İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKSİZLİK İÇEREN ORTAMLARIN MEKANİK MODELLEMESİ İÇİN PÜRÜZLÜLÜĞÜN KURAMSAL VE DENEYSEL YÖNTEMLER İLE SAYISAL TANIMI

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Kayhan DEVELİ

Anabilim Dalı : JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

OCAK 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKSİZLİK İÇEREN ORTAMLARIN MEKANİK MODELLEMESİ İÇİN PÜRÜZLÜLÜĞÜN KURAMSAL VE DENEYSEL YÖNTEMLER İLE SAYISAL TANIMI

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Kayhan DEVELİ

(505962015)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Ekim 2005

Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Ocak 2006

Tez Danışmanı : **Prof.Dr. Mahir VARDAR**

Diğer Jüri Üyeleri **Prof.Dr. Erdoğan YÜZER (İ.T.Ü.)**

Prof.Dr. Kutay ÖZAYDIN (Y.T.Ü.)

Prof.Dr. Mustafa ERDOĞAN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Reşat ULUSAY (H.Ü.)

OCAK 2006

ÖNSÖZ

Süreksizlik düzlemlerinin yüzey pürüzlülüğünü alansal olarak ifade edebilen, mekanik dayanım parametreleri ile ilişkilendirilebilir olup, 2-boyutlu analizlere dayalı metodlar ile hesaplanan sayısal pürüzlülük tanımlamalarının yapılmasını amaçlayan bu çalışmayı yöneten, araştırma programının her aşamasını yakından izleyerek bilimsel katkı ve önerilerde bulunan değerli hocam ve danışmanım İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Dekanı Sayın Prof. Dr. Mahir VARDAR' a içtenlikle teşekkür ederim. Çalışmanın her aşamasında, edindiğim bulgular ile ilgili değerli bilimsel görüş ve önerilerini aldığım, hocalarım İTÜ Maden Fakültesi Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Erdoğan YÜZER'e , Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN' a ve ayrıca bilimsel önerilerinden dolayı Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Reşat ULUSAY'a sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim. Destekleyici katkılarından dolayı İTÜ Maden Fakültesi Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Mustafa ERDOĞAN' a ve başta Dr. Müh. Rahmi EYÜBOĞLU olmak üzere tüm Anabilim Dalı çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Yüzey pürüzlülüğünün alansal olarak sayısallaştırılmasında kullanılmak üzere bu çalışma için özel olarak dizayn edilip geliştirilen, çalışma için gerekli ana verileri toplayan, "bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı" nın tasarımından imalatına kadar olan her aşamasında birlikte çalıştığım ve tanımlanan bu zaman aralığında üniversite tahsili yapmakta olmasına rağmen değerli zamanının önemli bir kısmını harcayan, kardeşim, Makina Mühendisi Özgür Gökhan DEVELİ' ye sonsuz teşekkürleri borç bilirim. Gerek "bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı" nın, gerekse mekanik sürtünme deneylerinde kullanılmak üzere, yine bu çalışma için özel olarak dizayn edilip geliştirilen "laboratuvar direkt kesme deney cihazı" nın elektronik kontrol ünitelerinin yapımında, ilgili bilgisayar yazılımların hazırlanmasında hep yanımda olan, çalışma süresince değerli görüş ve önerileri ile çok önemli katkılar sağlayan Fizik Yüksek Mühendisi Cumhur ÇÖMLEKÇİ' ye sonsuz teşekkür ederim.

TÜBİTAK Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu tarafından YDABÇAG-198Y016 Nolu proje ile çalışmaya önemli katkı sağlanmıştır. TÜBİTAK kurumuna önemli katkılarından dolayı teşekkür ederim. Değerli bilimsel görüşlerinden herzaman yaralandığım Doç. Dr. Tayfun BABADAĞLI' ya, mineralojik ve petrografik analizlerdeki yardımlarından dolayı Mineraloji ve Petrografi Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi Orhan YAVUZ' a ve destekleyici katkılarından dolayı Maden Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Dr. Müh. Ömür ACAROĞLUNA çok teşekkür ederim.

Tahsil hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü fedakarlığı yapan, hiç bir olanaktan mahrum bırakmayan sevgili anne ve babama sonsuz şükranlarımı sunarım. Desteklerinden dolayı kardeşlerime, çalışmalarım sırasında gösterdiği anlayış, sabır ve vermiş olduğu yüksek moralden dolayı eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2005 Kayhan DEVELİ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR vi
TABLO LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ ix
SEMBOL LİSTESİ xix
ÖZET xxi
SUMMARY xxiv

1 GİRİŞ 1
1.1 Problemin Tanıtımı 1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Yöntem 3

2 LİTERATÜR ÖZETİ 6
2.1 Pürüzlülük Üzerine Yapılmış Tanımlamalar 6
2.1.1 Nitel tanımlamalar 6
2.1.2 Nicel tanımlamalar 11
2.2 Pürüzlülük Ölçüm Düzenek ve Cihazlarının Tarihsel Gelişimi 16
2.3 Süreksizliklerin Kesme Dayanımı Üzerine Yapılmış Başlıca Çalışmalar 26

3 SÜREKSİZLİK ÖRNEKLERİNİN ALINDIĞI ÇAYELİ TÜNELİ KAZI SAHASININ JEOLOJİSİ 36
3.1 Konum 36
3.2 Çayeli Tünellerinin Bulunduğu Bölgenin Genel Jeolojisi 36
3.2.1 Bölge ve dolayında yapılmış önceki çalışmalar 36
3.2.2 Stratigrafi ve petrografi 40
3.2.2.1 Hemşindere formasyonu (üst kretase) 40
3.2.2.2 Rize formasyonu (üst kretase – paleosen) 42
3.2.2.3 Kaplıca formasyonu (alt – orta eosen) 42
3.2.2.4 Melyat formasyonu (alt – orta eosen) 42
3.2.2.5 Pazar formasyonu (miyosen) 43
3.2.2.6 Hamidiye formasyonu (plio – kuvaterner) 43
3.2.2.7 Taraça ve alüvyonlar (kuvaterner) 43
3.2.3 Yapısal jeoloji 44
3.3 Çayeli Tüneli Kazı Sahasının Jeolojisi 44
3.3.1 Stratigrafi ve petrografi 44
3.3.1.1 Melyat formasyonu (alt – orta eosen) 44
3.3.1.2 Pazar formasyonu (miyosen) 48
3.3.1.3 Alüvyon (kuvaterner) 48
3.3.2 Yapısal jeoloji 48
3.3.2.1 Tabakalar 48
3.3.2.2 Süreksizlikler 48

4 ARAŞTIRMA İÇİN GEREKLİ OLAN ÖZEL LABORATUVAR CİHAZLARININ GELİŞTİRİLMESİ 51
4.1 Yüzey Pürüzlülüğünün Sayısallaştırılması İçin Geliştirilien Bilgisayar Kontrollü Yüzey Tarama Cihazı 51

4.1.1 Mekanik tasarım 51
4.1.2 Kontrol yazılımı “SG2ULT” 53
4.1.3 Çalışma prensibi 54
4.1.4 Elektronik kontrol ünitesi 56
4.1.5 Bipolar step motorlar ve çalışma prensibleri 57
4.1.6 Bipolar step motor sürücü devresi 59
4.2 Mekanik Sürtünme Deneyleri İçin Geliştirilen Direkt Kesme Deney Cihazı 61
4.2.1 Kesme kutusu 62
4.2.2 Hidrolik ünite 63
4.2.3 Veri toplama ve işleme ünitesi (ölçüm sensörleri, bilgisayar donanım ve yazılımı) 64

5 SÜREKSİZLİK YÜZEYLERİNİN SAYISALLAŞTIRILMASI VE LABORATUVAR DİREKT KESME DENEYLERİ 67
5.1 Süreksizlik Örneklerinin Hazırlanması 67
5.2 Süreksizlik Yüzeylerinin Sayısallaştırılması 73
5.3 Laboratuvar Direkt Kesme Deneyleri ve Sonuçları 74

6 SÜREKSİZLİKLERİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN FRAKTAL GEOMETRİ YAKLAŞIMI İLE TANIMLANMASI 79
6.1 Fraktal Geometri Kavramı 79
6.2 Kendine Benzerlik (Self-Similarity) ve Kendine Yakınsallık (Self-Affinity) 84
6.3 Süreksizlik Yüzeylerinin Fraktal Boyutunu Hesaplamak İçin Güç Spektrum Yoğunluğu Analizi Yöntemi 88
6.4 Süreksizlik Yüzeylerinin Fraktal Boyutunu Hesaplamak İçin Üçgen Prizma Yüzey Alanı Yöntemi 95

7 ÖTELENEN SÜREKSİZLİKLERDE DEĞME ALANLARININ GELİŞİM MEKANİZMASI 104
7.1 Değme Alanlarının Hesabı İçin Yeni Bir Yaklaşım 109

8 FARKLI YÖNTEMLER İLE HESAPLANAN PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİNİN KESME DENEYLERİ İLE DEĞİŞİMİ 131
8.1 Kesme Yönündeki Maksimum Olası Değme Alanının (A_0) Kesme ile Değişimi 131
8.2 Kesme Yönündeki Şekil Parametresinin (C) Kesme İle Değişimi 131
8.3 Kesme Yönündeki θ^*_{max}/C ve A_0/C Oranlarının Kesme İle Değişimi 134
8.4 Fraktal Boyutların (D_{psd} ve D_{tpsam}) Kesme Deneyleri İle Değişimi 134
8.5 Yenilme Mekanizmalarında Pürüzlülüğün Artma ve Azalma Koşullarının İrdelenmesi 134

9 FARKLI YÖNTEMLERLE HESAPLANAN PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİNİN BİRBİRLERİ VE EN BÜYÜK KESME DAYANIM ORANLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI 143
9.1 Fraktal Boyut Değerleri ile Kesme Yönündeki Yüzey Geometrisini Tanımlayan Parametreler Arasındaki İlişkilerin Araştırılması 143
9.1.1 Kesme yönündeki şekil parametresi (c) ile fraktal boyutlar (dtpsam) arasındaki ilişki 143
9.1.2 Kesme yönündeki θ^*_{max}/C oranı ile fraktal boyutlar (D_{tpsam}) arasındaki ilişki 144

9.1.3 Kesme yönündeki A_0/C oranı ile fraktal boyutlar (D_{tpsam}) arasındaki ilişki 145
9.1.4 Kesme yönündeki θ^*_{max}/C ile A_0/C Oranları arasındaki ilişki 146
9.2 Fraktal Boyut Değerleri ve Kesme Yönündeki Pürüzlülüğü Tanımlayan Parametrelerin En büyük Kesme Dayanım Oranları İle Karşılaştırılması 147
9.2.1 En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile yüzey fraktal boyutları (D_{tpsam}) arasındaki ilişki 148
9.2.2 En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönündeki pürüzlülük parametreleri (C) arasındaki ilişki 148
9.2.3 En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönündeki θ^*_{max}/C oranları arasındaki ilişki 149
9.2.4 En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönündeki A_0/C oranları arasındaki ilişki 150

10 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜN SAYISAL DEĞERİNE ETKİYEN FAKTÖRLER 154
10.1 Veri Örnekleme Aralığının Üçgen Prizma Yüzey Alanı Yöntemi İle Hesaplanan Fraktal Boyutlar Üzerine Etkisi 154
10.2 Veri Örnekleme Aralığının Yöne Bağlı Yüzey Geometrisini Tanımlayan Parametreler Üzerine Etkisi 157
10.3 Heterojenlik Etkisi 164
10.4 Anizotropi Etkisi 166

SONUÇLAR VE TARTIŞMA 169

KAYNAKLAR 173

EKLER 180

ÖZGEÇMİŞ 257

KISALTMALAR

JRC	: Süreksizlik pürüzlülük katsayısı
JMC	: Süreksizlik uyumluluk katsayısı
JCS	: Süreksizlik duvarı basınç dayanımı
JRC_n	: Arazide belirlenen süreksizlik pürüzlülük kaysayısı
JCS_n	: Arazide belirlenen süreksizlik yüzeyi basınç dayanımı kaysayısı
PSD	: Güç Spektrum Yoğunluğu Analizi Yöntemi
TPSAM	: Üçgen Prizma Yüzey Alanı Yöntemi

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 : Süreksizlik yüzeyi nitel pürüzlülük tanımlaması (Piteau, 1970) 7
Tablo 2.2 : 9 tipik profil sınıfları için yapılan nitel pürüzlülük tanımları (ISRM, 1978). 11
Tablo 2.3 : Standart profiller için JRC, ortalama pürüzlülük açısı (i), fraktal boyut (D) ilişkileri (Türk ve diğ., 1987). 13
Tablo 2.4 : JRC değer aralıkları için hesaplanan fraktal boyutlar (Lee ve diğ., 1990). 14
Tablo 4.1 : Kullanılan step motorların teknik özellikleri 59
Tablo 5.1 : Farklı sabit normal gerilme değerleri için en büyük kesme dayanımları 76
Tablo 5.2 : Farklı sabit normal gerilme değerleri için dilatasyon açıları 77
Tablo 5.3 : İçsel sürtünme açısı (ϕ) ve görünür kohezyon (c_a) değerleri 78
Tablo 6.1 : Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemi kullanılarak, direkt kesme deneyleri öncesi ilksel durum ve 1 no' lu direkt kesme deneyi sonrası kesilen yüzeyler için hesaplanılan fraktal boyut (D_{psd}) değerleri 92
Tablo 6.2 : Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemi kullanılarak, 2 ve 3 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası kesilen yüzeyler için hesaplanılan fraktal boyut (D_{psd}) değerleri 93
Tablo 6.3 : Hücre boyutuna (s) bağlı olarak toplam yüzey alanının [S(s)] değişimi 99
Tablo 6.4 :Üçgen prizma yüzey alanı yöntemi kullanılarak, direkt kesme deneyleri öncesi ilksel durum ve 1 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası kesilen yüzeyler için hesaplanılan fraktal boyut (Dtpsam) değerleri 101
Tablo 6.5 : Üçgen prizma yüzey alanı yöntemi kullanılarak, 2 ve 3 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası kesilen yüzeyler için hesaplanılan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri 102
Tablo 7.1 : S25 ve S27 no'lu süreksizlik örneklerinin alt blok yüzeyleri (S25A ve S27A) için hesaplanan toplam potansiyel değme alanları (A_θ^*) 113
Tablo 7.2 : Direkt kesme deneyleri öncesi sayısallaştırılmış süreksizlik alt ve üst blokları için hesaplanan kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler 118
Tablo 7.3 : 1 no'lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış süreksizlik alt ve üst blokları için hesaplanan kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler 122
Tablo 7.4 : 2 no'lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış süreksizlik alt ve üst blokları için hesaplanan kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler 123
Tablo 7.5 : 3 no'lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış süreksizlik alt ve üst blokları için hesaplanan kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler 124
Tablo 10.1: Aynı yüzeylerin farklı örnekleme aralıkları (Δ) ile sayısallaştırılmasından oluşturulan veri setleri için üçgen prizma yüzey alanı yöntemi ile hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri 155

Tablo 10.2 : Aynı yüzeylerin farklı veri örnekleme aralıklarıyla (Δ) sayısallaştırılmasından oluşturulan veri setleri için değme alanları yöntemi ile hesaplanan kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı parametreler.....158
Tablo 10.3 : Aynı yüzeyler üzerindeki farklı bölgeleri için hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri 165
Tablo 10.4 : Yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametrelerin aynı yüzey üzerinde seçilen farklı yönler için aldıkları değerler 167

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 : Birinci ve ikinci derceden yüzey düzensizlikleri (Patton, 1966)..... 6
Şekil 2.2 : Değişik boyutlu yüklemelerde yüzey geometrileri (Deere, 1966)..... 7
Şekil 2.3 : a) Farklı çaplardaki diskler için net üzerinde en büyük dağılım konturları , b) Pusula ve profilograf metodlarında örnekleme aralığına bağlı olarak en büyük eğim değerlerindeki değişim (Fecker ve Rengers, 1971)..... 8
Şekil 2.4 : 10 standart çatlak pürüzlülük profili ve karşılık gelen JRC değerleri (Barton ve Choubey, 1977)..... 9
Şekil 2.5 : 9 tipik pürüzlülük profili (ISRM, 1978). 10
Şekil 2.6 : Profilin sayısallaştırılması (Tse ve Cruden,1979).....11
Şekil 2.7 : 10 standart profil (Barton ve Choubey,1977) için, JRC değerleri ile hesaplanan Z2 değerleri arasındaki ilişki (Tse ve Cruden, 1979)...12
Şekil 2.8 : 10 standart profil için JRC-D (fraktal boyut) ilişkisi (Lee ve diğ., 1990). 14
Şekil 2.9 : Eş derinlik ölçüm mikroskobu (Rengers, 1970).....17
Şekil 2.10 : Profilograf (Fecker ve Rengers, 1971).....18
Şekil 2.11 : Süreksizlik yüzey profillerinin arazide pusula ve farklı çaplardaki diskler ile ölçülmesi (Fecker, 1970 ; Fecker ve Rengers, 1971).....19
Şekil 2.12 : Profilograf (Lee ve diğ., 1990) 21
Şekil 2.13 : Çatlak yüzey pürüzlülüğünün mekanik ölçümü (Ferraro ve Giani, 1990). 21
Şekil 2.14 : Yüzey pürüzlülük tarayıcısı ile ölçme prensibi (Ayday ve Göktan, 1990).....22
Şekil 2.15 : Laser ile süreksizlik düzlemi yüzey geometrisinin kaydedilmesi (Ord ve Cheung, 1991).....23
Şekil 2.16 : Arazi profilometresinin farklı açılardan görünümleri (Aydan ve diğ., 1996).....23
Şekil 2.17 : Süreksizlik yüzeylerinin alansal olarak sayısallaştırılması için bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı (Develi, 1996) 25
Şekil 2.18 : İdeal testere dişli modeller için doğrusal olmayan (bilineer) yenilme zarfları (Patton, 1966) a) farklı pürüz eğim açılarına sahip modeller durumunda. b) aynı eğim açısına, farklı pürüz sayılarına sahip modeller durumunda.....27
Şekil 2.19 : Farklı malzeme özelliklerine sahip testere dişli modellerin yenilme zarfları (Patton, 1966) 28
Şekil 2.20 : Testere dişli modeller için örneğin dilatasyonu ve pürüzlerin kesilmesi aşamaları için için kuramsal Mohr zarfı (Patton, 1966).....29
Şekil 2.21 : Testere dişli modeller için dilatasyon ve kesilme olaylarının şematik sunumu (Einstein ve diğ., 1970) a) başlangıç durumu b) dilatasyon ve ardından pürüzün tepe kısmından kesilmesi c) dilatasyona izin verilmeyen yüksek normal gerilmelerde pürüzün tabanından kesilmesi.....30
Şekil 2.22 : Doğal süreksizliklerde yüzeyler arasındaki değme alanları ve kenetlenme (Einstein ve diğ., 1970).....31
Şekil 2.23 : Dilatasyon (ν) ve kesme alanı oranını (a_s) tanımlayan şematik kesit. 31

Şekil 3.1 : Çayeli tünelleri kazı sahasının yer bulduru haritası. 37
Şekil 3.2 : Bölgenin genelleştirilmiş dikme kesiti (Korkmaz ve Gedik, 1988).....41
Şekil 3.3 : Çayeli tüneli kazı sahasının dikme kesiti.....45
Şekil 3.4 : Tüf örneğinden hazırlanan bir ince kesitin mikroskop altında görünüşü Pl : Plajiyoklaz, Pr : Piroksen, H : Hornblend, Kp : Kayaç parçacığı 46
Şekil 3.5 : Tüflerin boşluklarında gelişen ikincil zeolit mineralizasyonuna örnek ..47
Şekil 3.6 :Melyat formasyonuna ait volkanitlerin içerdiği süreksizliklerden ölçülen 151 adet yönelim değerinden hazırlanan kontur diyagramı ...49
Şekil 3.7 :Melyat formasyonuna ait volkanitler içinde gelişen 151 adet süreksizlik düzleminin a) eğim yönlerine ait gül diyagramı b) eğim açıları dağılım histogramı 50
Şekil 4.1 : Geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı 1: SPM1 x ekseni boyunca hareketi sağlar, 2: SPM2 y ekseni boyunca hareketi sağlar, 3: SPM3 z ekseni boyunca hareketi sağlar, 4: Ölçüm iğnesi, 5: Örnek taşıyıcı, 6: Kontrol Ünitesi 7: Rijit Platform. (SPM: Step motor) (x, y ve z eksenlerindeki boyutlar sırasıyla 660, 660 ve 574 mm'dir). 51
Şekil 4.2 : Geliştirilen yüzey tarama cihazı a) 1: ölçüm iğnesi, 2: anahtar b) 3: sonsuz vidalar, 4: doğrusal hareket rulmanlarının içinden geçen kızak miller, 5: hareketli arabalar. 52
Şekil 4.3 : Ölçümle eş zamanlı olarak bilgisayar ekranından izlenebilen ölçüme ilişkin bilgiler.....53
Şekil 4.4 : Step motorun adım sayısını kullanarak yazılım tarafından yükseklik hesaplanmasına ilişkin açıklayıcı şema.....55
Şekil 4.5 : Yüzey tarama cihazı elektronik kontrol ünitesi 56
Şekil 4.6 : Bipolar bir step motorun basitleştirilmiş iç yapı şeması. 57
Şekil 4.7 : İki fazlı bipolar step motor için sürüş modları (Dönüşler saat yönündedir). 58
Şekil 4.8 : Gerçek bir bipolar step motor kesiti. 58
Şekil 4.9 : Bir motoru sürmek için kullanılan bipolar step motor sürücü devresi. ..60
Şekil 4.10 : Geliştirilen laboratuvar direkt kesme deney cihazı 61
Şekil 4.11 : Kesme kutusu montaj şeması.....62
Şekil 4.12 : Hidrolik pistonların rijit çerçeve içindeki montaj düzeni ve kesme kutusu ile olan konfigürasyonları. 63
Şekil 4.13 : Direkt kesme deney cihazı hidrolik ünitesi 64
Şekil 4.14 : Yük ve deformasyon ölçüm sensörlerinin kesme kutusu ile olan konfigürasyonları; 1: Yatay yük pistonu, 2: Düşey yük pistonu, 3: Yatay yük ölçer, 4: Düşey yük ölçer, 5: Yatay boy ölçer, 6: Düşey boy ölçer, 7: Sabit normal yük askısı, 8: Küresel başlık, 9: Sabit üst çenet, 10: Hareketli alt çenet, 11: Kayar yatak kutusu 65
Şekil 5.1 : Prizma şekilli süreksizlik örneklerinin hazırlanması: a) ve b) araziden alınmış süreksizlik örneklerinin biçimlendirilmesi c) prizma şekilli süreksizlik örneklerinin kesilerek boyutlandılması d) alt ve üst bloklar arasına pamuk yerleştirilerek orijinal yüzey geometrisinin korunması 68
Şekil 5.2 : İmal edilen alüminyum kalıp döküm kutuları: a) süreksizlik içeren örneğin konumlandırıcı kenet yardımıyla alt blok döküm kutusuna yerleştirilmesi b) süreksizlik referans hattına paralel konumlandırılmış bir örneğin döküm kutuları içindeki görünümü 1: Alt blok döküm kutusu, 2: Üst blok döküm kutusu, 3:Konumlandırıcı kenet, 4: Kenet ayar vidaları, 5: Örnek, AA' Süreksizlik hattı, BB': Süreksizlik referans hattı, H: Dolgu malzemesi döküm seviyesi.....70

Şekil 5.3 : Dolgu malzemesi içinde kalıba alınmış bir süreksizlik örneği a) h ≥ 5 mm koşulunun (ISRM, 1981) sağlanması, b) süreksizlik örneği alt ve üst blok yüzeylerinin kalıblar içindeki görünümü.....71
Şekil 5.4 : Dolgu malzemesi içinde kalıba alınmış süreksizlik örneği alt ve üst blok yüzeylerinin genel görünümü (S1L: alt blok yüzeyi, S1U: üst blok yüzeyi).....72
Şekil 6.1 : Güney Norveç kıyı şeridi (Mandelbrot, 1982).....82
Şekil 6.2 : Güney Norveç kıyı şeridi için cetvel uzunluğunun (r) fonksiyonu olarak tekrar sayısı [N(r)]. D=1.52 (Mandelbrot, 1982).....82
Şekil 6.3 : Topolojik olarak 1-boyutlu (D_T=1) olan gelişigüzel bir eğri için cetvel yada pergel (ruler yada divider) ile grid yada kutu sayma (box counting) yöntemlerinin uygulanması (Mandelbrot, 1988) 83
Şekil 6.4 : Self-similar (Kendine Benzer) ve Self-affine (kendine Yakınsal) yüzey profilleri (Power ve Tullis, 1991) 84
Şekil 6.5 : Güç spektrum yoğunluğu analizi ile hesaplanan fraktal boyut (D_{psd}) değerlerinin örneklere göre değişimi 94
Şekil 6.6 : sxs boyutundaki kare hücre (piksel) içinde oluşturulan üçgen prizmaların şematik görünümü.....96
Şekil 6.7 : Taban kenar uzunluğu s olan hücrenin üst görünümü (Clarke, 1986). 97
Şekil 6.8 : Artan hücre boyutları için toplam yüzey alanı hesaplama aşamaları...98
Şekil 6.9 : Rezolasyon alanı (sxs) - toplam yüzey alanı S(s) ilişkisi. D_{tpsam} = 2,0073 100
Şekil 6.10 : Üçgen prizma yüzey alanı yöntemi ile hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerlerinin örneklere göre değişimi.....103
Şekil 7.1 : Sayısallaştırılmış yüzey verisinin üçgenleştirilmesi (Graselli ve diğ.,2002) 106
Şekil 7.2 : Kesme yönünün bir fonksiyonu olarak görünür eğim açısının (θ*) geometrik tanımı (Graselli ve diğ.,2002) 106
Şekil 7.3 : İki farklı yüzey için, görünür eğim açısı (θ^*) ile toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*), arasındaki ilişki (Graselli ve diğ., 2002) 107
Şekil 7.4 : sxs boyutundaki kare grid hücresi içinde oluşturulan üçgenlerin kesme yönündeki görünür eğim açıları (θ^*).....110
Şekil 7.5 : Toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) ile görünür eğim açısı (θ^*) arasındaki ilişki a) S25A yüzeyi için b) S27A yüzeyi için.....114
Şekil 7.6 : S25A ve S27A yüzeylerinin 3-boyutlu sayısal görünümleri (S25A ve S27A sırasıyla S25 ve S27 no'lu süreksizlik örneklerinin alt blok yüzeyleridir.).....115
Şekil 7.7 : Değeri sıfırdan büyük olan hesaplanabilir en küçük görünür eğim açısını (θ^*_{min}) tanımlayan hücre.....116
Şekil 7.8 : Direkt kesme deneyleri öncesi sayısallaştırılmış yüzeyler için, toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) - görünür eğim açısı (θ^*) ilişkileri a) süreksizlik alt blokları için, b) süreksizlik üst blokları için 117
Şekil 7.9 : 1 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış yüzeyler için, toplam potansiyel değme alanı (Aθ*) - görünür eğim açısı (θ*) ilişkileri a) süreksizlik alt blokları için b) süreksizlik üst blokları için 119
Şekil 7.10 : 2 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış yüzeyler için, toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) - görünür eğim açısı (θ^*) ilişkileri a) süreksizlik alt blokları için b) süreksizlik üst blokları için 120

Şekil 7.11 : 3 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış yüzeyler için, toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) - görünür eğim açısı (θ^*) ilişkileri a) süreksizlik alt blokları için b) süreksizlik üst blokları için 121
Şekil 7.12 : İki farklı yüzey için hesaplanan maksimum olası değme alanları a) S2 no'lu süreksizlik örneğinin alt (S2A) ve üst (S2U) blokları için b) S10 no'lu süreksizlik örneğinin alt (S10A) ve üst (S10U) blokları için 126
Şekil 7.13 : S2 no'lu süreksizlik örneğinin alt (S2A) ve üst (S2U) blokları için hesaplanan potansiyel değme alanları (Ia, Ib, Ic) ile kesme sırasında gelişen gerçek değme alanlarının (IIa, IIb, IIc) karşılaştırılması 128
Şekil 7.14 : S10 no'lu süreksizlik örneğinin alt (S10A) ve üst (S10U) blokları için hesaplanan potansiyel değme alanları (Ia, Ib, Ic) ile kesme sırasında gelişen gerçek değme alanlarının (IIa, IIb, IIc) karşılaştırılması 129
Şekil 8.1 : Kesme yönündeki maksimum olası değme alanlarının (A_0) kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları 132
Şekil 8.2 : Kesme yönündeki şekil parametresinin (C) kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları 133
Şekil 8.3 : Kesme yönündeki θ^*_{max}/C oranının kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları 135
Şekil 8.4 : Kesme yönündeki A_0/C oranının kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları 136
Şekil 8.5 : Kesme sırasında gerilme yoğunlaşması olan kenarlarda gerçekleşen kopma olayının şematik gösterimi 137
Şekil 8.6 : Fraktal boyut değerlerinin tekrar hesaplandığı sınır koşullarından etkilenmeyen alanının (B alanı) şematik gösterimi 138
Şekil 8.7 : Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemiyle 32x32' lik gridler için hesaplanmış fraktal boyut (D_{psd}) değerlerinin kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları 139
Şekil 8.8 : Üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle 33x33' lük gridler için hesaplanmış fraktal boyut (D_{tpsam}) değerlerinin kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları 140
Şekil 9.1 : Kesme yönünde hesaplanan şekil parametresi (C) ile yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) arasındaki ilişki 144
Şekil 9.2 : Kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C oranı ile yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) arasındaki ilişki 145
Şekil 9.3 : Kesme yönünde hesaplanan A_0/C oranı ile yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) arasındaki ilişki 146
Şekil 9.4 : Kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C ile A_0/C oranları arasındaki ilişki 147
Şekil 9.5 : En büyük kesme dayanım oranları (τ_p/σ_N) ile yüzey fraktal boyutlarının (D_{tpsam}) karşılaştırılması 148
Şekil 9.6 : En büyük kesme dayanım oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönünde hesaplanan pürüzlülük parametresi (C) değerlerinin karşılaştırılması 149
Şekil 9.7 : En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C oranı değerlerinin karşılaştırılması 150
Şekil 9.8 : En büyük kesme dayanım oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönünde hesaplanan A_0/C oranı değerlerinin karşılaştırılması 151
Şekil 10.1 : Sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarının (Δ) üçgen prizma yüzey alanı yöntemi ile hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri üzerine etkisi 156

