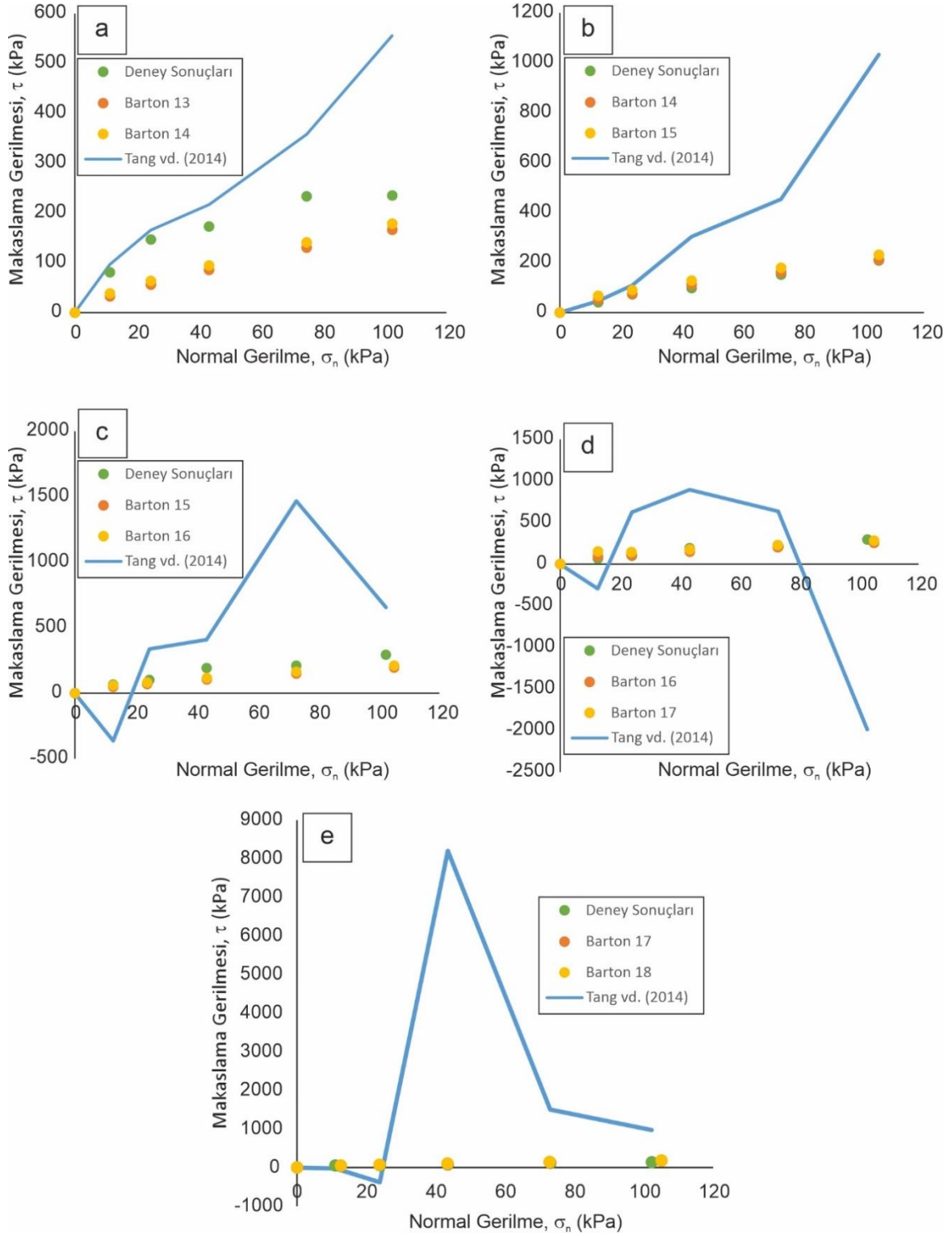
Şekil 8.10: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Tatone ve Grasselli (2009) tarafından önerilen eşitlikte  $\theta_{max}/(C+1)$  (3D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).



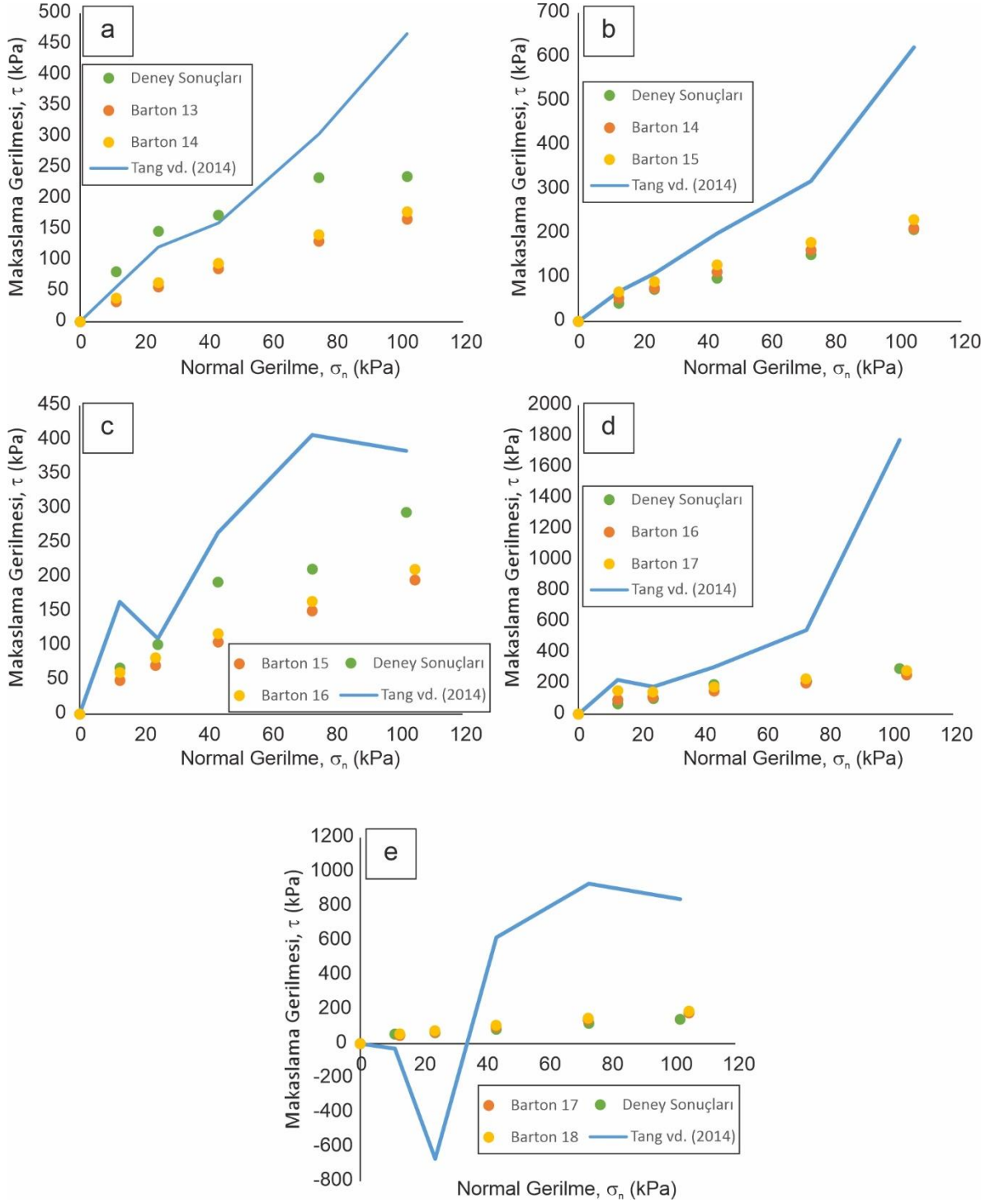
Tang ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikte de  $\theta_{max}/(C+1)$  ve  $\sigma_t$  parametreleri kullanılmaktadır. İki ve üç boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi için belirlenen yenilme zarfları sırasıyla Şekil 8.11 ve Şekil 8.12'de sunulmuştur. Deney sonuçlarını temsil eden daireler yeşil, Barton-Bandis kriteri ile eşik açısı kullanılmadan farklı JRC'ler için çizilen daireler sarı ve turuncu renkte gösterilmiştir. Önerilen eşitlik ile çizilen yenilme zarfları ise mavi renkle gösterilmiştir.

Şekil 8.11'deki yenilme zarfları incelendiğinde, deney sonuçları ile eşitlik yardımıyla belirlenen sonuçların uyuşmadığı net şekilde görülmektedir. Eşitlikten elde edilen sonuçlar düşük pürüzlülük seviyelerinde düşük normal gerilmeler altında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara bir miktar yakınlık gösterse de normal gerilme arttıkça sonuçlar arasındaki fark ciddi oranda artmaktadır. Pürüzlülük arttıkça kPa mertebesinde olan normal gerilmelere karşılık MPa mertebesinde makaslama gerilmeleri hesaplanmaktadır. Pürüzlülük arttıkça büyüyen açısı değerine bağlı olarak eşitlikte bulunan tanjant fonksiyonu negatif makaslama gerilmelerinin hesaplanmasına neden olmaktadır.  $JCS/\sigma_n$  oranı, JRC ve  $\phi_b$  değerleri negatif makaslama dayanımı elde edilmesine neden olan parametrelerdir. Her ne kadar JCS değeri girdi parametresi olarak kullanılmamış olsa da eşitlikteki diğer parametrelerin kullanılış şekli matematiksel olarak hatalı sonuçların üretilmesine engel olamamıştır.

Üç boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresini kullanarak çizilen yenilme zarflarında da ani makaslama dayanımı artışları görülmektedir. İki boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi kullanılarak çizilen yenilme zarflarının üç tanesinde negatif makaslama dayanımı değerleri varken, üç boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresinin kullanımı negatif değer içeren yenilme zarfı sayısını bire indirmiştir (Şekil 8.12e). Ancak üç boyutlu parametrenin kullanımı eşitlikten kaynaklı olduğu düşünülen sorunları ortadan kaldıramamıştır. Bu sonuçlara göre, Tang ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitliğin Barton-Bandis kriterinde karşılaşılan olumsuzlukları gidermeye yönelik herhangi bir katkı sunmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca bu eşitlik kullanılırken karşılaşılan olumsuzluklar Barton-Bandis kriterinde karşılaşılan olumsuzluklardan nicelik olarak daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 8.11: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Tang ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikte  $\theta_{max}/(C+1)$  (2D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).

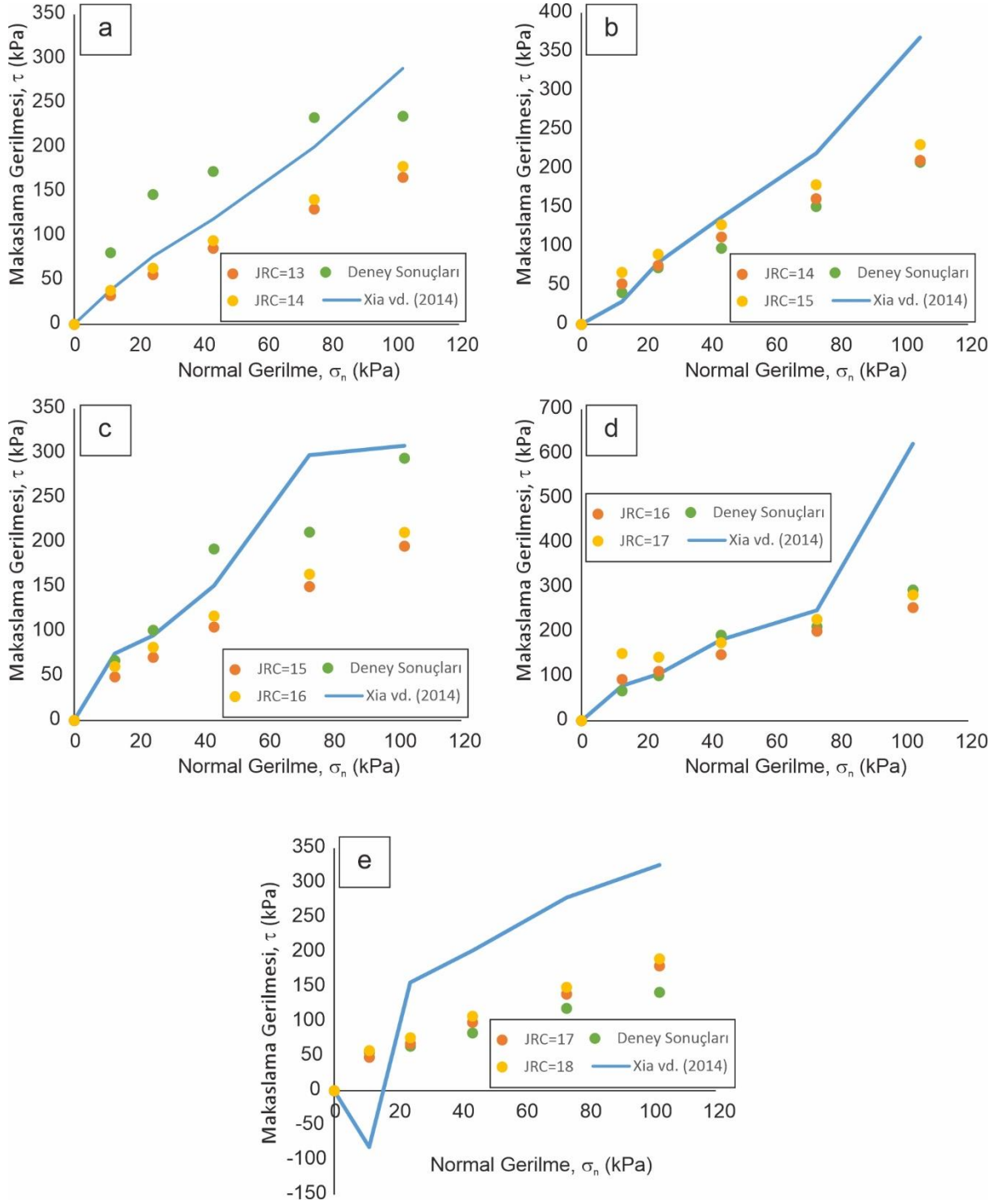


Şekil 8.12: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Tang ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikte  $\theta_{max}/(C+1)$  (3D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).

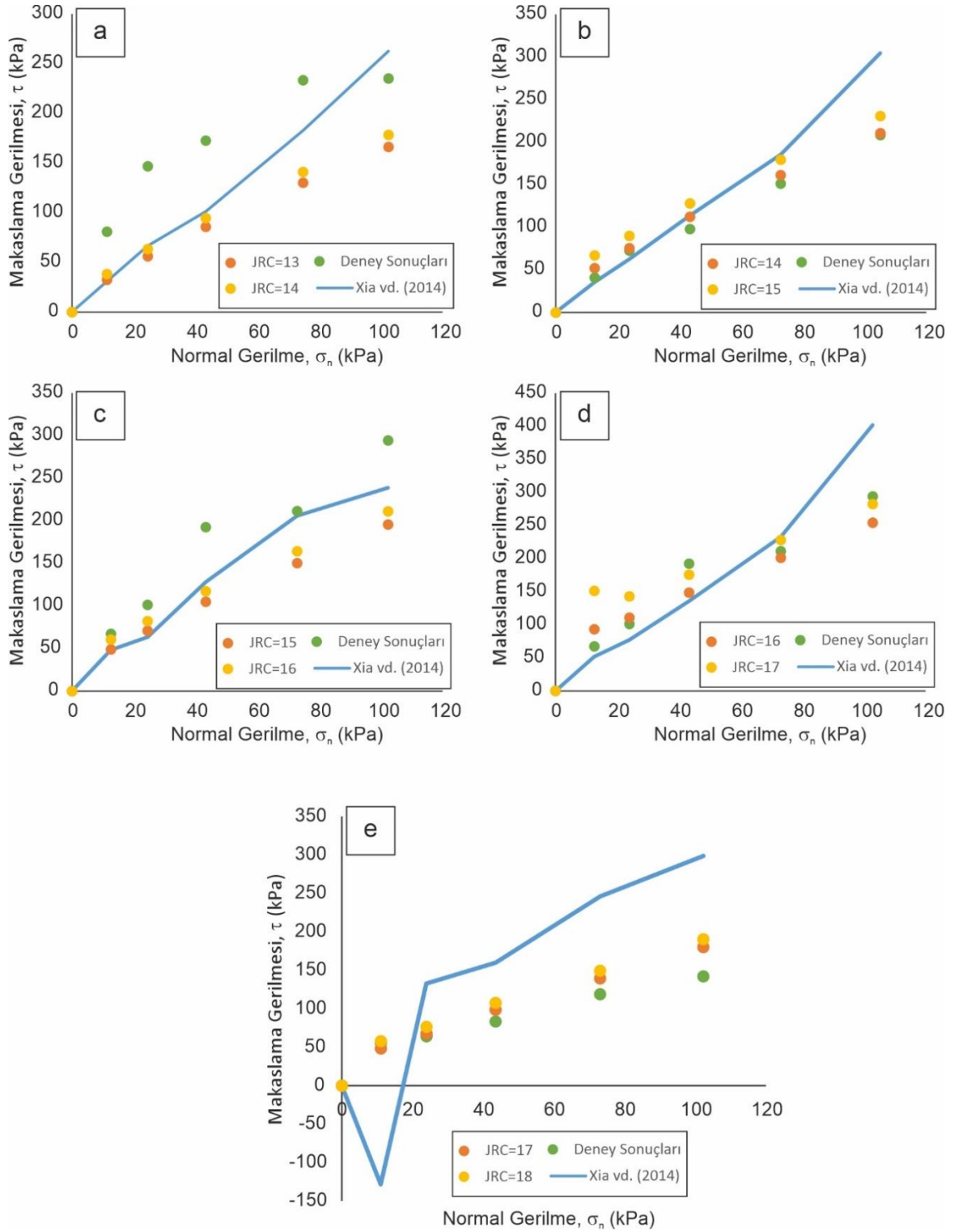
Alternatif yenilme kriterleri kapsamında son olarak kullanılacak eşitlik Xia ve ark. (2014) tarafından sunulan eşitlik  $\theta_{max}/(C+1)$  ve  $\sigma_t$  parametreleri bu eşitlikte de girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Önceki alternatif eşitliklerde olduğu gibi hem iki hem de üç boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi için ayrı ayrı yenilme zarfları çizilmiş ve sırasıyla Şekil 8.13 ve Şekil 8.14'te sunulmuştur. Deney sonuçlarını temsil eden daireler yeşil, Barton-Bandis kriteri ile eşik açığı kullanılmadan farklı JRC'ler için çizilen daireler sarı ve turuncu renkte gösterilmiştir. Önerilen eşitlik ile çizilen yenilme zarfları ise mavi renkle gösterilmiştir.