Şekil 10.2 : S27A yüzeyinin farklı örnekleme aralıkları (Δ) ile sayısallaştırılmasından elde edilen veri setleri için çizilen 3-boyutlu sayısal modeller ve hesaplanan fraktal boyutlar (D_{tpsam})....157
Şekil 10.3 : Sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarının (Δ) kesme yönündeki en büyük görünür eğim açısı (θ*max) değerleri üzerine olan etkisi.....160
Şekil 10.4 : S1A yüzeyinin farklı örnekleme aralıkları (Δ) ile sayısallaştırılmasındanelde edilen veri setlerinden hesaplanarak çizilen A_{θ}^{*} - θ^{*} ilişkileri 161
Şekil 10.5 : Sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarının (Δ) kesme yönündeki şekil parametresi (C) üzerine olan etkisi 162
Şekil 10.6 : Sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarının (Δ) kesme yönünde hesaplanan θ^{*}_{max}/C oranı üzerine olan etkisi 163
Şekil 10.7 : Sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarının (Δ) kesme yönünde hesaplanan A_0/C oranı üzerine olan etkisi 163
Şekil 10.8 : Yüzey pürüzlülüğünün heterojenliğinin araştırılması. a) Sayısallaştırılmış yüzeylere ait 65x65 boyutundaki orjinal kare gridlerin bölünmesi ile oluşturulan yeni gridler ve bölgeleri b) S6A yüzeyine ait orijinal grid için ve bu gridin bölünmesi ile oluşturulan 33x33 boyutundaki yeni gridler için çizilen 3-boyutlu sayısal modeller.....164
Şekil 10.9 : Aynı yüzeylerin farklı bölgeleri için hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerlerinin bölgelere göre değişimi ve yüzey pürüzlülüğünün heterojenliği.....165
Şekil 10.10: Yüzey pürüzlülüğünün anizotropisinin araştırıldığı yönler 166
Şekil 10.11: Yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametrelerin anizotropisi a) maksimum olası değme alanı (A_0) b) en büyük görünür eğim açısı (θ^{*}_{max}) c) şekil parametresi (C) d) θ^{*}_{max}/C oranı e) A_0/C oranı....168
Şekil B.1 : S1 örneği alt (S1A) ve üst (S1U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 180
Şekil B.2 : S2 örneği alt (S2A) ve üst (S2U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 180
Şekil B.3 : S3 örneği alt (S3A) ve üst (S3U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 181
Şekil B.4 : S4 örneği alt (S4A) ve üst (S4U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 181
Şekil B.5 : S5 örneği alt (S5A) ve üst (S5U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 182
Şekil B.6 : S6 örneği alt (S6A) ve üst (S6U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 182
Şekil B.7 : S7 örneği alt (S7A) ve üst (S7U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 183
Şekil B.8 : S8 örneği alt (S8A) ve üst (S8U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 183
Şekil B.9 : S9 örneği alt (S9A) ve üst (S9U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 184
Şekil B.10 : S10 örneği alt (S10A) ve üst (S10U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 184
Şekil B.11 : S11 örneği alt (S11A) ve üst (S11U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 185

Şekil B.12 : S12 örneği alt (S12A) ve üst (S12U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 185
Şekil B.13 : S13 örneği alt (S13A) ve üst (S13U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 186
Şekil B.14 : S14 örneği alt (S14A) ve üst (S14U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 186
Şekil B.15 : S15 örneği alt (S15A) ve üst (S15U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 187
Şekil B.16 : S16 örneği alt (S16A) ve üst (S16U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 187
Şekil B.17 : S17 örneği alt (S17A) ve üst (S17U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 188
Şekil B.18 : S18 örneği alt (S18A) ve üst (S18U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 188
Şekil B.19 : S20 örneği alt (S20A) ve üst (S20U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 189
Şekil B.20 : S21 örneği alt (S21A) ve üst (S21U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 189
Şekil B.21 : S22 örneği alt (S22A) ve üst (S22U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 190
Şekil B.22 : S23 örneği alt (S23A) ve üst (S23U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 190
Şekil B.23 : S25 örneği alt (S25A) ve üst (S25U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 191
Şekil B.24 : S26 örneği alt (S26A) ve üst (S26U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 191
Şekil B.25 : S27 örneği alt (S27A) ve üst (S27U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 192
Şekil B.26 : S28 örneği alt (S28A) ve üst (S28U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 192
Şekil B.27 : S29 örneği alt (S29A) ve üst (S29U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 193
Şekil B.28 : S30 örneği üst (S30U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 193
Şekil B.29 : S31 örneği alt (S31A) ve üst (S31U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 194
Şekil B.30 : S32 örneği alt (S32A) ve üst (S32U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli 194
Şekil B.31 : S1 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 195
Şekil B.32 : S2 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 195
Şekil B.33 : S3 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 196
Şekil B.34 : S4 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 196
Şekil B.35 : S5 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 197
Şekil B.36 : S6 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 197
Şekil B.37 : S7 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 198
Şekil B.38 : S8 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 198

Şekil B.39 : S9 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 199
Şekil B.40 : S10 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 199
Şekil B.41 : S11 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 200
Şekil B.42 : S12 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 200
Şekil B.43 : S13 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 201
Şekil B.44 : S14 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 201
Şekil B.45 : S15 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 202
Şekil B.46 : S16 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 202
Şekil B.47 : S17 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 203
Şekil B.48 : S18 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 203
Şekil B.49 : S20 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 204
Şekil B.50 : S21 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 204
Şekil B.51 : S22 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 205
Şekil B.52 : S23 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 205
Şekil B.53 : S25 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 206
Şekil B.54 : S26 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 206
Şekil B.55 : S27 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 207
Şekil B.56 : S28 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 207
Şekil B.57 : S29 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 208
Şekil B.58 : S30 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 208
Şekil B.59 : S31 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 209
Şekil B.60 : S32 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 209
Şekil B.61 : S1 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 210
Şekil B.62 : S2 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 210
Şekil B.63 : S3 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 211
Şekil B.64 : S4 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 211

Şekil B.65 : S5 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 212
Şekil B.66 : S6 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 212
Şekil B.67 : S7 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 213
Şekil B.68 : S8 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 213
Şekil B.69 : S9 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 214
Şekil B.70 : S10 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 214
Şekil B.71 : S11 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 215
Şekil B.72 : S12 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 215
Şekil B.73 : S13 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 216
Şekil B.74 : S14 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 216
Şekil B.75 : S15 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 217
Şekil B.76 : S16 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 217
Şekil B.77 : S17 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 218
Şekil B.78 : S18 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 218
Şekil B.79 : S20 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 219
Şekil B.80 : S21 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 219
Şekil B.81 : S22 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 220
Şekil B.82 : S23 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 220
Şekil B.83 : S25 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 221
Şekil B.84 : S26 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 221
Şekil B.85 : S27 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 222
Şekil B.86 : S28 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 222
Şekil B.87 : S29 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 223
Şekil B.88 : S30 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 223
Şekil B.89 : S32 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı 224
Şekil B.90 : S1 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 224
Şekil B.91 : S2 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 225
Şekil B.92 : S3 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 225
Şekil B.93 : S4 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 226
Şekil B.94 : S5 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 226

Şekil B.95 : S6 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 227
Şekil B.96 : S7 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 227
Şekil B.97 : S8 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 228
Şekil B.98 : S9 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 228
Şekil B.99 : S10 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 229
Şekil B.100 : S11 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 229
Şekil B.101 : S12 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 230
Şekil B.102 : S13 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 230
Şekil B.103 : S14 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 231
Şekil B.104 : S15 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 231
Şekil B.105 : S16 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 232
Şekil B.106 : S17 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 232
Şekil B.107 : S18 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 233
Şekil B.108 : S20 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 233
Şekil B.109 : S21 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 234
Şekil B.110 : S22 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 234
Şekil B.111 : S23 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 235
Şekil B.112 : S25 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 235
Şekil B.113 : S26 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 236
Şekil B.114 : S27 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 236
Şekil B.115 : S28 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 237
Şekil B.116 : S29 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 237
Şekil B.117 : S30 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 238
Şekil B.118 : S31 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 238
Şekil B.119 : S32 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı 239
Şekil B.120 : S1 örneği alt (S1A) ve üst (S1U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 240
Şekil B.121 : S2 örneği alt (S2A) ve üst (S2U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 240
Şekil B.122 : S3 örneği alt (S3A) ve üst (S3U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 241
Şekil B.123 : S4 örneği alt (S4A) ve üst (S4U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 241
Şekil B.124 : S5 örneği alt (S5A) ve üst (S5U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 242
Şekil B.125 : S6 örneği alt (S6A) ve üst (S6U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 242
Şekil B.126 : S7 örneği alt (S7A) ve üst (S7U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 243
Şekil B.127 : S8 örneği alt (S8A) ve üst (S8U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 243
Şekil B.128 : S9 örneği alt (S9A) ve üst (S9U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 244
Şekil B.129 : S10 örneği alt (S10A) ve üst (S10U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 244
Şekil B.130 : S11 örneği alt (S11A) ve üst (S11U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 245
Şekil B.131 : S12 örneği alt (S12A) ve üst (S12U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 245
Şekil B.132 : S13 örneği alt (S13A) ve üst (S13U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 246
Şekil B.133 : S14 örneği alt (S14A) ve üst (S14U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 246
Şekil B.134 : S15 örneği alt (S15A) ve üst (S15U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 247

Şekil B.135 : S16 örneği alt (S16A) ve üst (S16U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 247
Şekil B.136 : S17 örneği alt (S17A) ve üst (S17U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 248
Şekil B.137 : S18 örneği alt (S18A) ve üst (S18U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 248
Şekil B. 138 : S20 örneği alt (S20A) ve üst (S20U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 249
Şekil B. 139 : S21 örneği alt (S21A) ve üst (S21U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 249
Şekil B.140 : S22 örneği alt (S22A) ve üst (S22U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 250
Şekil B.141 : S23 örneği alt (S23A) ve üst (S23U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 250
Şekil B.142 : S25 örneği alt (S25A) ve üst (S25U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 251
Şekil B.143 : S26 örneği alt (S26A) ve üst (S26U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 251
Şekil B.144 : S27 örneği alt (S27A) ve üst (S27U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 252
Şekil B.145 : S28 örneği alt (S28A) ve üst (S28U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 252
Şekil B.146 : S29 örneği alt (S29A) ve üst (S29U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 253
Şekil B.147 : S30 örneği üst (S30U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 253
Şekil B.148 : S31 örneği alt (S31A) ve üst (S31U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 254
Şekil B.149 : S32 örneği alt (S32A) ve üst (S32U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları 254
Şekil B.150 : Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut değerlerinin (D_{psd}) kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları için b) süreksizlik üst blokları için 255
Şekil B. 151 : Üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut değerlerinin (D_{tpsam}) kesilme ile değişimi 256

SEMBOL LİSTESİ

Z_2 : Karekök ortalama
D : Fraktal Boyut
τ : Kesme Gerilmesi
u : Kesme yerdeğiştirmesi
v : Normal yerdeğiştirme
D_T : Topolojik Boyut
Δ : Veri Örnekleme Aralığı
S(k) : Güç spektrum Yoğunluğu
k : Dalga sayısı
β : Log S(k) – log (k) grafiğinde lineer regresyon doğrusunun eğimi
D_{psd} : Güç spektrum yoğunluğu analizi ile hesaplanan fraktal boyut değeri
D_{tpsam} : Üçgen prizma yüzey alanı yöntemi ile hesaplanan fraktal boyut değeri
θ : Gerçek eğim açısı
θ* : Görünür eğim açısı
θ^*_{cr} : Eşik görünür eğim açısı
A_θ^* : Kesme yönündeki toplam potansiyel değme alanı
A_0 : Kesme yönündeki maksimum olası değme alanı
θ^*_{max} : Kesme yönündeki en büyük görünür eğim açısı
C : Şekil parametresi
θ^*_{min} : Kesme yönündeki en küçük görünür eğim açısı
R^2 : Determinasyon (belirleme) katsayısı
τ_p : En büyük kesme gerilmesi
σ_n : Sabit normal gerilme
ϕ_μ : Pürüzsüz (düz) bir yüzeyin içsel sürtünme açısı
i : Pürüz açısı
ϕ_r : Rezidüel (kalıcı) içsel sürtünme açısı
c : Kohezyon
c_a : Görünür kohezyon
S : Kesme kuvveti
N : Sabit normal kuvvet
A : Alan
η : Kenetlenme derecesi
ν : Dilatasyon açısı
l_d ; Profilin cetvel ile ölçülen uzunluğu
l_t ; Profilin iki ucu arasındaki doğrusal uzunluk
r : Pergel açıklığı
L : Pergelle ölçülen eğri uzunluğu
N : Pergel adım sayısı
A : Pürüzlerin kesilme düzlemi üzerindeki izdüşümlerinin toplam alanı
K ve ϕ_0 : Kayanın malzeme dayanımı ile ilişkili Coulomb parametreleri
a_s : Kesme alanı oranı
σ_t : Doğrusal olmayan yenilme zarfında geçiş noktasına karşılık gelen normal gerilme
η : Pürüz kenetlenme derecesi

L_l : Pürüzün kesme vektörüne karşı eğimli olan kenarının kesilme düzlemindeki izdüşüm uzunluğu

σ_c : Süreksizlik yüzeyi basınç dayanımı

i_u : Büyük ölçekteki ondülasyon açısı

N_1 : x ekseni boyunca örneklenmiş olan veri sayısı

N_2 : y ekseni boyunca örneklenmiş olan veri sayısı

p_1 : Uzamsal ortamda x eksenindeki veri örnekleme indeksi

p_2 : Uzamsal ortamda y eksenindeki veri örnekleme indeksi

n_1 : Fourier uzayında x eksenindeki dalgasayısı örnekleme indeksi

n_2 : Fourier uzayında y eksenindeki dalgasayısı örnekleme indeksi

k_{n1} ve k_{n2} : Dalgasayısı vektörünün Fourier uzayındaki bileşenleri

s : Kare hücre kenar uzunluğu

$S_{i,j}$: Kare hücrenin toplam alanı

S(s) : Kare hücre boyutunun fonksiyonu olarak süreksizlik yüzeyinin toplam alanı

b : ln [S(s)] – ln (sxs) grafiğine çizilen regresyon doğrusunun eğimi

τ_p/σ_N : En büyük kesme dayanımı oranı

SÜREKSİZLİK İÇEREN ORTAMLARIN MEKANİK MODELLEMESİ İÇİN PÜRÜZLÜLÜĞÜN KURAMSAL VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE SAYISAL TANIMI

ÖZET

Süreksizlik yüzeylerinin sayısallaştırılmasında kullanılmak üzere tamamen bilgisayar kontrollü yeni bir yüzey ölçüm sistemi bu çalışma için özel olarak tasarımlanarak, geliştirilmiştir. Bu ölçüm sistemi; mekanik bir yüzey tarama cihazı, elektronik kontrol ünitesi, bilgisayar ve kontrol yazılımından oluşmaktadır. Yüzey tarama cihazı ile 256x256 mm boyutundaki yüzeylerin, yatay düzlemde en fazla 0.1 mm' lik çözünürlük ile sayısallaştırılması mümkündür. Yüksekliklerin (z) ölçülmesindeki duyarlık 0.1 mm' dir. Bu cihaz, seçilen örnekleme aralığına bağlı olarak, yüzey üzerindeki farklı koordinat noktalarındaki yükseltileri otomatik olarak ölçmekte ve bilgisayarda oluşturduğu veri dosyalarına kayıt etmektedir.

Süreksizlik yüzeylerinin kesme dayanımı ve davranışlarının, dolayısıyla mekanik parametrelerinin laboratuvar ortamında deneysel olarak belirlenmesi için, bir direkt kesme deney cihazı yine bu çalışma için özel olarak dizayn edilmiş ve geliştirilmiştir. Bu cihaz, kesme kutusu, hidrolik ünitesi ve veri toplama ünitesinden oluşmaktadır. Bu cihazda, kesme kutusuna uygulanan kuvvetler sayısal yük ölçerler ile belirlenmektedir. Yatay ve düşey yerdeğiştirme miktarları ise sayısal boy ölçerler tarafından belirlenmektedir. Deney süresince, bu ölçüm cihazları üzerindeki değişimler özel bir veri toplama yazılımı aracılığı ile sorgulanmakta ve bilgisayara kayıt edilmektedir.

Geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı kullanılarak, Çayeli Tüneli kazı sahasında yüzeylenen volkanik tüflerden alınan süreksizlik örneklerinin tümünün alt ve üst blok yüzeyleri, x ve y eksenlerinde Δ=1 mm örnekleme aralığı ile sayısallaştırılmış, bu yüzeyler için 65 satır 65 kolondan oluşan 2-boyutlu veri setleri elde edilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğünün sayısal olarak tanımlanmasında fraktal geometri kavramı kullanılmıştır. İlki kendine yakınsal (self-affine) ikincisi kendine benzer (self – similar) yöntem olmak üzere sırasıyla güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) ve üçgen prizma yüzey alanı (tpsam) yöntemleri seçilmiş ve yüzeylerin sayısallaştırması ile elde edilen 2-boyutlu veri setlerine uygulanmıştır. Böylece iki farklı yöntemle bu çalışmada kullanılan örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri için fraktal boyutlar (D_{psd} ve D_{tpsam}) hesaplanmıştır. Aynı örneğin karşılıklı blokları için her iki yöntemle de birbirine çok yakın fraktal boyut değerleri hesaplanmıştır. Örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri birbirlerini genellikle iyi karşılar durumdadır. Bir başka değişle karşılıklı blok yüzeyleri iyi örtüşmektedir. Birbirleriyle iyi derecede örtüşen alt ve üst blok yüzeyleri için çok yakın fraktal boyut (D_{psd} ve D_{tpsam}) değerlerinin hesaplanmış olması, geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazının ölçüm doğruluğunun ve hassasiyetinin oldukça güvenilir olduğu anlamına gelmektedir.

Geliştirilen laboratuvar direkt kesme deney aleti kullanılarak, yüzey fraktal boyutları hesaplanan süreksizlik örnekleri üzerinde mekanik kesme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde, normal gerilmeyi deney süresince sabit tutmak için ağılık külçelerinin kullanılması tercih edilmiş ve normal kuvvet statik olarak uygulanmıştır. Kesme deneylerinde yatay yerdeğiştirme oranı dakikada 0.1 mm olup, 10 mm' lik kesme yerdeğiştirmesi süresince yüzeyler kesilmiştir. Üç farklı sabit normal gerilme seviyesi seçilmiştir. Çok aşamalı deney tekniği (staged testing) kullanıldığından, farklı sabit normal gerilme değerleri altında her defasında aynı yüzeyler kesilmiştir. Her kesme işleminin ardından yüzeylerde oluşan milonitik malzeme temizlenerek yüzeylerden uzaklaştırılmış ve tüm yüzeyler tekrar sayısallaştırılmıştır. Bu deneyler sonucunda, farklı sabit normal gerilme değerleri için örneklerin en büyük kesme dayanımları elde edilmiştir.

Kesme deneyleri sırasında oluşan değme alanlarının kesme yönüne bağlı olarak önceden hesaplanmasına olanak sağlayan ve hesaplama tekniği, yüzey fraktal boyutlarının hesaplanmasında kullanılan üçgen prizma yüzey alanı metodunun temel algoritması üzerine kurulu olan yeni bir yaklaşım (değme alanları yaklaşımı) geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan örneklerin alt ve üst blok yüzeylerinin sayısallaştırılması ile elde edilmiş veri setlerine bu yeni yaklaşım uygulanmıştır. Böylece, literatürde daha önce de tanımlanmış olan ve bir süreksizlik yüzeyi üzerinde kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayan sayısal parametreler geliştirilen bu yeni yaklaşım ile de hesaplanmıştır. Bu parametreler, kesme yönündeki; maksimum olası değme alanı (A_0), toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*), en büyük görünür eğim açısı (θ^*_{max}), şekil parametresi (C) ve yüzeydeki açısallığın değişimini tanımlayan θ^*_{max}/C oranıdır. Bu çalışmada, kesme yönünde hesaplanan yeni bir parametre olarak, A_0/C oranı da tanımlanmıştır. Bu parametreler için daha önce tanımlanmış olan semboller, literatürü özdeş kılmak amacıyla, bu çalışmada da değiştirilmeksizin aynen kullanılmıştır. Tüm bu parametreler laboratuvar kesme deneylerindeki kesme yönünde hesaplanmıştır.

Farklı sabit normal gerilme değerleri altında gerçekleştirilen her kesme işleminin ardından örneklerin alt ve üst blok yüzeylerinin tekrar sayısallaştırılmış olması, tüm sayısal parametrelerin her kesme işleminden sonra tekrar hesaplanmasına ve bu parametrelerin değerlerinin kesme ile değişimlerinin izlenmesine olanak tanımıştır. D_{psd}, D_{tpsam}, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametreleri yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılıdır. Diğer taraftan, C parametresinin daha yüksek değerleri daha az pürüzlü yüzeyleri ifade eder. Yüzeylerin kesilmesi ile birlikte, pürüzlülüğünün azalmasına bağlı olarak; D_{psd}, D_{tpsam}, θ^*_{max}/C ve A_0/C değerlerinde azalma, C parametresinin değerinde ise beklendiği gibi artma gerçekleşmiştir. A_0 parametresi kesme yönündeki maksimum olası değme alanını tanımladığından, kesilme ile bu parametrenin değerleri de doğal olarak azalma göstermiştir.

Fraktal analizlerden elde edilen ve tüm yüzeyin pürüzlülüğünü tanımlayan fraktal boyutlar (D_{psd} and D_{tpsam}) ile, kesme yönündeki geometriyi tanımlayan parametreler (C, θ^*_{max}/C ve A_0/C) birbirleriyle karşılaştırılmıştır. D_{tpsam} değerleri ile C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametreleri arasında yüksek ilişki bulunmuştur. Ayrıca, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametrelerinin birbirleri ile oldukça ilişkili olduğu saptanmıştır. Diğer taraftan, D_{psd} değeri ile C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametreleri arasında bir ilişki görülmemiştir. Bunlara ek olarak, örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri için hesaplanan fraktal boyutlar (D_{psd} ve D_{tpsam}) ve kesme yönünde hesaplanan C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametreleri, bu örneklerin σ_{n1}=300 kPa sabit normal gerilme değeri altında kesilmesi ile elde edilen en büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) ile karşılaştırılmıştır. Örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri için hesaplanan hem fraktal boyut değerleri (D_{tpsam}) hem de kesme yönündeki C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametreleri bu örneklerin en büyük kesme dayanımı oranları ile oldukça iyi ilişki sunmuştur. En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_n) ile

en iyi ilişkiyi A_0/C parametresi göstermiştir. Güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) yöntemiyle hesaplanan fraktal boyutlar (D_{psd}) ile en büyük kesme dayanımı oranları(τ_p/σ_n) arasında bir ilişki bulunamamıştır. Bu yöntemle hesaplanan fraktal boyut (D_{psd}) değerlerinin diğer yüzey parametreleri ve en büyük kesme dayanımı oranları ile iyi ilişki göstermemesinin olası nedenleri tartışılmıştır.

Aynı yüzeyin sayısallaştırılmasında kullanılacak farklı veri örnekleme aralıklarının, o yüzey için hesaplanacak sayısal parametreler (D_{tpsam}, θ^*_{max}, C, θ^*_{max}/C, A_0/C) üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Örnekleme aralığı arttıkça, hem D_{tpsam} hem de θ^*_{max}, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametreleri için daha düşük değerler hesaplanmıştır. Bu duruma uygun olarak C parametresi için daha yüksek değerler hesaplanmıştır. Yüksek veri örnekleme aralığı değerleri altında yapılan sayısallaştırma işlemlerinde yüzey detaylarına ilişkin veriler toplanamamakta, analizlerde ise yüzeyler gerçekte olduklarından daha az pürüzlü hesaplanmaktadır. Sayısallaştırma işleminde veri örnekleme aralığı değeri ne kadar küçük seçilirse daha doğru ve güvenilir veri toplanmakta ve bu şekilde oluşturulan veri setleri yüzeylerin geometrisini daha gerçekçi yansıtmaktadır. Son olarak, heterojenlik ve anizotropi araştırılmış, süreksizlik düzlemlerinin yüzey geometrisinin önemli oranda heterojen ve anizotrop olduğu ortaya konmuştur.

QUANTIFICATION OF SURFACE ROUGHNESS WITH THEORETICAL AND EXPERIMENTAL METHODS FOR MECHANICAL MODELLING OF JOINTED ROCKS

SUMMARY

A new computer-controlled surface scanning device has been specially designed and developed for this study in order to digitize discontiniuty surfaces. The system consists of a mechanical scanning device, an electronical control unit, a PC and software to control the unit automatically. The system is capable of collecting data on a 256x256 mm area with maximum 0.1 mm resolution in the x – y direction and 0.1 mm in the z direction. Depending on a specifed sampling interval, elevations in each coordinates on a discontinuity surface are automatically measured and recorded by this device.

Also, a new direct shear test device has been specially designed and developed for this study in order to define frictional properties of discontinuity surfaces. This device consists of a shear box, a hydrolic unit and a data acquisation unit. Digital load cells are used to measure loads applied to the shear box. Horizontal and vertical displacements are measured by digital micrometers. During the tests, loads and displacements measured by these sensors are recorded on the computer simultaneously by means of special data acquisition software.

Upper and lower surfaces of all samples, taken from the discontinuities of the volcanic tuff outcrops in Çayeli tunnel excavation site, were scanned and digitized with an 1 mm sampling interval in the horizontal axes (x and y) by using the developed surface scanning device. After these measurements 2-D data sets with the size of 65x65 were obtained for upper and lower surfaces of each samples.

Fractal geometry concept was used for quantitatively definition of the surface roughness. Two different fractal methods were chosen. These are “power spectral density analysis, psd” suitable for self-affine 2-D data sets and “triangular prism surface area method, tpsam” suitable for self-similar 2-D data sets. These two methods were applied to 2-D surface data sets obtained by digitizing process. So fractal dimensions (D_{psd} and D_{tpsam}) with two different methods were calculated for upper and lower parts of all samples used in this research. It was realized that the calculated fractal dimensions for the upper and lower parts of the same samples are very close to each others in both two methods. Note that the upper and lower surface of the same samples used here match each other well. With the other words they are physically well-mated surfaces. Obtaining very close fractal dimensions for this kind of sufaces means that accuarcy of the developed surface scanning device is high and the data measured are reliable.

After these calculations, all samples were sheared at laboratory by using developed direct shear test device. In these experiments, to keep the normal load constant during the test, dead weights was preferred and therefore normal load was applied statically. A horizontal displacement rate of 0.1 mm/min was used and the tests were continuited till 10 mm shear displacement were achieved. Three different

constant normal stress levels were selected. Because staged testing method was used the same surfaces were sheared under different constant normal stress levels. After each shearing, milonitic material occuring on the surfaces was cleaned and removed. Then both upper and lower surfaces were digitized again. For each shearing performed under different constant normal loads maximum shear strenghts were obtained.

In this study, a new approach has been developed which enables calculating of contact areas occuring in shearing process depending on the specified shear direction. Algorithm of this method is based on the main algorithm of triangular prism surface area method which is used to calculate fractal dimensions of surfaces. This new approach was applied to the 2-D data sets obtained by digitizing of the upper and lower surfaces of the all samples used in this study. So the parameters previously defined in the literature were calculated in this study with this new approach. These parameters define the surface geometry in a specified shear direction on a discontinuity surface. These are maximum possible contact area (A_0), total potential contact area (A_θ^*), maximum apperant dip angle (θ^*_{max}), shape parameter (C) and the ratio θ^*_{max}/C describing angularity of the surface in the shear direction. Additionally, a new parameter A_0/C has been defined. In this study, the previously given notations for these parameters are used without any change to keep the literature same. All of these parameters were calculated in the shear direction as it become at the laboratory shear tests.

Digitizing upper and lower parts of all samples after each shearing performed at different constant normal stress made it possible to calculate all quantitative roughness parameters after each shearing and to observe variations of these parameters with shearing. Note that D_{psd}, D_{tpsam}, θ^*_{max}/C and A_0/C are proportional to the amount of surface roughness. On the other hand, the high values of the parameter C indicates relatively smooth surfaces. A decrease in the values of parameters D_{psd}, D_{tpsam}, θ^*_{max}/C and A_0/C and an increase in the values of parameter C were observed as normally expected depending of roughness degradetion. Because parameter A_0 defines maximum possible contact area in the shear direction, similarly the values calculated for this parameter decreased with shearing.

The values calculated for the parameters C, θ^*_{max}/C and A_0/C in the shear direction for upper and lower parts of all samples were compared with the fractal dimensions (D_{psd} and D_{tpsam}) which characterizes roughness of whole surface. Good agrements were obtained between D_{tpsam} and the parameters C, θ^*_{max}/C and A_0/C. More importantly, a high correlation between the ratio θ^*_{max}/C and the ratio A_0/C was obtained. On the other hand no correlation was found between D_{psd} and the parameters C, θ^*_{max}/C and A_0/C. Additionally, calculated values of both fractal dimensions (D_{psd} and D_{tpsam}) and the parameters C, θ^*_{max}/C and A_0/C for both sides of the discontinuity samples were compared maxsimum shear strengths of these samples obtained from laboratory shear tests performed constant normal stress of σ_N = 300 kPa. Maximum shear strength ratios (τ_p/σ_N) for all samples were used in these comparisons. It was found that fractal dimension values (D_{tpsam}) and the parameters C, θ^*_{max}/C and A_0/C calculated for both sides of the samples show good correlations with the maximum shear strength ratios (τ_p/σ_N) of these samples. The best agrement was observed between the ratio A_0/C and the ratio τ_p/σ_N. But no correlation was found between D_{psd} and the ratio τ_p/σ_N. The possible reasons of why fractal dimensions (D_{psd}) obtained by power spectral density analysis (psd) have not showed good correlations with the other surface parameters and maximum shear strength ratios were discused.

Effect of sampling interval used in the surface scanning on the calculated values of D_{tpsam} and on the parameters θ^*_{max}, C, θ^*_{max}/C, A_0/C was also investigated. It was observed that both D_{tpsam} and the parameters θ^*_{max}, θ^*_{max}/C, A_0/C decreased with the increasing of sampling interval and the values of C increased. Remember that high values of C corresponds less rough surfaces. This means that higher values of sampling interval results lost of data during surface scanning. Sampling interval is an important issue in surface scanning. Smaller sampling interval values gives more accure and reliable surface data. Heterogeneity and anisotropy of the surfaces was also investigated and it was observed that discontinuity surfaces are greatly heterogeneous and anisotropic.

1 GİRİŞ

1.1 Problemin Tanıtımı

Doğada kaya ortamı, monolotik (tek parçalı) bir ortam niteliğinde olmayıp, genel bir ifade ile süreksizlik düzlemleri olarak adlandırılan yapısal zayıflıklara sahiptir. Bu süreksizlikler, kaya ortamını parçalara ayırmakta, süreksizliklerle sınırlandırılmış olan farklı boyut ve şekildeki herbir parça ise "birim kaya elemanı" adını almaktadır. Homojen ve izotrop özelliklere sahip monolitik ortamların, faklı kuvvetler altındaki davranışları, ortamı oluşturan malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olarak şekillenirken, heterojen ve anizotrop olan polilitik (çok parçalı) nitelikteki çatlaklı ortamların mekanik davranışı; bir yandan kayanın malzeme özellikleri, diğer yandan da süreksizliklerin mekanik parametreleri tarafından belirlenmektedir. Kaya malzemesine oranla daha düşük dayanım değerlerine sahip olan bu süreksizlikler, çatlaklı ortamların mekanik dayanım ve davranışını belirleyen ana etmendir. Çatlaklı ortam içindeki birim kaya elemanları, üzerindeki yükleri komşu oldukları dokunma yüzeyleri, bir başka deyişle süreksizlik yüzeyleri üzerinden kesme ve normal kuvvetler şeklinde birbirlerine aktarmaktadırlar. Dışarıdan hiçbir etkinin olmadığı duraylı koşullarda, bu kuvvetler statik açıdan birbirleriyle denge durumundadırlar. Ancak çatlaklı kaya ortamında herhangi bir teknik girişim gerçekleştirildiğinde, doğal (primer) gerilme durumu bozulmakta, statik açıdan ilk başta denge konumunda bulunan doğal gerilmelerin; yer, yön ve büyüklüğündeki değişiklikler ikincil (sekonder) gerilme durumunu sonuçlamaktadır. Teknik girişim sırasında etkilenen, ya da etkili olan ve sistem büyüklüğü olarak bilinen ortam sınırları içinde oluşan bu yeni gerilmeler, vektörel olarak tekrar dengeye ulaşmaya çalışırken, bulundukları ortamı da mekanik olarak zorlamaktadırlar. Bu sırada birim kaya elemanları, bir yandan kendi içlerinde deforme olmakta, diğer yandan komşu oldukları süreksizlik düzlemleri boyunca birbirleri üzerinde ötelenmektedirler.

Süreksizliklerin çatlaklı kayanın mekanik davranışındaki etkilerini somut, kullanılabilir ve güvenilebilir matematiksel bağıntılarla yansıtabilmek son on yılların en çok arzulanan bilimsel ve pratik arayışları arasında yer almış, çatlaklı ortamları modellemek ve süreksizliklerin kesme davranışını belirlemek için günümüze dek çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, süreksizlikler için değişik kesme dayanımı ölçütleri önerilmiştir. Bu ölçütlerin tümünde, süreksizlik

düzlemlerinin yüzey geometrisi, bir başka deyişle pürüzlülük, süreksizliğin kesme dayanımını ve davranışını önemli ölçüde etkileyen bir parametre olarak ele alındığından, yüzey pürüzlülüğünün nitel ve nicel tanımlamasına yönelik olan çalışmalar artmıştır. Ancak bu çalışmaların hemen hemen çoğunda, pürüzlülük çizgisel bir büyüklük olarak ele alınmıştır.

Nitel pürüzlülük tanımlamalarında süreksizlik yüzeyi görsel olarak incelenmekte ve yüzeyin geometrisi "standart profillerle" karşılaştırılmaktadır. Yüzeyin geometrisi en çok hangi profile benziyorsa, o profil için yapılmış olan standart pürüzlülük tanımlaması, incelenen yüzey içinde aynen kabul edilmektedir. Barton ve Choubey (1977) tarafından verilmiş olan "10 standart pürüzlülük profili", bu tür görsel karşılaştırmaya dayalı tanımlama yöntemlerinin ilkidir. Bu yöntemde, 10 standart yüzey profili için, değeri 0 ile 20 arasında değişen, çatlak pürüzlülük katsayısı (Joint Roughness Coefficient, JRC) parametreleri tanımlanmaktadır. Görsel karşılaştırmaya dayalı yöntemlerden bir diğeri ise, ISRM (1978, 1981) tarafından verilen "standart pürüzlülük profilleri" dir. Bu yöntemde pürüzlülük; "basamaklı , dalgalı, düzlemsel" tanımlamaları altında 3 ana gruba ayırtlanmakta, her bir grup için de "pürüzlü, düz, kaygan" alt tanımlamaları yapılmaktadır. Her iki yöntem de görsel karşılaşmaya dayalı olduğundan, yapılacak pürüzlülük tanımlamaları tamamen uygulayıcı veya araştırmacının kişisel değerlendirmelerine bağlıdır. Bu yöntemlerin kullanılması sırasında; aynı süreksizlik yüzeyi için, farklı uygulayıcılar tarafından farklı değerlendirmelerin yapılabilir olması pek mümkündür.

Günümüze değin yapılmış olan nicel (kantitatif) tanımlamalara yönelik çalışmalar incelendiğinde ise, çeşitli matematiksel, istatiksel ya da fraktal analiz yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Aynı yüzey için, farklı uygulayıcılar tarafından, aynı sayısal analiz yöntemi uygulandığında, aynı sonuçlar elde edileceğinden, bu tür çalışmalar sayısal analizler üzerine kurulu olmaları açısından kuşkusuz son derece önemlidir. Ancak bu tür çalışmaların çoğunda, pürüzlülüğün yine çizgisel bir büyüklük olarak ele alındığı görülmektedir. Süreksizlik yüzeyi üzerinde seçilen iki nokta arasında kalan çizgisel geometri değişik yöntemlerle sayısallaştırılmakta ve sayısal analizlerde, yüzey profillerini temsil eden 1-boyutlu veri setleri kullanılmaktadır. Herhangi bir yüzey profili için hesaplanmış olan sayısal bir değerin, o profilin ait olduğu yüzeyin geometrisini ne oranda gerçekçi şekilde yansıtacağı ise tartışmaya açıktır. Aynı yüzey üzerinden birbirlerine paralel olarak çıkarılan profiller çoğu kez birbirinden farklı geometriler sunmaktadır. Bu nedenle, yüzeyin genelini yansıtan gerçekçi bir pürüzlülük tanımının iki boyutlu analizlere

dayandırılması, mekanik parametreler ile yapılacak ilişkilendirmelerde ise bu şekilde tanımlanmış pürüzlülük değerlerinin kullanılması önem kazanmaktadır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Yöntem

Bu çalışmada; süreksizliklere ait farklı yüzey geometrilerinin birbirleriyle nicel olarak karşılaştırılmasına imkan verebilecek, mekanik parametreler ile ilişkilendirilebilir, 2-boyutlu analizlere dayalı yöntemler ile hesaplanmış olan ve pürüzlülüğü alansal olarak ifade eden sayısal pürüzlülük değerlerinin tanımlanması amaçlanmaktadır.

Bu amaç doğrultusunda;

I. Süreksizlik yüzeyleri üzerinde, farklı P(x,y) koordinat noktalarındaki yükselti (z) değerlerinin ölçümü ve haritalanması, bir başka deyişle yüzeyin tümünün sayısallaştırılması,
II. Sayısallaştırma işlemi ile elde edilecek 2-boyutlu veri setlerine yine 2-boyutlu farklı analiz yöntemlerinin uygulanarak pürüzlülüklerinin tanımlanması,
III. Aynı yüzeyler için farklı yöntemler ile hesaplanan pürüzlülük ifadelerinin birbirleri ile karşılaştırılması suretiyle anlamlılık ve doğruluklarının sınanması,
IV. Farklı yöntemler ile hesaplanan pürüzlülük ifadelerinin, yüzeylerin mekanik dayanımları ile ilişki kurabilme yeteneklerinin test edilmesi

çalışma yöntemini oluşturmaktadır.

Süreksizlik yüzeylerinin alansal olarak sayısallaştırılmasında kullanılmak üzere, tamamen bilgisayar kontrollü yeni bir yüzey tarama cihazı, elektronik kontrol ünitesi ve kontrol yazılımı bu çalışma için özel olarak tasarımlanarak geliştirilmiştir. Süreksizlik yüzeylerinin kesme dayanım ve davranışlarının, laboratuvar ortamında deneysel olarak belirlenmesine imkan verecek yeni bir direkt kesme deney cihazı yine bu çalışma için özel olarak geliştirilmiştir.

Geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı sayesinde, çalışmada kullanılan süreksizlik örneklerinin tümünün alt ve üst blok yüzeyleri, yatay eksenlerde (x ve y eksenleri) Δ=1 mm örnekleme aralığı, düşey eksende ise 1/10 mm duyarlık ile sayısallaştırılmıştır. Sayısallaştırma sonucunda, süreksizlik örneklerinin alt ve üst blok yüzeyleri için, 65 kolon 65 satırdan oluşan (65x65), 2-boyutlu veri setleri elde edilmiştir. Herhangi bir yüzey için oluşturulan 2-boyutlu veri seti; sayısallaştırma sırasında kullanılan 1 mm veri örnekleme aralığına bağlı olarak, yüzey üzerinde farklı P(x,y) koordinat noktalarında ölçülmüş olan yükselti değerlerinden (z) oluşmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğünün sayısal olarak tanımlanmasında fraktal geometri kavramı kullanılmıştır. Biri self – affine (kendine yakınsal) , diğeri self – similar (kendine benzer) olmak üzere iki farklı fraktal analiz yöntemi seçilmiş ve yüzeylerin sayısallaştırılması ile elde edilen 2-boyutlu veri setlerine uygulanmıştır. Bunlar sırasıyla; güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) ve üçgen prizma yüzey alanı (tpsam) yöntemleridir. Bu sayede, çalışmada kullanılan örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri için iki farklı yöntem ile fraktal boyutlar hesaplanmıştır.

Geliştirilen laboratuvar direkt kesme deney aleti kullanılarak, yüzey fraktal boyutları daha önce hesaplanan süreksizlik örnekleri üzerinde mekanik kesme deneyleri yapılmış, yüzeylerin en büyük kesme dayanımları belirlenmiştir. Bu deneylerde farklı sabit normal gerilme değerleri altında her defasında aynı yüzeyler kesilmiştir. Her kesme işleminin ardından, kesilen yüzeyler tekrar sayısallaştırılmıştır.

Kesme deneyleri sırasında oluşan değme alanlarının kesme yönüne bağlı olarak önceden hesaplanmasına olanak sağlayan ve hesaplama tekniği, yüzey fraktal boyutlarının hesaplanmasında kullanılan üçgen prizma yüzey alanı yönteminin temel algoritması üzerine kurulu olan yeni bir yaklaşım olarak “potansiyel değme alanları yaklaşımı” geliştirilmiştir. Yüzeylerin sayısallaştırılması ile elde edilmiş veri setlerine bu yeni yaklaşım uygulanarak, literatürde daha önce tanımlanmış olan kesme yönündeki yüzey geometrisini ifade eden sayısal parametreler bu yeni yaklaşım ile de hesaplanmıştır.

Kesme deneyleri öncesinde sayısallaştırılan süreksizlik örneği alt ve üst blok yüzeyleri, her kesme işleminin hemen ardından tekrar sayısallaştırıldığından, kesilen yüzeyler için fraktal boyutlar ile kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayan sayısal parametreler tekrar hesaplanmış ve kesilmeye bağlı değişimleri izlenmiştir.

Fraktal analizlerden elde edilen ve yüzeyin bütününün geometrisini tanımlayan fraktal boyutlar ile potansiyel değme alanları yaklaşımdan hesaplanarak sadece kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayan sayısal parametreler, hem birbirleri hem de mekanik kesme deneylerinden elde edilen en büyük kesme dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Böylece hesaplanan bu değerlerin; yüzey pürüzlülüğünün alansal olarak sayısal ifadesindeki güvenilirlik ve doğrulukları, ardından da en büyük kesme dayanımı değerleri ile ilişki kurabilme yetenekleri sınanmıştır.

Ayrıca, aynı süreksizlik yüzeyinin sayısallaştırılması sırasında kullanılacak farklı örnekleme aralıklarının, o yüzeyin morfolojisini tanımlamak amacı ile hesaplanacak

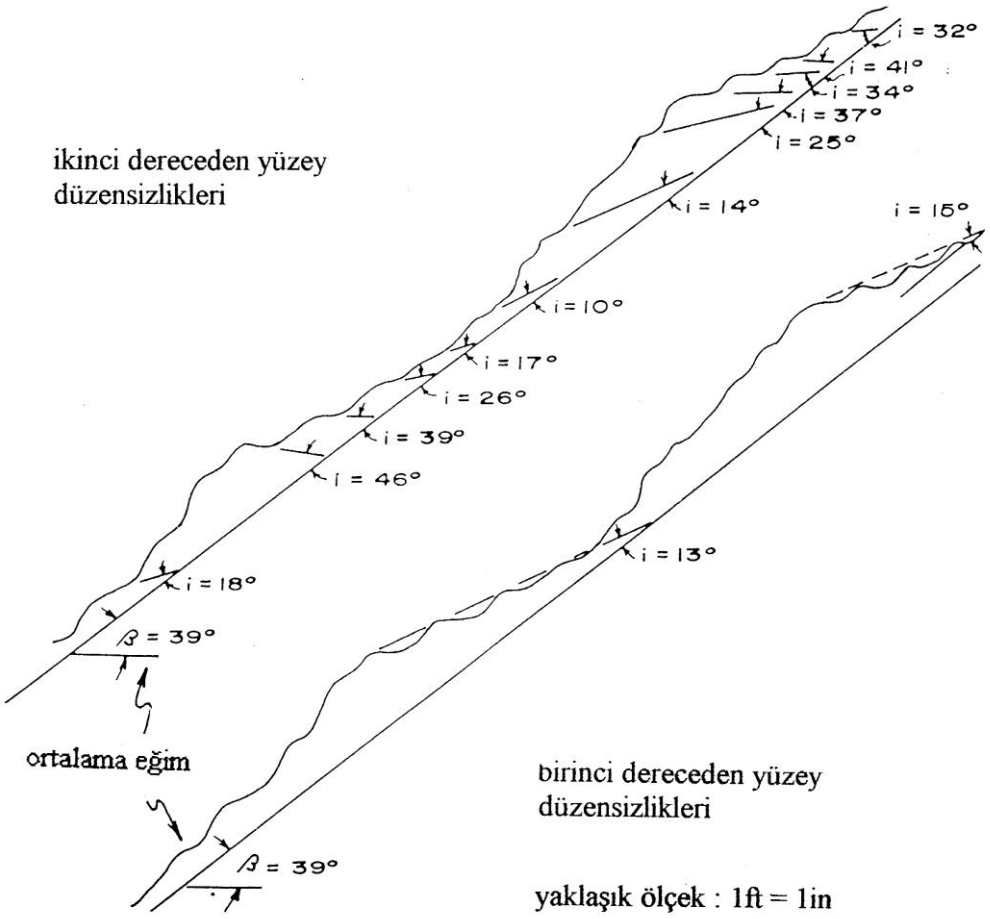
sayısal pürüzlülük değeri üzerindeki etkisi, yüzey pürüzlülüğünün heterojenliği ve anizotropisi araştırılmıştır.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Pürüzlülük Üzerine Yapılmış Tanımlamalar

2.1.1 Nitel tanımlamalar

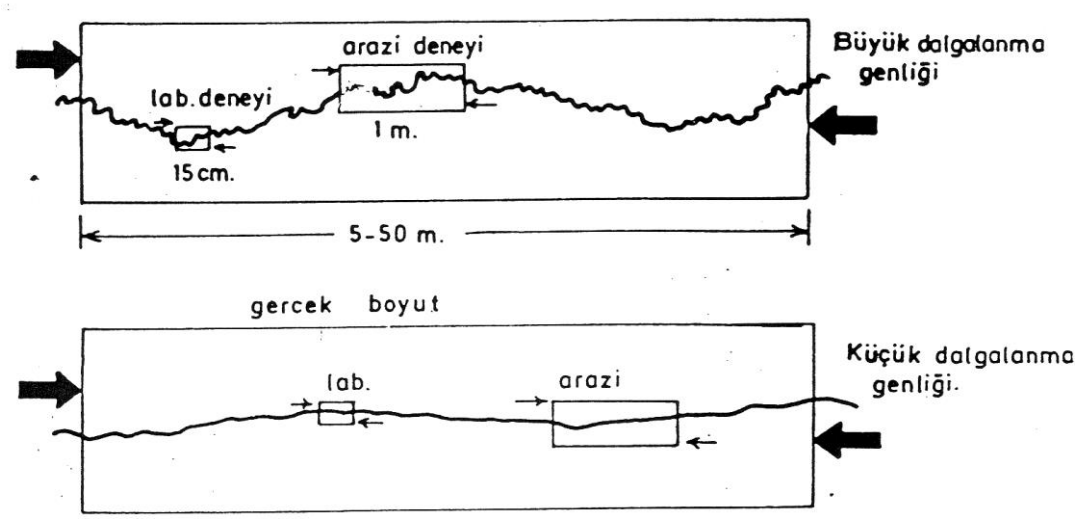
Patton (1966), süreksizliklerin yüzey geometrisini iki ayrı grupta tanımlamıştır. Belirli bir ölçüm mesafesi içinde büyük dalga boyuna sahip olan çizgisel geometri (birinci dereceden yüzey düzensizlikleri) yüzey dalgalılığıdır. Ana dalgalanmalar üzerinde yeralan ancak ana dalgalanmalara oranla aynı gözlem uzunluğu içinde daha düşük dalga boyuna, dolayısıyla daha yüksek frekanslara sahip olan çizgisel geometri (ikinci dereceden yüzey düzensizlikleri) ise yüzey pürüzlülüğüdür (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Birinci ve ikinci derceden yüzey düzensizlikleri (Patton, 1966)

Pürüzlülüğün referans düzleminden ortalama sapma açıları ($i_{pürüzlülük}$), dalgalanma açılarına ($i_{dalgalılık}$) nazaran genellikle daha yüksek değerlere sahip olmaktadır.

Değişik boyutlu yüklemelerde, süreksizlik yüzey geometrisinin süreksizliğin kesme dayanımı üzerine olan etkisi Deere (1966) tarafından incelenilmiştir (Şekil 2.2). Araştırmacı, dalgalılık genliğinin yüksek olduğu durumlarda, arazi ve laboratuvar deney sonuçları arasında önemli farkların beklenebileceğini, dalgalılık genliğinin düşük olduğu durumlarda ise laboratuvar ve arazi deney sonuçlarının yakın olabileceğini, ancak süreksizlik yüzeyinin tamamının değerlendirmeye alınması durumunda laboratuvar ve arazi deney sonuçlarının yine de birbirinden farklı olabileceğini öne sürmüştür.



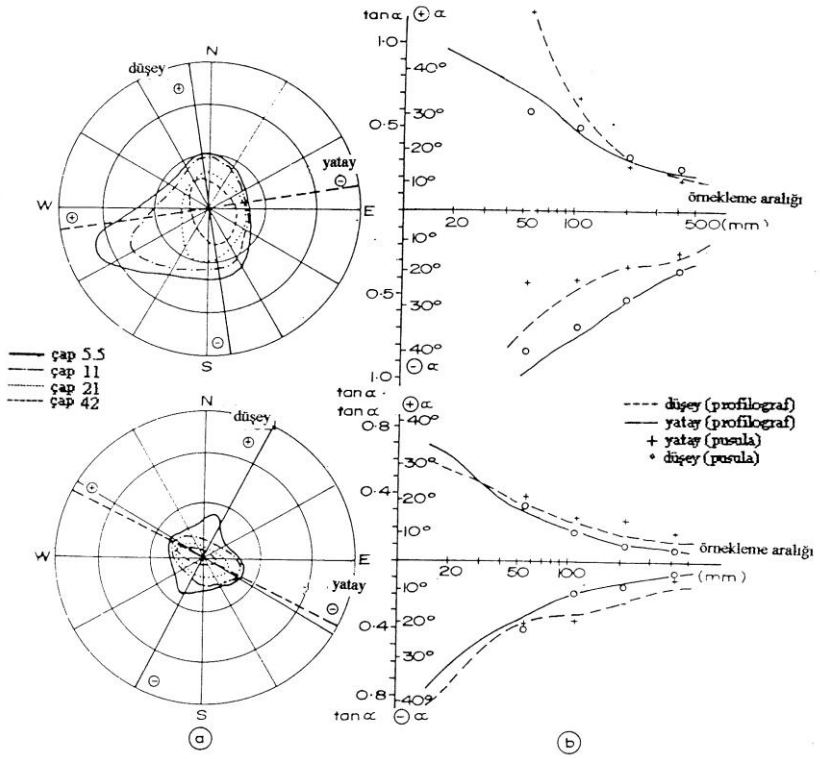
Şekil 2.2 : Değişik boyutlu yüklemelerde yüzey geometrileri (Deere, 1966).

Süreksizlik düzlemlerinin yüzey geometrilerine ilişkin nitel bir tanımlama Piteau (1970) tarafından yapılmıştır (Tablo 2.1). Bu tanımlamada olası 5 farklı yüzey durumu ayırtlanmış ve her bir sınıfa ilişkin özellikler tanımlanılmıştır.

Tablo 2.1 : Süreksizlik yüzeyi nitel pürüzlülük tanımlaması (Piteau, 1970)

YÜZEY DURUMU	TANIMLAMA
Düz	Dokunulduğunda pürüzsüzdür, kayma izi bulunabilir.
Hafif Pürüzlü	Yüzey girinti ve çıkıntıları açıkça görülebilir ve hissedilebilir.
Orta Pürüzlü	Yüzeyde pürüzler açıkça görülür ve aşındırıcı görünüşlüdür.
Pürüzlü	İri pürüzler, çıkıntılar ve yüksek açılı basamaklar belirgindir.
Çok Pürüzlü	Yüzeye dik basamaklar ve çıkıntılar vardır.

Fecker ve Rengers (1971) tarafından, arazide büyük ölçekteki süreksizliklerin yüzey morfolojisini tanımlamak amacıyla geliştirilen ve bir jeolog pusulasıyla farklı çaplardaki disklerin kullanımını esas alan bir ölçüm tekniği kullanılmıştır. Bu araştırmacılar, bir süreksizlik yüzeyi üzerinde, birbirleriyle dik açı yapan iki farklı doğrultu tanımlamışlar ve her iki doğrultu boyunca, süreksizlik yüzeyi üzerinde tanımladıkları metodoloji kapsamında pusula ve farklı çaplardaki diskler ile eğimleri ölçmüşlerdir. Kullanılan disk çaplarına da bağlı olarak pusuladan okudukları eğim değerlerini, uzanımları boyunca pürüzlülük profillerinin tanımlanılmasına gereksinim duyulan birbirine dik iki farklı doğrultunun da belirtildiği bir kutupsal eş alan neti üzerine yerleştirmişlerdir (Şekil 2.3.a). Netin merkeziden en uzak mesafe bulunan noktalar, pusula ile ölçülen en büyük eğim değerlerine karşılık gelmektedir. Şekil 2.3.a 'da da görüldüğü üzere, farklı çaplara sahip her bir disk için merkezden en uzak mesafede bulunan noktalar birleştirilmiş ve böylece en büyük dağılım konturları elde edilmiştir. Bu konturlar sayesinde, çatlak yüzeyi üzerinde farklı yönlerdeki eğim değerleri ve dolayısıyla çatlak yüzey geometrisi yorumlanılmaktadır. Şekil 2.3.b 'de ise, kullanılan disk çaplarına ve yine Fecker ve Rengers (1971) tarafından geliştirilmiş olan profilograf için örnekleme aralığına bağlı olarak, maksimum eğim değerleri arasındaki değişim görülmektedir.



Şekil 2.3 : a) Farklı çaplardaki diskler için net üzerinde en büyük dağılım konturları , b) Pusula ve profilograf metodlarında örnekleme aralığına bağlı olarak en büyük eğim değerlerindeki değişim (Fecker ve Rengers, 1971).

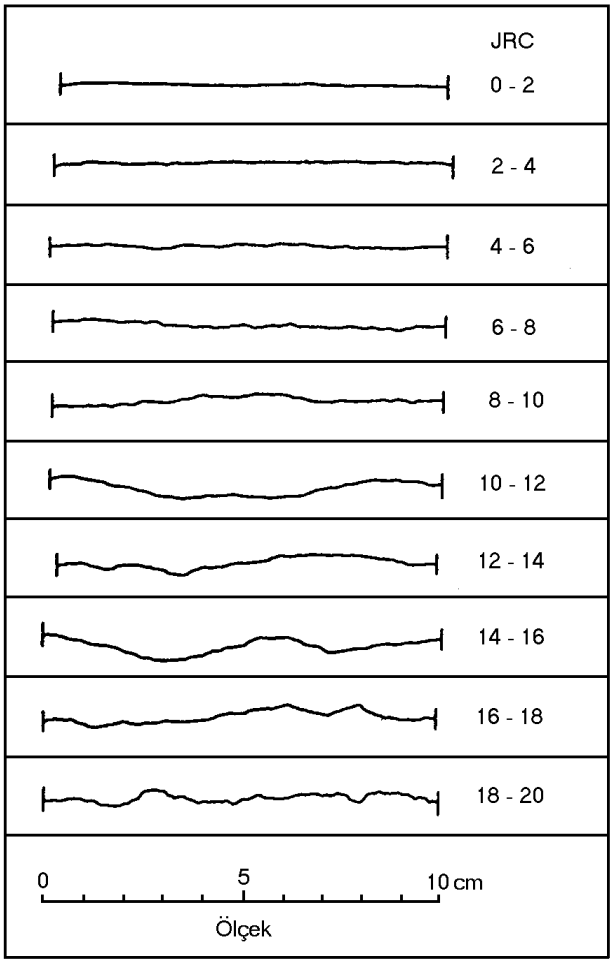
Anlaşılacağı üzere, aynı ölçüm noktaları için artan disk çapları ile yinelenen ölçümler her defasında daha düşük eğim değerlerinin okunmasına neden olmaktadır. Aynı şekilde profilograf yönteminde örnekleme aralığındaki artış;

Δx; iki nokta arasındaki yatay mesafe

Δy; iki noktanın yükseklikleri farkı

olmak üzere, $\Delta y/\Delta x$ oranının değerinin azalmasını ve olduğundan daha düşük eğim değerlerinin okunulmasını sonuçlamaktadır.

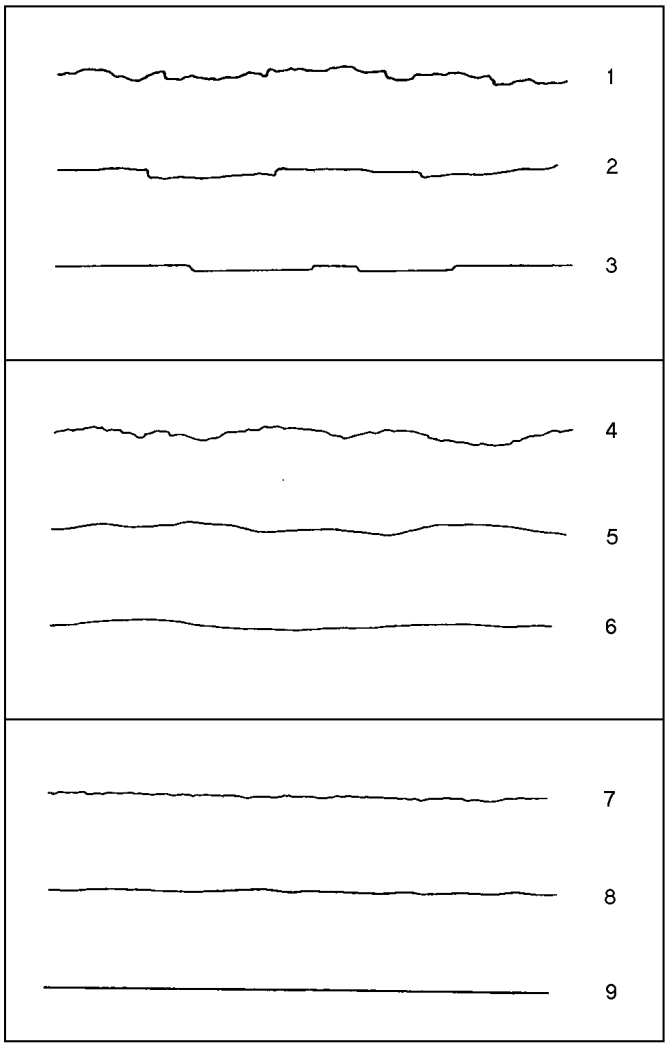
Barton ve Choubey (1977), 10 standart çatlak yüzey profili belirlemiş ve herbir profil için artan pürüzlülük derecesine bağlı olarak 0-20 arasında değerler alan birer çatlak pürüzlülük katsayısı, JRC (Joint Roughness Coefficient), değer aralığı tanımlamışlardır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : 10 standart çatlak pürüzlülük profili ve karşılık gelen JRC değerleri (Barton ve Choubey, 1977).