İki boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi ile belirlenen yenilme zarfları incelendiğinde düşük pürüzlülük seviyelerinde doğrusala yakın eğilim gösteren yenilme zarfları görülmektedir (Şekil 8.13a ve 8.13b). Bu yenilme zarfları önceki eşitliklerde olduğu gibi deney sonuçlarını temsil etmede yetersiz kalmaktadır. Normal gerilme arttıkça, eşitlik ile belirlenen değerlerin Barton-Bandis kriteri ile belirlenen değerlerden de uzaklaştığı görülmektedir. Şekil 8.13d'de son normal gerilme seviyesine kadar deney sonuçlarına yakın bir eğilim çizen yenilme zarfı, son normal gerilme seviyesinde keskin bir artış göstermiştir. Bu alternatif eşitlik pürüzlülüğünün artması ile beraber negatif makaslama dayanımı değerleri vermeye başlamıştır (Şekil 8.13e).

Üç boyutlu  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi ile belirlenen yenilme zarflarında da iki boyutlu yenilme zarflarına benzer bir durum gözlenmektedir. Düşük pürüzlülüğe sahip örneklerdeki yenilme zarflarındaki deney sonuçları ile uygunluk iki boyutlu parametre ile çizilen zarflara göre daha fazladır (Şekil 8.14a ve 8.14b). Şekil 8.14d'deki son normal gerilme seviyesine karşılık gelen makaslama gerilmesinde yine bir artış gözlenmektedir. Üç boyutlu parametre ile çizilen yenilme zarflarında gözlenen doğrusal eğilimin, iki boyutlu parametre ile çizilen yenilme zarflarına göre daha fazla olduğu söylenebilir. Son pürüzlülük seviyesi için negatif makaslama gerilmesi değerleri yine hesaplanmıştır. Bu eşitlikle çizilen yenilme zarflarındaki negatif makaslama dayanımı değerleri, Tang ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikle çizilen yenilme zarflarındaki negatif değerlerden daha azdır. Bu sonuçlara göre Xia ve ark. (2014) tarafından önerilen alternatif eşitliğin, Barton-Bandis kriterine alternatif olmaktan uzak olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 8. 13: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Xia ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikte  $\theta_{max}/(C+1)$  (2D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbirlere aittir).



Şekil 8.14: Farklı ignimbirit örneklerinde JRC'nin (a) 13-14, (b) 14-15, (c) 15-16, (d) 16-17 ve (e) 17-18 değişim aralıkları için gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar, Barton-Bandis kriterine ait sonuçlar ve Xia ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikte  $\theta_{max}/(C+1)$  (3D) kullanılarak belirlenen yenilme zarfları (a-c vişne, b-d sarı ve e bej renkli ignimbiritlere aittir).

Barton-Bandis kriterinde girdi parametresi olarak kullanılan  $\phi_b$  parametresinin makaslama dayanımının belirlenmesinde önemli bir rolü vardır. Bu parametre için standartlara uygun örnek hazırlanırken zorluklarla karşılaşılması son derece olasıdır. Elde edilen  $\phi_b$  değerlerinin, Barton ve Choubey (1977) tarafından belirtilen ortalama  $\phi_b$  değişim aralığının hemen üstünde olduğu görülmektedir. Bu durum kriterde bulunan tanjant fonksiyonu ile hesaplanan açı değerinin artmasına neden olmaktadır.  $\phi_b$  değerinin yüksekliği, tutarsız sonuçlar veren eşik sınıra yaklaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Kriter düşük  $\phi_b$  değerine sahip örneklerde düşük normal gerilmeler altında tutarlı sonuçlar verse bile ignimbirit gibi yüksek  $\phi_b$  değerine sahip örneklerde yanlış sonuçlar vermeye yatkındır.

İgnimbiritlerde gerçekleştirilen makaslama deneylerinde,  $JCS/\sigma_n$  değerine bağlı olarak eşik açı kullanılmıştır. Ancak eşik açı değeri ile çizilen yenilme zarfları deney sonuçları ile uyumlu bir görüntü çizmemiştir. Eşik açı değeri kullanılmadan çizilen yenilme zarfları deney sonuçlarına yakın sonuçlar vermiştir. Ancak bir yenilme zarfında, makaslama dayanımında ani artış görülmüştür (Şekil 8.3d). Bu durumun yüksek JRC,  $JCS/\sigma_n$  oranı ve  $\phi_b$  değerlerinin ortak etkisinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada kullanılan örnekler ve uygulanan normal gerilmeler özelinde, eşik açı kullanılmadan çizilen yenilme zarflarının deney sonuçlarını daha iyi temsil ettiği anlaşılmıştır.

Literatürde bulunan, makaslama deney sonuçlarını daha iyi temsil edebilecek alternatif eşitlikler üzerinde çalışılmıştır. Bu eşitlikler arasında sadece Ghazvinian ve ark. (2012) tarafından sunulan eşitlik pürüzlülüğü JRC parametresi ile tanımlamaktadır. Bu eşitlik ile çizilen yenilme zarflarında herhangi bir ani artış ve/veya negatif makaslama değerleri gözlenmemiştir. Ancak bu yenilme zarflarının deney sonuçlarını temsil etmedeki başarısı Barton-Bandis kriteri ile eşik açı kullanılmadan çizilen yenilme zarflarının gerisinde kalmıştır.

Alternatif pürüzlülük parametresi olarak  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresini kullanan üç farklı eşitlik ile yenilme zarfları çizilmiştir. Hem iki hem de üç boyutlu olarak  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi kullanılarak çizilen bu yenilme zarflarının deney sonuçlarını temsil etmedeki performansı, Barton-Bandis kriteri ile belirlenen yenilme zarflarına göre

çok daha düşüktür. Barton-Bandis kriteri ile çizilen yenilme zarflarında negatif makaslama gerilmesi değerleri yokken, Tang ve ark. (2014) ve Xia ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitlikler ile çizilen yenilme zarflarında negatif değerler gözlenmiştir. Ayrıca normal gerilmenin değişimine bağlı olarak ani yükselen ve düşen makaslama gerilmesi değerleri görülmüştür. Tatone ve Grasselli (2009) tarafından önerilen eşitlik ile çizilen yenilme zarflarında ani makaslama gerilmesi değişimleri ve negatif makaslama gerilmesi değerleri gözlenmemiştir. Bu açıdan bakıldığında Tang ve ark. (2014) ve Xia ve ark. (2014) tarafından önerilen eşitliklerden daha başarılı olduğu söylenebilir. Ancak Tatone ve Grasselli (2009) tarafından önerilen eşitlik, Barton-Bandis kriterinde gözlenen eğrisel eğilimi yansıtamamıştır. Bazı yenilme zarflarının neredeyse doğrusal bir eğilime sahip olduğu dikkat çekmiştir.



## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında yapay örnekler hazırlanmış sonrasında bu örnekler üzerinde deneyler yapılmış ve sayısallaştırma işlemlerine yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. İgnimbirit örnekleri üzerinde de benzeri çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- a) Barton-Bandis kriterinin düşük dayanımlı malzemelerde, düşük normal gerilmeler altında nasıl bir performans sergileyeceğine yönelik yapılan bu çalışma öncesinde ve süresince literatürde benzeri şartları sağlayan bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Literatürde Barton-Bandis kriterine yönelik yapılan güncel çalışmaların daha çok JRC parametresinin belirlenmesi için kullanılan sayısallaştırma yöntemlerine ilişkin olduğu tespit edilmiştir.
- b) Barton-Bandis kriterinde girdi parametresi olan JCS değeri belirlenirken kullanılan Schmidt çekici, alçı gibi düşük dayanımlı yumuşak malzemelerde doğru sonuçlar vermemektedir. Yapılan deneylerde 1.07, 1.43 ve 1.66 karışım oranlarına sahip örneklerde geri sıçrama değerleri çoğunlukla okunamamıştır. Geri sıçrama ve birim hacim ağırlık değerlerine bağlı UCS hesaplanmasına yönelik geliştirilen abakta, en düşük birim hacim ağırlık değeri 20 kN/m<sup>3</sup>tür. Alçı örneklere ait birim hacim ağırlık değerleri bu sınıır altındadır. Bazı geri sıçrama değerleri okunmuş olsa bile abaktaki birim hacim ağırlık değerlerinden kaynaklanan eksiklik sebebiyle UCS değerinin belirlenmesi mümkün değildir. Bu kapsamda abak için önerilen eşitliğin kullanımı da sakıncalıdır.
- c) İgnimbiritlerde gerçekleştirilen Schmidt çekici deneyleri kapsamında bütün örneklerde geri sıçrama değerlerine ait okumalar alınabilmiştir. Ancak ignimbiritlere ait birim hacim ağırlık değerleri de sınır değerinin altında olduğu için bu tip düşük dayanımlı doğal kayalarda da Schmidt çekicini kullanmak hatalı sonuçlar verecektir. Abak yerine eşitlik yardımıyla belirlenen ignimbiritlerdeki UCS değerleri, gerçek UCS değerlerinin iki katından büyüktür. Bahsedilen nedenlerden ötürü Schmidt çekicinin kullanılmadığı

benzeri durumlarda, alternatif olacak pratik bir UCS belirleme yönteminden faydalanılması gerekmektedir.

- d) Schmidt çekici yerine iğne penetrometresi kullanılarak UCS değerleri belirlenmiştir. Deney örnekleri yumuşak ve düşük dayanımlı olduğu için deneyler sırasında iğne penetrometresinin kullanım özelliklerine ters düşen bir sonuçla karşılaşılmamıştır. Literatürde 20 MPa'a kadar dayanıma sahip örnekler üzerinde kullanılmış olan iğne penetrometresi, bu çalışma kapsamında kullanılan en büyük dayanıma sahip alçı örnekte (28.05 MPa) başarılı UCS tahmini gerçekleştirmiştir. Hem alçı hem de ignimbiritler üzerinde başarılı sonuçlar veren iğne penetrometresi arazide de UCS belirleme olanağı sunmaktadır. Parametrelerin pratik şekilde belirlenmesi kriterin en büyük avantajlarından ve iğne penetrometresi bu amaca uygun bir yöntemdir.
- e) Literatürde NPI değerleri kullanılarak UCS tahmini yapan eşitlikler vardır. Alçı ve ignimbiritlere benzer örneklerle yapılan çalışmalardan türetilen eşitlikler, bu çalışmadaki örneklere ait UCS değerlerinin belirlenmesinde oldukça başarılı olmuştur. Schmidt çekicinin kullanılmadığı durumlarda, benzer örneklerle türetilen eşitlikler kullanılarak NPI değerinden UCS değeri belirlenebilir. Ancak UCS tahmini için türetilen eşitliklerde yararlanılan kaya türlerinden farklı kaya türleri ile çalışıldığında, önerilen eşitliklerin seçimi konusunda dikkatli olunmalıdır.
- f) Alçı örneklerde JRC parametresinin belirlenmesi için profilometre, SLS ve SfM yöntemlerinden yararlanılmıştır. Profilometre yönteminde standart profile sahip alçı örneklerden bir hat boyunca profil çıkartılmış ve bilgisayar ortamında sayısallaştırılarak profile ait koordinatlar elde edilmiştir. SLS yönteminde optik tarayıcı, SfM yönteminde ise akıllı telefon kullanılmış ve örneklere ait üç boyutlu sayısal modeller oluşturulmuştur. Bu modellerden de birer profil alınarak koordinat verileri elde edilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda profilometre ile sayısallaştırma yönteminin hem pratik hem de diğer yöntemlere nazaran daha ekonomik olduğu görülmüştür. SLS ve SfM yöntemleri kullanılacak ekipmanlara bağlı olarak oldukça maliyetli yöntemler olabilmektedir. Profilometre ve SfM yöntemlerinin arazide kullanılma imkânı vardır. Ancak SLS yönteminde kullanılan optik tarayıcıların birçoğu laboratuvar ortamlarında kullanılabilen cihazlardır. Bu yöntemin tercih

edilmesi süreksizlik yüzeyinin laboratuvar ortamına taşınması işlemini beraberinde getirmektedir. Bu çalışmadaki örneklerin boyutu kullanılan optik tarayıcının algılayabileceği en küçük obje boyutuna yakın değerlere sahiptir. Bu nedenle tarama işlemlerinde birtakım problemlerle karşılaşıldı. Ancak bu problemlere rağmen alçı örnekler üzerinde elde edilen sonuçlar, profilometre, SLS ve SfM yöntemlerinin birbirlerine karşı bariz bir üstünlüğü olduğunu göstermemiştir. Standart profillere ait veriler ile farklı sayısallaştırma yöntemlerinden elde edilen verilerin karşılaştırılması sonucu hesaplanan RMSE değerleri oldukça düşüktür. Her üç yöntem de bazı pürüzlülük seviyelerinde diğer iki yönteme kıyasla daha düşük RMSE değerleri vermekte iken; hesaplanan en yüksek RMSE değerinin 0.5 mm olması bu üç yöntemin de başarılı olduğunu göstermiştir. İki boyutlu pürüzlülük analizlerinde profilometre yöntemi, üç boyutlu pürüzlülük analizlerinde ise SfM yöntemi pratik ve ekonomik bir seçenektir. Optik tarayıcılara kıyasla akıllı telefonlar ile sayısallaştırma işlemlerinin ön plana çıktığı söylenebilir.

- g) İgnimbirit örneklerde de üç sayısallaştırma yöntemi kullanılmıştır. İki boyutlu analizler için belirli hatlar boyunca her bir örnekten dört profil çıkartılmıştır. SfM yöntemi ile sayısallaştırılmış örnekler çözünürlüğü en yüksek veri setlerini oluştururken, SLS yöntemine ait modellerin çözünürlüğü düşük kalmıştır. İgnimbiritlerdeki örnek boyutları alçılara göre daha küçük olduğu için optik tarayıcı ile tarama işlemleri oldukça zor gerçekleşmiştir. İgnimbirit örneklerde de iki boyutlu analizler için profilometre, üç boyutlu analizler için ise SfM yöntemi en pratik yöntemler olmuştur.
- h) Sayısallaştırılmış profil verileri ile istatistiksel parametreler hesaplanmıştır. Pürüzlülüğün tanımlanması amacıyla literatürde yaygın şekilde kullanılan istatistiksel parametrelerden dördü seçilmiş ve bu parametreler ile JRC değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Profilometre ile sayısallaştırılmış alçılardan istatistiksel parametrelerle belirlenen JRC değerleri, çalışmada kullanılan alçılara ait JRC değişim aralıklarına büyük oranda uymaktadır. SLS yöntemi kullanılarak belirlenen JRC değerleri, düşük pürüzlülüklere sahip standart profillerin değişim aralıklarına uyum göstermektedir. Ancak JRC'nin 14-16 ve 18-20 değişim aralıkları için istatistiksel parametreler ile hesaplanan JRC değerlerinin, standart profillere ait değişim aralıklarından farklı değerler aldığı görülmüştür. Bunun sebebinin SLS yöntemi ile

sayısallaştırma işlemlerinde karşılaşılan zorluklar olduğu düşünülmektedir. Pürüzlülük arttıkça, örnek boyutuna da bağlı olarak optik tarayıcının süreksizlik yüzeyine ait detayları yeterli hassasiyette kaydedemediği düşünülmüştür. SfM yöntemi ile sayısallaştırılan profillerden belirlenen JRC değerlerinin, standart profillere ait JRC değişim aralıklarında ortalama olarak 2 puan daha düşük olduğu görülmüştür. Sayısallaştırma işlemleri başarılı şekilde gerçekleştiği kabul edildiği için, JRC değerlerindeki bu sistematik sapmanın JRC hesaplamada kullanılan eşitliklerden kaynaklandığı düşünülmüştür.

- i) İgnimbiritlerde referans olarak kullanılabilir veri olmadığından deneylerde kullanılacak örnekler için JRC değerleri görsel karşılaştırma ile belirlenmiş ve örnekler beşerli gruplar halinde beş farklı JRC değişim aralığına atanmıştır. Profilometre yöntemiyle sayısallaştırma sonucu belirlenen istatistiksel parametrelerle hesaplanan JRC değerleri, görsel karşılaştırma ile belirlenen JRC değerlerine büyük oranda uymaktadır. Özellikle  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi ile belirlenen JRC değerlerinin, görsel karşılaştırma sonucu belirlenen JRC değişim aralıklarına tam olarak uyduğu görülmektedir. SLS yöntemi ile belirlenen istatistiksel parametreler ile hesaplanan JRC değerleri ise öngörülen JRC değişim aralıklarına çoğunlukla uymamıştır.  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresi ile belirlenen JRC değerlerinin diğer istatistiksel parametreler kıyasla JRC değişim aralıklarına daha çok uyduğu görülmüştür. SfM yöntemiyle belirlenen istatistiksel parametrelerden hesaplanan JRC değerlerinin, öngörülen değişim aralıklarında ortalama olarak 3 puan daha düşük olduğu görülmüştür. Bu duruma kullanılan eşitliklerin sebep olduğu düşünülmüştür. Literatürde karşılaşılan eski çalışmalarda, çoğunlukla profilometre ile sayısallaştırma işlemleri gerçekleştirilmiş ve JRC eşitlikleri bu sayısallaştırma yöntemine ait verilerden türetilmiştir. Bu çalışmada da profilometre ile sayısallaştırma sonucu belirlenen JRC değerleri ilgili örnekler için JRC değişim aralıklarına uyum sağlamaktadır. SfM yöntemi ile sayısallaştırılmış örnekler için veriler kullanılarak SfM yönteminden JRC belirlenmesine yönelik eşitliklerin türetilebileceği düşünülmüştür.
- j) İgnimbiritlerde üç boyutlu pürüzlülüğün belirlenmesi adına SfM yöntemi ile sayısallaştırma sonucu elde edilen modeller kullanılmıştır. Bu modellerde iki

boyutlu  $R_L$  ve  $\theta_{max}/(C+1)$  parametrelerinin karşılığı olan  $R_S$  ve  $\theta_{max}/(C+1)$  (3D) parametreleri belirlenmiştir. Üç örnekte üç boyutlu parametre değeri iki boyutlu parametre değerinde yüksek iken diğer iki örnekte durum tam tersidir. Üç boyutlu parametrelerin, iki boyutlu parametrelere yakın değerler aldığı görülmüştür. Süreksizlik yüzeylerinden üç boyutlu parametreleri belirlemek amacıyla yapılan işlemler düşünüldüğünde, iki boyutlu parametrelerin farklı sayısallaştırma yöntemleriyle çok daha pratik şekilde belirlenebildiği anlaşılmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, iki boyutlu profillerle belirlenen istatistiksel parametrelerin örneğin tümüne ait pürüzlülüğü temsil etmede oldukça başarılı olduğu söylenebilir.