Çatlak pürüzlülük katsayısı (JRC), belirlenilmek istenilen bir profil Şekil 2.4 'de görülen standart profiller ile görsel olarak kıyaslanılmakta ve incelenilen profile en çok yakınsayan standart profilin JRC değeri incelenilen profil içinde aynen kabul edilmektedir. Tamamen kişisel yargı ve tecrübeye dayalı bir mukayese yöntemidir.

Süreksizlik düzlemlerin yüzey geometrilerinin tanımlanmasına yönelik olarak ISRM (1978) tarafından 9 tipik pürüzlülük profili sınıflandırılmış (Şekil 2.5) ve her sınıf için nitel olarak birer pürüzlülük tanımlaması önerilmiştir.



Şekil 2.5 : 9 tipik pürüzlülük profili (ISRM, 1978).

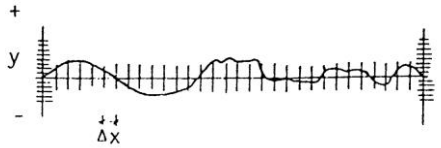
Şekil 2.5' de görülen profil sınıflarının her biri için yapılan nitel pürüzlülük tanımlamaları Tablo 2.2' de sunulmuştur.

Tablo 2.2 :9 tipik profil sınıfları için yapılan nitel pürüzlülük tanımları (ISRM, 1978).

SINIF	TANIMLAMA
1	Pürüzlü, basamaklı
2	Düz, basamaklı
3	Kayma yüzeyi, basamaklı
4	Pürüzlü, dalgalı
5	Düz, dalgalı
6	Kayma yüzeyli, dalgalı
7	Pürüzlü, düzlemsel
8	Düz, düzlemsel
9	Kayma yüzeyli, düzlemsel

2.1.2 Nicel tanımlamalar

Tse ve Cruden (1979), süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğünü sayısal olarak tanımlamak ve JRC değeri ile ilişkilendirmek amacıyla, süreksizlik yüzeylerinden alınan profillerin istatistiksel analizini yapmışladır. Bir profil üzerinde eşit aralıklarla (Δx) seçilen toplam M adet noktanın genlik değerleri ölçülmekte ve böylece profil sayısallaştırılmaktadır (Şekil 2.6).



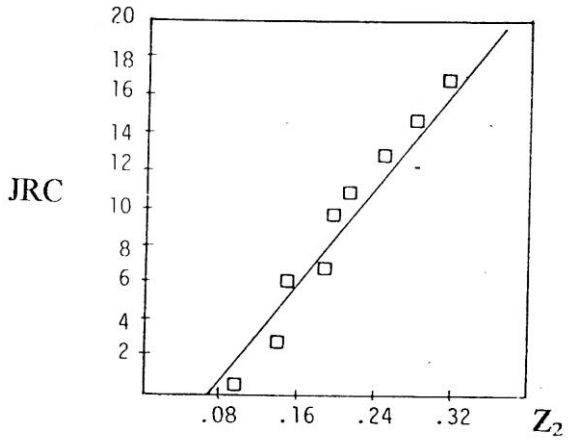
Şekil 2.6 : Profilin sayısallaştırılması (Tse ve Cruden,1979)

Eğer "y_i", profilin en yüksek ve en alçak noktalarının yaklaşık olarak ortasından geçirilen bir referans doğrusunun üzerinde veya altında ölçülen i 'ninci ölçüm noktasının genliği ise, profilin birinci türevinin karakök ortalaması (Z_2)

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M} y_{i+1} - y_i}{M(\Delta x)^2}} \qquad (2.1)$$

bağıntısı ile hesaplanılmaktadır. Bu araştırmacılar, Barton ve Choubey (1977) tarafından sunulan 10 standart profili sayısallaştırmış ve 2.1 no' lu bağıntıyı kullanarak her profil için birer Z_2 değeri hesaplamışlardır. Her bir profil için hesaplanan Z_2 değerleri ile profillere ait olan JRC değerleri bir kartezyen koordinat

sisteminde korele edilmiş ve regresyon analizi sonucunda, Şekil 2.7' de görülen ilişki ortaya konulmuştur.



Şekil 2.7 : 10 standart profil (Barton ve Choubey,1977) için, JRC değerleri ile hesaplanan Z2 değerleri arasındaki ilişki (Tse ve Cruden, 1979)

Bu ilişki sayesinde Z_2 ve JRC değerleri arasında

$$JRC=32.20+32.47\log Z_2 \qquad (2.2)$$

bağıntısı elde edilmiştir. Bağıntı sayesinde, istatistiksel olarak, Z_2 değeri hesaplanan bir profilin JRC değeri belirlenebilmektedir.

Çeşitli araştırmacılar tarafından, süreksizlik yüzeyi profillerinin fraktal boyut kavramı ile tanımlanılmasına yönelik çalışmalar yapılmış ve fraktal boyut ile JRC değerleri arasında çeşitli ilişkiler geliştirilmiştir. Carr ve Warriner (1987), yaptıkları çalışmalar sonucunda bir profilin JRC değeri ile fraktal boyutu (D) arasında;

$$JRC=-1022.55+1023.92D \qquad (2.3)$$

ve

$$JRC=1000(D-1) \qquad (2.4)$$

doğrusal ilişkilerini tanımlamışlardır.

Türk ve diğ. (1987), cetvel (ruler) yöntemini kullanarak, süreksizliklerden alınan profillerin fraktal boyutlarını hesaplamışlar ve profillerin ortalama pürüzlülük açıları (i) ile fraktal boyutları (D) arasındaki olası bir ilişkinin varlığını araştırarak

$$i = \cos^{-1} l_d^{(1-D)} \qquad (2.5)$$

bağıntısını tanımlamışlardır.

Ancak daha genel bir durum için

$$i = \cos^{-1} (x l_d)^{(1-D)} \qquad (2.6)$$

bağıntısını vermişlerdir. Burada; “x” bir sabit olup, $x=1/l_t$

l_d; profilin cetvel ile ölçülen uzunluğu

l_t; profilin iki ucu arasındaki doğrusal uzunluk

olarak tanımlanmaktadır. Adı geçen yazarlara göre, bu ilişki ile "i" açısının tanımlanmasında ana ondülasyonlar ve bunların üzerindeki ikincil pürüzlülükler birlikte hesaba katılmış olmaktadır. Tablo 2.3' de 10 standart profil için; çatlak pürüzlülük katsayısı (JRC), ortalama pürüzlülük açısı (i) ve profil fraktal boyutu (D) arasındaki sayısal ilişkiler görülmektedir.

Tablo 2.3 : Standart profiller için JRC, ortalama pürüzlülük açısı (i), fraktal boyut (D) ilişkileri (Türk ve diğ., 1987).

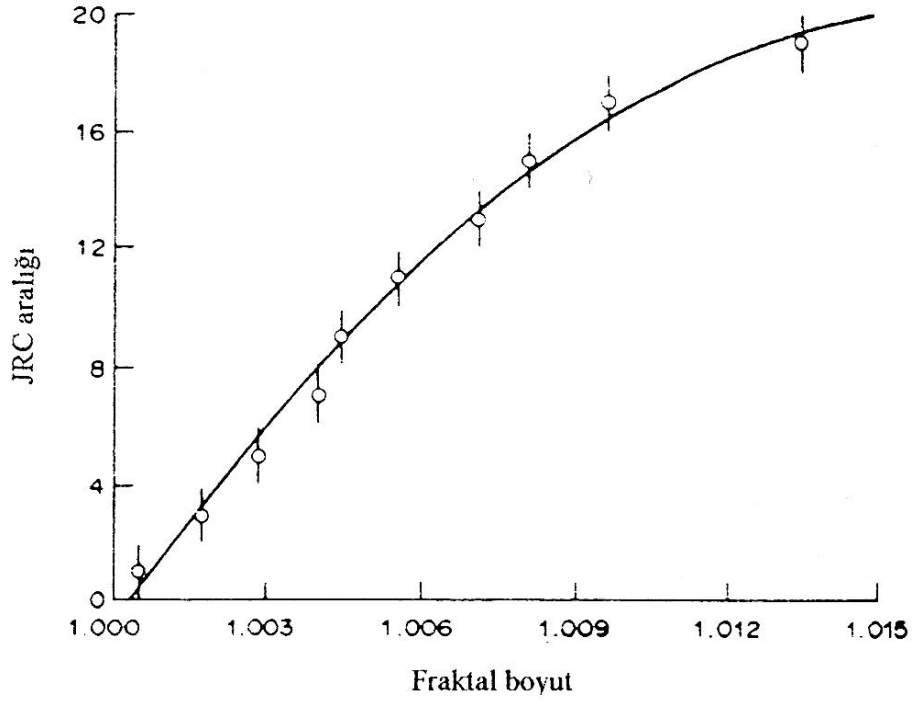
JRC	Fraktal Boyut (D)	$i = \cos^{-1} l_d^{(1-D)}$ (°)
0-2	1.0	0
2-4	1.0019	5.84
4-6	1.0027	6.95
6-8	1.0049	9.34
8-10	1.0054	9.88
10-12	1.0045	8.95
12-14	1.0077	11.62
14-16	1.0070	11.20
16-18	1.0104	13.58
18-20	1.0170	17.33

Lee ve diğ. (1990), cetvel yöntemini kullanarak, 10 standart pürüzlülük profilinin her birinin fraktal boyut değerini (D) hesaplamışlardır (Tablo 2.4).

Tablo 2.4 :JRC değer aralıkları için hesaplanan fraktal boyutlar (Lee ve diğ., 1990).

	Cetvel Tekrar Sayısı (N)					
JRC Değer Aralığı	**r = 2**	**r = 4**	**r = 6**	**r = 8**	**r = 10**	**Fraktal Boyut (D)**
0-2	98.098	49.028	32.681	24.509	19.605	1.000446
2-4	99.878	49.849	33.229	24.899	19.922	1.001687
4-6	100.281	50.031	33.297	24.955	19.997	1.002805
6-8	99.427	49.627	33.037	24.750	19.746	1.003974
8-10	98.599	49.182	32.700	24.494	19.587	1.004413
10-12	100.519	50.046	32.281	24.932	19.927	1.005641
12-14	97.799	48.601	33.361	24.207	19.327	1.007109
14-16	103.670	51.595	34.282	25.652	20.459	1.008055
16-18	102.328	50.612	33.786	25.215	20.129	1.009584
18-20	103.866	51.497	34.112	25.489	20.336	1.013435

Düşük JRC değerine sahip profiller için düşük, yüksek JRC değerlerine sahip profiller için yüksek fraktal boyutlar elde edilmiştir. Bu ilişki Şekil 2.8' de görülmektedir.



Şekil 2.8 : 10 standart profil için JRC-D (fraktal boyut) ilişkisi (Lee ve diğ., 1990).

Polinom regresyon analizi sonucunda JRC ile D (fraktal boyut) arasında,

$$JRC = -0.87804 + 37.7844\left(\frac{D-1}{0.015}\right) - 16.9304\left(\frac{D-1}{0.015}\right)^2 \quad (2.7)$$

ilişkisi tanımlanmıştır.

Zongqi ve Xu (1990), daha önce verilen (2.1) no' lu bağıntı ile hesaplanılan Z_2 değerinin, profilin sayısallaştırılması sırasında örnekleme aralığına bağlı olarak değişeceğini, bununda JRC değerini etkileyeceğini öne sürmüş ve (2.2) no' lu bağıntıya alternatif olarak,

$$JRC = AZ_2 - B \quad (2.8)$$

ilişkisini önermiştir. Burada A ve B örnekleme aralığına bağlı olarak değişen sabitler olarak tanımlanılmış ve

0.25 mm' lik örnekleme aralığı için: A= 60.32, B= 4.51
0.5 mm' lik örnekleme aralığı için : A= 61.79, B= 3.47
1 mm' lik örnekleme aralığı için : A= 64.22, B= 2.31

değerlerini alacağı belirtilmiştir.

Huang ve Doong (1990), (2.3) ve (2.4) no' lu bağıntılar ile hesaplanılan JRC değerinin tek bir kayma doğrultusu için geçerli olabileceğini ancak aynı süreksizlik yüzeyi üzerinde farklı kesme dayanımlarının ortaya çıkmasına neden olabilecek alternatif hareket doğrultularının hesaba katılmadığını ifade etmiştir. Bu araştırmacılar, aynı süreksizlik yüzeyi üzerinde farklı yönlerde alınan çizgisel yüzey profillerinin ve kesme dayanımı değerlerinin anizotrop bir özellik sergilediğini, ancak artan normal gerilme değerleri altında anizotropinin kesme dayanımı üzerine olan etkisinin azaldığını bildirmişlerdir.

Aydan ve diğ. (1995, 1996), arazide aynı süreksizlik yüzeyi üzerinden farklı yönlerde alınan çizgisel yüzey profillerinin geometrilerinin birbirinden farklı olduğunu, yönlere göre değişim göstererek anizotrop özellik sergilediğini, doğal olarak dayanım parametrelerinin de bundan etkilendiğini belirtmiştir.

Goodman ve diğ. (1972), farklı yüzey geometrilerine sahip örnekler üzerinde, örnekleme aralığının değişiminin, elde edilen profil geometrisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Örnekleme aralığı arttıkça, gerçekte daha yüksek değerlere sahip

yüzey eğimleri elde edilen profillerde daha düşük eğim değerleri sergilemekte ve dolayısıyla pürüzlülük geometrisinin tanımlanma duyarlılığı azalmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğünün tanımına yönelik çalışmaların çoğunda, pürüzlülük çizgisel bir büyüklük olarak ele alınmıştır. Ancak aynı süreksizlik yüzeyi üzerinden birbirine paralel olarak alınan çizgisel profiller arasında geometrik farklılıklar olabilmekte, bu profiller aynı yüzey üzerinde yönlere göre de değişim sunmaktadır. Bu nedenle yüzeyin genelini yansıtan alansal analizlerin yapılması ayrı bir önem kazanmaktadır.

2.2 Pürüzlülük Ölçüm Düzenek ve Cihazlarının Tarihsel Gelişimi

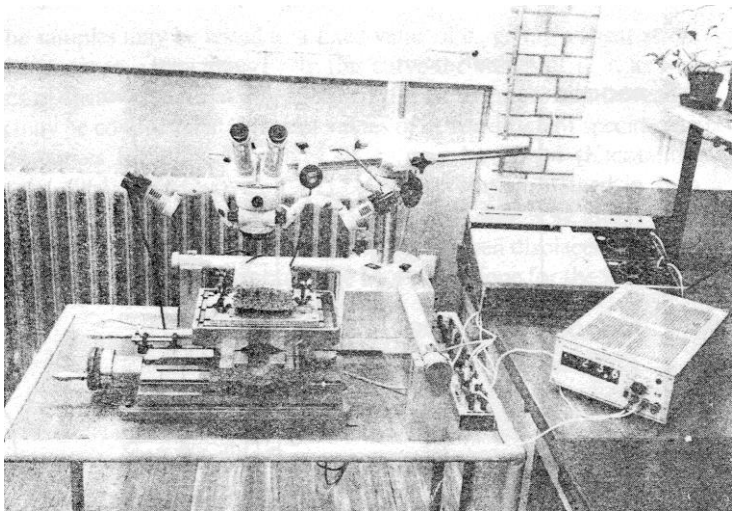
Yüzey pürüzlülüğünün süreksizliklerin mekanik davranışı üzerine olan etkisinin belirlenebilmesi için, öncelikle pürüzlülüğün sayısal olarak tanımlanması gereklidir. Pürüzlülük durumu sayısal olarak tanımlanmış olan yüzeyleri birbirleri ile objektif olarak karşılaştırmak mümkündür. Diğer karşılaştırmalar ise, kişiden kişiye değişecek öznel değerlendirmeler olacaktır. Seçilecek herhangi bir analiz yöntemi ile bu sayısal tanımın yapılabilmesi için, öncelikle analizde kullanılacak verilerin yüzey üzerinden toplanması, bir başka deyişle tüm yüzey boyunca, belirli bir örnekleme aralığı dahilinde, her farklı P(x-y) koordinatına karşılık gelen yükselti (z) değerinin ölçülmesi gereklidir. Yüzeyin sayısallaştırılması anlamına gelen bu işlem için efektif ölçüm tekniklerinin kullanılmasına ihtiyaç duyulacaktır. Sayısallaştırılmış veri setlerinin analizi sonucunda elde edilecek olan sayısal pürüzlülük parametrelerine güvenilirlik ise, sayısallaştırma işleminin doğruluk veya kesinliği ile yüksek oranda ilişkili olacaktır.

Yüzey verisi toplama teknikleri amaca uygun olmak zorundadır. Örneğin, ilgi alanı olarak metal yüzeyleri seçildiğinde, mikro veya nano ölçeklerde pürüzlülük tanımlamaları önem kazanacak, mikro-topoğrafik haritalama için uygun veri toplama tekniklerine gereksinim duyulacaktır. Çok yüksek duyarlılık gerektiren bu tür araştırmalarda; taramalı elektron mikroskobu (Lin ve Peng, 1998), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) (Grigoriev ve diğ., 1998 ; Jacops ve diğ., 1998 ; Brinksmeier ve Riemer, 1998), interferometrik mikroskop (Wyant ve Schmit, 1998 ; Gleyzes ve diğ., 1998), fringe-field kapasitif yöntemi (Nowicki ve Jarkiewicz, 1998) gibi özel tekniklerin kullanıldığı literatürde görülmektedir. Kaya kütlesi içindeki süreksizlik düzlemlerine ait yüzeylerin pürüzlülüğü araştırılmak istendiğinde, analiz ölçeği milimetreler veya santimetreler düzeyinde olabilecektir. Topoğrafik yüzeyler düşünüldüğünde ise bu metreler düzeyinde olacaktır.

Süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü, bu alanda yapılan çalışmalardaki artış göz önüne alındığında, son 20 yıldır önemli ilgi alanı olmuştur. Bu alandaki çalışmalar, veri toplama tekniklerinin geliştirilmesi ve farklı bilim dallarına yönelik cihazların üretilmesi şeklinde olmuştur. Veri toplamada kullanılacak uygun ölçüm tekniklerinin seçimi ve sayısal analizlerde kullanılacak olan metodoloji hala araştırma konusudur.

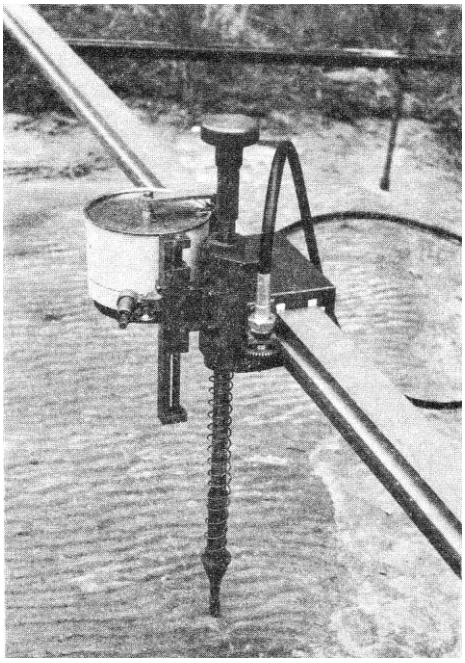
Literatür incelendiğinde, herbiri farklı niteliklere sahip olan çok sayıda ölçüm sisteminin geliştirilip kullanıldığı görülmektedir (Rengers, 1970; Fecker ve Rengers, 1971; Fecker, 1970; Önalp, 1975; Brown ve Scholz, 1985; Krohn ve Thompson, 1986; Lee ve diğ., 1990; Ferraro ve Giani, 1990; Tsoutrelis, 1990; Huang ve Doong, 1990; Ayday ve Göktan, 1990; Ord ve Cheung, 1991; Aydan ve diğ., 1996; Develi, 1996).

Rengers (1970) tarafından süreksizlik yüzeylerinin morfolojisini belirlemek amacıyla bir stereo-derinlik ölçüm mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 2.9). Ölçüm düzeneği, yatay düzlem içinde birbirlerine ortogonal olarak monte edilmiş olan ve sonsuz vida-kızak ilkesi ile çalışan iki adet hareketli tabla ve bu tablaları normalden gören bir eş derinlik ölçüm mikroskobundan oluşmaktadır. Yüzey profileri elde edilecek olan süreksizlik hareketli tabla üzerine yerleştirilmekte ve yatay düzlem içinde seçilen doğrultularda hareket ettirilmektedir. Bu sırada, süreksizlik yüzeyinin tamamını mikroskobun görüş alanında tutabilmek amacıyla, mikroskobun optik sistemi içinde yer alan mercek, düşey düzlem içinde aşağı ve yukarı hareket ettirilir. Yatay düzlemde süreksizliğin ötelenmesine karşın, merceğin düşeydeki deplasmanları bir x-y kaydedici tarafından 20 kez büyütülerek kaydedilmekte ve elde edilen grafik yüzey profili olarak kabul edilmektedir. Kayıt cihazı üzerinde elde edilen profillerin uzunluğu 25 cm' ye ulaşmaktadır.



Şekil 2.9 : Eş derinlik ölçüm mikroskobu (Rengers, 1970).

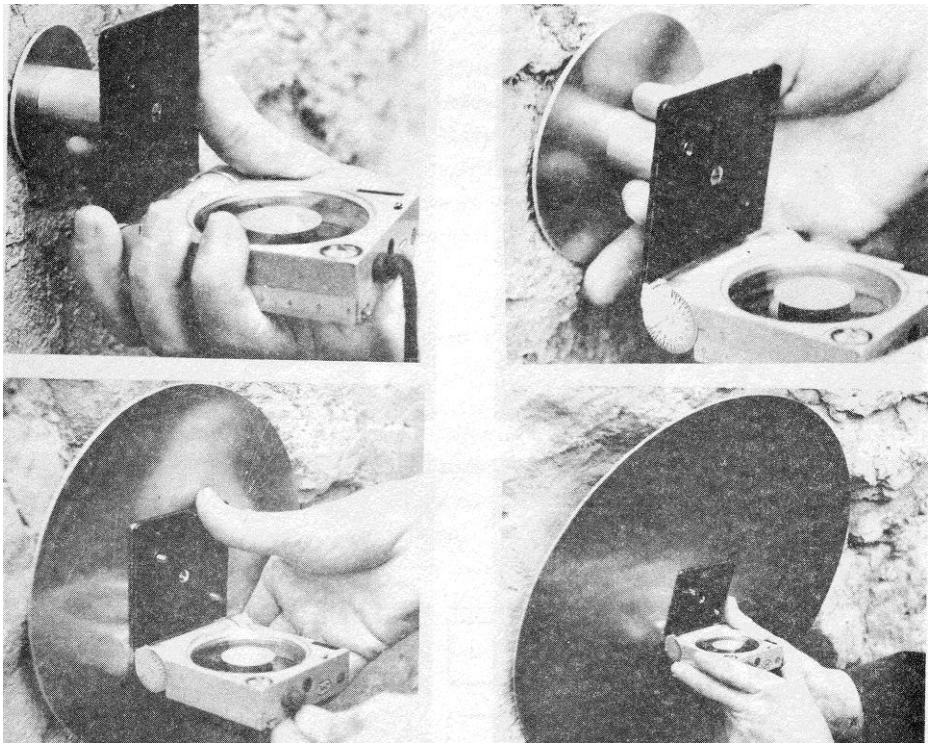
Fecker ve Rengers (1971) tarafından süreksizlik yüzeylerinin morfolojisini arazide belirlemek amacıyla bir profilograf kullanılmıştır. Ölçüm düzeneğinde, birbirlerine paralel olarak konumlandırılmış iki adet kızak ve bu kızakların eksenine dik yönde yerleştirilmiş bir komparatör bulunmaktadır (Şekil 2.10). Bu komparatör, kızaklar üzerinde kayarak hareket edebilmektedir. Komparatör iğnesinin yüzey üzerindeki girinti ve çıkıntılara takılmasını önlemek için iğnenin uç kısmına bir rulman monte edilmiştir. Komparatör iğnesinin yaptığı yerdeğiştirmeler iğnenin üst kısmında bulunan bir tambura çizilmektedir. Kızaklar yardımı ile komparatör süreksizlik yüzeyi üzerinde bir doğru boyunca yatay düzlem içinde ötelenmekte ve yüzey morfolojisine bağlı olarak, komparatör iğnesinin düşey düzlem içinde yapmış olduğu yerdeğiştirmeler tambura çizilmektedir. Böylece seçilen doğrultu boyunca, 1/1 ölçekte yüzey pürüzlülük profili elde edilebilmektedir. Düzenek sayesinde arazideki süreksizlik yüzeylerinden alınabilecek en büyük profil uzunluğu 200 cm' dir. Yüzey profillerinin gerçeğe yakın olarak elde edilmesindeki hassasiyet, komparatör iğnesinin ucuna monte edilmiş olan rulmanın çapı ile ilişkilidir. Pürüzlülük profili tambura çizildiği için, daha sonra tekrar bu profilin sayısallaştırılmasına gereksinim duyulmaktadır. Bununla birlikte, bu teknik arazideki büyük ölçekli yüzeyler için kullanışlıdır.



Şekil 2.10 : Profilograf (Fecker ve Rengers, 1971)

Arazide büyük ölçekteki süreksizlik düzlemlerinin yüzey morfolojisini belirlemek amacıyla Fecker (1970) ile Fecker ve Rengers (1971) tarafından basit bir yöntem kullanılmıştır. Yöntem, bir jeolog pusulası ve farklı çaplardaki diskler üzerine

kuruludur (Şekil 2.11). Süreksizlik yüzeyi üzerinde, belirli bir doğrultu boyunca noktalar seçilmekte ve çapı bilinen bir disk sırasıyla bu noktalara yerleştirilmektedir. Jeolog pusulası her nokta için ayrı ayrı disk üzerine konulmakta ve eğim açıları ölçülmektedir. Aynı işleme farklı çaplardaki diskler ile devam edilmekte ve süreksizlik yüzeyi üzerinde, seçilen doğrultu boyunca, kullanılan disk çapına bağlı olarak, eğim ölçümlerinin değişimindeki dağılım yüzey pürüzlülüğü olarak değerlendirilmektedir. Daha küçük çapta disklerin kullanımı, ana ondülasyonlar dışında, daha küçük ölçekteki yüzey düzensizliklerinin kaydedilmesine olanak sağlamakta ve gerçeğe daha yakın profillerin alınabilme şansını artırmaktadır. Ancak ölçüm çözünürlüğü kullanılan en küçük disk çapı ile sınırlıdır. Araştırmacılar çok daha büyük ölçekteki süreksizlik yüzeylerinin ölçümü için fotogrametri yöntemini kullanmışlardır.



Şekil 2.11 : Süreksizlik yüzey profillerinin arazide pusula ve farklı çaplardaki diskler ile ölçülmesi (Fecker, 1970 ; Fecker ve Rengers, 1971).

Önalp (1975), süreksizlik yüzey geometrisinin kaydedilmesi için mekanik bir ölçüm sistemi kullanmıştır. x-y düzleminde hareket edebilen yatay bir tabla üzerine, yüzey ölçümü yapılacak süreksizlik yerleştirilmekte ve istenilen bir doğrultuda tabla elle mekanik olarak hareket ettirilmektedir. Bu sırada dokunma yükü 1gr'dan daha az olan çelik bir iğne yüzeyle sürekli olarak temas halinde bulunmaktadır. Yüzey yükseltileri, iğnenin düşey yönde yaptığı yerdeğiştirmelere bağlı olarak, 5-200 oranında büyültme olanağı olan bir transduser ile ölçülmektedir. Böylece, yüzey

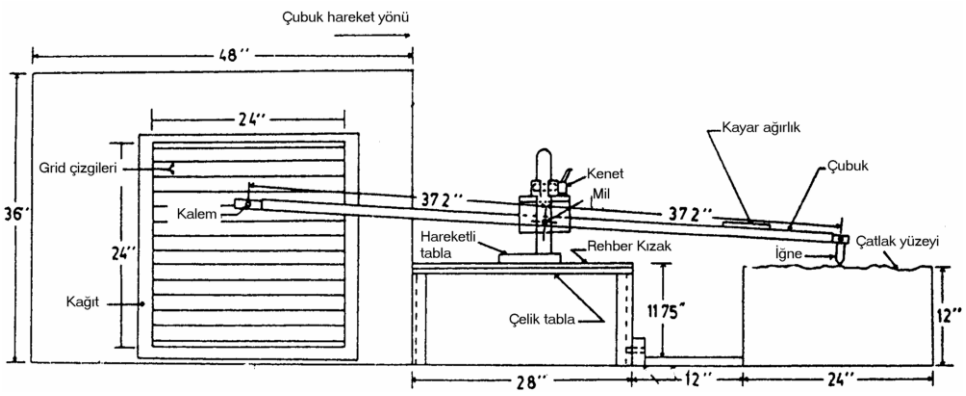
topoğrafyası bir x-y çiziciden sürekli profiller olarak elde edilmektedir. Ölçüm doğrultusu boyunca profil uzunluklarına karşılık gelen yatay tablanın yerdeğiştirmeleri ise, 1-50 oranında büyültme ile doğrusal bir potansiyometreyle ölçülmektedir.

Brown ve Scholz (1985), süreksizlik yüzeylerinin profillerini çıkarmak için bir profilometre geliştirmişlerdir. Laboratuvar ölçekli bu cihaz, 1cm' den 1μm' ye kadar olan dalga boylarını, 2mm' den 0.1 μm' ye kadar olan yükseltileri okuyabilmektedir. Bu cihazın saha ölçekli tipi ise, 1m' den 1mm kadar olan dalga boylarını, 5 cm' den 10 μm' ye kadar olan yükseltileri kayıt edebilmektedir. Brown ve Scholz (1985) tarafından geliştirilen bu cihaz, farklı zamanlarda farklı araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Bu cihazı ile Power ve diğ. (1987), süreksizlikler üzerinden 0.5 mm aralıklarla 1m' lik profiller çıkarmışlardır. Schmittbuhl ve diğ. (1993), 60 cm uzunluğundaki süreksizlik yüzeyleri üzerinden 0.5 mm örnekleme aralığı ile yüzey profilleri elde etmişlerdir. Schmittbuhl ve diğ. (1995), aynı cihazı laboratuvar ölçekli veri toplamak amacıyla kullanmışlardır. Bu araştırmacılar, 4 cm' lik profilleri 25μm' lik örnekleme aralıkları ile sayısallaştırmış, profilleri yan yana sıralayarak yüzey haritası elde etmişlerdir. Kulatilake ve diğ. (1995) bu cihazı doğal süreksizliklerden alınan 10 cm çapındaki silikon kalıpların ölçülmesinde kullanmışlardır.

Krohn ve Thompson (1986), kumtaşı örneklerinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikro yapısal görüntüler almışlar, fotografik ve görüntü işleme teknikleri kullanarak bu görüntüleri analiz etmişlerdir.

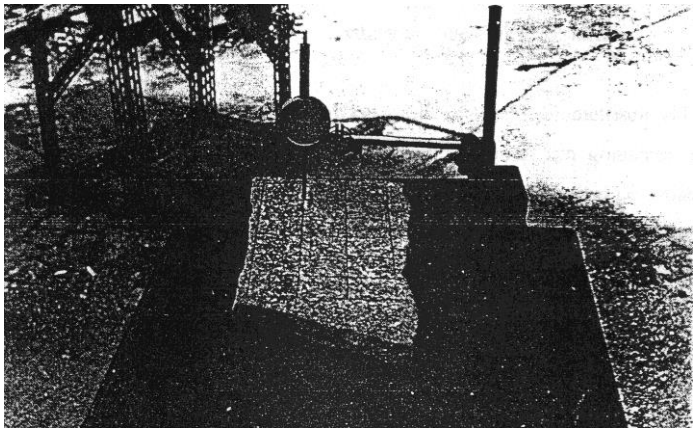
Süreksizlik yüzey profillerini elde etmek amacıyla, diğer bir mekanik ölçüm düzeneği Lee ve diğ. (1990) tarafından kullanılmıştır (Şekil 2.12). Uzunca bir milin bir ucuna kalem diğer ucuna ise süreksizlik yüzeyine temas eden bir iğne bağlanmıştır. Bu mil, ağırlık merkezinden ekseni etrafında dönebilecek şekilde hareketli bir kenet içine yerleştirilmiştir. Bu kenet sayesinde uzun mil, çelik bir tablanın üzerine monte edilmiş olan kızaklar üzerinde ileri-geri kayabilmektedir. Milin iğne monte edilmiş olan ucunun altına, yüzey geometrisi araştırılan bir süreksizlik yüzeyi rijit olarak yerleştirilmektedir. Kızak üzerindeki hareketli kenet, kızak doğrultusu boyunca seçilen bir başlangıç konumundan ileriye doğru hareket ettirildiğinde, milin bir ucundaki iğne yüzey üzerinde ve yüzeye sürekli temas halinde ötelenmekte ve yüzey morfolojisine bağlı olarak düşey yönde yükselim ve alçalımlar gerçekleştirmektedir. Bu sırada milin diğer ucundaki kalem ise, iğnenin düşey yöndeki hareketlerinin tersini yapmakta ve bu hareketleri kağıt üzerine çizmektedir. Böylece süreksizlik yüzeyi üzerinde seçilen doğrultu boyunca

pürüzlülük profili elde edilmektedir. Elde edilen profilin daha sonra tekrar sayısallaştırılması gerekmektedir.



Şekil 2.12 : Profilograf (Lee ve diğ., 1990)

Ferraro ve Giani (1990), arazide yüzey geometrisi kaydedilmek istenilen süreksizlik yüzeyi üzerinde bir grid oluşturmuşlar ve bu grid üzerinde tanımlanmış farklı koordinat noktalarına ait yükselti değerlerini elle kontrol ettikleri bir mekanik komparatör ile okumuşlardır (Şekil 2.13). Daha sonra, elde ettikleri sayısal veriler sayesinde yüzeye ait kontur haritası oluşturmuşlardır. Oldukça yoğun emek gerektiren bu yöntemde, yüzey boyutu arttırıldığında çok daha fazla emek ve zamana ihtiyaç duyulacaktır.



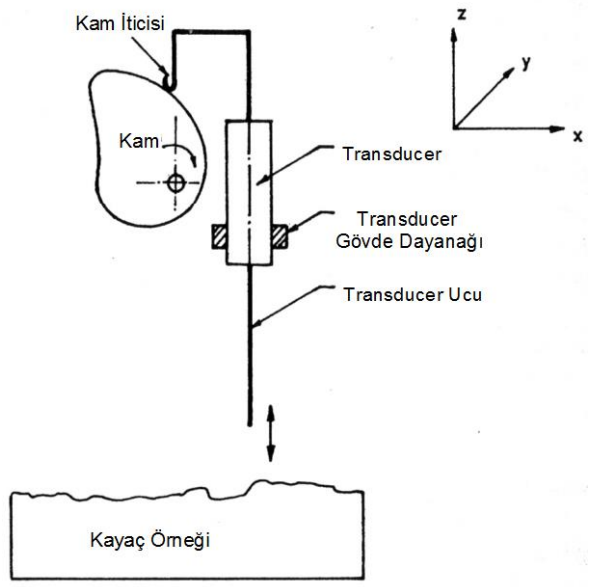
Şekil 2.13 : Çatlak yüzey pürüzlülüğünün mekanik ölçümü (Ferraro ve Giani, 1990).

Tsoutrelis (1990), fotoğraf tekniği uygulamaları üzerine çalışmıştır. Bu tür bir uygulamada, süreksizlik yüzeyinden belirli açılarla alınan fotoğraflar ilk olarak dijit forma çevrilmekte ve daha sonra görüntü işleme programları ile bilgisayarda analiz edilmektedir.

Huang ve Doong (1990), süreksizlik yüzeylerinin kesme dayanımı üzerinde yüzey pürüzlülüğüne bağlı anizotropi etkisini araştırmışlardır. Bilgisayar bağlantılı, LV-250

tipi bir profilometre kullanarak, kesme deneyine alınacak olan 10 cm çapındaki daire kesitli yüzeylerden 1 cm ara ile pürüzlülük profilleri çıkartmışlardır.

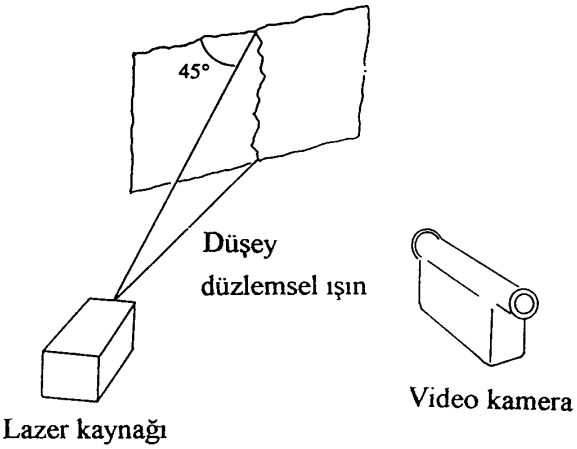
Ayday ve Göktan (1990), pürüzlülüğü laboratuvar ortamında ölçmek için yüzey tarayıcı bir aygıt geliştirmişlerdir. Bu aygıt yatay düzlemde hareket edebilen x ve y tablaları ile bağlı olduğu kamın dönme hareketiyle düşey eksende (z) aşağı-yukarı ötelenebilen bir deplasman ölçerden (transducer) oluşmaktadır. Tablaların ve kamın hareketleri bilgisayar aracılığı ile step motorlar tarafından sağlanmaktadır. x ve y tablaları ile yatay düzlemde adım adım ötelenen süreksizlik yüzeyi üzerinde aralarında 2 mm yatay mesafe bulunan noktalardaki yükselti değerleri deplasman ölçer tarafından okunmakta ve bilgisayara kayıt edilmektedir. Aygıtta ölçülebilir en büyük yüzey alanının 150x150 mm^2 olduğu belirtilmiştir. Aygıta ait ölçme prensibi Şekil 2.14' de görülmektedir.



Şekil 2.14 : Yüzey pürüzlülük tarayıcısı ile ölçme prensibi (Ayday ve Göktan, 1990)

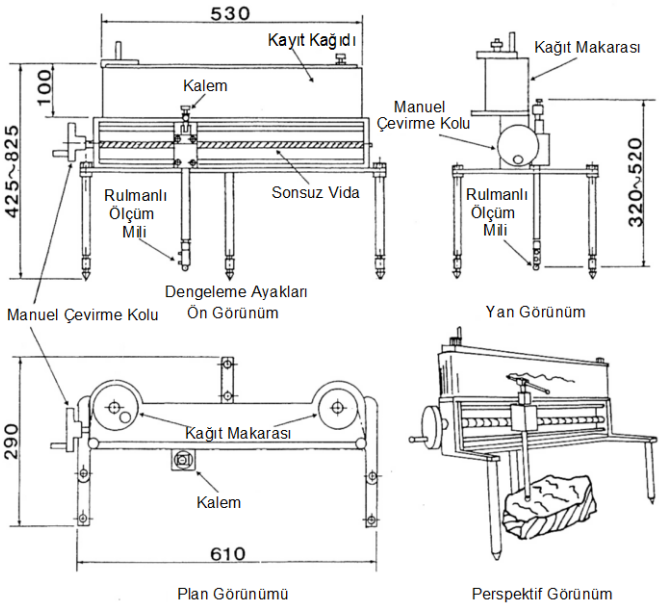
Ord ve Cheung (1991), süreksizlik yüzeylerinin 3-boyutlu geometrisini elde etmek amacıyla optik bir sistem kullanmışlardır. Sistem düzlemsel ışın gönderen bir lazer kaynağı üzerine kuruludur (Şekil 2.15). Lazer kaynağı ile süreksizlik yüzeyi aralarında 45 derecelik bir açı olacak biçimde karşılıklı yerleştirilir. Lazer kaynağından düzlemsel olarak çıkan ışın yüzey üzerine bir şerit halinde düşmektedir. Ancak yüzeyin rölyefine uyarak doğrusallığını kaybetmekte ve yüzey üzerinde bulunduğu hat boyunca yüzeyin şeklini almaktadır. Başlangıçtaki doğrusal ışın yüzey üzerinde bir profil görünümü sunmaktadır. Bu görüntüler, sabit bir video kamera tarafından kaydedilerek bilgisayara aktarılmaktadır. Yan yana alınmış profiller korele edilerek, 512x512' lik bir grid üzerinde yüzeyin 3-boyutlu görüntüsü

elde edilebilmektedir. Bir görüntü analiz programı yardımıyla da bu görüntü analiz edilmekte ve yüzeyin üç boyutlu koordinatları belirlenmektedir.



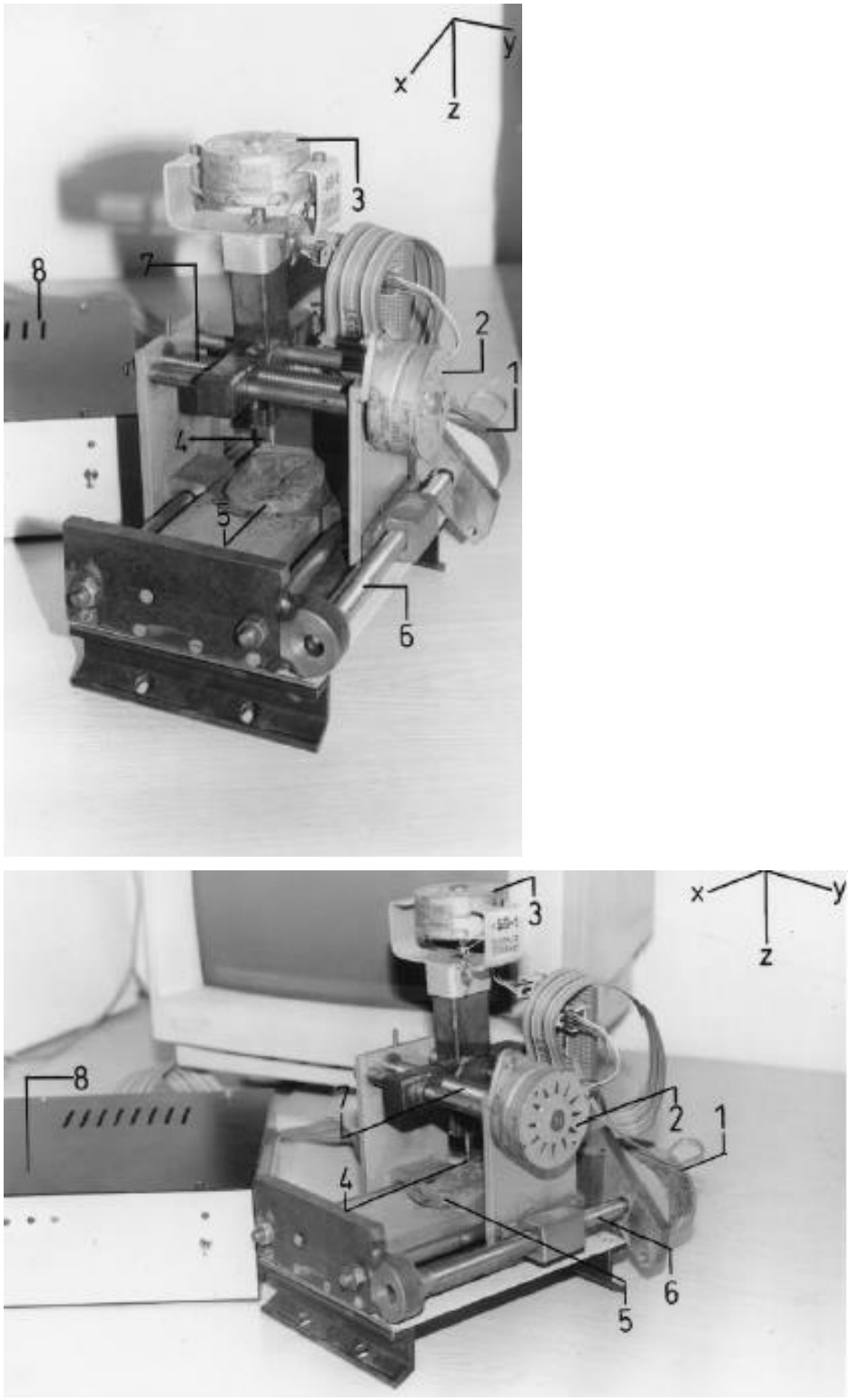
Şekil 2.15 : Laser ile süreksizlik düzlemi yüzey geometrisinin kaydedilmesi (Ord ve Cheung, 1991).

Aydan ve diğ. (1996), arazide yüzey profillerinin ölçümü için elle (manuel) kontrol edilen bir profilometre geliştirmişlerdir (Şekil 2.16). Alüminyum bir sehpa içerisine monte edilmiş sonsuz bir vida elle çevrildiğinde, bu vidanın içinden geçtiği blok üzerinde yer alan ölçüm milinin uç kısmındaki 3 mm çapındaki rulman süreksizlik yüzeyi üzerinde çizgisel bir hat boyunca dönerek ötelenmektedir. Bu sırada, ölçüm hattı üzerindeki girinti ve çıkıntılara bağlı olarak ölçüm milinin düşey eksendeki aşağı-yukarı hareketleri ise çubuğun en üst kısmına bağlanmış bir kalem ile kağıt üzerine çizilmektedir. Bu şekilde elde edilen çizgisel profiller daha sonra bilgisayara aktarılmakta ve bilgisayarda sayısallaştırılmaktadır.



Şekil 2.16 :Arazi profilometresinin farklı açılardan görünümleri (Aydan ve diğ., 1996)

Develi (1996), süreksizlik yüzey pürüzlülüğünün alansal olarak ölçümü, bir başka deyişle tüm yüzeyin sayısallaştırılması için, tamamen bilgisayar kontrollü bir "yüzey tarama cihazı" tasarlayıp geliştirmiştir (Şekil 2.15). Cihazda taranabilir en büyük alan 54x54 mm olup, yükseltilerin ölçülmesindeki duyarlık 1/10 mm' dir. Yatay düzlemdeki (xy-düzlemi) veri örnekleme aralığı 1 mm olup istendiğinde bu değerin daha altında seçilebilmektedir. Cihaz ile bilgisayar arasındaki haberleşme özel tasarlanmış bir kontrol ünitesi aracılığı ile sağlanmakta ve cihaz Turbo C diliyle yazılan özel bir program ile kontrol edilmektedir. Bu program, ölçüm sırasında okunan yükselti (z) değerlerini koordinatları (x,y) ile birlikte ölçümle eş zamanlı olarak bilgisayarda oluşturduğu veri dosyasına kaydetmekte, bunlar o sırada bilgisayar ekranından da izlenebilmektedir. Cihazın çalıştırılması ile birlikte ölçümlerin insan eli değmeksizin bilgisayar kontrolü altında otomatik şekilde yapılması, kullanıcıya kolaylık ve pratiklik sağlamaktadır. Bilgisayar kontrollü bu yüzey tarama cihazı ile ilgili daha detaylı bilgi literatürde mevcuttur (Develi, 1996; Develi ve Vardar, 1998; Develi ve diğ., 2001).



Şekil 2.17 : Süreksizlik yüzeylerinin alansal olarak sayısallaştırılması için bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı (Develi, 1996)

1: SPM1, 2: SPM2, 3: SPM3 (SPM: step motor), 4: ölçüm iğnesi, 5: süreksizlik yüzeyi , 6: sonsuz vida (x ekseni boyunca hareketi sağlar) 7: sonsuz vida (y ekseni boyunca hareketi sağlar) 8: elektronik kontrol ünitesi. (x,y ve z eksenlerindeki boyutlar sırasıyla 230, 160 ve 245 mm'dir)

Ünal (2000), laboratuvar ölçeğindeki yüzeylerin pürüzlülüğünün ölçülmesinde sayısal fotogrametri yöntemini kullanmış, bu yöntemin küçük ölçekli çalışmalarda kullanılabileceğini belirtmiştir.

Daha öncede belirtildiği gibi, sayısallaştırılmış veri setlerinin analizleri sonucunda elde edilecek olan sayısal pürüzlülük parametrelerine güvenilirlik, sayısallaştırma işleminin doğruluğu ile yüksek oranda ilişkilidir. Lazer profilometrisi gibi yöntemlerde daha sık ve daha yüksek hassasiyette hızlı veri toplanabilmektedir. Ancak bu tür cihazların yüksek maliyetleri ve bulunabilirliğinin kısıtlı olması kullanımlarını sınırlamaktadır. Benzer şekilde, fotoğrafik ve görüntü analiz tekniklerinde hız kazanılmakta, ancak bu tür teknikler düşük çözünürlüklerde uygulandığında veri kaybına neden olabilmektedir. Mekanik profilograflar ile pratik veri toplanması mümkün olabilmektedir. Ancak bu durumda, süreksizlik yüzeyi üzerinde belirli bir hat boyunca ölçüm yapıldığından, 1-boyutlu profil verisi toplanabilmektedir. Profilograflar ile tüm yüzey haritalanmak istendiğinde, ayrı profillerin ikinci bir işlem ile birleştirilmesi uğraştırıcı ve zaman alıcı olmaktadır. Bu nedenle, Develi (1996) tarafından geliştirilen tamamen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı tüm yüzeyi alansal olarak sayısallaştırması açısından önem kazanmakta, ölçümlerin ise bilgisayar denetiminde olması, özel yazılımı sayesinde ölçüm sırasında doğrudan sayısal veri toplanması ve veri dosyalarının ölçüm sonrasında hiç bir ikincil ek işlem gerektirmeksizin matematiksel analizlerde doğrudan kullanılabilir formatta bulunması kullanıcıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Sonuç olarak, farklı boyutlardaki süreksizlik yüzeylerinin ve/veya bu yüzeylerin profillerinin sayısallaştırılması için, farklı araştırmacılar tarafından farklı teknikler geliştirilmiş ve uygulanmıştır.

2.3 Süreksizliklerin Kesme Dayanımı Üzerine Yapılmış Başlıca Çalışmalar

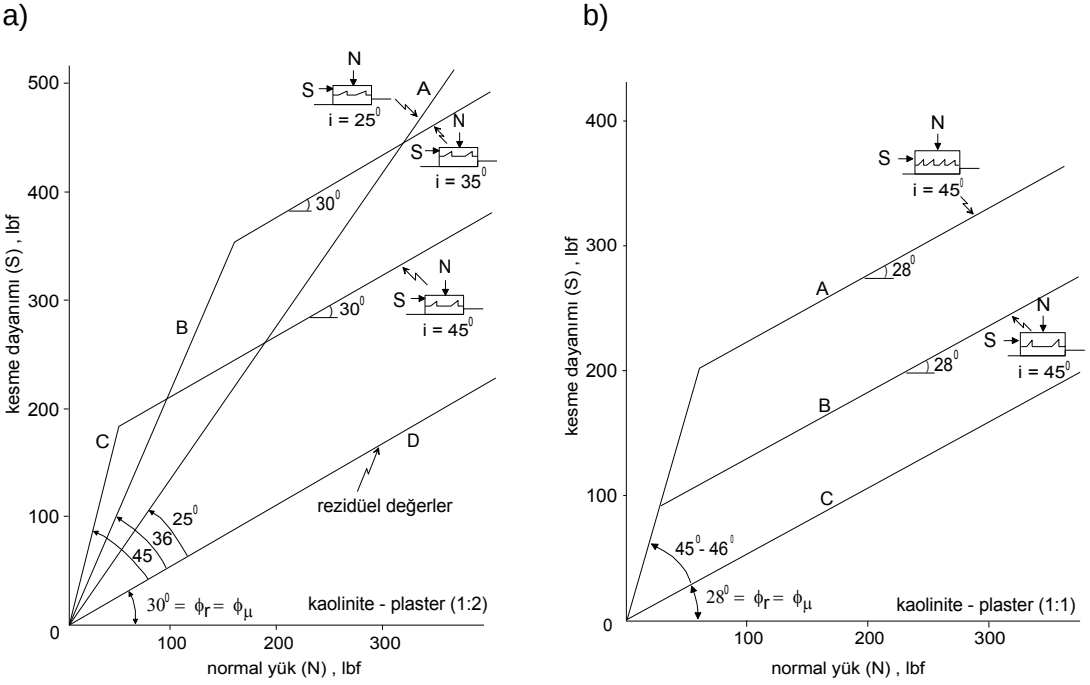
Süreksizliklerin kesme dayanımı ve davranışı, yüzey pürüzlülüğünün bunun üzerine olan etkisi, kaya mekaniğinin başlıca araştırma konularından biri olup, farklı zamanlarda değişik araştırmacılar tarafından çeşitli kesme dayanımı ölçütleri geliştirilmiştir. Kuvvetler altında zorlanan süreksizliklerin davranış biçimlerini anlamaya yönelik literatürde ilk göze çarpan çalışmalar, özel konfigürasyonlu model yüzeyler üzerinde gerçekleştirilen deneysel, nümerik ve kuramsal araştırmalardır (Rowe ve diğ., 1964 ; Patton, 1966 ; Corthouts, 1966 ; Ladanyi ve Archambault, 1969 ; Einstein ve diğ., 1970).

Süreksizlik yüzeylerinin en büyük kesme dayanımı Coulomb ölçütüne göre,

$$\tau_p = c_a + \sigma_n \tan \phi \qquad (2.9)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada; c_a süreksizliğin görünür kohezyonu, σ_n normal gerilme ve ϕ süreksizliğin içsel sürtünme açısıdır.

Patton (1966), pürüz açıları, pürüz sayıları ve malzeme (kaolen-alçı) karışım oranları birbirinden farklı olan, testere dişli (saw-tooth) modeller üzerinde yapmış olduğu kesme deneyleri ile, pürüzlülüğün ve pürüzler arasındaki kenetlenmenin yenilenme zarfları üzerine olan etkisini araştırmıştır. Pürüz sayısı iki, pürüz açıları (i); 25^0, 35^0, 45^0 ve kaolen-alçı karışım oranı 1:2 olan modeller üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, pürüz eğim açısı i = 25° olan modeller için doğrusal (lineer) yenilme zarfı elde edilmiştir (Şekil 2.18a, A zarfı). Pürüz eğim açıları i = 30^0 ve 45^0 olan modeller içinse doğrusal olmayan (bilineer) yenilme zarfları sunmuştur (Şekil 2.18a, B ve C zarfları).

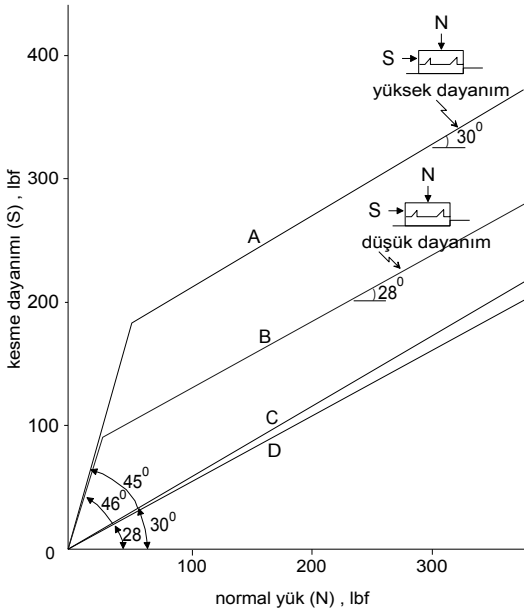


Şekil 2.18 : İdeal testere dişli modeller için doğrusal olmayan (bilineer) yenilme zarfları (Patton, 1966) a) farklı pürüz eğim açılarına sahip modeller durumunda. b) aynı eğim açısına, farklı pürüz sayılarına sahip modeller durumunda.

Bu modeller için rezidüel (artık) dayanım zarfına (Şekil 2.18a, D zarfı) ait rezidüel (artık) içsel sürtünme açısı (ϕ_r), aynı karışım oranı ile hazırlanan pürüzsüz (düz) modellerin içsel sürtünme açısına (ϕ_μ) neredeyse eşit bulunmuştur. B ve C zarflarının ikincil kısımlarının eğim açıları, artık içsel sürtünme açısına (ϕ_r) çok

yakındır. Bu zarfların birincil kısımlarının eğim açıları ise, pürüzsüz düz yüzeye ait içsel sürtünme açısı (ϕ_μ) değeri ile pürüz açısının (i) toplamına eşittir. Pürüz eğim açıları ve kaolen-alçı karışım oranları aynı, fakat pürüz sayıları farklı olan modeller üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, öncekine benzer doğrusal olmayan yenilme zarfları elde edilmiştir (Şekil 2.18b).

Model karışım oranı ve pürüz eğim açısı değerlerinin sabit tutularak, yüzey üzerindeki pürüz sayısının artırılması, doğrusal olmayan yenilme zarfındaki dönüm noktasının daha yüksek bir normal kuvvette gerçekleşmesini sonuçlamıştır. Özdeş yüzey konfigürasyonlu, ancak farklı karışım oranlı modeller üzerinde yapılan kesme deneyleri ise; daha sağlam modellere (Şekil 2.19, A zarfı) ait yenilme modundaki değişimin, daha zayıf modellerinkine (Şekil 2.19, B zarfı) nazaran, daha yüksek normal yük değerlerinde ortaya çıktığını göstermiştir. Diğer taraftan, Şekil 2.18b' deki yenilme zarfları ile Şekil 2.19' deki yenilme zarflarının eksen takımı üzerinde bulundukları yerleri ve açısal geometrileri dikkate alındığında, birbirleri ile uyum içinde olduğu, modelin dayanımının artırılmasının, pürüz sayısının artırılmasına benzer bir davranışa neden olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.19 : Farklı malzeme özelliklerine sahip testere dişli modellerin yenilme zarfları (Patton, 1966)

Corthouts (1966), pürüz eğim açısı i=45^0 olan simetrik testere dişli model üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik analiz yapmış ve benzer şekilde doğrusal olmayan bir yenilme zarfı elde etmiştir.