- k) Alçı örneklerde gerçekleştirilen makaslama deneylerine ait sonuçlar incelendiğinde, Barton-Bandis kriteri ile çizilen ve eşik açısı uygulamasının kullanıldığı yenilme zarflarının deney sonuçlarını temsil etmede yetersiz kaldığı görülmüştür. Eğrisel bir eğilim çizen deney sonuçlarının eşik açısı ile çizilen doğrusal bir yenilme zarfıyla temsil edilmesinin yanlış olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca eşik açısı ile çizilen yenilme zarflarının çoğu deney sonucundan daha yüksek değerler verdiği görülmüştür. Eşik açısı değeri kullanılmadan çizilen yenilme zarflarında  $JCS/\sigma_n$  oranının artışına bağlı olarak bazı normal gerilme seviyelerinde negatif makaslama gerilmeleri gözlenmiş, bazı normal gerilme değişimlerinde ise ani makaslama gerilmesi artışları gözlenmiştir. Bu tarz problemlerin yaşanmadığı normal gerilme seviyelerinde ise eşik açısı kullanılmadan da kriterin deney sonuçlarını yansıtabilecek ölçüde yenilme zarfları sunabildiği görülmüştür.
- l) Eşik açısı üzerine yapılan çalışmalar sonucu, önerilen  $70^\circ$ lik açısı değerinden daha yüksek açılar için de kriterin doğru çalıştığı görülmüş ve eşik açısı değerinin  $JRC$ ,  $JCS/\sigma_n$  ve  $\phi_b$  parametrelerine bağlı olarak daha büyük değerler alabileceği ortaya konmuştur. Negatif makaslama gerilmesi ve/veya ani makaslama gerilmesi artışları göstermeden kriterin düzgün çalışabileceği  $JCS/\sigma_n$  değerinin belirlenmesine yönelik bir grafik çizilmiş ve en yüksek eşik açısı değerinin  $85.2^\circ$  olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu grafik ile  $JCS/\sigma_n$  oranının 4000 olduğu seviyelerde bile uygun  $JRC$  ve  $\phi_b$  değerleri için kriterin düzgün çalıştığı gösterilmiştir.

m) İgnimbiritlerde, beş farklı JRC değişim aralığına göre makaslama deneyleri gerçekleştirilmiş ve eşik açısı kullanılarak yenilme zarfları çizilmiştir. Barton-Bandis kriteri ile  $JCS/\sigma_n$  oranına bağlı olarak sarı renkli ignimbiritlerde doğrusal yenilme zarfları elde edilmiştir. Farklı iki JRC değeri için aynı yenilme zarfı oluşturulmuştur. Vişne ve bej renkli ignimbiritlerde düşük normal gerilmelerde eşik açısı kullanılarak doğrusal yenilme zarfı çizilmiş, normal gerilme arttıkça orijinal eşitliğe geçilerek eğrisel bir yenilme zarfı elde edilmiştir. Halbuki deney sonuçları eğrisel bir eğilime sahiptir. Eşik açısı ile çizilen doğrusal yenilme zarflarının deney sonuçlarını temsil etmede yetersiz kaldığı görülmüştür. Eşik açısı kullanılmadan çizilen yenilme zarflarında sarı ve bej renkli ignimbiritlere ait yenilme zarflarının deney sonuçlarıyla son derece uyumlu olduğu görülmüştür. Sarı renkli ignimbirite ait bir normal gerilme değeri için makaslama gerilmesinde ani bir artış görülmüş, bunun dışında herhangi bir negatif makaslama gerilmesi ve/veya ani artış görülmemiştir. Vişne renkli ignimbiritler için çizilen yenilme zarflarının, deney sonuçlarının altında kaldığı görülmüştür. İlk bakışta bu örnekler için belirlenen JRC değişim aralığı değerlerinin hatalı olduğu düşünülmüştür. Ancak vişne renkli ignimbiritler için hem görsel karşılaştırma ile hem de profilometre ile sayısallaştırma yöntemlerinden belirlenen JRC değişim aralıkları birbirlerine çok yakındır. SLS yönteminde belirlenen JRC değerleri, vişne renkli ignimbiritler için belirlenen JRC değişim aralıklarından 1 ila 2 birim yüksektir. JRC değerindeki artış deney sonuçları ile yenilme zarflarını birbirine yaklaştırmaktadır. Ancak SfM yöntemi ile belirlenen JRC değerleri de düşük olduğu için profilometre ile belirlenen JRC değerlerinin hatalı olabileceğine dair net bulgu elde edilememiştir. JCS ve  $\phi_b$  parametrelerinin olduğundan düşük tespit edilmiş olma ihtimali de bulunmaktadır. Bu değerlerdeki ufak artışların da deney sonuçları ile yenilme zarfları arasındaki farkı azaltacağı söylenebilir.

n) Öngörülen JRC değişim aralıklarına ait yenilme zarflarına ek olarak, ignimbiritlerde farklı sayısallaştırma yöntemleri kullanılarak belirlenen dört istatistiksel parametre ile hesaplanan JRC değerleri yardımıyla yenilme zarfları çizilmiştir. Bu zarflar incelendiğinde özellikle profilometre ile sayısallaştırma yöntemi yoluyla belirlenen JRC değerlerinin deney sonuçlarıyla büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür. SLS yönteminde  $R_L$

ve  $\theta_{max}/(C+1)$  parametreleriyle hesaplanan JRC değerlerine ait yenilme zarflarının (bej renkli ignimbitlerdeki zarflar hariç) deney sonuçlarına yakın olduğu belirlenmiştir. Pürüzlülük arttıkça SfM yöntemiyle belirlenen yenilme zarflarının deney sonuçlarına yaklaştığı görülmüştür. Pürüzlülüğün artmasıyla SfM yöntemi kullanılarak oluşturulan sayısal modelin doğruluğunun arttığı yönünde izlenim oluşmuş ve bu modelden elde edilen süreksizlik profillerine ait JRC değerlerinin gerçek JRC değerlerine daha yakın olduğu düşünülmüştür.

- o) Barton-Bandis kriterinde gözlenen negatif makaslama gerilmesi ve ani makaslama gerilmesi gibi olumsuzluklar üzerine alternatif kriterler ile yenilme zarfları çizilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bir kriter JRC değerini girdi parametresi olarak kullanırken, geri kalan kriterler  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresini girdi olarak kullanmaktadır. JRC ile çizilen alternatif yenilme zarfları bahsedilen olumsuzlukları göstermemiştir. Ancak normal gerilme arttıkça deney sonuçları ile alternatif kriter arasındaki uyum azalmıştır.  $\theta_{max}/(C+1)$  parametresinin iki ve üç boyutlu değerleri alternatif kriterlerde kullanılmıştır. Bu eşitliklerle çizilen yenilme zarflarının bir kısmı doğrusal bir eğilim gösterdiğinden, bir diğer kısmı da negatif ve/veya ani artış gösteren makaslama gerilmesi değerleri verdiği için deney sonuçlarını temsil etmede yetersiz kalmıştır. Alternatif olarak kullanılan bütün eşitliklerin deney sonuçlarını temsil etmede Barton-Bandis kriteri kadar başarılı olamadığı anlaşılmıştır. Alternatif eşitliklerde yapılan birtakım düzenlemelerle, Barton-Bandis kriteri ile belirlenen yenilme zarflarında gözlenen ani yükselme ve negatif makaslama dayanımı gibi problemlerin ortadan kalktığı görülmüştür. Ancak kriter ile çizilen tek bir yenilme zarfında gözlenen bu duruma karşılık, kullanılma geçmişi ve yaygınlığı az olan alternatif eşitliklere başvurulması mantıklı olmayacaktır. Bunun yerine Barton-Bandis kriterinin eksikliklerini gidermeye yönelik yaklaşımların daha doğru olacağı düşünülmüştür.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre aşağıda belirtilen önerilerin gelecekte yapılacak çalışmalarda dikkate alınması yarar sağlayacaktır.

1. Barton-Bandis kriterinde karşılaşılan olumsuzlukların (negatif ve/veya ani artış gösteren makaslama gerilmeleri) giderilmesi için kriter eşitliğinde düzenleme yapılmak istenirse, ulaşılması güç ekipmanlarla belirlenebilecek yeni parametreler türetmenin yerine öncelikle mevcut parametreler üzerinde düzenleme yapılması daha uygundur. Yeni bir parametrenin eklenmesi kaçınılmaz ise, çekilme dayanımı gibi alternatif dayanım parametreleri ile bahsedilen olumsuzlukların önüne geçilebildiği görülmüştür.
2. Süreksizlik yüzeylerinin sayısallaştırılmasında kullanılan SfM yönteminin arazi şartlarında test edilip profilometre yöntemiyle arasında sayısallaştırma performansı açısından bir fark olup olmadığı irdelenmelidir.
3. Düşük normal gerilmeler altında pürüzlü zayıf kayalarda gerçekleşmiş duraysızlıkların araştırılıp kriterin bu yöndeki eksikliğini gidermeye yönelik arazi çalışmalarının yapılması önerilmektedir.



## 10. KAYNAKLAR

- Agisoft, Agisoft Metashape, [www.agisoft.com](http://www.agisoft.com), 2019.
- Alejano, L.R., Muralha, J., Ulusay, R., Li, C.C., Perez-Rey, I., Karakul, H., Chryssanthakis, P., Aydan, Ö., ISRM suggested method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means of tilt tests, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 3853-3859, 2018.
- An, P., Fang, K., Jiang, Q., Zhang, H., Zhang, Y., Measurement of rock joint surfaces by using smartphone structure from motion (SfM) photogrammetry, *Sensors*, 21 (3), 922-944, 2021.
- Artec, Artec Eva Portable 3D Scanner, [www.artec3d.com](http://www.artec3d.com)
- Asadi, M.S., Rasouli, V., Barla, G., A laboratory shear cell used for simulation of shear strength and asperity degradation of rough rock fractures, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 683-699, 2013.
- Asadizadeh, M., Moosavi, M., Hossaini, M.F., Masoumi, H., Shear strength and cracking process of non-persistent jointed rocks: an extensive experimental investigation, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 415-428, 2018.
- Askari, M., Ahmadi, M., Failure process after peak strength of artificial joints by fractal dimension, *Geotechnical and Geological Engineering*, 25, 631-637, 2007.
- ASTM, Standard D5607-95: Standard test method for performing laboratory direct shear specimens under constant normal force, 1996.
- Atapour H., Moosavi M., Some effects of shearing velocity on the shear stress deformation behaviour of hard–soft artificial material interfaces, *Geotechnical and Geological Engineering*, 31, 1603-1615, 2013.
- Avşar, E.Ö., Bozkurtoğlu, E., Aydar, U., Şeker, D.Z., Kaya, Ş., Gazioğlu, C., Determining roughness angle of limestone using optical laser scanner, *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 3(3), 57-75, 2016.
- Aydan Ö. The inference of physico-mechanical properties of soft rocks and the evaluation of the effect of water content and weathering on their mechanical

properties from needle penetration tests. Symposium of ARMA, Chicago, Paper No. ARMA12-639, 2012.

Aydan, Ö., Shimizu, Y., Kawamoto, T., The anisotropy of surface morphology and shear strength characteristics of rock discontinuities and its evaluation, Rock Mechanics, Rock Mechanics: Tools and Techniques, Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium 19-21 June, Montreal, Quebec, Canada, (eds: M. Aubertin, F. Hassani, H. Mitri), A.A. Balkema, 1391-1398, 1996.

Aydan Ö., Ulusay R. Geomechanical Evaluation of Derinkuyu Antique Underground City and Its Implications in Geoengineering, Rock Mechanics and Rock Engineering, 46, 731-754, 2013.

Ayday, C., Göktan, R.M., Süreksizlik yüzey pürüzlülüğünün sayısal olarak belirlenmesi, II. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, Türkiye, 149-157, 1990.

Bae, D., Kim, K., Koh, Y., Kim, J., Characterization of joint roughness in granite by applying the scan circle technique to images from a borehole televiewer, Rock Mechanics and Rock Engineering, 44, 497-504, 2011.

Bahaaddini, M., Hagan, P.C., Mitra, R., Khosravi, M.H., Experimental and numerical study of asperity degradation in the direct shear test, Engineering Geology, 204, 41-52, 2016.

Ban, L., Qi, C., Chen, H., Yan, F., Ji, C., A new criterion for peak shear strength of rock joints with a 3D roughness parameter, Rock Mechanics and Rock Engineering, 53, 1755-1775, 2020.

Bandis, S., Experimental Studies of Scale Effects on Shear Strength and Deformation of Rock Joints, Ph.D. Thesis, The University of Leeds, Department of Earth Sciences, Leeds, 1980.

Bandis, S., Lumsden, A.C., Barton, N., Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 18, 1-21, 1981.

Barton, N., A relationship between joint roughness and joint shear strength, Symposium Soc. Internat. Mécanique des Roches, Nancy, Paper 1-8, 1971.

- Barton, N., Review of a new shear-strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, 7, 287-332, 1973.
- Barton, N., The shear strength of rock and rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(9), 255-279, 1976.
- Barton, N., Shear strength investigations for surface mining, 3rd International Conference on Stability in Surface Mining, Vancouver, Chapter 7, 171-192, 1981.
- Barton, N., Modelling Rock Joint Behavior from In Situ Block Tests: Implications for Nuclear Waste Repository Design, Technical Report, ONWI-308, Utah, 1982.
- Barton, N., Non-linear shear strength descriptions are still needed in petroleum geomechanics, despite 50 years of linearity, 50th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA-2016-252, 2016.
- Barton, N., Bandis, S., Some effects of scale on the shear strength of joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 17, 69-73, 1980.
- Barton, N., Bandis, S., Characterization and modeling of the shear strength, stiffness and hydraulic behavior of rock joints for engineering purposes, *Rock Mechanics and Engineering Volume 1: Principles*, Xia-Ting Feng (Eds.), CRC Press/Balkema, London, 3-40, 2017.
- Barton, N., Choubey, V., The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, 10, 1-54, 1977.
- Belem, T., Homand-Etienne, F., Souley, M., Fractal analysis of shear joint roughness, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 34 (3-4), Paper 130, 1997.
- Belem, T., Homand-Etienne, F., Souley, M., Quantitative parameters for rock joint surface roughness, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 33 (4) 217-242, 2000.
- Bozkurtoğlu, E., İTÜ Kampüs Alanındaki Kayaçların Yüzey Pürüzlülüğünün Görüntü Analiz Yöntemi İle Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 1996.

- Byerlee, J., Friction of rocks, *Pure and Applied Geophysics*, 116 (4-5), 615-626, 1978.
- Cao, P., Deng, H., Chen, Y., Fu, N., The shear characteristic and failure mechanism study of infilled rock joints with constant normal load, *Journal of Vibroengineering*, 21 (4), 940-951, 2019.
- Carr, J.R., Warriner, J.B., Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 26 (2), 253-263, 1989.
- Coulomb, C.A., Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture, *Mémoires de mathématique et physique présenté à l'Académie des sciences par savantes étrangères*, 7, 343-382, 1776.
- Chen, S.J., Zhu, W.C., Zhang, M.S., Yu, Q.L., Fractal description of rock joints based on digital image processing technique, *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 34 (11), 2087-2092, 2012.
- Chilés, J., Gentier, S., Geostatistical modelling of a single fracture, *Geostatistics Tróia '92*, Vol. 1-5, A. Soares (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 95-108, 1993.
- Cloud Compare, [www.danielgm.net/cc/](http://www.danielgm.net/cc/), 2022.
- Çağlan, D., Pürüzlü Eklem Yüzeylerinin Makaslama Dayanımı Parametrelerinin Saptanmasında Barton Görgül Yenilme Ölçütünün Pratiğe Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tez, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2000.
- Deere, D.U., Miller, R.P., Engineering classification and index properties of rock, Air Force Weapons Laboratory Technical Report, New Mexico, 1966.
- Develi, K., Harşit Vadisi – Kürtün Barajı Aks Yeri Kayaçlarında Çatlak Yüzeylerindeki Pürüzlülüğün Sayısal Tanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996.
- Develi, K., Süreksizlik İçeren Ortamların Mekanik Modellemesi İçin Pürüzlülüğün Kuramsal ve Deneysel Yöntemler İle Sayısal Tanımı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.

- Develi, K., Babadağlı, T., Quantification of natural fracture surfaces using fractal geometry, *Mathematical Geology*, 30 (8), 971-998, 1998.
- Develi, K., Babadağlı, T., Çömlekçi, C., A new computer controlled surface scanning device for measurement of fracture surface roughness, *Computer and Geosciences*, 27 (3), 265-277, 2001.
- Develi, K., Vardar, M., Yüzey pürüzlülüğünün sayısal tanımı ve süreksizliğin kesme dayanımına etkisi, *İTÜ Dergisi/d 5* (4), 69-82, 2006.
- Fairhurst, C., On the validity of the Brazilian test for brittle materials, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1, 535-546, 1964.
- Fardin, N., Influence of structural non-stationarity of surface roughness on morphological characterization and mechanical deformation of rock joints, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41 (2), 267-297, 2008.
- Fardin, N., Feng, Q., Stephansson, O., Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, 329-335, 2004.
- Fecker, E., Rengers, N., Measurement of large scale roughnesses of rock planes by means of profilograph and geological compass, *Rock Fracture: Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, Nancy, France, 1-18, 1971.
- Feder, J., *Fractals*, Plenum Press, 1988.
- Fell, R., Jeffrey, R.P., Determination of drained shear strength for slope stability analysis. Proc. of an Extension Course on Soil Slope Instability and Stabilization, Sydney, A. A. Balkema, 53-70, 1987.
- Ferrero, A.M., Giani, G.P., Geostatistical description of the joint surface roughness, *Rock Mechanics Contributions and Challenges*, W. Hustrulid and G.A. Johnson (Eds.), Balkema, Rotterdam, 463-470, 1990.
- Garcia-Luna, R., Senent, S., Jimenez, R., Using telephoto lens to characterize rock surface roughness in SfM models, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 2369-2382, 2021.

- Gentier, S., Riss, J., Archambault, G., Flamand, R., Hopkins, D., Influence of fracture geometry on shear behavior, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, 161-174, 2000.
- Ghazvinian, A.H., Azinfar, M.J., Geranmayeh Vaneghi, R., Importance of tensile strength on the shear behavior of discontinuities, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 349-359, 2012.
- Grasselli, G., Wirht, J., Egger, P., Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing, *International journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39, 789-800, 2002.
- Grasselli, G., Egger, P., Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40, 25-40, 2003.
- Gui, Y., Xia, C., Ding, W., Qian, X., Du, S., A new method for 3D modeling of joint surface degradation and void space evolution under normal and shear loads, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 2827-2836, 2017.
- Gui, Y., Xia, C., Ding, W., Qian, X., Du, S., Modelling shear behaviour of joint based on joint surface degradation during shearing, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 107-131, 2019.
- Haque, A., Shear behaviour of soft rock joints under constant normal stiffness, PhD Thesis, University of Wollongong, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, New South Wales, 1999.
- Hoek, E., Brown, E.T., Empirical strength criterion for rock masses, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 106 (GT9), 1013-1035, 1980.
- Hong, E., Kwon, T., Song, K., Cho, G., Observation of the degradation characteristics and scale of unevenness on three-dimensional artificial rock joint surfaces subjected to shear, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 3-17, 2016.
- Hou, D., Rong, G., Yang, J., Zhou, C., Peng, J., Wang, X., A new shear strength criterion of rock joints based on cyclic shear experiment, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20 (2), 180-198, 2016.

- Indraratna, B., Thirukumaran, S., Brown, E.T., Zhu, S., Modelling the shear behaviour of rock joints with asperity damage under constant normal stiffness, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 179-195, 2015.
- Innocenti, F., Mazzuoli, R., Pasquare, G., Radicati di Brozolo, F., Villari L., The Neogene calc-alkaline volcanic of Central Anatolia: geochronological data on Kayseri-Nigde area, *Geological Magazine*, 112(4), 349-360, 1975.
- ISRM, The Complete ISRM Suggested Methods for Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006, R. Ulusay, J.A. Hudson (Eds.), Suggested Methods prepared by the ISRM Commission on Testing Methods, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, 2007.
- ISRM, The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014, R. Ulusay (ed.), Springer, 2015.
- İşleyen, E., Laboratory Investigation of Shear Behavior of Rock Discontinuities Based on Shear Rate, Size and Roughness Characteristics, MSc Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2017.
- Jaeger, J.C., Friction of rocks and stability of rock slopes, *Géotechnique*, 21 (2), 97-134, 1971.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W., *Fundamentals of Rock Mechanics*, Blackwell Publishing, 2007.
- Jang, H.S., Kang, S.S., Jang, B.A., Determination of joint roughness coefficients using roughness parameters, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 2061-2073, 2014.
- Jang, H.S., Jang, B.A., New method for shear strength determination of unfilled, unweathered rock joint, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 1515-1534, 2015.
- Jia, H.Q., Experimental Research on Joint Surface State and the Characteristics of Shear Failure, MSc. Thesis, Central South University, Changsha, China, 2011.
- Jiang, Y., Li, B., Tanabashi, Y., Estimating the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 837-846, 2006.

- Jing, L., Nordlund, E., Stephansson, O., An experimental study on the anisotropy and stress-dependency of the strength and deformability of rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 29 (6), 535-542, 1992.
- Kahraman S., Aloglu A.S., Aydin B., Saygin E. The needle penetration test for predicting coal strength, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(6), 587-591, 2017.
- Koralay, T., Kadioğlu, Y.K., Reasons of different colors in the ignimbrite lithology: Micro-XRF and confocal Raman spectrometry method, *Spectrochimica Acta Part A*, 69(3), 947-955, 2008.
- Kulatilake, P.H.S.W., Shou, G., Huang, T.H., Morgan, R.M., New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32 (7), 673-697, 1995.
- Kulatilake, P.H.S.W., Um, J., Pan, G., Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the variogram method, *International Journal of Solids and Structures*, 35 (31-32), 4167-4189, 1998.
- Kusumi, H., Teraoka, K., Nishida, K., Study on new formulation of shear strength for irregular rock joints, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 34 (3-4), Paper 168, 1997.
- Ladanyi, B., Archambault, G., Simulation of shear behavior of a jointed rock mass, *Proceedings of the 11th Symposium on Rock Mechanics, ARMA*, 105-125, 1969.
- Lamas, L.N., An experimental and analytical study of the roughness of granite joints, *ISRM International Symposium: EUROCK '96*, G. Barla (Ed.) Torino, Italy, Balkema, Rotterdam, 117-126, 1996.
- Lee, Y.H., Carr, J.R., Barr, D.J., Hass, C.J., The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 23 (6), 453-464, 1990.



- Lee, Y.K., Park, J.W., Song, J.J., Model for the shear behavior of rock joints under CNL and CNS conditions, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 70, 252-263, 2014.
- Li, Y., Huang, R., Relationship between joint roughness coefficient and fractal dimension of rock fracture surfaces, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 75, 15-22, 2015.
- Li, Y., Zhang, Y., Quantitative estimation of joint roughness coefficient using statistical parameters, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 77, 27-35, 2015.
- Li, Y., A constitutive model of opened rock joints in the field, PhD. Thesis, The University of New South Wales, School of Mining Engineering, New South Wales, 2016.
- Liu, S.Y., Fractional dimension method of JRC measurement, *Site Investigation Science and Technology*, 6, 26-29, 1993.
- Liu, Q., Tian, T., Ji, P., Ma, H., Experimental investigation of the peak shear strength criterion based on three-dimensional surface description, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 1005-1025, 2017.
- Maerz, N.H., Franklin, J.A., Bennett, C.P., Joint roughness measurement using shadow profilometry, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27 (5), 329-343, 1990.
- Magsipoc E., Zhao Q., Grasselli G. 2D and 3D roughness characterization, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 1495-1519, 2020.
- Maksimovic, M., New description of the shear strength for rock joints, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 25 (4), 275-284, 1992.
- Malinverno, A., A simple method to estimate the fractal dimension of self-affine series, *Geophysical Research Letters*, 17 (11), 1953-1956, 1990.
- Mandelbrot, B.B., *The Fractal Geometry Of Nature*, W.H. Freeman and Company, New York, 1983.

- Marsch, K., Wujanz, D., Fernandez-Steege, T.M., On the usability of different optical measuring techniques for joint roughness evaluation, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 811-830, 2020.
- Matsushita, M., Ouchi, S., On the self-affinity of various curves, *Physica D*, 38, 246-251, 1989.
- Milne, D., Hawkes, C., Hamilton, C., A new tool for the field characterization of joint surfaces, *ROCKENG09: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium*, M. Diederichs and G. Grasselli (Eds.), Toronto, Paper 4169, 2009.
- Mirzaghobanali, A., Shear behavior of rock joints under cyclic loading and constant normal stiffness conditions, PhD Thesis, University of Wollongong, Faculty of Engineering and Information Sciences, New South Wales, 2013.
- Mohr, O., Über die darstellung des Spannungszustandes eines körpelementes, *Zivil Ingenieure*, 28, 113-156, 1882.
- Muralha, J., Grasselli, G., Tatone, B., Blümel, M., Chryssanthakis, P., Yujing, J., ISRM Suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 291-302, 2014.
- Myers, N.O., Characterization of surface roughness, *Wear*, 5 (3), 182-189, 1962.
- Newland, P.L., Allely, B.H., Volume changes in drained triaxial tests on granular materials, *Géotechnique*, 7 (1), 17-34, 1957.
- Oglesby, J., Hudyma, N., Brown, S., Bliss, A., Harris, A., Development and assessment of a photogrammetry system for rock specimen surface characterization, *SoutheastCon*, 1-5, 2017.
- Oh, J., Li, Y., Mitra, R., Canbulat, I., A numerical study on dilation of a saw-toothed rock joint under direct shear, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 913-925, 2017.
- Okada S., Izumiya Y., Iizuka Y., Horiuchi S. The estimation of soft rock strength around a tunnel by needle penetration test, *Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 33(2), 35-38, 1985.

- Önsel, İ.E., Kaya Kütlesindeki Süreksizliklerin Pürüzlülük Ölçümleri İçin Objektif Yöntemlerin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
- Papaliangas, T.T., Hencher, S.R., Lumsden, A.C., A comprehensive peak shear strength criterion for rock joints, Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics, Tokyo, 1, 359-366, 1995.
- Park, J.W., Lee, Y.K., Song, J.J., Choi, B.Y., A constitutive model for shear behavior of rock joints based on three-dimensional quantification of joint roughness, Rock Mechanics and Rock Engineering, 46, 1513-1537, 2013.
- Pasquare, G., Geology of Cenozoic volcanic area of Central Anatolia, Atti. Accademei Nazionale dei Lincei Memoire, 9, 55-204, 1968.
- Patton, F.D., Multiple modes of shear failure in rock, Proceedings of the 1st International Congress of International Society for Rock Mechanics, Lisbon, 1, 509-513, 1966.
- Power, W.L., Tullis, T.E., Brown, S.R., Boitnott, G.N., Scholz, C.H., Roughness on natural fault surfaces, Geophysical Research Letters, 14 (1), 29-32, 1987.
- Qin, S.Q., Zhang, Z.Y., Wang, S.T., Huang, R.Q., Fractal features of jointed rock masses and engineering geological significance, Journal of Engineering Geology, 1 (2), 14-23, 1993.
- Rahimi M.R., Mohammadi S.D., Heidari M., Jalali S.H. Evaluation of the needle penetration test to estimate the uniaxial compressive strength of gypsum rocks, Arabian Journal of Geosciences, 13, 14, 2020.
- Richards, L.R., The Shear Strength of Joints In Weathered Rock, Ph.D. Thesis, University of London, Imperial College of Science & Technology, London, 1975.
- Rocscience, [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com), Phase 2, 2011.
- Roko, R.O., Daemen, J.J.K., Myers, D.E., Variogram characterization of joint surface morphology and asperity deformation during shearing, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34 (1), 71-84, 1997.

- Sayles, R.S., Thomas, T.R., The spatial representation of surface roughness by means of the structure function: A practical alternative to correlation, *Wear*, 42, 263-276, 1977.
- Shigui, D., Yunjin, H., Xiaofei, H., Measurement of joint roughness coefficient by using profilograph and roughness ruler, *Journal of Earth Science*, 20 (5), 890-896, 2009.
- Tam, C.C.Y., Kwong, A.K.L., Lee, P.K.K., Calibration of rock joint roughness and shear strength with the use of 3D laser scanning technique, *The Hong Kong Institution of Engineers Transactions*, 18 (3), 27-34, 2011.
- Tang, Z.C., Wong, L.N.Y., Influences of normal loading rate and shear velocity on the shear behaviour of artificial rock joints, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 2165-2172, 2015.
- Tang, Z.C., Liu, Q.S., Huang, J.H., New criterion for rock joints based on three dimensional roughness parameters, *Journal of Central South University*, 21, 4653-4659, 2014.
- Tang, H., Ge, Y., Wang, L., Yuan, Y., Huang, L., Sun, M., Study on estimation method of rock mass discontinuity shear strength based on three-dimensional laser scanning and image technique, *Journal of Earth Science*, 23 (6), 908-913, 2012.
- Tatone, B.S.A., Quantitative Characterization of Natural Rock Discontinuity Roughness In-Situ and In The Laboratory, MSc Thesis, University of Toronto, Department of Civil Engineering, Toronto, 2009.
- Tatone, B.S.A., Grasselli, G., A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials, *Review of Scientific Instruments*, 80 (12), Paper 125110, 2009.
- Tatone, B.S.A., Grasselli, G., A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47, 1391-1400, 2010.
- Temel, A., Kapadokya Eksplozif Volkanizmasının Petrolojik ve Jeokimyasal Özellikleri, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1992.

- Tse, R., Cruden, D.M., Estimating joint roughness coefficients, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16, 303-307, 1979.
- Turk, N., Greig, M.J., Dearman, W.R., Amin, F.F., Characterization of rock joint surfaces by fractal dimension, *Proceedings of the 28th US Symposium on Rock Mechanics*, Tucson, 1223-1236, 1987.
- Ulusay, R., *Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler*, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, Güncellenmiş ve Genişletilmiş 5. Baskı, 458 p, 2010.
- Ulusay R., Ergüler Z.A. Needle penetration test: Evaluation of its performance and possible uses in predicting strength of weak and soft rocks, *Engineering Geology*, 149-150, 47-56, 2012.
- Ulusay R., Aydan Ö., Ergüler Z.A., Ngan-Tillard D.J.M., Seiki T., Verwaal W., Sasaki Y., Sato A. ISRM Suggested method for the needle penetration test, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 1073-1085, 2014.
- USB, 6255-09 Procedure for performing direct shear and sliding friction testing using a portable direct shear device introduction, 24p, 2009.
- Ünal, M., Süreksizlik Yüzey Pürüzlülüğünün Modellenmesi ve Makaslama Dayanımı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2000.
- Ünal, M., Ünver, B., Tercan, E., Modelling of discontinuity surface roughness by digital photogrammetry and geostatistical methods, *Proceedings of the 9th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, G.N. Panagiotou, T.N. Michalakopoulos (Eds.), Athens, Greece, 391-396, 2000.
- Ünal, M., Yakar, M., Yıldız, F., Discontinuity surface roughness measurement techniques and the evaluation of digital photogrammetric method, *Proceedings of the 20th Congress of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Istanbul, Turkey, 1103-1109, 2004.
- Ünal, M., Ünver, B., Characterization of rock joint surface degradation under shear loads, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (3), Paper 1A 24, 2004.

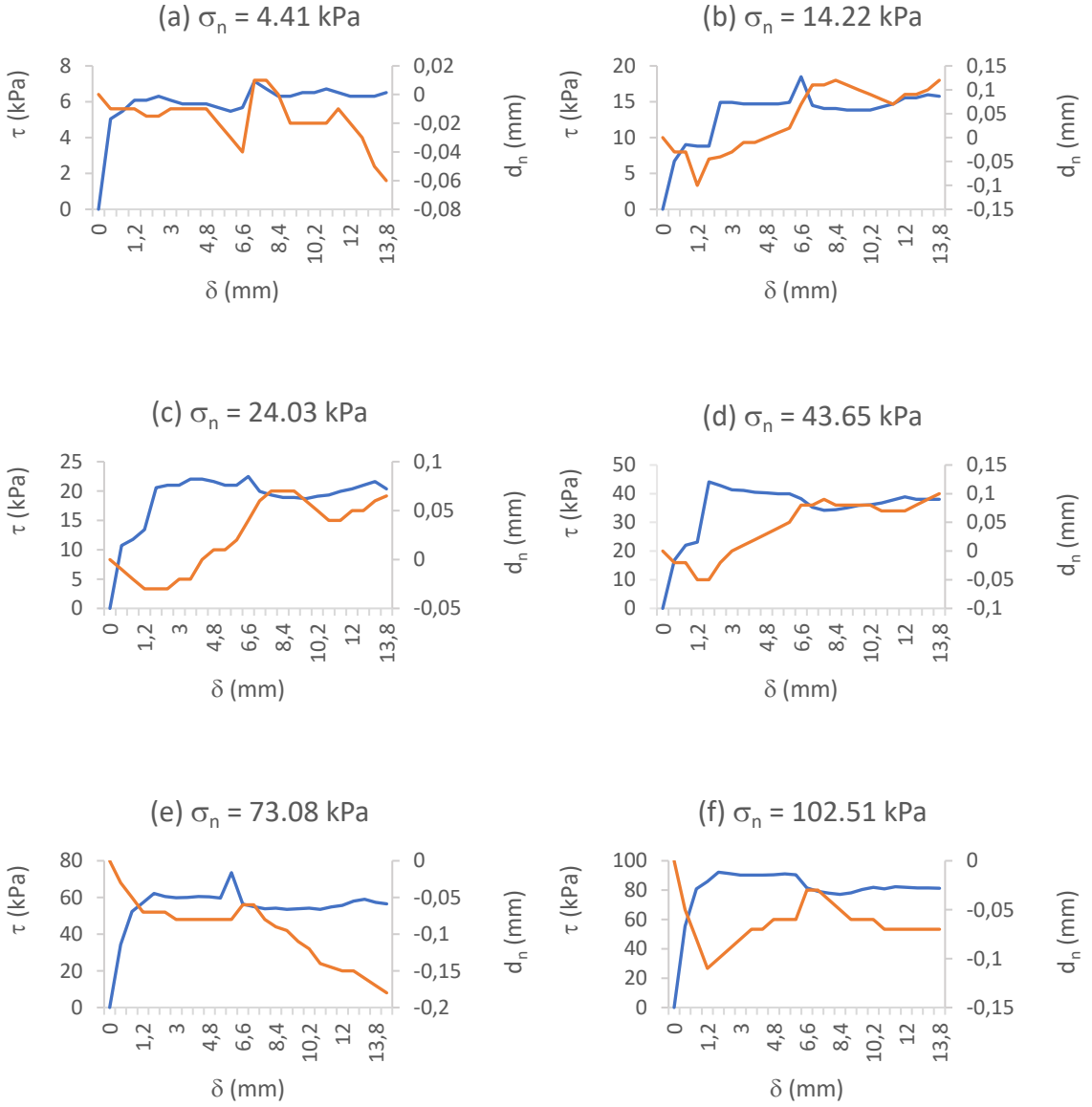
- Wakabayashi, N., Fukushige, I., Experimental study on the relation between fractal dimension and shear strength, Proceedings of the International Symposium for Fractured and Jointed Rock Masses, Berkeley, California, 101-110, 1992.
- Xia, C.C.X., Tang, Z.C., Xiao, W.M., Song, Y.L., New peak shear strength criterion of rock joints based on quantified surface description, Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, 387-400, 2014.
- Xie, H.P., Pariseau, W.G., Fractal estimation of rock joint roughness coefficient, Sci China, 24 (5), 524-530, 1994.
- Xu, H.F., Zhao, P.S., Li, C.F., Tong, Q., Predicting joint roughness coefficients using fractal dimension of rock joint profiles, Applied Mechanics and Materials, 170-173, 443-448, 2012.
- Yang, Z.Y., Lo, S.C., Di, C.C., Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using  $Z_2$ , Rock Mechanics and Rock Engineering, 34 (3), 243-251, 2001.
- Yang, J., Rong, G., Hou, D., Peng, J., Zhou, C., Experimental study on peak shear strength criterion for rock joints, Rock Mechanics and Rock Engineering, 49, 821-835, 2016.
- Yu, X., Vayssade, B., Joint profiles and their roughness parameters, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 28 (4), 333-336, 1991.
- Zhang, X., Jiang, Q., Chen, N., Wei, W., Feng, X., Laboratory investigation on shear behavior of rock joints and a new peak shear strength criterion, Rock Mechanics and Rock Engineering, 49, 3495-3512, 2016.
- Zhao, J., Joint surface matching and shear strength part B: JRC-JMC shear strength criterion, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34 (2), 179-185, 1997.
- Zheng, B., Qi, S., A new index to describe joint roughness coefficient (JRC) under cyclic shear, Engineering Geology, 212, 72-85, 2016.
- Zhou, H.W., Xie, H., Anisotropic characterization of rock fracture surfaces subjected to profile analysis, Physics Letters A, 325, 355-362, 2004.

Zhou, C.B., Xiong, W.L., Relation between joint roughness coefficient and fractal dimension, Journal of Wuhan University Hydraulic and Electric Engineering, 29 (5), 1195-1197, 1996.