Patton (1966), doğrusal olmayan yenilme zarfını, artan normal gerilmeler altında yenilme modellerinin farklılık gösterdiğini savunan kuramı ile açıklamıştır. Patton (1966)' ın "doğrusal olmayan kesme dayanımı ölçütü" ne göre, zarfın birincil kısmındaki en büyük kesme dayanımları; düşük normal gerilmeler altında, "i" açısı ile eğimli yüzeyler boyunca ortaya çıkan kayma hareketinin sonucudur. Bu durum için en büyük kesme dayanımı ölçütü,

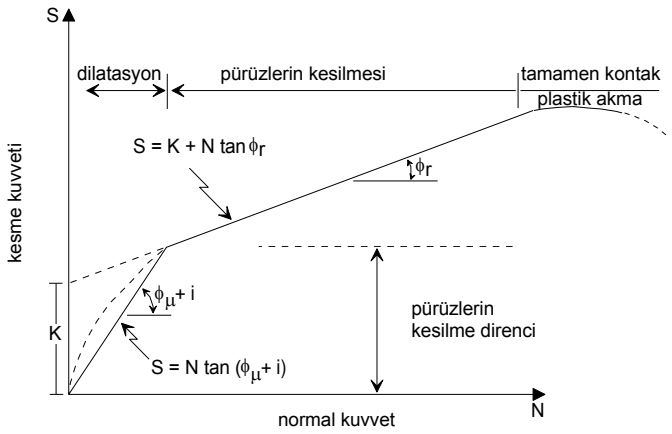
$$\tau_p = \sigma_n \tan (\phi_\mu + i) \qquad (2.10)$$

eşitliği ile tanımlanmıştır. Burada; τ_p en büyük kesme dayanımı, σ_n sabit normal gerilme, ϕ_μ pürüzsüz yüzeyin sürtünmeye bağlı kayma direnci açısı, i pürüzlerin yatay düzlem ile yaptığı açıdır (bu durum için dilatasyon açısına eşittir).

Diğer yandan, dilatasyonun sınırlandığı yüksek normal gerilme değerlerinde, pürüzler üzerinde oluşan gerilmeler, bu pürüzlerin dayanımına ulaştığında, kesilme gerçekleşmektedir. Bu aşama için en büyük kesme dayanımı ölçütü;

$$\tau_p = c_a + \sigma_n \tan \phi_r \qquad (2.11)$$

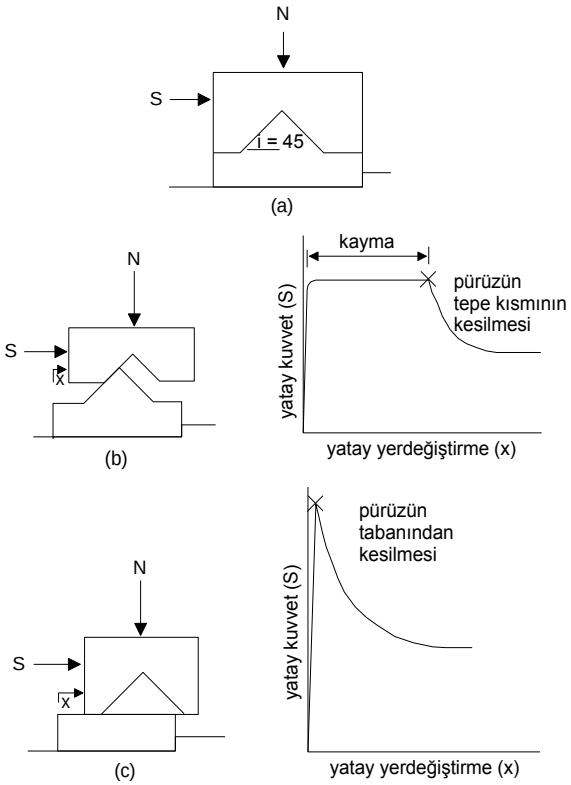
ifadesi ile tanımlanmıştır. Burada, ϕ_r malzemenin artık kesme direnci açısı, c_a görünür kohezyondur (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 : Testere dişli modeller için örneğin dilatasyonu ve pürüzlerin kesilmesi aşamaları için için kuramsal Mohr zarfı (Patton, 1966).

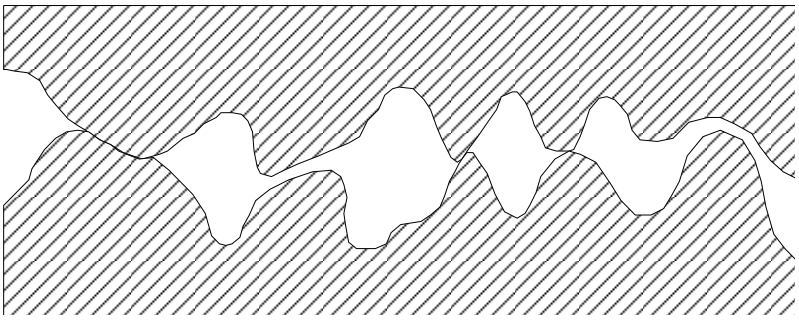
Einstein ve diğ., (1970)' e göre özel konfigürasyonlu model örneğinde, başlangıçta hiç bir kuvvet ve bu kuvvetlere bağlı bir hareket mevcut değil iken, iki yüzey arasındaki değme tüm yüzey alanı boyunca gerçekleşecek ve iki yüzey birbirine tamamen kenetlenecektir (Şekil 2.21a). (2.10) no' lu eşitlik ile ifade edilen kritere uygun olarak düşük ve orta normal kuvvet değerleri altında kesme kuvvetinin uygulanması ile birlikte, pürüzlülük kesilmeksizin iki yüzey birbiri üzerinde kaymaya

başlayacak ve uygulanılan kesme kuvvetinin doğrultusuna dik yönde dilatasyon gerçekleşecektir. Dilatasyonun miktarına bağlı olarak, artık iki yüzey birbirine tüm yüzey alanları boyunca değmeyecek, ancak belirli bölgelerde birebir değme gelişecek ve kenetlenme sadece bu değme bölgelerinde olacaktır (Şekil 2.21b). Birbirine kenetlenen pürüzler üzerindeki gerilme yoğunlaşması bu pürüzlerin dayanımına ulaştığında ise, (2.11) no' lu eşitlik ile tanımlanan ölçüte bağlı olarak kesilme olayı gerçekleşecektir. Dilatasyon ve kesilme olayları ile bunlara karşılık gelen kesme yükü - yatay yer değiştirme eğrilerinin şematik sunumu kuramsal olarak Şekil 2.21c' deki gibi verilmiştir.



Şekil 2.21 : Testere dişli modeller için dilatasyon ve kesilme olaylarının şematik sunumu (Einstein ve diğ., 1970) a) başlangıç durumu b) dilatasyon ve ardından pürüzün tepe kısmından kesilmesi c) dilatasyona izin verilmeyen yüksek normal gerilmelerde pürüzün tabanından kesilmesi

Ancak Patton (1966)' un doğrusal olmayan kesme dayanımı ölçütü, karşılıklı yüzey geometrileri birbirine mükemmel uyan ve dolayısıyla kenetlenmenin kusursuz olarak sağlanabildiği testere dişli modeller için geçerlidir. Oysa doğadaki süreksizliklerin yüzey geometrileri buradaki testere dişli modeller ile kıyaslanamayacak derecede karmaşık bir yapı sunmaktadır. Örtüştürüldüklerinde karşılıklı yüzeyler her zaman birbirine tam olarak uymaz, sadece belirli noktalarda birbirine değer, kenetlenme bu noktalarda gelişir ve diğer kısımlarda ise farklı şekil ve boyutlarda boşluklar yer alır (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 : Doğal süreksizliklerde yüzeyler arasındaki değme alanları ve kenetlenme (Einstein ve diğ., 1970)

Rowe ve diğ., (1964) kesme kuvvetini (S) üç farklı bileşene ayırmışlardır.

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \qquad (2.12)$$

Burada,

S_1 : Normal kuvvet (N)' e karşı dilatasyon sırasında yapılan harici işe neden olan kesme kuvveti bileşeni,

S_2 : Dilatasyon nedeni ile sürtünme sırasında yapılan ek dahili işe neden olan kesme kuvveti bileşeni,

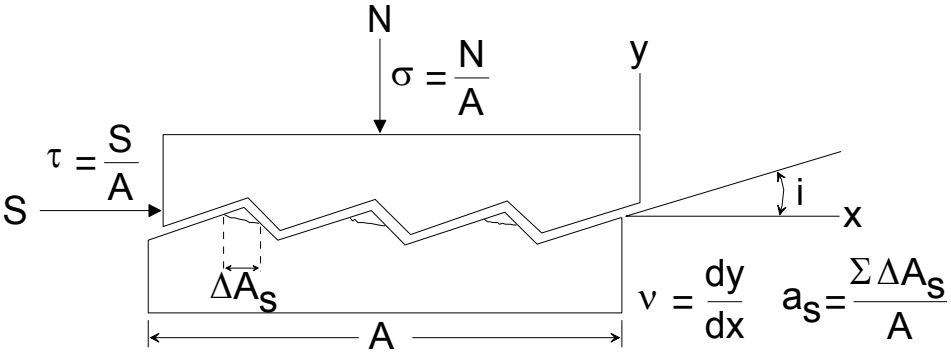
S_3 : Kesme sırasında dilatasyon olmaksızın, dahili sürtünme sırasında yapılan işe neden olan kesme kuvveti bileşenidir (ideal düz yüzey durumu).

S_1 bileşeni Şekil 2.23' e göre,

$$S_1\,dx = N\,dy \Rightarrow S_1 = N\,dy/dx \qquad (2.13)$$

dolayısıyla da, $S_1 = N \tan \Rightarrow S_1 = Nn$ şeklinde ifade edilmektedir. Burada,

n: yenilme anındaki dilatasyon oranıdır (n=dy/dx)



Şekil 2.23 : Dilatasyon (ν) ve kesme alanı oranını (a_s) tanımlayan şematik kesit.

S_2 cosi, kayma düzlemine paralel olan kesme gerilmesi ve S sini, i $\neq$ 0 durumunda dilatasyon nedeniyle ortaya çıkan ve düzleme normal olan toplam kuvvet olduğundan,

S_2 bileşeni;

$$S_2 \cos i = S \sin i \tan\phi_\mu \quad (2.14)$$

$$S_2 = S \tan i \tan\phi_\mu$$

$$S_2 = S_n \tan\phi_\mu \quad (2.15)$$

şeklinde yazılmaktadır.

Dilatasyonun gerçekleşmediği durumda (örneğin; ideal düz yüzey durumu) S_3 bileşeni,

$$S_3 = N \tan\phi_\mu \quad (2.16)$$

ile tanımlanmaktadır.

(2.13), (2.15) ve (2.16) no'lu eşitlikler, (2.12) no'lu denklemde yerine konursa,

$$S = N \tan i + S \tan i \tan\phi_\mu + N \tan\phi_\mu$$

$$S/N = \tan i + S/N \tan i \tan\phi_\mu + \tan\phi_\mu$$

$$S/N = \tan(\phi\mu + i) \quad (2.17)$$

elde edilmektedir. Dikkat edilirse bu eşitlik daha önce verilen (2.10) no'lu eşitlik ile aynıdır.

Ladanyi ve Archambault (1969), pürüzlü bir süreksizlik yüzeyinde, pürüzlerin kesilmesine bağlı olarak dördüncü bir bileşenin ortaya çıkacağını (S_4), ve bu bileşenin değerinin, yüzey üzerindeki tüm pürüzlerin tabanlarından kesildiği varsayımından yola çıkarak tanımlanabileceğini belirterek, Rowe ve diğ., (1964)' nin kuramını daha ileriki bir noktaya taşımış ve S_4 bileşenini

$$S_4 = AK + N \tan \phi_0 \quad (2.18)$$

ifadesi ile tanımlamıştır. Burada,

A : pürüzlerin tabanlarının kesme düzlemi üzerindeki izdüşümlerinin toplam alanı

K ve ϕ_0 : kayanın malzeme dayanımı ile ilişkili Coulomb kesme parametreleridir.

Ladanyi ve Archambault (1969)' a göre; gerçekte pürüzlü bir yüzey kesildiğinde, kayma ve kesilme olmak üzere eş zamanlı iki farklı yenilme olayı gerçekleşmektedir. Eğer pürüzler izdüşüm alanının sadece bir kısmı boyunca ($A_s = \sum \Delta A_s$) kesilirse, "A-A_s" alanı üzerinde kayma gerçekleşecektir. Bu durumda daha önce (2.12) no'lu denklem ile verilen toplam kesme kuvveti,

$$S = (S_1 + S_2 + S_3)(1-a_s) + S_4 a_s \tag{2.19}$$

şeklinde yazılabilecektir. Burada; $a_s = A_s / A$ olup, kesme alanı oranı olarak adlandırılmıştır.

Ladanyi ve Archambault (1969), S_1, S_2, S_3 ve S_4 denklemlerini (2.19) no'lu eşitlikde yerine koyarak, toplam düzlemsel alana (A) bölmüş, kesme dayanımı (τ) için

$$\tau = \frac{S}{A} = \frac{\sigma_n(1-a_s)(\nu + \tan\phi_\mu) + (\sigma_n \tan\phi_0 + K)a_s}{1-(1-a_s)\,\nu \tan\phi_\mu} \tag{2.20}$$

ifadesini tanımlamıştır. Bu ifade, literatürde "Ladanyi ve Archambault en büyük kesme dayanımı ölçütü" olarak bilinmektedir.

Eğer $\nu = 0$ ise (dilatasyonun gerçekleşmediği durum),

$$\tau = \sigma_n(1-a_s)\tan\phi_\mu + (\sigma_n \tan\phi_0 + K)\,a_s \tag{2.21}$$

ifadesi ile düz (pürüzsüz) kesme yüzeyinin kesme dayanımı tanımlanmaktadır.

Kesme alanı oranı a_s ve dilatasyon oranının (ν) değeri uygulanan normal gerilmeye bağlıdır. Ladanyi ve Archambault (1980), bu parametrelerin hesaplanması için aşağıdaki görgül ilişkileri önermiştir.

$$a_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\eta\sigma_t}\right)^L \tag{2.22}$$

$$\nu = \left(1 - \frac{\sigma_n}{\eta\sigma_t}\right)^K \tan(i_0) \tag{2.23}$$

Burada, σ_t doğrusal olmayan yenilme zarfındaki geçiş noktasına karşılık gelen ve dilatasyonu bastıran normal gerilme değeri olup, pratik amaçlar için σ_c'ye eşit kabul edilebileceği belirtilmiştir. L ve K boyutsuz sabitler olup, değerleri sırasıyla 1.5 ve 4'

tür. i_0 kesme vektörüne karşı eğimli pürüz eğim açısıdır. η pürüzlerin başlangıçtaki kenetlenme derecesini tanımlayan bir parametre olup,

$$\eta = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta L_1} \tag{2.24}$$

eşitliği ile tanımlanmıştır. Burada, Δx kesme yerdeğiştirmesi, L_l pürüzün kesme vektörüne karşı eğimli olan yamacının kesilme düzlemine izdüşümünün uzunluğudur.

Barton (1971), modelden yapay oluşturulmuş 200' den fazla çekme çatlağı üzerinde yaptığı laboratuvar kesme deneyleri sonucunda, bu modellerin en büyük kesme dayanımını,

$$\tau = \sigma_N \tan [\, 20 \log_{10} (\sigma_c / \sigma_N) + 30^0 \,] \tag{2.25}$$

eşitliği ile tanımlamıştır. Bu eşitlik, daha sonra doğal süreksizlik yüzeylerinin en büyük kesme dayanımı için

$$\tau = \sigma_N \tan [\, JRC \log_{10} (JCS / \sigma_N) + \phi_r \,] \tag{2.26}$$

şeklinde genelleştirilmiştir (Barton, 1973). Burada; τ en büyük kesme dayanımı, σ_N normal gerilme, JRC çatlak pürüzlülük katsayısı, JCS çatlak yüzeyi sıkışma dayanımı, ϕ_b temel içsel sürtünme açısı olarak tanımlanmaktadır. Büyük ölçekteki arazi uygulamalarında bu ölçütün,

$$\tau = \sigma_N \tan [\, JRC_n \log_{10} (JCS_n / \sigma_N) + \phi_r + i_u \,] \tag{2.27}$$

şeklinde kullanılması önerilmiştir (Barton ve Bandis, 1982; Bandis, 1993). Burada; ϕ_r rezidüel sürtünme açısı, i_u büyük ölçekteki ondülasyon açısıdır. JRC_n ve JCS_n arazide belirlenen JRC ve JCS değerleridir. Çağlan (2000), sınırlı sayıda veriye dayanmakla birlikte, Barton yenilme ölçütünden sadece doruk değil artık (rezidüel) makaslama dayanım parametrelerinin de hesaplanabileceğini belirtmiş, JRC ve JCS parametrelerinin ise ölçek etkisine bağlı olarak değişmediğinin gözlendiğini bildirmiştir. Uygulamadaki kolaylığı ile bu ölçüt, özellikle arazi mühendisleri açısından oldukça pratiktir. Ancak JRC değerinin tahmini, tamamen uygulayıcının kişisel yargı ve deneyimine bağlı bir karşılaştırma yöntemidir.

Zhao (1997), ölçütün; genellikle pürüzlü ve her iki bloğu birbirine oldukça iyi uyan yüzeyler sunan model malzeme ve zayıf kayalarda yapay olarak oluşturulmuş taze tansiyon çatlakları üzerine kurulduğunu, doğal süreksizliklerin her iki bloğuna ait

yüzeylerin birbirlerine her zaman tam olarak uymayacağını ve bu tür doğal süreksizlikler test edildiğinde ölçütün gerçekte olduğundan daha yüksek kesme dayanımı değerlerini verdiğini belirtmiştir. Araştırmacı, pürüzlülük ile karşılıklı yüzey uyumluluğu etkisini birlikte dikkate alan yeni bir ölçüt tanımlamıştır. Barton ölçütünün bir modifikasyonu olan bu yeni ölçüt,

$$\tau = \sigma_N \tan [\, JRC.\, JMC \log_{10} (JCS / \sigma_N) + \phi_r \,] \qquad (2.28)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada; JMC çatlak uyumluluk katsayısı (joint matching coefficient) olup, JMC $\geq$ 0.3 koşulu tanımlanmıştır. JMC $<$ 3 olduğu durumlarda ise, JMC = 3 olarak kabul edilmesi önerilmiştir.

Bu ölçütlerin tümünde, süreksizlik düzlemlerinin yüzey geometrisi, bir başka deyişle pürüzlülük, süreksizliğin kesme dayanımını önemli ölçüde etkileyen bir parametre olarak ele alındığından, yüzey pürüzlülüğünün tanımlamasına ve dayanım parametreleri üzerine olan etkisinin araştırılmasına yönelik çalışmalar artmıştır. Bu çalışmaların çoğunda pürüzlülük çizgisel bir büyüklük olarak ele alınmakta, süreksizlik yüzeylerinden alınan 1-boyutlu profiller üzerinde değerlendirilmektedir. Ancak birbirlerine paralel olarak, aynı yüzey üzerinden alınan profillerin çoğu kez birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, yüzeyin genelini temsil eden sayısal pürüzlülük tanımlamalarının yapılması, mekanik parametreler ile kurulacak ilişkilerde bu şekilde tanımlanmış pürüzlülük değerlerinin kullanılması önem kazanmaktadır.

3 SÜREKSİZLİK ÖRNEKLERİNİN ALINDIĞI ÇAYELİ TÜNELİ KAZI SAHASININ JEOLOJİSİ

3.1 Konum

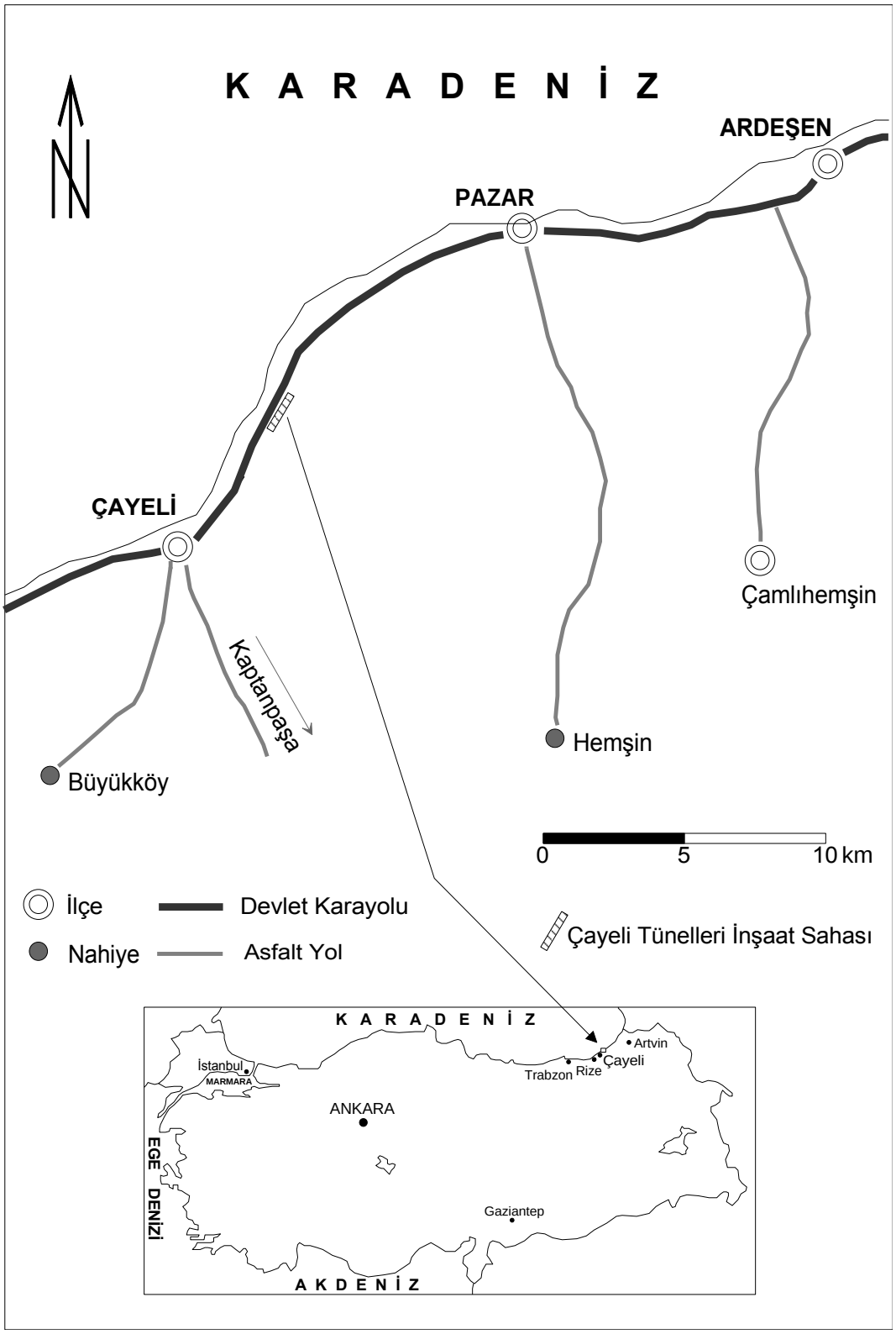
Karadeniz Sahil Yolu İyileştirme Projesi, Çayeli-Ardeşen-Hopa Devlet Yolu (KM:140+150.00-217+545.52), Çayeli Tünel Geçişi (KM:151+029.586-152+372.851) kazı sahası, araştırmada kullanılan süreksizlik örneklerin temin edildiği yerdir. Doğu Karadeniz Bölgesi' nde Artvin-F45-c1 paftası içinde bulunan saha, Trabzon-Hopa Devlet Karayolu üzerindeki Çayeli ilçesinin yaklaşık 4.5 km kuzeydoğusundan başlayarak, devlet karayoluna az çok paralel bir şekilde uzanmakta ve eski Çayeli Tüneli çıkışının yaklaşık 75 m güneydoğusunda son bulmaktadır (Şekil 3.1). Çayeli Tünel Geçişi çift tüp olarak projelendirilmiş olup, her iki tüpün de eksenleri Karadeniz sahiline yaklaşık olarak paralel uzanmaktadır. Bu tüplerden güneyde bulunanı 1343 m uzunluğunda olup, sağ tüp bunun hemen kuzeyinde yer alan 1061 m uzunluğundaki tüp ise sol tüp olarak adlandırılmaktadır.

3.2 Çayeli Tünellerinin Bulunduğu Bölgenin Genel Jeolojisi

3.2.1 Bölge ve dolayında yapılmış önceki çalışmalar

Erguvanlı (1950), Trabzon ile Gümüşhane illeri arasında kalan bölgenin jeolojik etüdünü yapmıştır. Araştırmacı; biri Senoniyen, diğeri ise Lütesiyen yaşlı olmak üzere iki kompleksten Senoniyen yaşlı olanın bazik ve nötr bileşimli lav, tüf ve aglomeralarla bunlar arasındaki sedimanter kayaçlardan, Lütesiyen yaşlı olanın ise gri – mor renkli, porfirik dokulu andezitlerle bunların arasında mercekler halinde bulunan flişlerden oluştuğunu belirtmiştir. Bölgede iki tip granitin varlığını savunan Erguvanlı (1950), Torul bölgesinde yaptığı incelemelerde granitlerin Senoniyen kalkerlerini deldiğini ve kontak zonlarında bunları mermerleştirdiğini gözlemlemiştir.

Çoğulu (1975), Pontid tektonik ünitesine dahil olan (Ketin, 1959-1960) Gümüşhane ve Rize masiflerinin petrolojisi ve jeokronometrisi konusunda yaptığı çalışmada, Gümüşhane ve Rize plütonlarının bulunduğu jeolojik ortamdaki en önemli kayaçların; Paleozoyik, Liyas, Üst Kretase ve Eosen dönemlerine ait olduğunu



Şekil 3.1 :Çayeli tünelleri kazı sahasının yer bulduru haritası.

belirtmiştir. Fillat, grafit şist, mika şist, kuvarsit, kuvars fillat, gnays ve gözlü gnayslardan oluşan Paleozoyik yaşlı metamorfitler, bölgenin en yaşlı kayaçlarıdır. Trias' ın mevcut olmadığı bölgede, Liyas' dan itibaren başlayan sedimantasyon evresinde kalınlığı 2000 metreye ulaşan kalker, marn gre ve killi şistlerden oluşan bir

seri meydana gelmiştir. Andezit, bazalt, spilit ve yastık lavlardan oluşan volkanik ara katkılar içeren bu seri, Paleozoyik şistler üzerine uyumsuz gelmektedir. Kalınlığı 1000 metreden fazla olan Üst Kretase yer yer kalker, marn ve gre arakatkıları içeren andezit ve bazalt lavları ile tüf ve aglomeralardan oluşmaktadır. Aglomeralara yakın bulundukları yerler dışında genellikle iyi tabakalanma gösteren tüfler mor, kırmızı ve kahverenklidirler. Kalınlıkları 100 – 200 metre arasında değişen kalker, marn ve kumtaşı arakatkıları devamlı bir seviye teşkil etmeyip, serinin içinde mercekler halinde bulunmaktadır. Kalınlığı 1000 metreye ulaşan ve içinde fliş arakatkıları bulunduran andezit, bazalt ile bunların tüf ve aglomeralarından oluşan volkanik seri ise Pontid Eosenini oluşturmaktadır. Araştırmacıya göre, Gümüşhane plütonunun sokulumu ile etkilenen seri kristalen şistlerdir. Volkanik arakatkılı Lias flişi ise, hem bu metamorfik seriyi hem de granitleri örtmekte olup, plüton ile olan kontak zonlarında hiç bir metamorfizma izi göstermemektedir. Bu gözlemlere göre; Gümüşhane plütonunun jeolojik yaşı kristalen şistlerden daha genç, Liyas' dan ise daha yaşlıdır. Rize plütonunun sokulumu ile kontak zonlarında hem Üst Kretase hem de Lütesiyen yaşlı formasyonlar metamorfizmaya uğramışlardır. Bu nedenle Rize plütonunun jeolojik yaşı Lütesiyenden daha gençtir. Her iki plüton için de tahmin edilen jeolojik yaşlar, muhtelif jeokronometrik yaş tayini metodları ile elde edilen yaşlar ile uyumludur. Jeolojik ve Jeokronometrik yaşlar birlikte değerlendirildiklerinde, Gümüşhane plütonu Paleozoik' te Hersiniyen orojenezi ile ilgili olarak sokulum yapmış, Rize plütonu ise Üst Eosen' de (Tersiyer) Alp orojenezine bağlı olarak yerleşmiştir.

Gümüşhane plütonu daha önce Yılmaz (1974) tarafından da incelenmiştir. Gümüşhane graniti olarak adlandırılan granitoid kayaçlar topluluğunun, Jura (Liyas) öncesinde (büyük bir olasılıkla Hersiniyen orojenezi döneminde) kabuk içerisine sokulduğu, katılaşarak plütonu oluşturduğu belirtilmiştir. Plüton bölgedeki daha yaşlı metamorfik serileri kesmiş ve Jura – Kretase formasyonları ile transgresif olarak örtülmüşlerdir. Araştırmacıya göre, plütonun sokulum – yerleşim zamanı Paleozoyik sonu – Liyas öncesi bir döneme rastlamaktadır.

Gedikoğlu (1978), Doğankent (Giresun) yöresinde Harşit granit karmaşığı ve çevre kayaçları üzerine yaptığı çalışmada bu bölge için; Alt Bazik Volkanik Seri ve mermerler (Jura - Alt Kretase), dasitik lav, tüf ve breşler (Senoniyen), volkano-sedimanter seri (Senoniyen) ve Üst Bazik Volkanik Seri (Üst Senoniyen – Alt Tersiyer ?) şeklinde bir istiflenme tanımlamıştır. Araştırmacı, bazik volkanik kayaçlar ile mermer seviyeleri içeren Alt Bazik Serinin Alt Kretase – Üst Kretase zaman aralığının bir bölümünde Harşit granit karmaşığı tarafından kesildiğini, esas

kütlesi homojen granodiyorit olan Harşit granit karmaşığının jeokronolojik olarak K / Ar yöntemine göre 94.4 milyon yıl yaşında olduğunu belirtmiştir. Harşit granit karmaşığının sokulumunu takip eden bir yükselmeden sonra, bölgenin Üst Kretase' nin başlangıcında aşınmaya uğradığını kabul eden araştırmacıya göre, Senoniyen yaşlı birimler bu aşınma yüzeyi üzerine diskordan olarak gelmiştir.