## EKLER

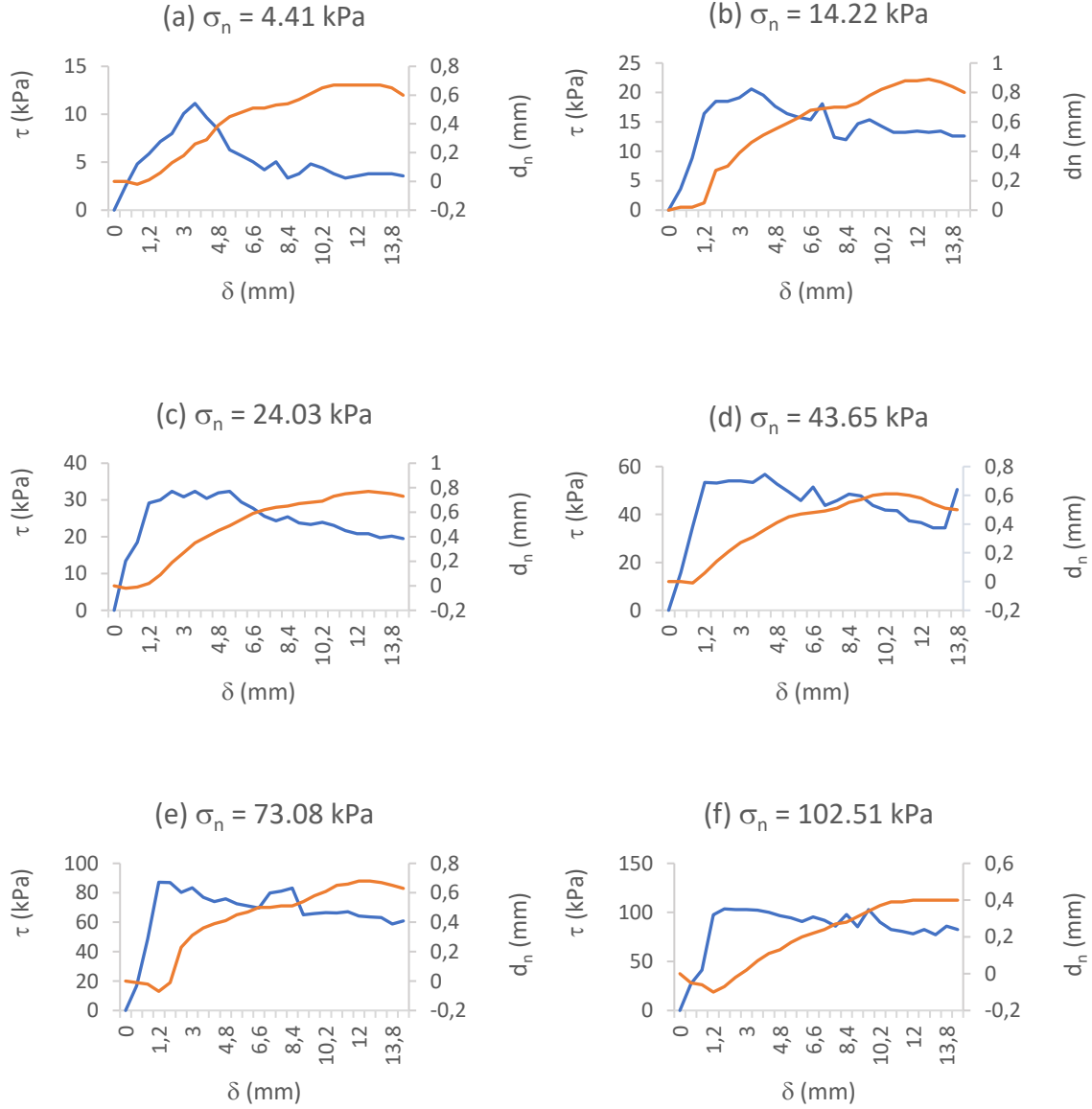
### EK-1: Alçılarda Gerçekleştirilen Makaslama Deneyleri Sonuçları

**EK-1a:** 1.07 karışım oranlı ve JRC 0-2 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.

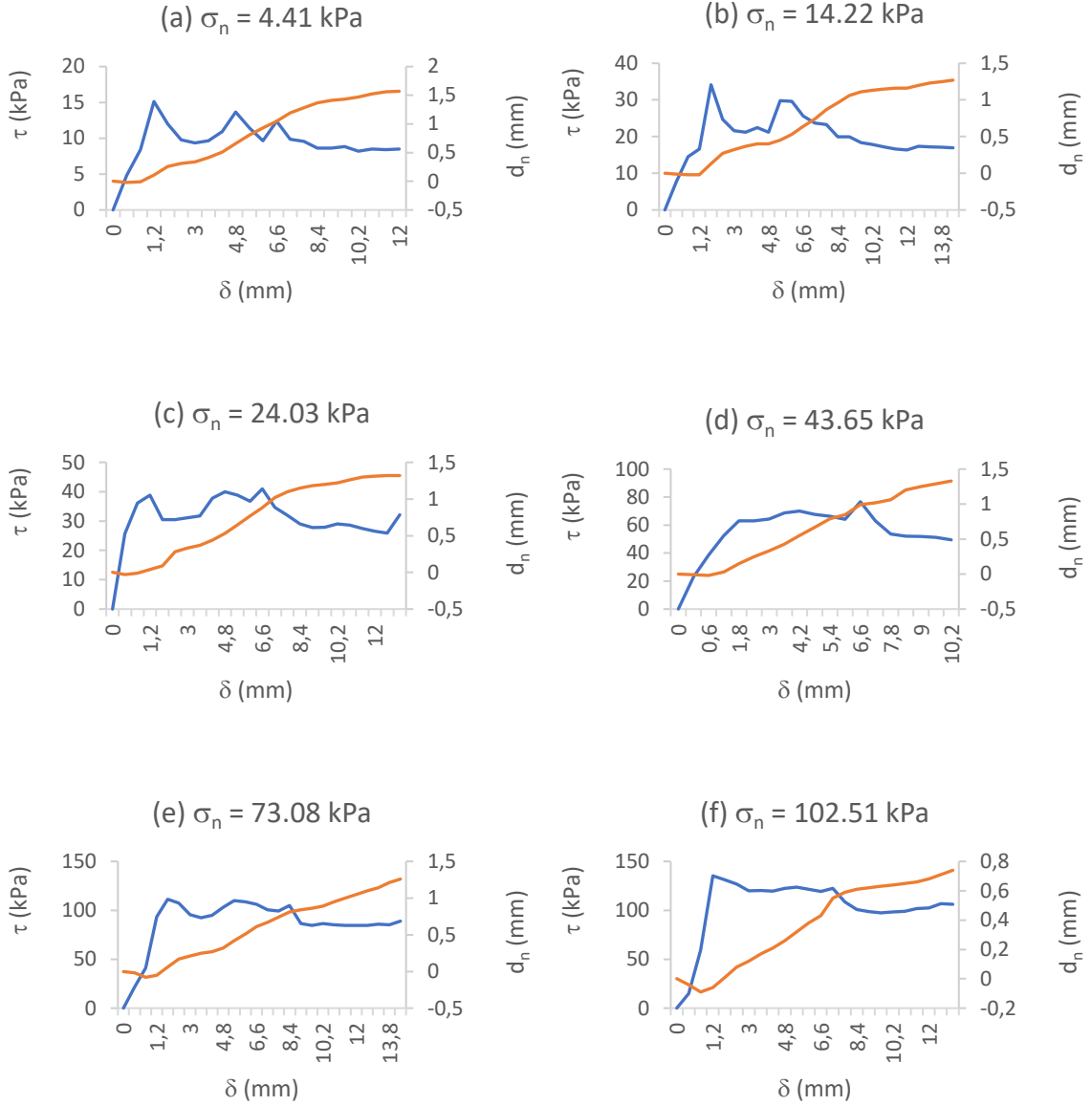




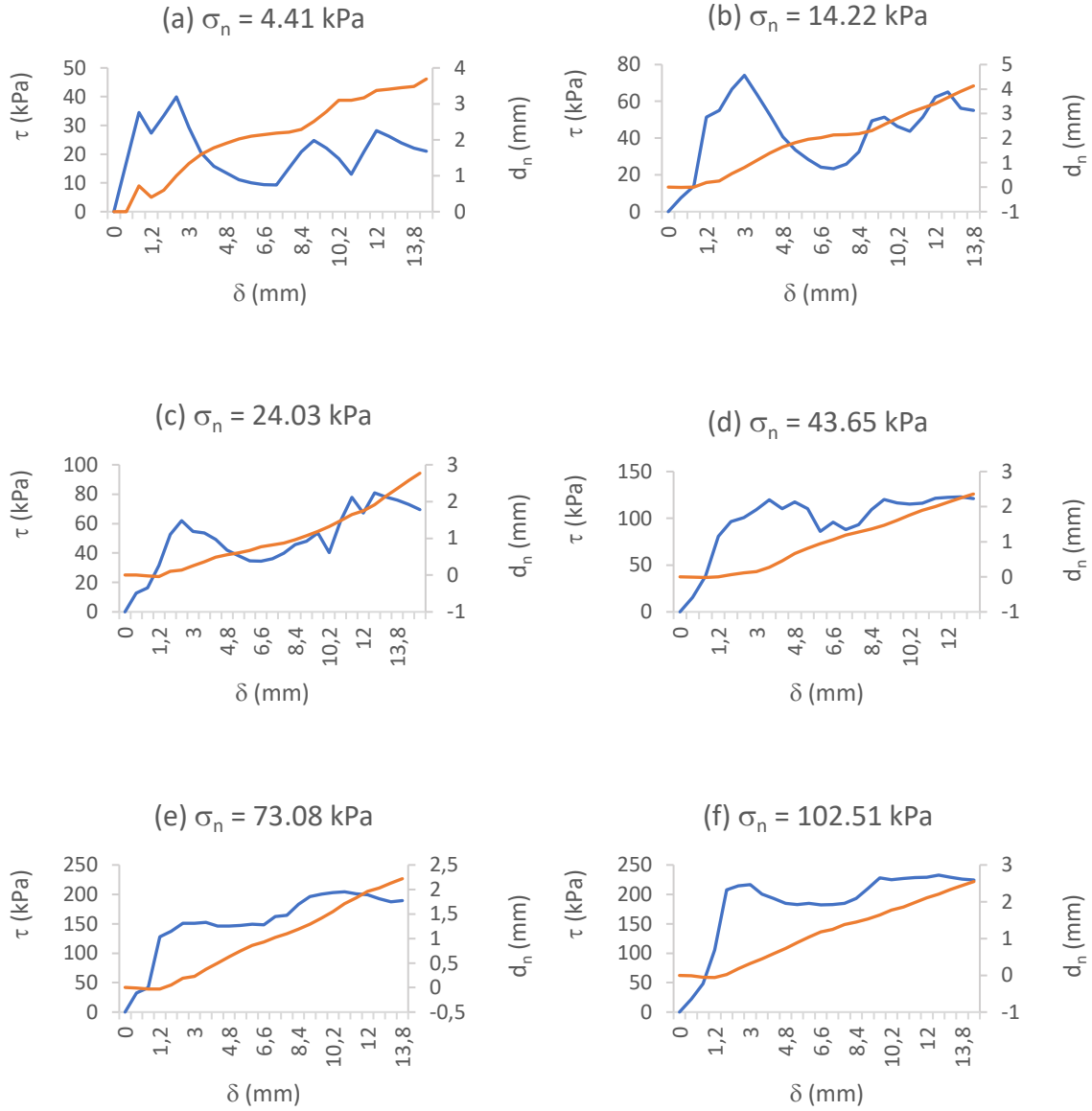
**EK-1b:** 1.07 karışım oranlı ve JRC 4-6 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



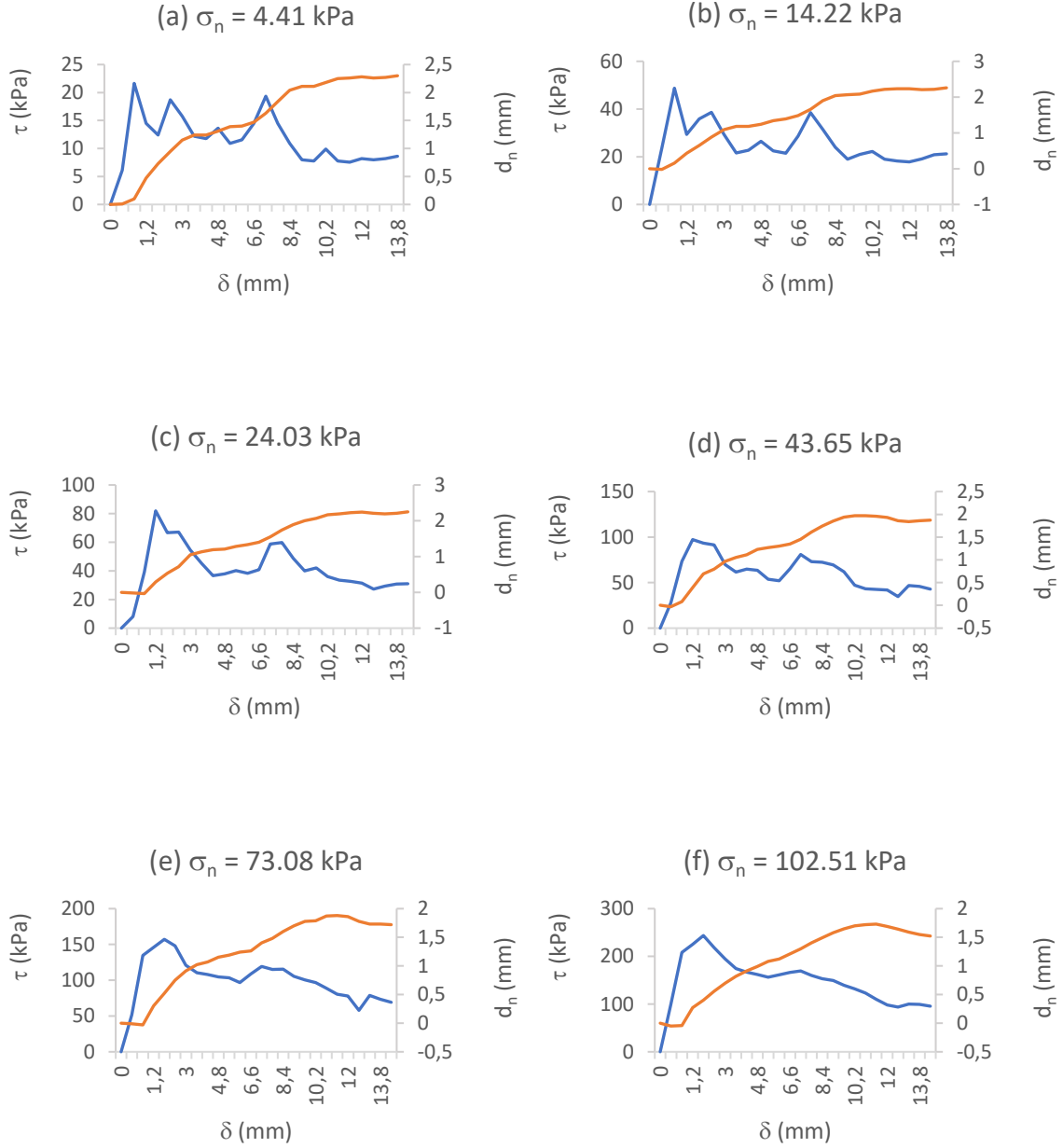
**EK-1c:** 1.07 karışım oranlı ve JRC 8-10 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



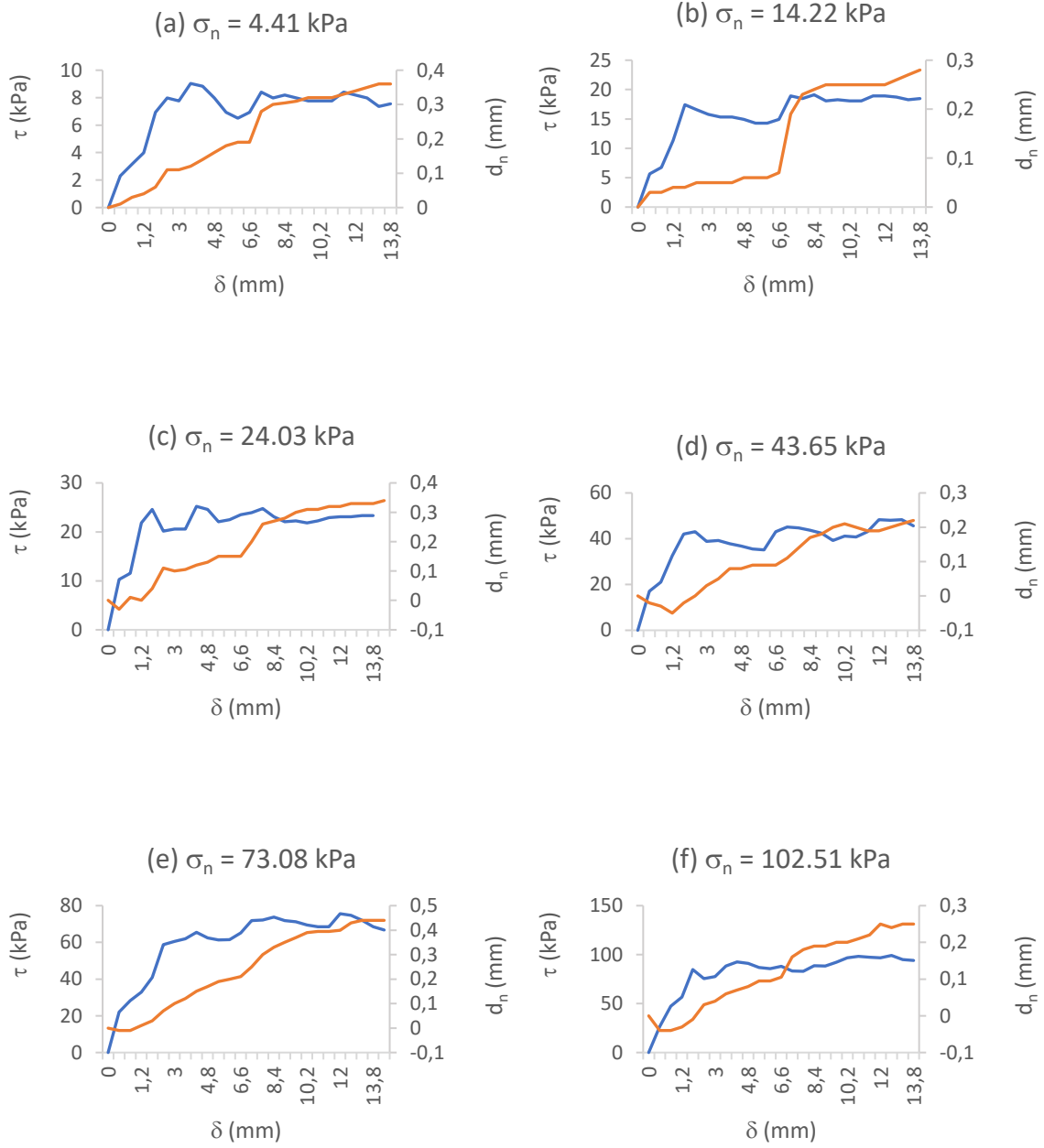
**EK-1ç:** 1.07 karışım oranlı ve JRC 14-16 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



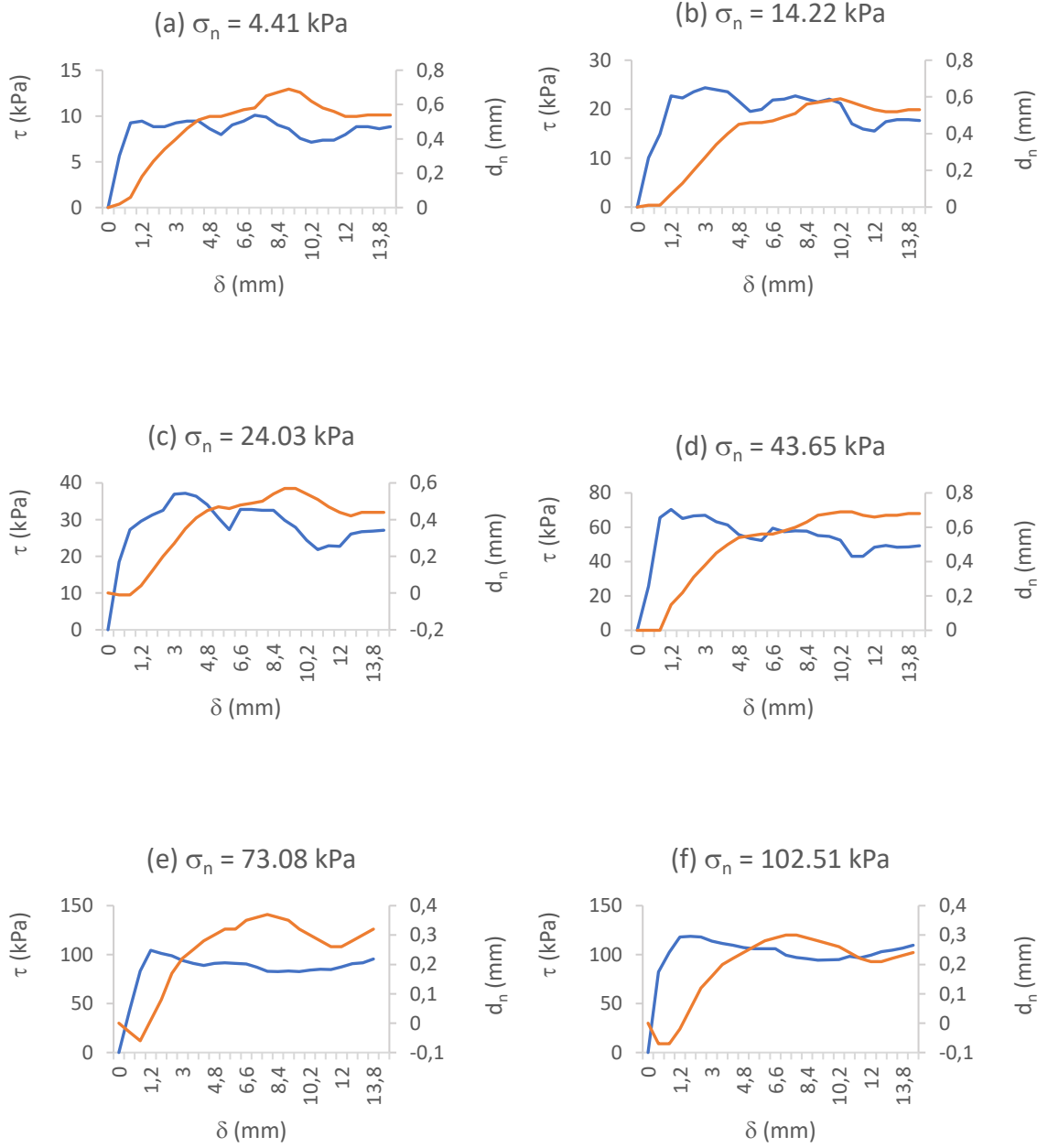
**EK-1d:** 1.07 karışım oranlı ve JRC 18-20 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



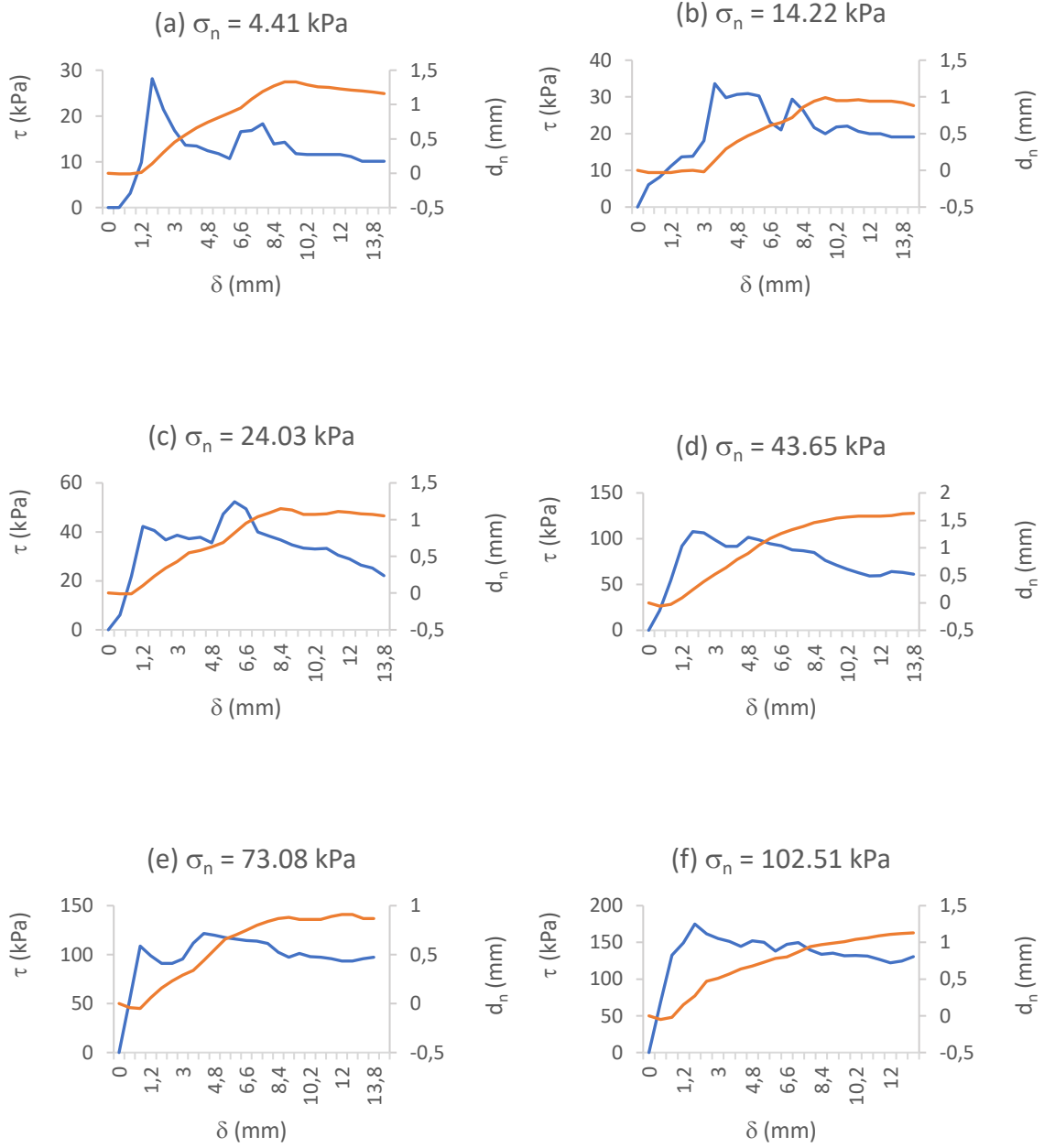
**EK-1e:** 1.43 karışım oranlı ve JRC 0-2 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



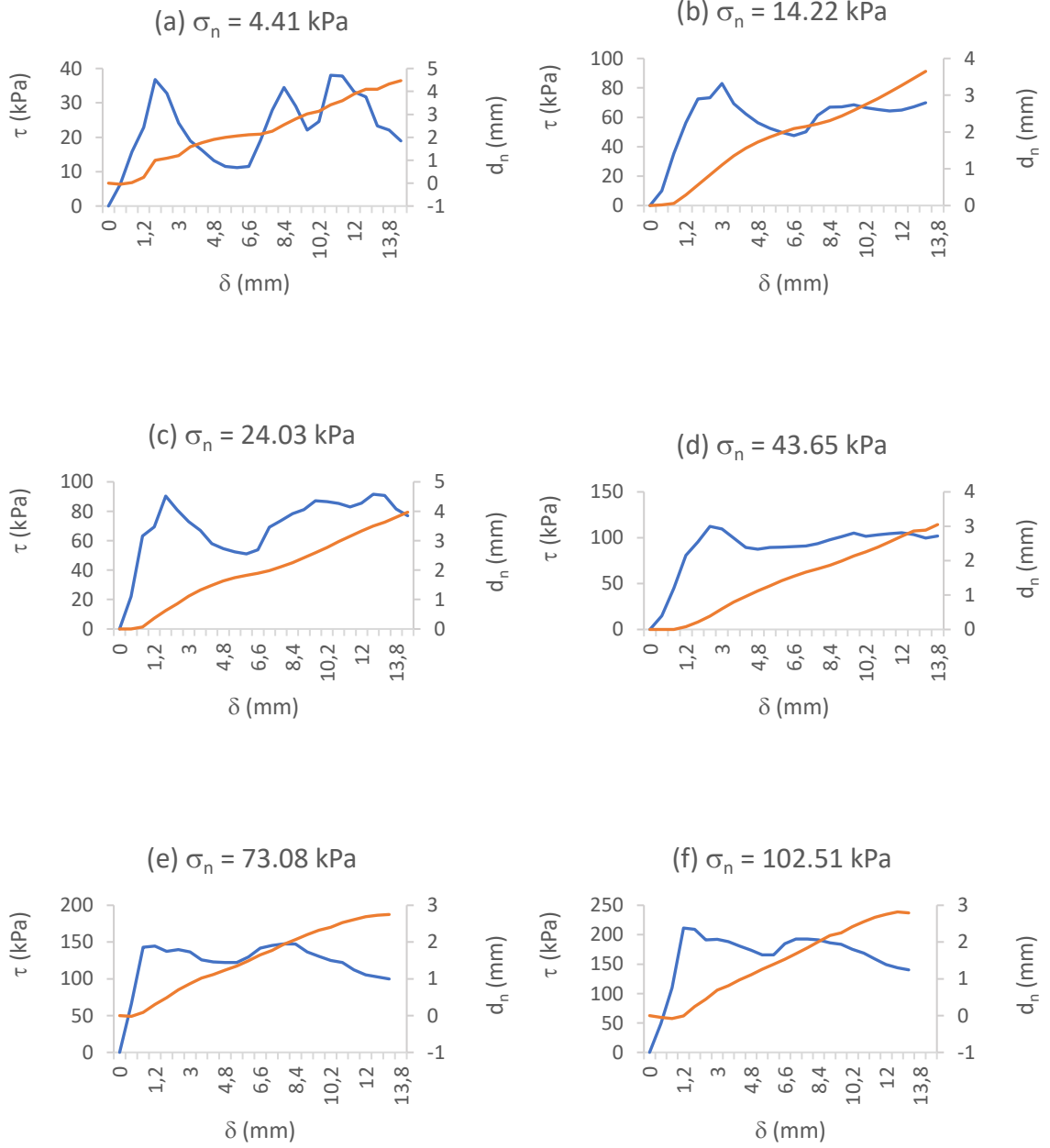
**EK-1f:** 1.43 karışım oranlı ve JRC 4-6 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