Özsayar ve Gedikoğlu (1981), Doğu Pontid' lerde Üst Kretase yaşlı kayaçların denizaltı volkanizması ürünü olduklarını ve içerdikleri kırmızı biyomikrit seviyelerinden Senoniyen yaşını aldıklarını belirtmiştir.

Ercan ve Gedik (1983), Pontidlerdeki Üst Kretase volkanizmasının tipik bir ada yayı volkanizması olduğunu ve kuzeye doğru dalan Neo-Tetis okyanus kabuğunun yitim zonunda kısmi ergime ürünü olduğunu ve daha sonra gerçekleşen Eosen volkanizmasınında ada yayı grubundan olup, aynı yitim zonunun ürünü olduğunu belirtmiştir.

Korkmaz ve Gedik (1988), bu çalışmada kullanılan örneklerin alındığı Çayeli tünel sahasını da içine alan Rize-Fındıklı-Çamlıhemşin arasındaki yaklaşık 850 km^{2}' lik bir alanın stratigrafisini tanımlamış, bölgede yüzeylenen birimleri ilk kez litostratigrafi esasına göre formasyon ölçeğinde ayırtlamış ve adlandırmıştır

Bulut (1989), Çambaşı (Çaykara – Trabzon) Baraj ve Uzungöl HES yerlerinde yaptığı çalışmasında, kireçtaşı, kumtaşı, tüfit, bazaltik lav ve tüf, kırmızı kireçtaşı, dasitik lav ve tüflerden oluşan volkano-tortul seriye fosil içeriklerine bağlı olarak Üst Kretase yaşını vermiştir.

İskenderoğlu (1990), Çayeli-Pazar (Rize) arasındaki sahil yolu şevlerini incelemiş, bu çalışmasında Korkmaz ve Gedik (1988) tarafından yapılan formasyon adlamasını kullanmıştır.

Eyüboğlu (1999), Harşit vadisinin Doğankent (Giresun) ve Yurt köyü (Gümüşhane) arasında kalan bölgede yaptığı çalışmasında, Harşit granitoyidinin Üst Kretase yaşlı birimleri kesmediğini, inceleme alanı için Alt ve Üst Kretase arasında bir uyumsuzluk olduğunun söylenebileceğini, Özkürtün bucağı ve civarında yüzlekler veren Kürtün granitoyidinin makroskopik ve mikroskopik özellikleri açısından Harşit granitoyidinden farklı olduğunu, bunların dışında Kürtün granitoyidinin Üst Kretase yaşlı birimleri keserek onları ayrıştırdığı ve metamorfizmaya uğrattığını belirtmiştir.

3.2.2 Stratigrafi ve petrografi

Doğu Karadeniz bölgesinde, "Rize-Çayeli-Pazar-Ardeşen-Fındıklı-Çamlıhemşin" arasında bulunan ve bu çalışmada kullanılan örneklerin temin edildiği Çayeli Tüneli kazı sahasını da kapsayan, yaklaşık 850 km^{2}' lik bir alanın jeolojisi, Korkmaz ve Gedik (1988) tarafından ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Bu çalışma ile, yukarıda sınırları tanımlanan bölgede, ilk kez birimler litostratigrafi esasına göre formasyon ölçeğinde ayırtlanmış ve adlandırılmıştır (Şekil 3.2). Ayırtlanan formasyonlar yaşlıdan gence doğru;

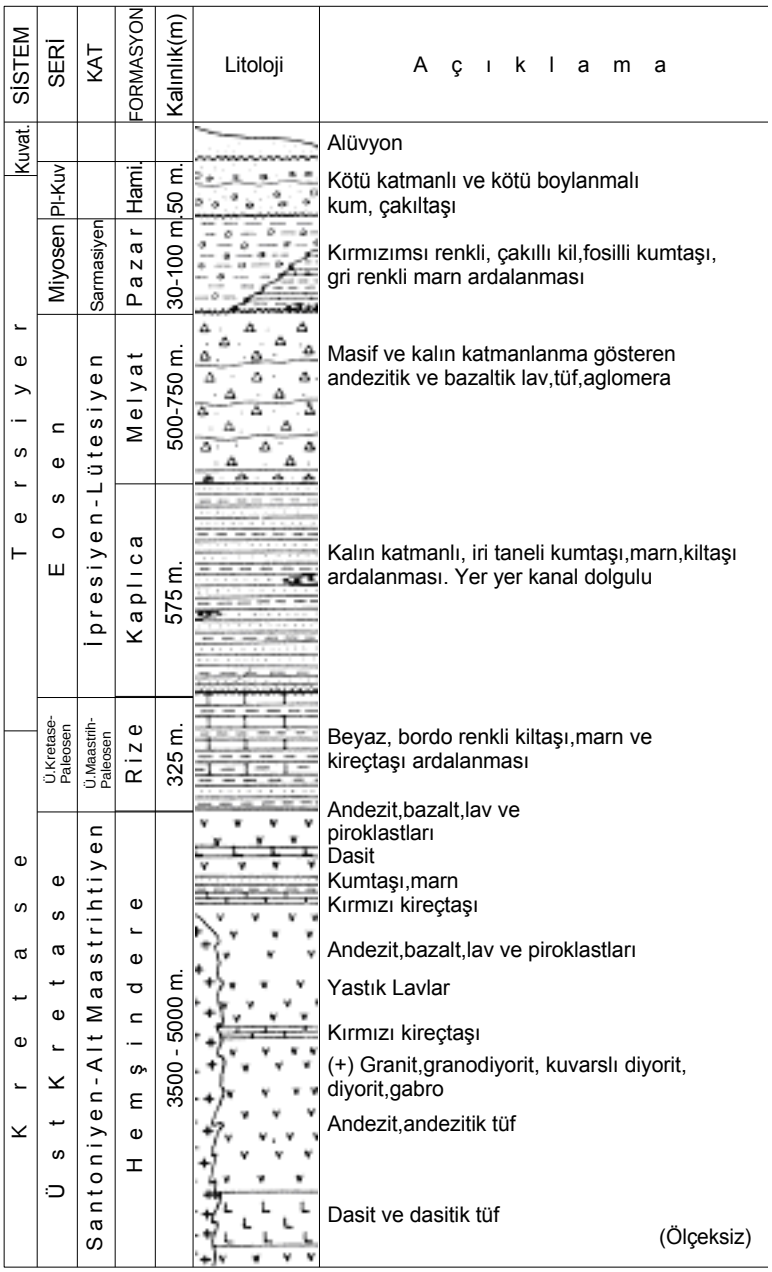
a) Hemşindere Formasyonu (Üst Kretase)
b) Rize Formasyonu (Üst Kretase – Paleosen)
c) Kaplıca Formasyonu (Alt – Orta Eosen)
d) Melyat Formasyonu (Alt – Orta Eosen)
e) Pazar Formasyonu (Miyosen)
f) Hamidiye Formasyonu (Plio-Kuvaterner)
g) Taraça ve Alüvyonlar (Kuvaterner)

şeklinde sıralanmaktadır. Çayeli tünelleri kazı sahasının bulunduğu bölgenin genel jeolojisini tanıtmak amacı ile, adı anılan araştırmacıların ayırtlayarak adlandırdıkları bu formasyonlara ait tanımlamaları aşağıda verilmiştir.

3.2.2.1 Hemşindere formasyonu (Üst Kretase)

Çok tipik olarak Pazar ilçesinin güneyinde Hemşindere vadisi boyunca gözlendiği için Korkmaz ve Gedik (1988) tarafından Hemşindere formasyonu olarak adlandırılan bu formasyon; yer yer kırmızı renkli kireçtaşı, kumtaşı ve marn arakatmanları içeren andezit, bazalt ve dasit lav ile bunların kırıntılarından oluşmaktadır. Anılan araştırmacılar, renkleri gri, koyu gri, siyah arasında değişen andezit-bazalt lav ile gri-yeşilimsi gri renkli tüf, aglomera ve breşlerle temsil olunan piroklastların formasyonun en yaygın kayaç grubunu oluşturduğunu belirtmişlerdir. Genellikle açık renkli olmalarıyla ayırtlanan dasit lav ve piroklastlarının ise andezit-bazalt lav ve piroklastları içinde yer yer seviyeler halinde bulunduğunu bildirmişlerdir. Bu araştırmacıların bulgularına göre; genellikle ince tabakalı olan kırmızı renkli mikritik - biyomikritik kireçtaşlarının kalınlığı 5-10 metre arasında değişmekte, orta katmanlı gri-beyaz renkli kumtaşı-marn arakatmanlarının kalınlığı yersel olarak 221 metreye ulaşmaktadır. Formasyonun kalınlığı ise 3500-5000 metre arasında değişmektedir. Aynı araştırmacılar, kırmızı kireçtaşı seviyelerinin

paleontolojik incelemesi sonucunda tayin edilen faunalara dayanarak, formasyona Santoniyen – Alt Maastrihtiyen (Üst Kretase) yaşını vermişlerdir.



Şekil 3.2 : Bölgenin genelleştirilmiş dikme kesiti (Korkmaz ve Gedik, 1988)

Ayrıca, Hemşindere formasyonunun yer yer intrüzif kayaçlar tarafından kesildiğini belirtmişlerdir. Çalışılan alan içinde, intrüzif kayaçların sadece Santoniyen-Maastrihtiyen yaşlı Hemşindere formasyonunu kestiği ve daha genç bir formasyonu kesen intrüzife rastlanmadığı bildirilmiş, bu kayaçların yerleşim yaşı Üst Maastrihtiyen olarak kabul edilmiştir (Korkmaz ve Gedik, 1988).

3.2.2.2 Rize formasyonu (Üst Kretase – Paleosen)

Kireçtaşı, kumlu kireçtaşı ve kumtaşı arakatmanlı kırmızımsı bordo ve beyaz renkli marn ve şeyl ardalanmasından oluşan formasyon, Rize ilinin merkezinde ve güneyinde yüzeylenmekte olduğundan, Korkmaz ve Gedik (1988) tarafından Rize formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bu araştırmacılar, alt düzeylerinde bulunan kumtaşlarının yer yer bitüm içermekte olduğu formasyonun, üste doğru kırmızımsı bordo renkli marn arakatmanlı, beyaz renkli killi kireçtaşı ardalanması ile son bulmakta olduğunu ve bu kireçtaşı katmanlarının kalınlığının 5-35 cm arasında değiştiğini belirtmiştir. Aynı araştırmacılar, yoğun bitki örtüsü nedeniyle Rize formasyonu ile alttaki Hemşindere formasyonu arasındaki dokanak ilişkisinin belirgin olmadığını, ancak paleontolojik verilere göre iki formasyonun birbiriyle uyumlu olduğunu bildirmiş, tip kesitinde kalınlığı 325 metre ölçülen Rize formasyonunun, hafif bir uyumsuzluk ile Eosen yaşlı Kaplıca formasyonu tarafından üstlendiğini belirtmiştir. Taban düzeylerindeki marn ve şeyllerin, üst düzeylerindeki kireçtaşlarının içerdiği fosillerin paleontolojik tayini sonucunda, formasyona Üst Kretase-Paleosen yaşı verilmiştir (Korkmaz ve Gedik, 1988).

3.2.2.3 Kaplıca formasyonu (Alt – Orta Eosen)

Kumtaşı-kiltaşı-marn ardalanmasından oluşup, orta-kalın yer yer de masif katmanlanma gösteren ve Rize ilinin hemen güneyinde yüzeylenen formasyon, Korkmaz ve Gedik (1988) tarafından Kaplıca formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bu araştırmacılar, alttaki Rize formasyonu ile uyumsuz olan ve üzerine uyumlu ve geçişli olarak Melyat formasyonu gelen bu formasyonun kalınlığını ölçülen tip kesitinde 575 metre olarak bulmuşlardır. Formasyondan aldıkları fosilli örneklerin paleontolojik tayini sonucunda, Kaplıca formasyonuna Alt - Orta Eosen yaşını vermişlerdir.

3.2.2.4 Melyat formasyonu (Alt – Orta Eosen)

Doğu Karadeniz sahil hattı boyunca Rize ile Pazar yerleşimleri arasında kalan bölgenin genişce bir kesiminde yüzeylenip, andezitik ve bazaltik lav, tüf, breş ve aglomeralardan oluşan bu formasyon, çok tipik olarak Çayelinin yaklaşık 9 km kuzeydoğusunda bulunan Melyat dere vadisi boyunca izlendiğinden, Korkmaz ve Gedik (1988) tarafından Melyat formasyonu olarak isimlendirilmiştir. Aynı araştırmacılar, genelde masif yapılı olmakla birlikte, yer yer kötü katmanlanma sunan Melyat formasyonunun, Rize dolayında Kaplıca formasyonu üzerine geçişli ve uyumlu geldiğini, ancak diğer kesimlerde Hemşindere formasyonu ile tektonik dokanaklı olduğunu, kalınlığının ise 500 ile 750 metre arasında değiştiğini

bildirmişlerdir. Bu araştırmacılar, formasyonun yaşını doğrudan verebilecek bir faunaya rastlanılmadığını belirtmişler, bununla birlikte, Kaplıca formasyonu ile geçişli ve uyumlu olduğu için aynı yaşta kabul ederek, formasyona Alt – Orta Eosen yaşını vermişlerdir.

3.2.2.5 Pazar formasyonu (Miyosen)

Tabanda yer yer çakıltaşları ile başlayıp üste doğru kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve kireçtaşı arakatmanları içeren gri renkli marn ardalanması ile devam eden, en üst düzeylerinde ise kum, çakıl ve kayaç parçaları içeren kırmızımsı renkli kil ve çamurlarla son bulan bu formasyon, Çayeli dolayında ve en tipik olarak Pazar civarında yüzeylenmekte olduğundan, Korkmaz ve Gedik (1988) tarafından Pazar formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bu araştırmacılar, Pazar formasyonunun Melyat formasyonu üzerine açısal uyumsuzluk ile geldiğini, üstte ise yersel olarak Pliyo – Kuvaterner (?) yaşlı Hamidiye formasyonu tarafından uyumsuzlukla örtüldüğünü ve bölge genelinde 30 ile 100 metre arasında değişen kalınlıklara sahip olduğunu bildirmişlerdir. Kumtaşı, kireçtaşı ve marn seviyelerinden sağlanan fosil topluluklarının paleontolojik etüdü (Özsayar, 1977) ve kömürlü seviyelerden alınan kömür örneklerinin palinolojik tayinleri (Korkmaz ve Gedik, 1988) sonucunda formasyona Sarmasiyen yaşı verilmiştir.

3.2.2.6 Hamidiye formasyonu (Pliyo – Kuvaterner)

Kötü katmanlanma gösterip, kum ve kil mercekleri içeren gevşek çimentolu çakıltaşlarından oluşan formasyon, Korkmaz ve Gedik (1988) tarafından Hamidiye formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bu araştırmacılar formasyonun alt sınırının Sarmasiyen yaşlı Pazar formasyonu ile uyumsuz olduğunu, üstte ise taraça ve alüvyonlar tarafından yine uyumsuzluk ile örtüldüğünü ve kalınlığının 50 metre ölçüldüğünü bildirmişlerdir. Aynı araştırmacılar, Hamidiye formasyonuna doğrudan yaş vermeye olanak sağlayacak bir faunaya rastlanmadığı belirtmişler, bununla birlikte, Sarmasiyen yaşlı Pazar formasyonunu uyumsuzlukla üstelediğinden Plio-Kuvaterner' e ait olduğunu kabul etmişlerdir.

3.2.2.7 Taraça ve alüvyonlar (Kuvaterner)

Daha yaşlı birimlerden ayrılan kum ve çakıl boyutundaki volkanik kökenli malzemeden oluşmuşlardır. Dere yatakları ve kıyı kesimlerinde izlenmektedirler.

3.2.3 Yapısal jeoloji

Kormaz ve Gedik (1988), Pontid Tektonik Birliğinde yer alan çalışma alanında büyük ölçekli kıvrımlı yapıların gelişmediğini, bölgede genellikle kırık tektoniğinin hakim olduğunu belirtmişlerdir. Yaklaşık KD-GB doğrultulu büyük ölçekli fayların geliştiğini ve faylanma nedeni ile Üst Kretase yaşlı Hemşindere formasyonu ile Eosen yaşlı Melyat formasyonu arasında normal istifde gözlenen Rize ve Kaplıca formasyonlarının çoğu yerde kaybolduğunu, dolayısıyla da faylı bölgelerde Hemşindere ve Melyat formasyonlarının birbirleriyle tektonik dokanaklı olduğunu ifade etmişlerdir.

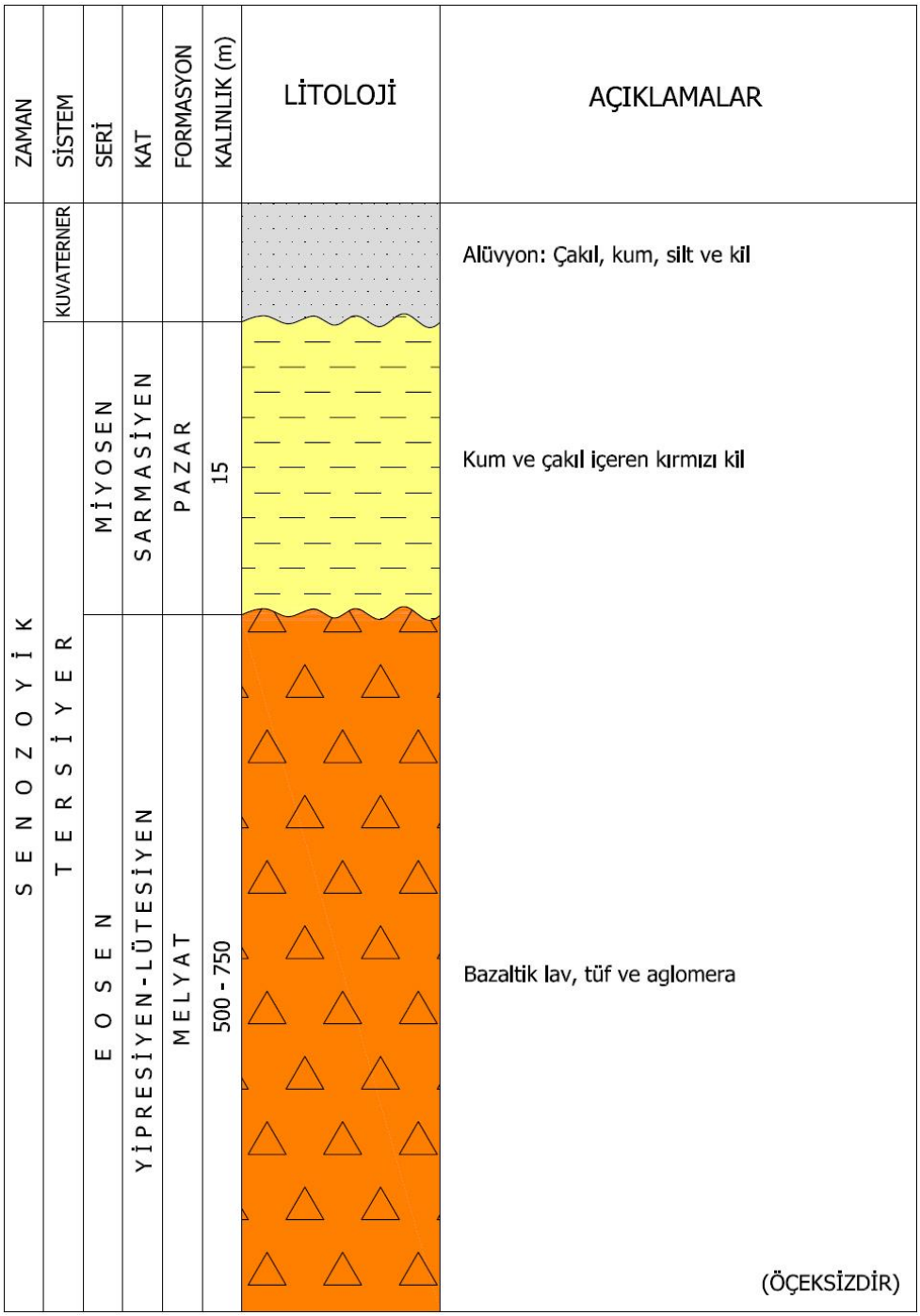
3.3 Çayeli Tüneli Kazı Sahasının Jeolojisi

3.3.1 Stratigrafi ve petrografi

Bazaltik lav, tüf ve aglomeralardan oluşan Alt – Orta Eosen yaşlı Melyat formasyonu Çayeli tüneli kazı sahasında yüzeylenen en yaşlı formasyondur. Bu formasyonun üzerine Miyosen yaşlı Pazar formasyonu gelmektedir. En üstte ise, daha yaşlı formasyonlardan koparak ayrılan çakıllar ile kum, silt ve kil boyutundaki malzemeden oluşan Kuvaterner yaşlı alüvyonlar bulunmaktadır. Çayeli tüneli kazı sahasının dikme kesiti Şekil 3.3' de verilmiş olup, 1/5000 ölçekli jeolojik haritası ve kesiti ise Şekil B.152' de sunulmuştur.

3.3.1.1 Melyat formasyonu (Alt – Orta Eosen)

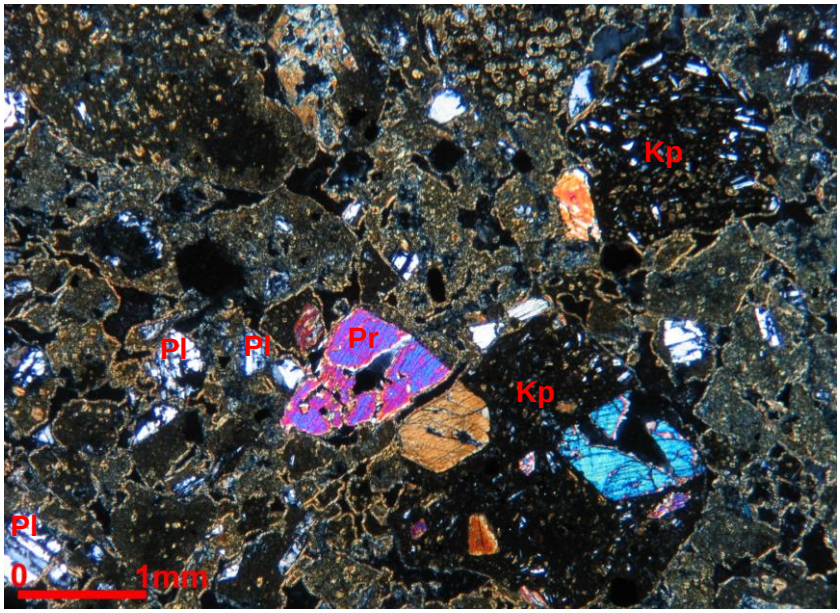
Çayeli tünellerinin sol ve sağ tüp giriş ve çıkışları arasında bulunan sahanın neredeyse tamamı bazaltik lav ve piroklastlarından oluşan volkanik kayaçlar topluluğu ile kaplıdır. Bazaltik lavlar gri ve koyu gri renkli olup, yuvarlak şekilli piroklastik parçaların daha ince taneli hamur (kül ve lapilli) ile bağlanması sonucu oluşan aglomeralar ise yeşilimsi kahverenklidirler. Yüzey pürüzlülüğünün sayısal tanımında ve laboratuvar direkt kesme deneylerinde kullanılmak üzere bu formasyondan alınan süreksizlik içeren örnekler (komşu birim kaya elemanları), bazaltik lavlara oranla yerinden sökülebilirliği çok çok daha kolay olan tüf seviyelerinden seçilmiştir. Tüfler arazide kahverengimsi, sarımsı bej renklidir.



Şekil 3.3 : Çayeli tüneli kazı sahasının dikme kesiti

Taze yüzeylerinde ise renkleri açık yeşil ile gri arasında değişir. Alterasyona uğramış kesimlerde kahverengiye geçiş göstermektedirler.

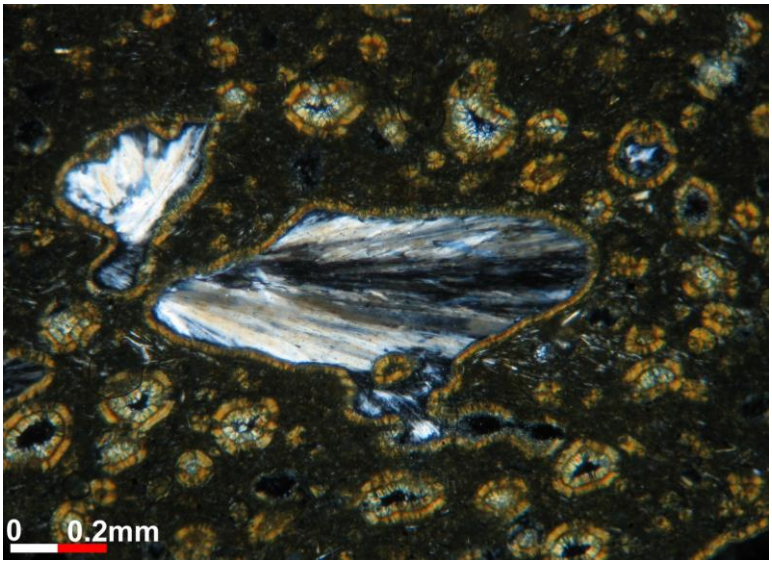
Tüf örneklerinden hazırlanılan ince kesitlerin petrografik analiz sonuçlarına göre, kayaç tümüyle volkanojenik piroklastlardan oluşmakta ve piroklastik kayaç dokusu sunmaktadır (Şekil 3.4). Serbest mineral parçacıkları ve volkanik kayaç parçacıkları şeklinde izlenen volkanojenik piroklastlar, düzensiz şekillere sahip olup, yarı köşeli – köşeli parçacıklar şeklinde gözlenirler.



Şekil 3.4 : Tüf örneğinden hazırlanan bir ince kesitin mikroskop altında görünüşü
Pl : Plajiyoklaz, Pr : Piroksen, H : Hornblend, Kp : Kayaç parçacığı

Kayacın piroklastik bileşenleri çoğunlukla lapilli tane boyutu aralığında (2 – 32 mm) yer almakta olup, bu bileşenlerin özellikle de volkanik kayaç parçalarının boyutlarının el örneğinde 1 cm' ye ulaşabildiği gözlenmiştir. Gerek serbest mineral parçacıkları, gerekse volkanik kayaç parçacıkları kahverengi bazik volkanik cam hamur ile sıkı bir kenetlenme içindedir. Serbest mineral parçacıkları asıl plajiyoklaz ve piroksen kristallerinden oluşmakta olup, az miktarda amfibol kristalleri de izlenmektedir. Volkanik kayaç parçacıkları bünyesinde gözlenen fenokristaller, serbest mineral parçacıkları ile aynı türdendir. Plajiyoklaz mineralleri yarı özşekilli ve özşekilli fenokristaller şeklinde gözlenmekte ve boyutları mikroskop altında 100 – 2400 mikron aralığında değişmektedir. Diğer taraftan, el örneklerinde boyutları 5 – 7 mm' ye kadar ulaşabilen özşekilli prizmatik plajiyoklaz fenokristalleri gözlemek de mümkündür. Plajiyoklazlar genelde labrador, ender olarak andezin bileşimlidirler. Piroksen mineralleri; uçuk yeşil renkli, yarı özşekilli ve özşekilli fenokristaller şeklinde gözlenmekte olup, yer yer bunları çok ince kahverengi volkan camından oluşan bir kuşağın çevrelediği izlenmiştir. Boyutları mikroskop altında 200 – 2400 mikron arasında olup, bazılarında ikizlenme bazılarında ise zonlanma görmek mümkündür. Amfibol (hornblend) mineralleri yeşil renkli, yarı özşekilli prizmatik fenokristaller şeklinde ve tıpkı piroksen minerallerinde olduğu gibi yer yer kahverengi bazik volkan camından oluşan ince bir kuşakla çevrili olarak izlenmektedir. Nadir de olsa bazılarının içinde piroksen kapanımları mevcuttur. Amfibol minerallerinin boyutları mikroskop altında 400 ile 1360 mikron arasında ölçülmüştür. Plajiyoklazlar yer yer ayrışarak kil ve karbonat minerallerine dönüşmüşlerdir. Bunların dışında

silisleşmeler de izlenmektedir. Ayrışma sonucu amfibol ve piroksenler klorit ve epidot gibi ikincil minerallere dönüşmüştür. Piroklastik bileşenler arasındaki boşluklarda ve volkanik kayaç parçacıkları bünyesindeki vesiküllerde yer yer dolgu şeklinde ikincil zeolit mineralizasyonları gözlenmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Tüflerin boşluklarında gelişen ikincil zeolit mineralizasyonuna örnek

Volkanik kayaç parçacıkları genellikle bazalt türünden olup, mikroporfirik, seri porfirik, afanitik ve porfirik dokular sunmaktadır. Bunlar hipohyalin-mikrolitik, hipokristalen-mikrolitik, hipokristalen afanitik hamurlu olabilmektedir. Çoğunluğu bazalt, az bir kısmı da andezitik bazalt türündedir. Boyutları 700 mikron ile 5000 mikron arasında değişmektedir. Kayacın piroklastik bileşenlerinin çoğunlukla lapilli tane boyutu aralığında yer almakta oluşu, adlandırmada dikkate alınmış ve kayaç bazik lapilli tüf olarak adlandırılmıştır.