**EK-1g:** 1.43 karışım oranlı ve JRC 8-10 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.

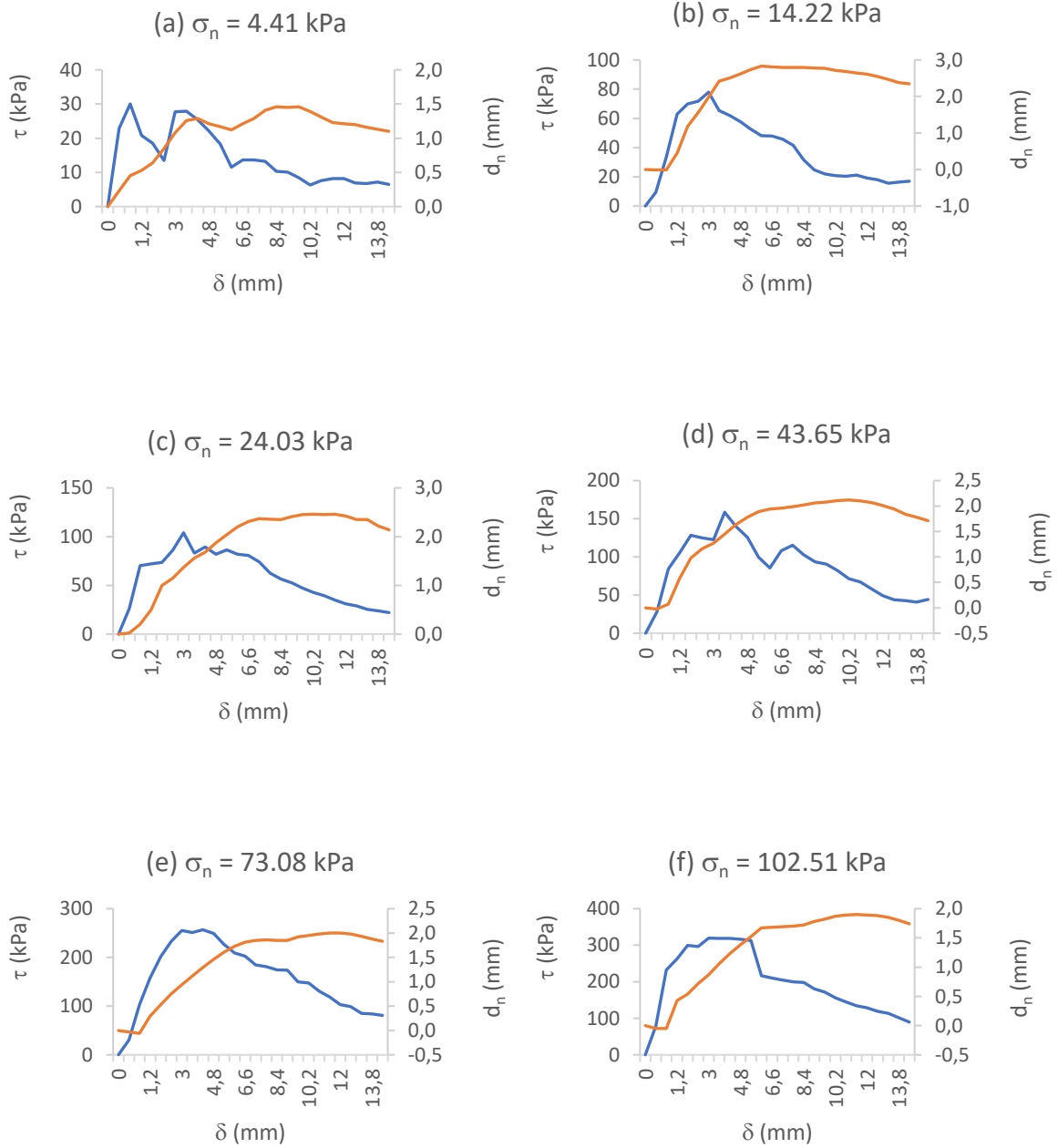


**EK-1h:** 1.43 karışım oranlı ve JRC 14-16 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.

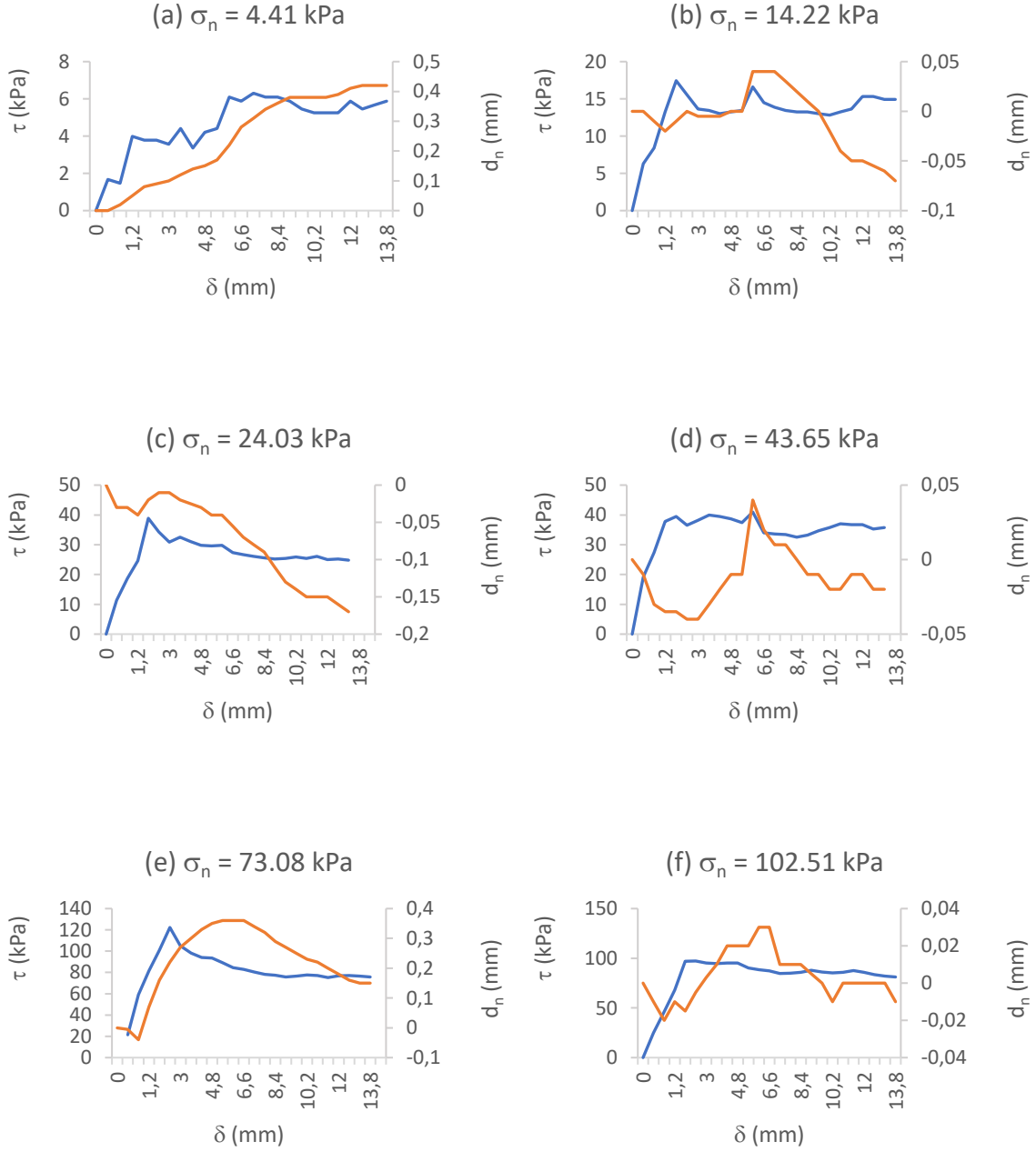




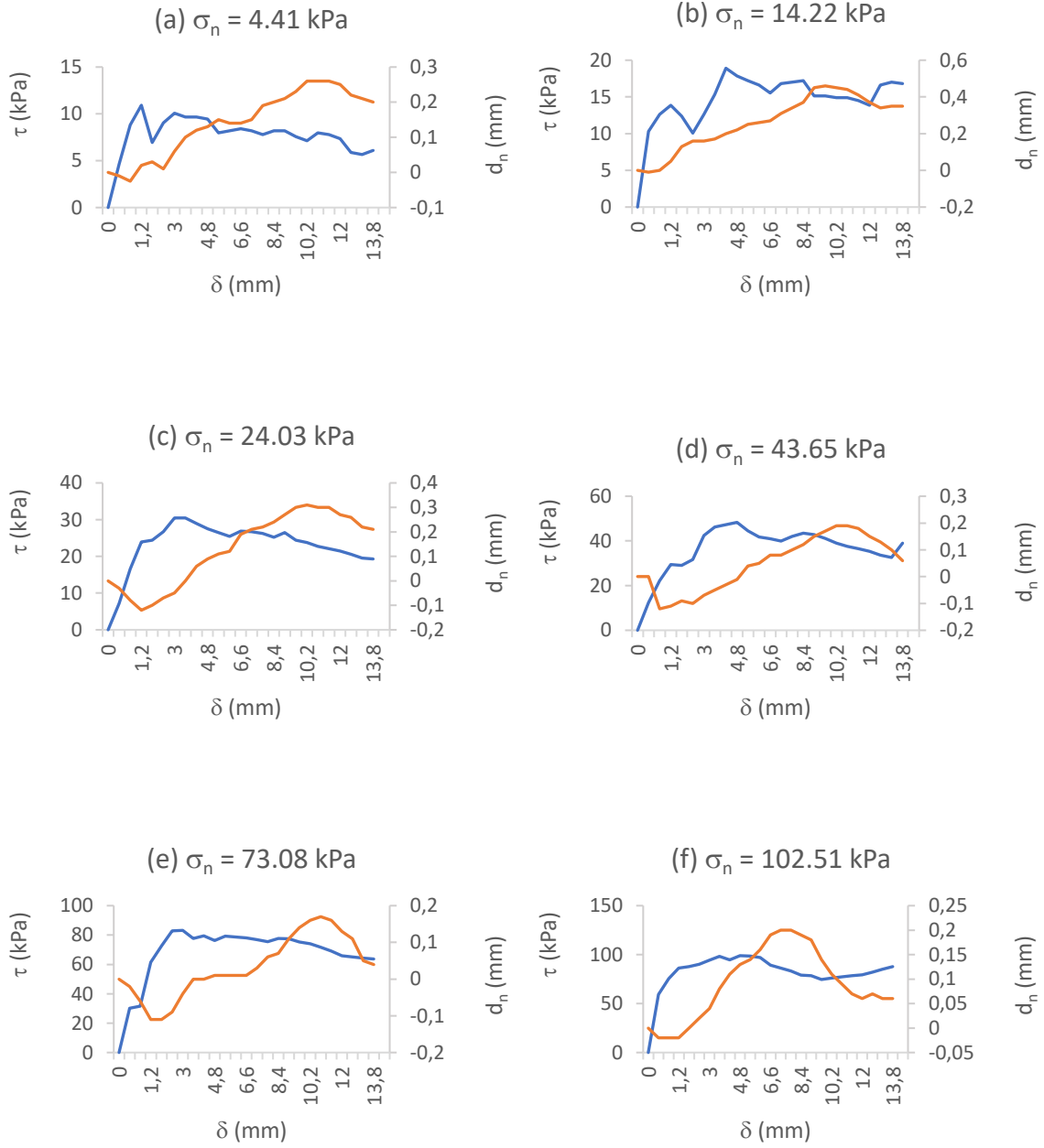
**EK-1:** 1.43 karışım oranlı ve JRC 18-20 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



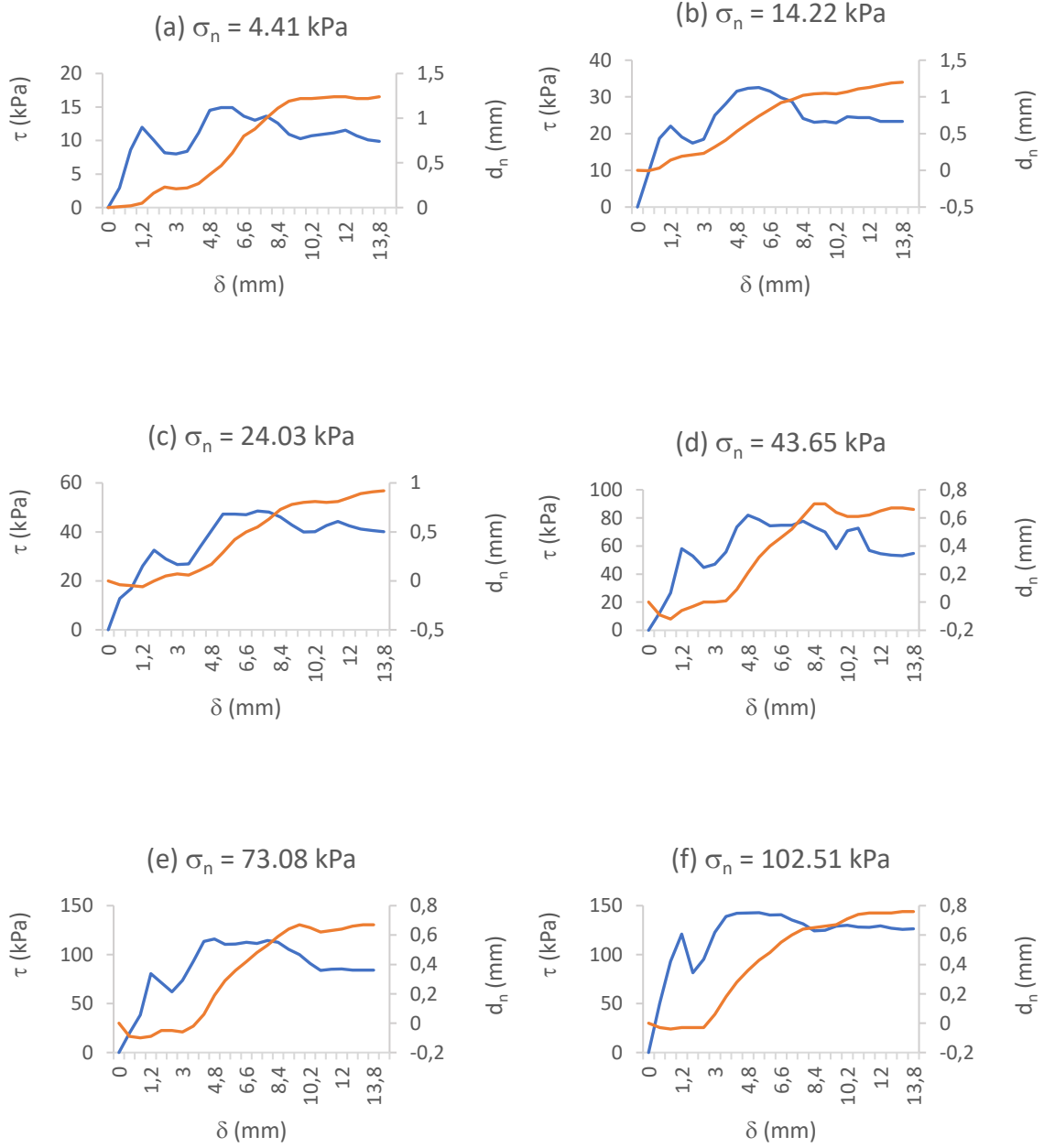
**EK-1i:** 1.66 karışım oranlı ve JRC 0-2 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



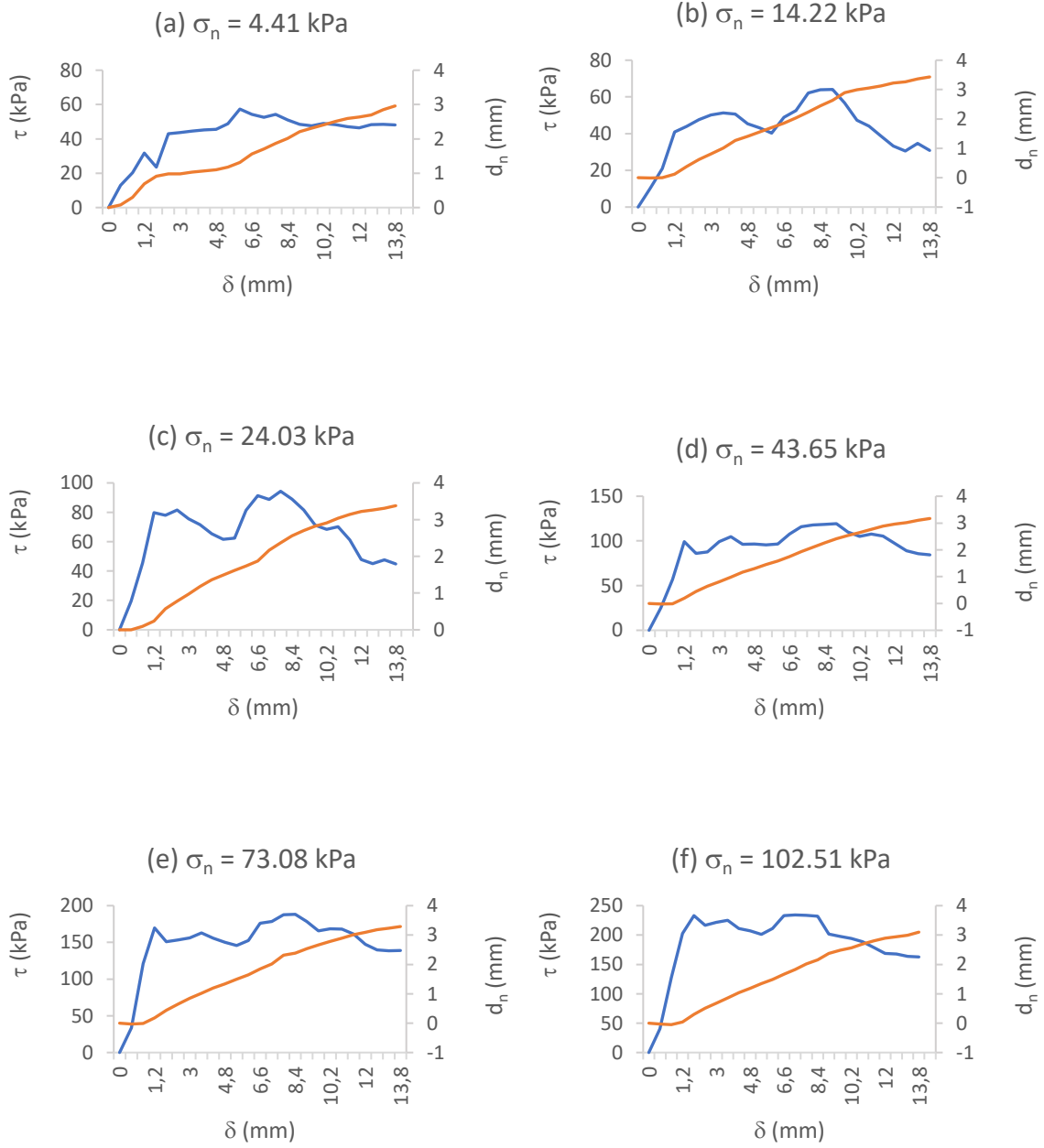
**EK-1j:** 1.66 karışım oranlı ve JRC 4-6 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



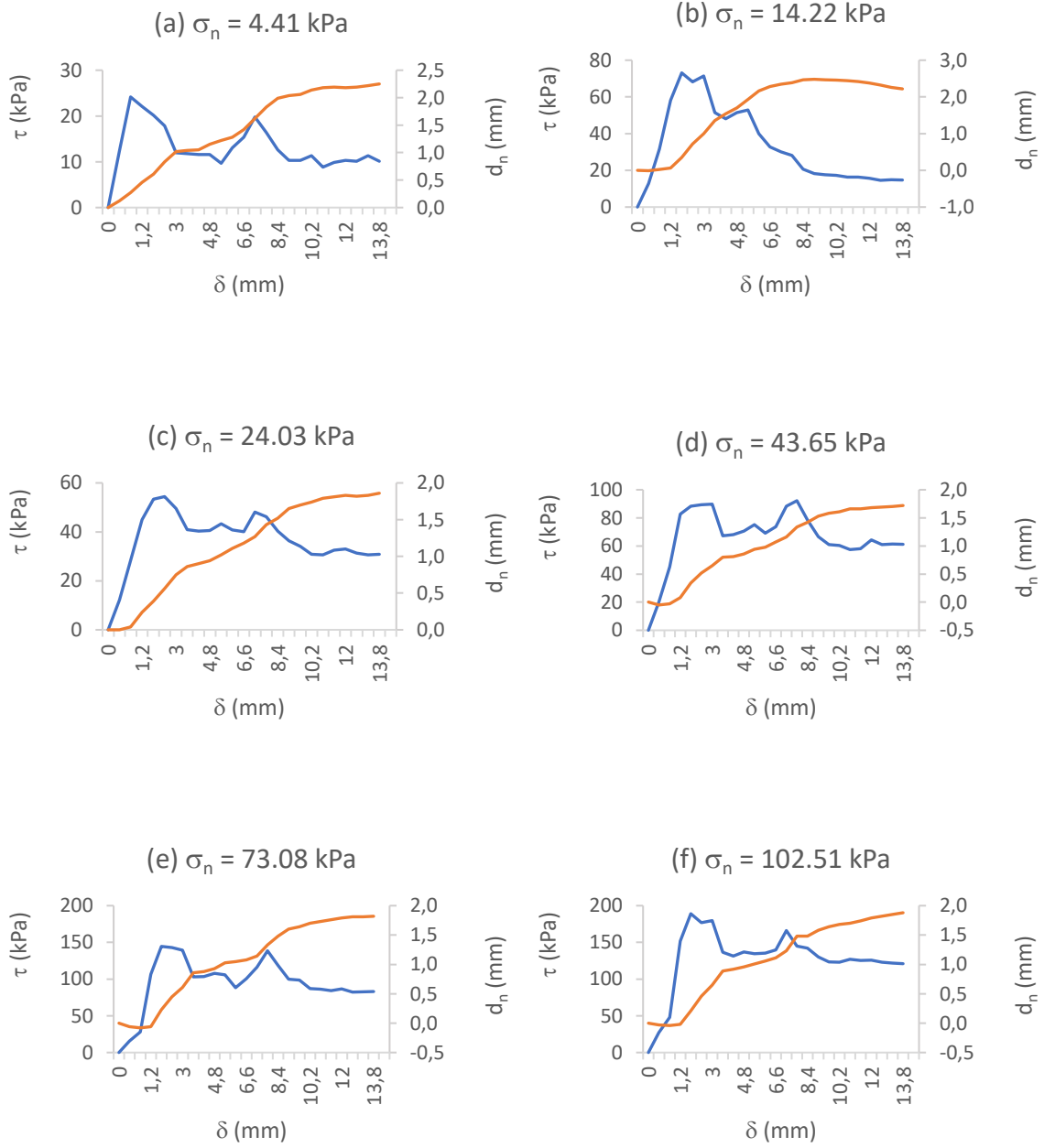
**EK-1k:** 1.66 karışım oranlı ve JRC 8-10 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



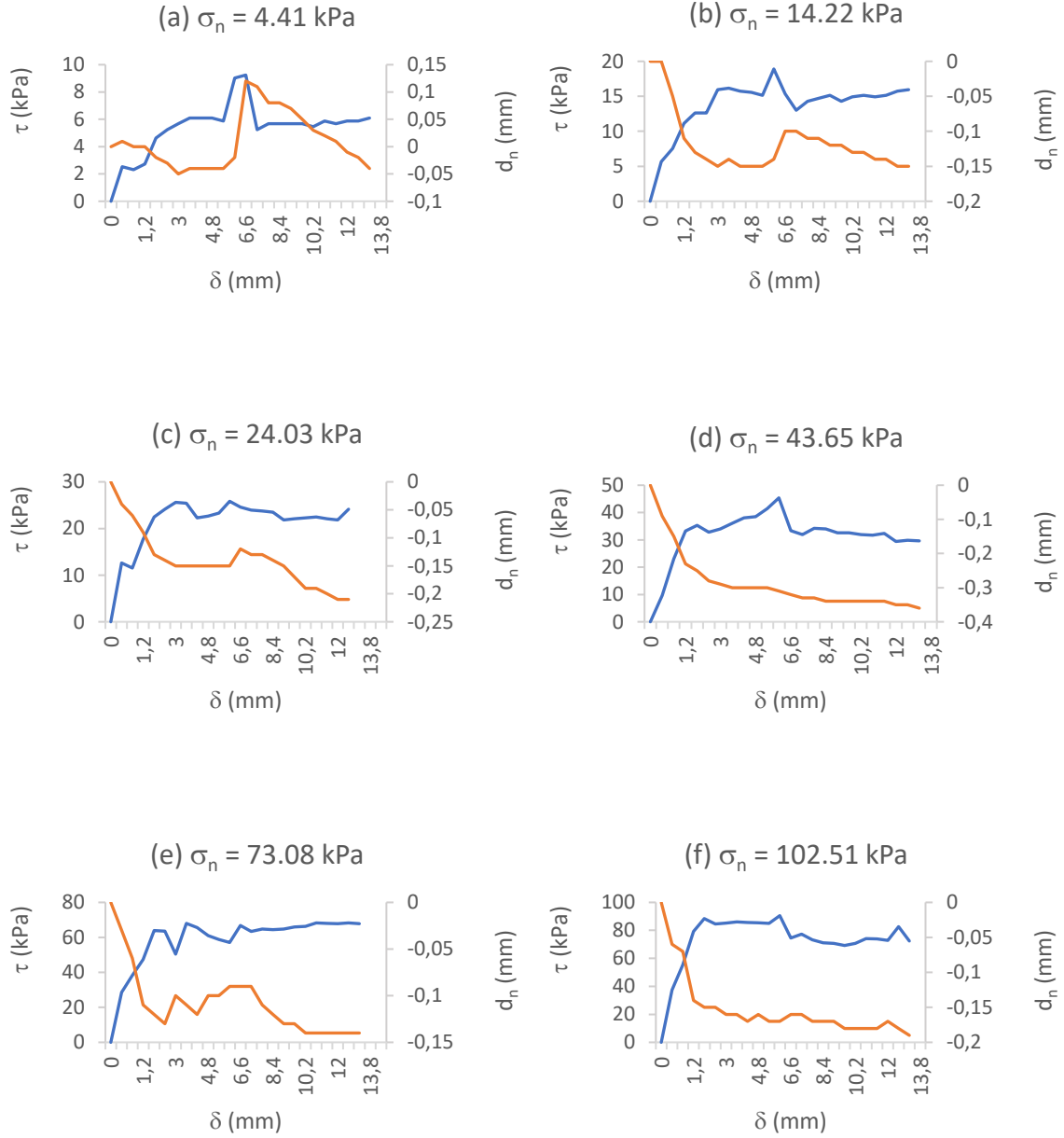
**EK-11:** 1.66 karışım oranlı ve JRC 14-16 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



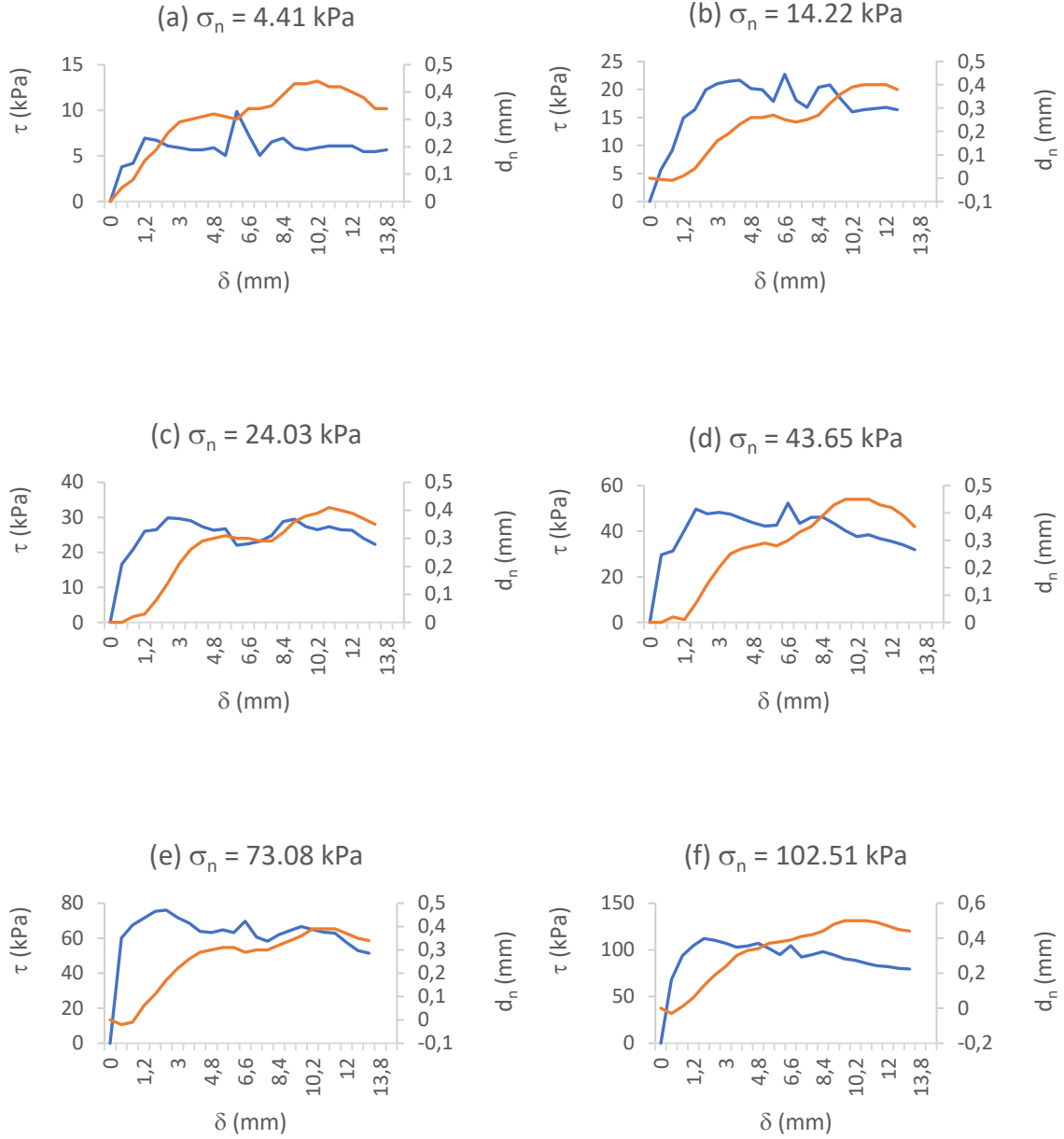
**EK-1m:** 1.66 karışım oranlı ve JRC 18-20 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



**EK-1n:** 2.8 karışım oranlı ve JRC 0-2 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.

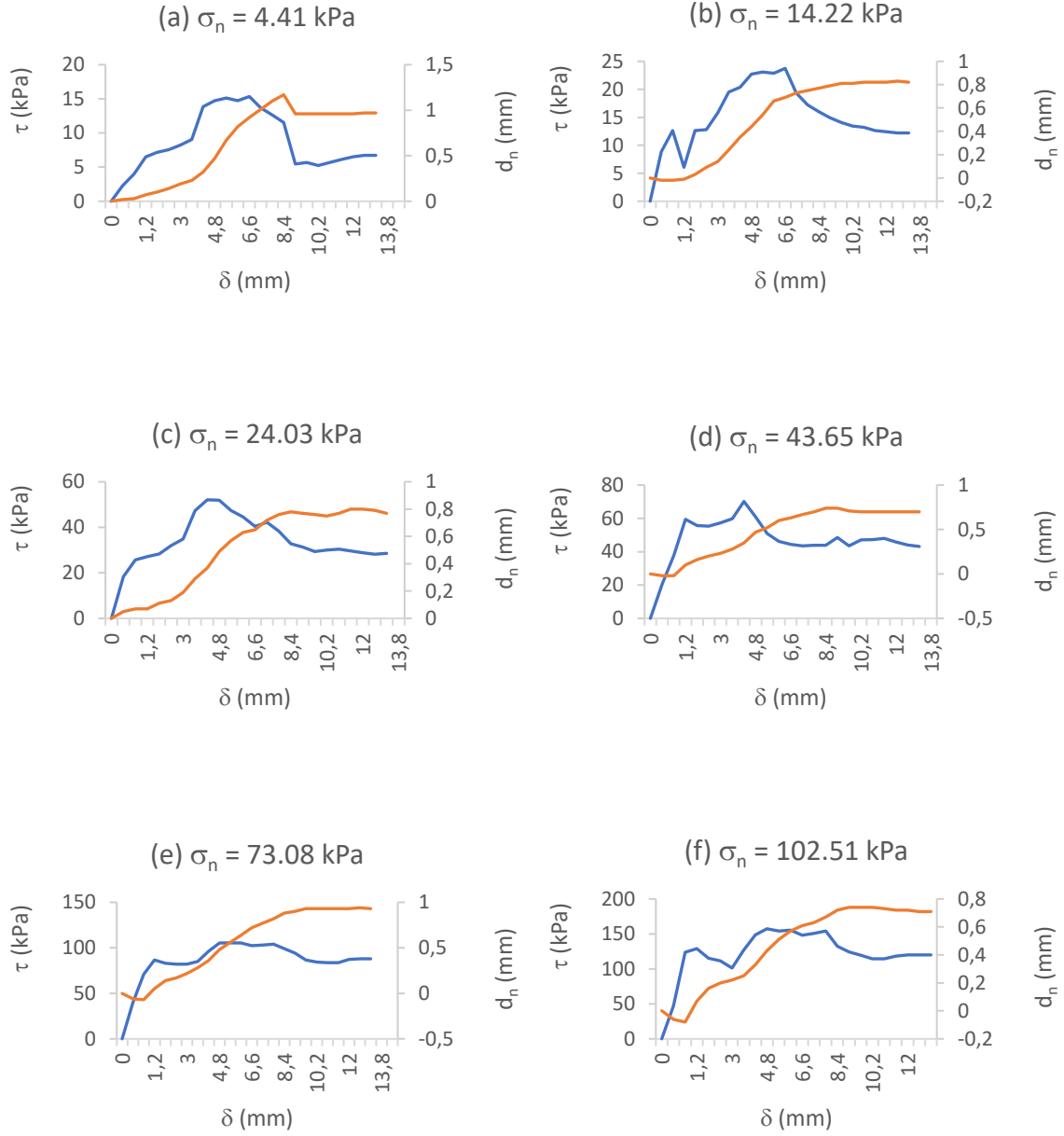


**EK-1o:** 2.8 karışım oranlı ve JRC 4-6 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.

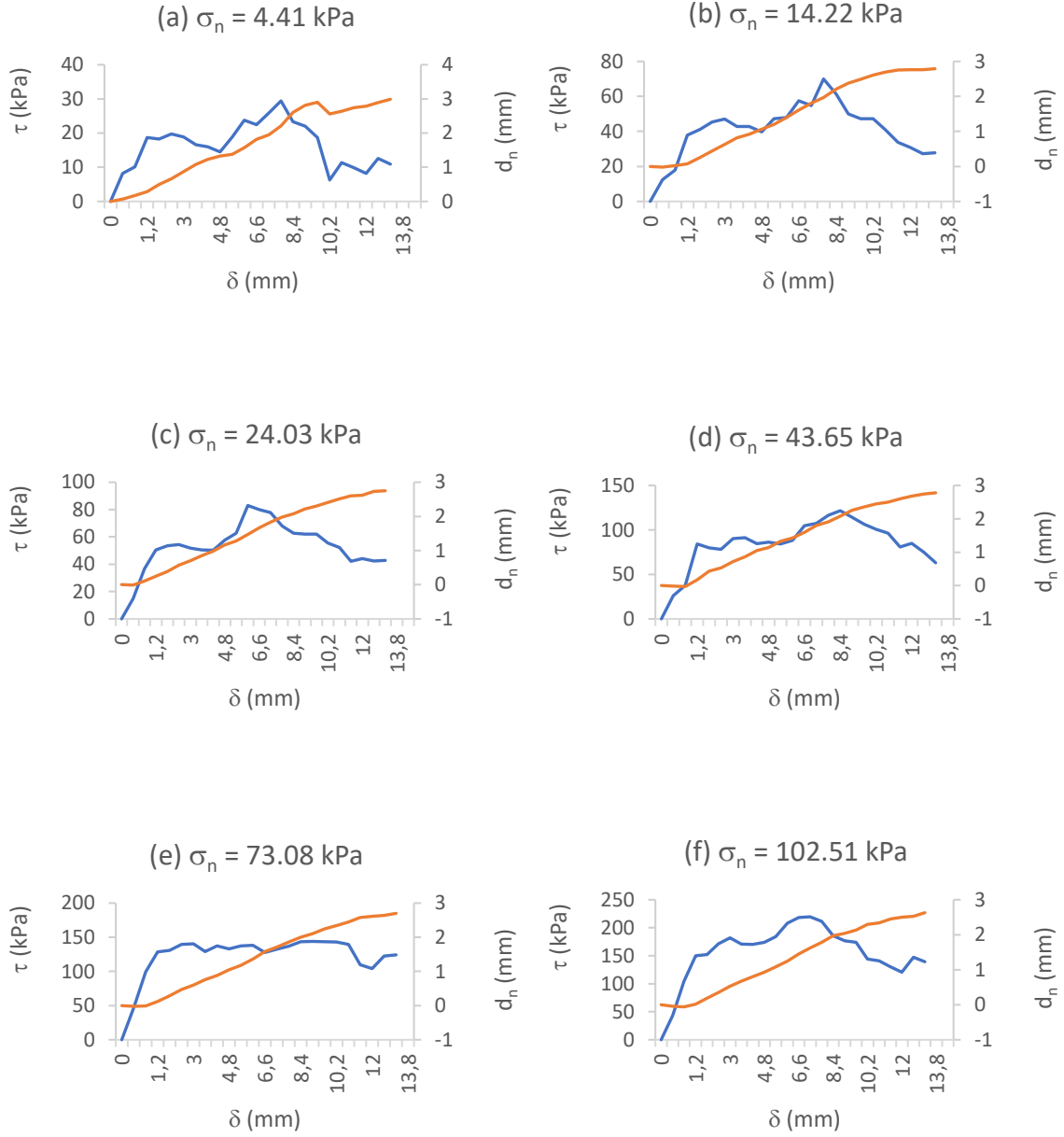




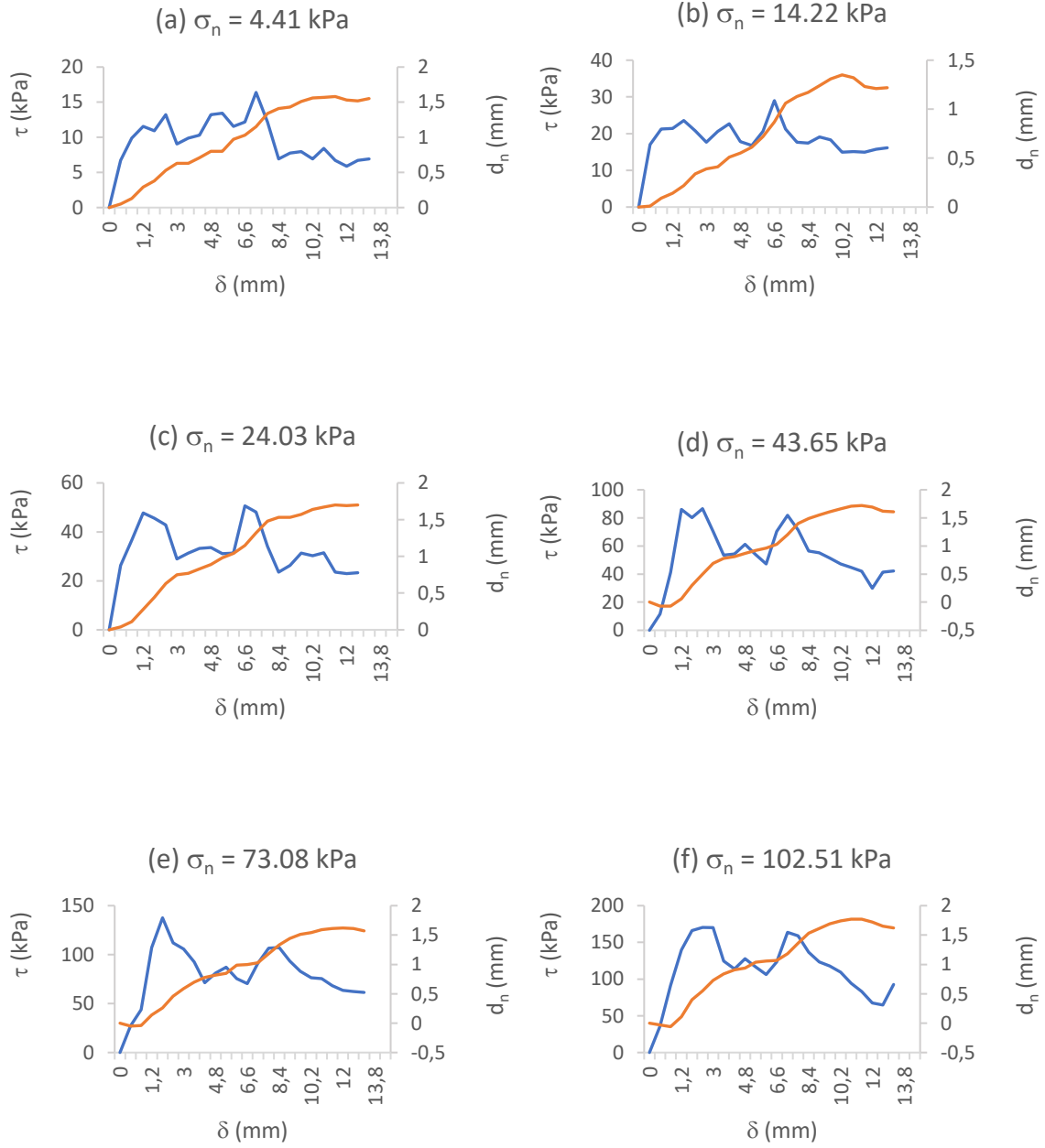
**EK-1ö:** 2.8 karışım oranlı ve JRC 8-10 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



**EK-1p:** 2.8 karışım oranlı ve JRC 14-16 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



**EK-1r:** 2.8 karışım oranlı ve JRC 18-20 profile sahip örnekler üzerinde, farklı normal gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen  $\delta$  değerlerine karşılık çizilen  $\tau$  (mavi) ve  $d_n$  (turuncu) grafikleri.



## EK-2: Tezden Üretilmiş Yayın

Solak, K.C., Tuncay, E. An evaluation on Barton-Bandis shear strength criterion for discontinuities in weak materials under low normal stresses. *Bull Eng Geol Environ* **82**, 411 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03434-7>

Bulletin of Engineering Geology and the Environment (2023) 82:411  
<https://doi.org/10.1007/s10064-023-03434-7>

ORIGINAL PAPER



## An evaluation on Barton-Bandis shear strength criterion for discontinuities in weak materials under low normal stresses

Kemal Cem Solak<sup>1</sup> · Ergün Tuncay<sup>1</sup>

Received: 11 February 2023 / Accepted: 21 September 2023 / Published online: 13 October 2023  
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2023

### Abstract

The shear strength parameters of the discontinuity surfaces should be acquired for the investigation of discontinuity-controlled instabilities in rock masses. Particularly in weak rocks, it is highly challenging to collect samples from the field and prepare laboratory test samples without affecting the features of the discontinuities. Therefore, empirical methods are gaining importance for determining the strength of discontinuities in such rocks. The purpose of this study is to assess how well the Barton-Bandis criterion performed on samples with low strength under low normal stresses. Artificial samples using various plaster-water mixtures having low compressive strengths with standard roughness profiles were prepared for conducting direct shear tests. The input parameters of Barton-Bandis criterion were determined by laboratory experiments; empirical failure envelopes were drawn, and the results were compared. Based on detailed evaluations, it was seen the criterion has some limitations for low normal stresses. Besides, to determine the joint compressive strength parameter, needle penetration test may be more effective than the Schmidt hammer test especially for low strength materials with the unweathered discontinuity surfaces. According to the results of comparison among digitized data from profilometer, photogrammetric approach (SfM), and optical scanner (SLS) methods, conclusion demonstrates that all of them can be preferred to determine the joint roughness coefficient (JRC) in an acceptable range for the Barton-Bandis criterion. Among them, profilometer and SfM are both easily accessible to all users. However, it should be emphasized that profilometer is still more practical method to estimate the JRC.

**Keywords** Shear strength of discontinuities · Barton-Bandis criterion · Photogrammetry · Optical scanner · Needle Penetrometer