Bazaltik lav, tüf ve aglomeralardan oluşan formasyon içerisindeki piroklastik malzemelerin boyutları arazide birkaç milimetre ile 1 metre arasında değişim gösterebilmektedir. Formasyon genelde masif yapılı olmakla birlikte yer yer kötü katmanlanma sunmaktadır. Çatlaklar yüzeyden derine inildikçe kapanmaktadır. Bazen dolgusuz, bazen kil ve kalsit dolguludur. Dolgu malzemesi yüzeye yakın olan kesimlerde çoğunlukla yıkanmıştır. Tünel kazı sahası içinde bu formasyonun alt sınırı izlenememiştir. Ancak tünel kazı sahasının dışında Rize dolayında Alt – Orta Eosen yaşlı Kaplıca formasyonu üzerine geçişli ve uyumlu geldiği, bununla birlikte tünel sahasının dışında yer alan güneydeki daha iç kesimlerde Üst Kretase yaşlı Hemşindere formasyonu ile tektonik dokanaklı olduğu bildirilmiştir (Korkmaz ve Gedik, 1988).

3.3.1.2 Pazar formasyonu (Miyosen)

Bu formasyon; tünel sahası içinde sağ tüp girişinin güneydoğusundan başlayarak, sağ tüp eksenine, dolayısıyla Karadeniz sahiline yaklaşık paralel olan bir hat boyunca Melyat formasyonuna ait olan volkanitleri açısal uyumsuzluk ile örtmektedir. Pazar formasyonunun düşey ve yanal yönde litolojik değişimler gösterdiği, özellikle gri renkli marn ve kumtaşlarının yanal yönde ve üste doğru kum ve çakıl içeren kırmızımsı renkli kil ve çamurlu seviyelere geçmekte olduğu ve bu seviyelerin bir çok yerde doğrudan Melyat formasyonunun üzerine geldiği bildirilmiştir (Korkmaz ve Gedik, 1988). Pazar formasyonu tünel kazı sahası içinde alttaki Melyat formasyonu üzerine bu şekilde gelmektedir. Formasyon içindeki kum ve çakıllar volkanitlerden türemiştir. Kötü derecelenme gösteren çakıllar yuvarlak-az yuvarlak şekilli olup, ince, orta ve iri tanelidir. Yer yer değişik boyutlarda bloklar da içeren kırmızımsı kahverenkli killer, volkanik kayaçların ayrışma ürünüdür. Tünel güzergahı boyunca yapılan temel araştırma sondajlarında, formasyon en fazla 15 metre kesilebilmiş, ardından Melyat formasyonuna girilmiştir. Miyosene ait bu çökeller Hamidiye formasyonu tarafından uyumsuzlukla üstlenmektedir. Ancak Hamidiye formasyonu tünel kazı sahası içinde yüzeylenmemektedir.

3.3.1.3 Alüvyon (Kuvaterner)

Kuzeybatı – güneydoğu doğrultulu derelerin vadi tabanlarında ve sahil kesimlerinde izlenirler. Genellikle alttaki daha yaşlı formasyonlardan koparak ayrılan volkanik kökenli çakıllar ile kum, silt ve kil boyutundaki malzemeden oluşup, yer yer de bloklar içerirler. İri boyutlu malzeme miktarı nispeten daha fazladır. Özellikle derelerin sahile ulaştıkları kesimlerde dane boyutlarında artış gözlenir.

3.3.2 Yapısal jeoloji

3.3.2.1 Tabakalar

Bazaltik lav, tüf ve aglomeralardan oluşan volkanitler genelde masif yapılı olmakla birlikte, yer yer kötü katmanlanma sunar. Doğrultuları genellikle KD–GB olup, eğim yönü KB‘ dır. Eğim açıları ise 11^0 ile 25^0 arasında değişmektedir.

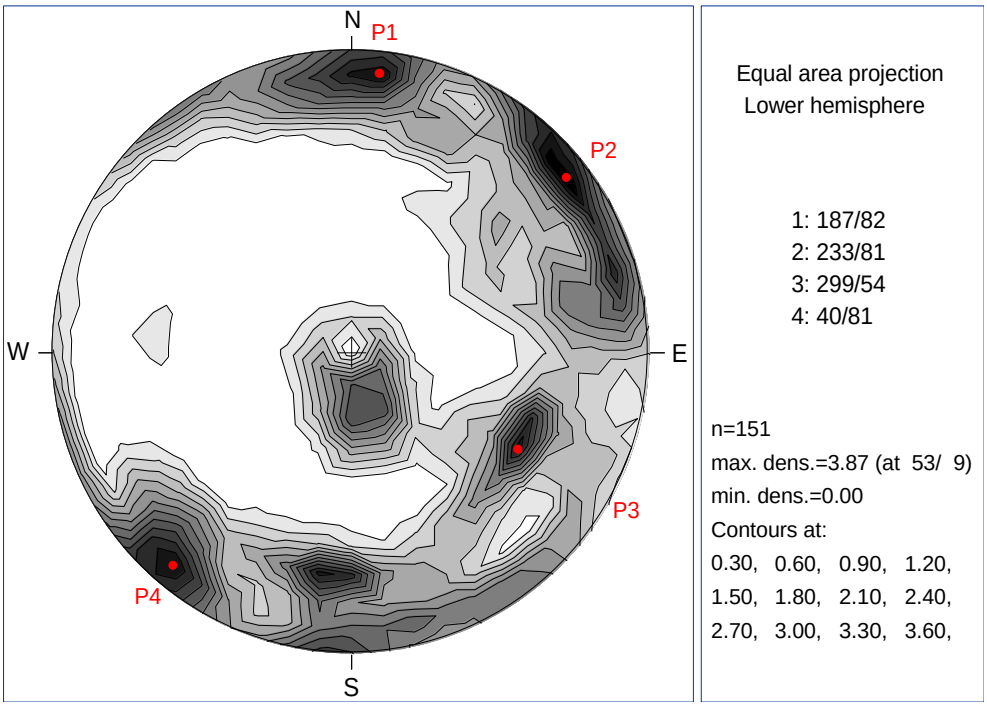
3.3.2.2 Süreksizlikler

Tünel sahasının yoğun bitki örtüsü ile kaplı olması, süreksizlik düzlemlerinden ölçü alınmasını oldukça zorlaştırmıştır. Alınan ölçü sayısı, bitki örtüsünün nispeten zayıf olduğu dolayısıyla süreksizliklerin izlenebildiği kesimlerin sıklık ve büyüklüğü ile ilişkili olarak, 151’ dir. Kontur diyagramlarından yararlanarak kaya kütlesi içindeki

süreksizlik takımlarının belirlenmesine yönelik yapılan değerlendirmelerde, en az 150 yönelim değerinin kullanılması önerilmektedir (ISRM, 1981). Bu açıdan bakıldığında, alınan ölçü sayısı önerilen sınır değerin altında kalmamıştır. Melyat formasyonuna ait volkanitler içinde gelişmiş olan süreksizlik düzlemlerinden alınan 151 adet yönelim değeri eşit alanlı izdüşüm ağında değerlendirilmiş ve formasyonun içerdiği süreksizliklere ait kontur diyagramı hazırlanmıştır (Şekil 3.6). Diyagram üzerinde kutupların en fazla yoğunlaştığı konturların merkezi dikkate alındığında, kaya kütlesinin başlıca dört süreksizlik takımı içerdiği ve P1, P2, P3, P4 kutuplarına karşılık gelen bu süreksizlik takımları için egemen yönelimlerin sırasıyla;

1: K84B 82 GB (187/82)
2: K37B 81 GB (233/81)
3: K30D 54KB (299/54)
4: K50B 81 KD (40 / 81)

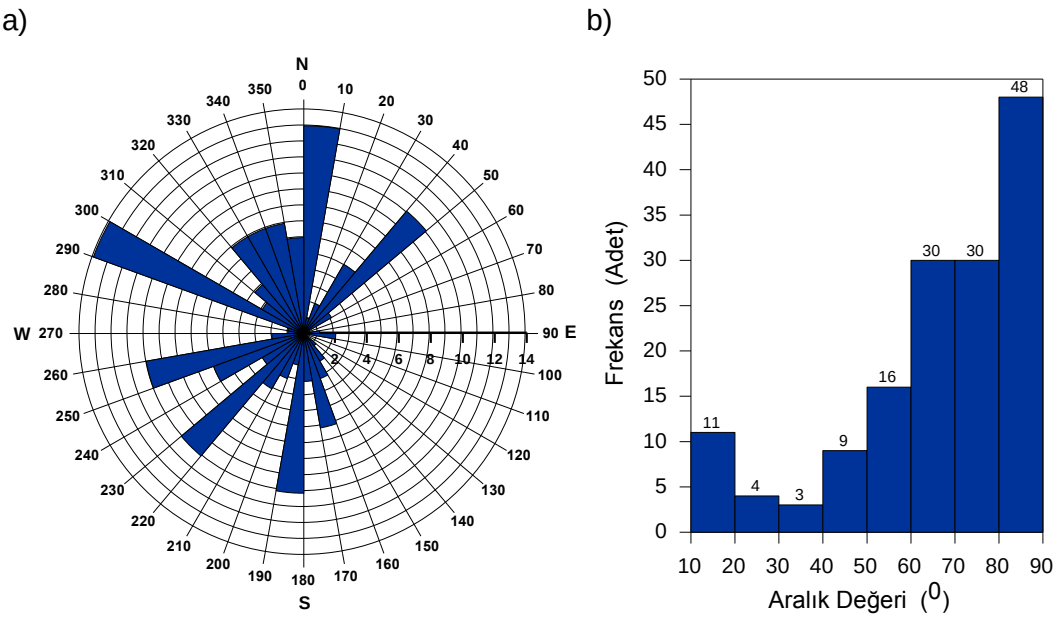
şeklinde olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, egemen yönelim değerlerinden sapma gösteren diğer tali yönelimler de mevcuttur. Eğim açıları göz önüne alındığında, süreksizlik takımlarından 1, 2 ve 4 no'lu olanların çekme, 3 no'lu olanın ise kesme çatlaklarını temsil ettiğini söylemek mümkündür.



Şekil 3.6 :Melyat formasyonuna ait volkanitlerin içerdiği süreksizliklerden ölçülen 151 adet yönelim değerinden hazırlanan kontur diyagramı

Süreksizlik eğimlerinin geliştiği yönlerin tanımlanması amacı ile aynı ölçüler kullanılarak hazırlanan eğim yönü gül diyagramı Şekil 3.7a' da sunulmuştur.

İzlendiği üzere, süreksizlikler genel olarak KB, GB ve KD yönlerine doğru eğim kazanmıştır. Eğimlerin en çok geliştiği yönler ise KB ve GB' dır. Eğim açılarının frekans dağılımı incelendiğinde (Şekil 3.7b), 151 ölçünün yaklaşık % 32' sinin 80^0 ile 90^0 arasında değişen eğim açısı değerine sahip olduğu görülmektedir. 60^0 ile 70^0 ve 70^0 ile 80^0 aralıklarında yer alan eğim açısı değerlerinin frekansları birbirine eşittir. Bu iki aralık grubu birlikte değerlendirildiğinde 60^0 ile 80^0 arasında bulunan açı değerlerinin oranı yaklaşık % 40' dır. Daha geniş bir aralık içinde ele alınırlarsa, ölçülen eğim açıları % 72' lik bir oranla 60^0 ile 90^0 arasında değerler almaktadır.



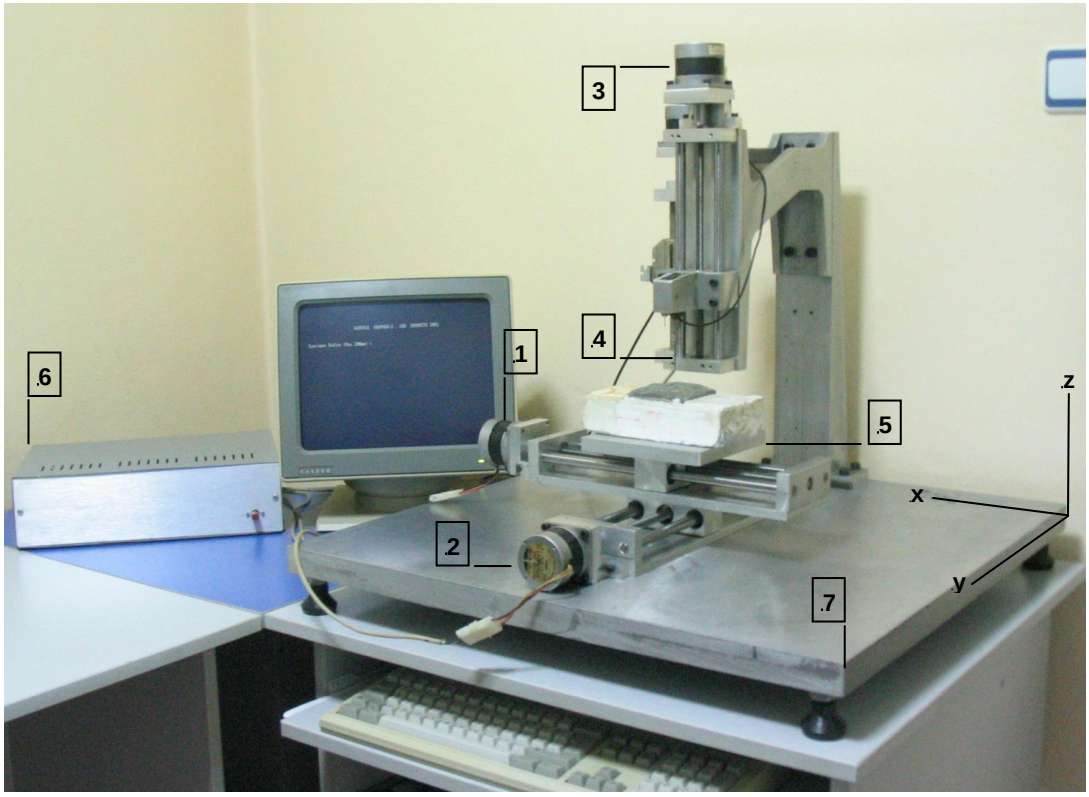
Şekil 3.7 :Melyat formasyonuna ait volkanitler içinde gelişen 151 adet süreksizlik düzleminin a) eğim yönlerine ait gül diyagramı b) eğim açıları dağılım histogramı

4 ARAŞTIRMA İÇİN GEREKLİ OLAN ÖZEL LABORATUVAR CİHAZLARININ GELİŞTİRİLMESİ

4.1 Yüzey Pürüzlülüğünün Sayısallaştırılması İçin Geliştirilien Bilgisayar Kontrollü Yüzey Tarama Cihazı

4.1.1 Mekanik tasarım

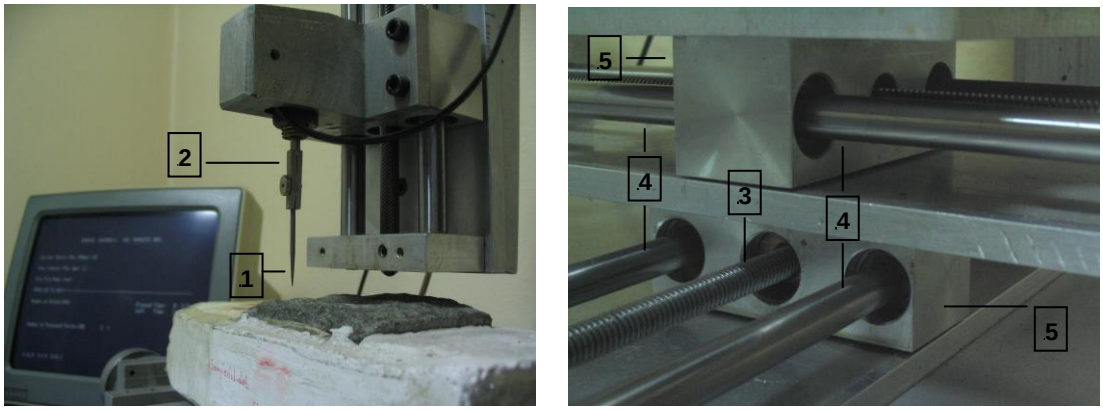
Geliştirilen bu yeni cihaz, oldukça rijit olan alüminyum döküm bir gövde ve bu gövde üzerine monte edilmiş olan 3 adet tabladan (x,y ve z tablaları) oluşmaktadır (Şekil 4.1). Tablalar 3-boyutlu kartezyen koordinat sistemi içinde birbirlerine dik konumdadır. Her bir tablanın üzerinde, tablanın uzun ekseni boyunca ileri geri hareket edebilen birer araba bulunmakta olup, hareketler bipolar step motorlar tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 4.1 : Geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı 1: SPM1 x ekseni boyunca hareketi sağlar, 2: SPM2 y ekseni boyunca hareketi sağlar, 3: SPM3 z ekseni boyunca hareketi sağlar, 4: Ölçüm iğnesi, 5: Örnek taşıyıcı, 6: Kontrol Ünitesi 7: Rijit Platform. (SPM: Step motor) (x, y ve z eksenlerindeki boyutlar sırasıyla 660, 660 ve 574 mm'dir).

y-tablası, döküm gövdenin yatay düzlemsel platformu üzerine monte edilmiştir. Bu tablanın y-ekseni boyunca ileri geri hareket edebilen arabası üzerine, bu tablaya ortogonal pozisyonda x-tablası bağlanmıştır. x-tablasının x-ekseni boyunca hareket edebilen arabası üzerinde ise, örnek taşıyıcı platform yer almaktadır. x ve y tablalarının arabalarının xy düzlemi (yatay düzlem) içinde yaptığı ötelenme hareketleri ile, örnek taşıyıcı üzerinde bulunan ölçüm yüzeyi yatay düzlemde gezdirilebilmektedir. x ve y tablalarına dik konumda bulunan z-tablasının z-ekseni yönünde aşağı-yukarı ötelenebilen arabası, üzerinde bir ölçüm iğnesi taşımaktadır. Ölçüm iğnesinin hemen üst kısmına, bu iğne ile birlikte ötelenebilen bir anahtar (switch) bulunmaktadır (Şekil 4.2a). Ölçüm iğnesinin z-ekseni boyunca aşağı doğru ötelenmesi sırasında, ölçüm iğnesine çok hafif bir dokunma yükü etkidiğinde, bu iğne yukarı doğru çok sınırlı bir hareket ile (≈ 0.5 mm) üzerindeki anahtara baskı yapmakta ve anahtarı kapalı (on) pozisyona getirmektedir. Bu yük boşaldığı anda, bir yay mekanizması sayesinde, iğne sınırlı hareketi ile tekrar aşağı düşmekte dolayısıyla anahtardan ayrılmaktadır. Bu durumda anahtar tekrar açık (off) konumuna gelmektedir. x-y tablalarının arabaları sayesinde yatay düzlemde gezdirilmekte olan herhangi bir yüzey üzerindeki yükseltilerin ölçümü, z-ekseni boyunca aşağı-yukarı ötelenebilen bu iğne ile sağlanmaktadır.

a) b)



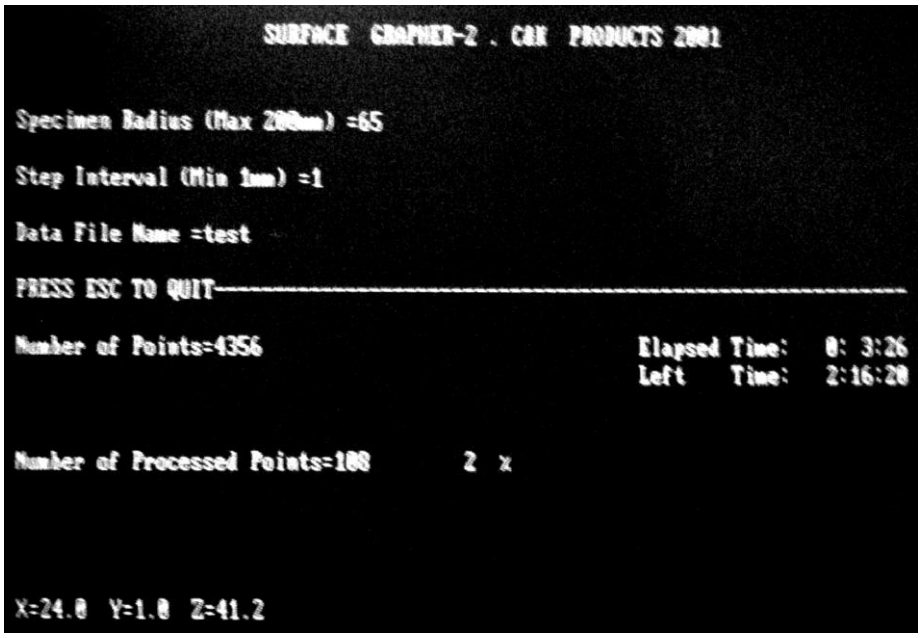
Şekil 4.2 : Geliştirilen yüzey tarama cihazı a) 1: ölçüm iğnesi, 2: anahtar b) 3: sonsuz vidalar, 4: doğrusal hareket rulmanlarının içinden geçen kızak miller, 5: hareketli arabalar.

Arabaların hareketi, otomasyonda kullanılan hassas sonsuz vidalar tarafından sağlanmaktadır. Bu sonsuz vidalar, tablaların üzerindeki arabaların merkezlerine yerleştirilmiş olan somunların içinden geçmekte olup, tablalara monte edilmiş olan bipolar step motorlar (x-eksenindeki tabla için SPM1, y-eksenindeki tabla için SPM2 ve z-eksenindeki tabla için SPM3, SPM:step motor) tarafından tahrik edilmektedir. Step motorlar ise, yine özel olarak tasarlanıp imal edilen ve yüzey tarama cihazı ile

bilgisayar arasında arayüz görevi üstlenen kontrol ünitesi tarafından sürülmektedir. Step motorların açısal dönme hareketi, tablalar üzerinde yer alan arabaların doğrusal ötelenme hareketini sağlamaktadır. Her bir sonsuz vidanın sağında ve solunda yer alıp, sonsuz vidaya paralel konumda bulunan ikişer adet düşük sürtünmeli mil ise, hareket sırasında kızak görevini üstlenmektedir (Şekil 4.2b). Otomasyon sistemlerinde kullanılmakta olan bu miller, yine arabaların içine yerleştirilmiş olan doğrusal hareket rulmanlarının içinden geçmektedir. Bu doğrusal rulmanlar sayesinde, arabaların miller üzerindeki hareketi sırasında oluşan sürtünmeler en aza indirgenmektedir.

4.1.2 Kontrol yazılımı "SG2ULT"

Yüzey tarama cihazı, özel olarak geliştirilen bir yazılım (SG2ULT) ile tamamıyla bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. Bu yazılımın kaynak kodu Visual C' de hazırlanmıştır. Yazılım IBM uyumlu herhangi bir bilgisayarda çalışabilmektedir. Kontrol yazılımı çalıştırıldığında; taranacak "yüzey boyutu", kullanılacak "veri örnekleme aralığı (Δ)" değerleri ve ölçüm sırasında okunulan yükselti değerlerinin saklanacağı "veri kayıt dosyasının adı" bilgisi istenilir. Bu bilgi ve değerler girildikten sonra, klavyede "enter" tuşuna basılarak yüzey üzerindeki yükselti değerlerinin ölçümü başlatılır. Ölçüm sırasında okunulan yükselti değerleri bir yandan veri dosyasına kaydedilirken, diğer yandan bilgisayar ekranında o ana dek gerçekleştirilmiş işlemler hakkında açıklayıcı bilgiler izlenilebilmektedir (Şekil 4.3).



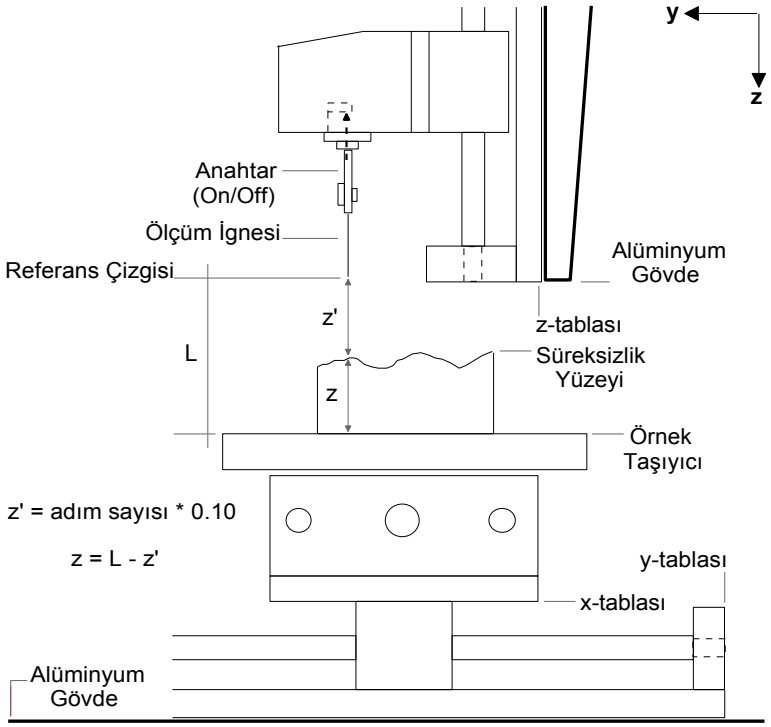
Şekil 4.3 : Ölçümle eş zamanlı olarak bilgisayar ekranından izlenebilen ölçüme ilişkin bilgiler

Bunlar; ölçülecek toplam nokta sayısı, ölçümü gerçekleştirilen nokta sayısı ve yüzdesi, her farklı koordinat noktasındaki ölçüm değerleri, ölçümde geçen ve kalan süre değerleridir. Yazılım ile cihaz arasındaki haberleşme, arayüz vazifesi gören ve bu çalışma için özel olarak dizayn edilmiş olan, elektronik kontrol ünitesi üzerinden sağlanmaktadır. Kontrol ünitesi paralel (I/0) port vasıtası ile bilgisayara bağlantılıdır. Yazılım cihaz üzerindeki step motorları (SPM1, SPM2 ve SPM3) kontrol ünitesi içinde yer alan 3 adet step motor sürücü devresi aracılığı ile sürmektedir.

4.1.3 Çalışma prensibi

Pürüzlülüğü ölçülecek olan süreksizlik yüzeyi, dış kuvvetlerden etkilenmeyecek şekilde, örnek taşıyıcı üzerine sabitlenir. Öyleki, kare kesitli süreksizlik yüzeyinin geometrik merkezi ile yüzeyin üzerindeki ölçüm iğnesi aynı doğru parçası üzerindedir. Visual C' de hazırlanılan kontrol yazılımı açıldığında ilk olarak; "yüzey boyutu", kullanılacak "veri örnekleme aralığı (Δ) değeri" ve ölçülecek yükselti değerlerinin saklanacağı "veri kayıt dosyasının adı" bilgileri girilir. Yazılım çalıştırıldığında, SPM1 ve SPM2 eş zamanlı ve sürekli olarak dönerek x ve y tablalarının arabalarını harekete geçirir. Arabaların ötelenmeme hareketi ile örnek taşıyıcı üzerindeki kare kesitli süreksizlik yüzeyinin köşe noktası tam olarak ölçüm iğnesinin altına gelir. Bu nokta aynı zamanda ilk ölçüm noktasıdır. Bu konum otomatik olarak sağlanır sağlanmaz, SPM3' ün dönme hareketi ile ölçüm iğnesi z-ekseni boyunca belirli bir referans düzeyinden aşağıya doğru ötelenerek yüzeye iner. İğne yüzeye temas eder etmez dokunma yükünün etkisiyle üzerinde bulunan anahtara baskı yapar ve anahtar kapalı (on) konumuna geçer. Bu işaret bilgisi kontrol ünitesi aracılığı ile paralel port üzerinden tekrar bilgisayara gönderilir. Bu durum yazılım tarafından hemen algılanır, gönderilen kontrol bitleri ile SPM3' ün ters yönde dönme hareketi sağlanır ve iğne tekrar başlangıçdaki referans konumuna çekilir. İğnenin referans noktasına çekilmesi sırasında iğne yüzeyden ayrıldığı anda üzerindeki dokunma yükü boşalır ve anahtar bir sonraki noktanın ölçümü için tekrar açık (off) konumuna geçer. Bu sırada, iğnenin referans noktasından aşağıya inerek yüzeye dokununcaya dek SPM3' ün atmış olduğu adım sayısı yazılım tarafından sayılır. SPM3' ün 1 adımı 1.8^0 dereceye karşılık gelmektedir. SPM3' ün 1 adım atması, dolayısıyla tahrik ettiği sonsuz vidanın 1.8^0 dönmesi, ölçüm iğnesinin 0.1024 mm ötelenmesini sağlamaktadır. 0.1024 değeri SPM3 için kalibrasyon sabitidir. İğne referans noktasından aşağıya inip yüzeye dokununcaya dek, SPM3' ün atmış olduğu adım sayısı yazılım tarafından sayılır ve kalibrasyon sabiti ile çarpılarak, referans noktası ile yüzey üzerindeki ölçüm noktası arasındaki mesafe (z') hesaplanır. Bu değer, referans noktası ile örnek taşıyıcı arasındaki sabit mesafeden

(L=sabit) çıkarılarak ölçüm noktasının örnek tabanından olan yüksekliği (z) hesaplanır (Şekil 4.4). Hesaplanan yükseklik değeri (z), ait olduğu noktanın koordinat [P(x,y)] bilgisi ile birlikte, ölçümle eş zamanlı olarak yazılım tarafından veri dosyasına kaydedilir. Böylece o noktadaki ölçüm işlemi tamamlanmış olur.



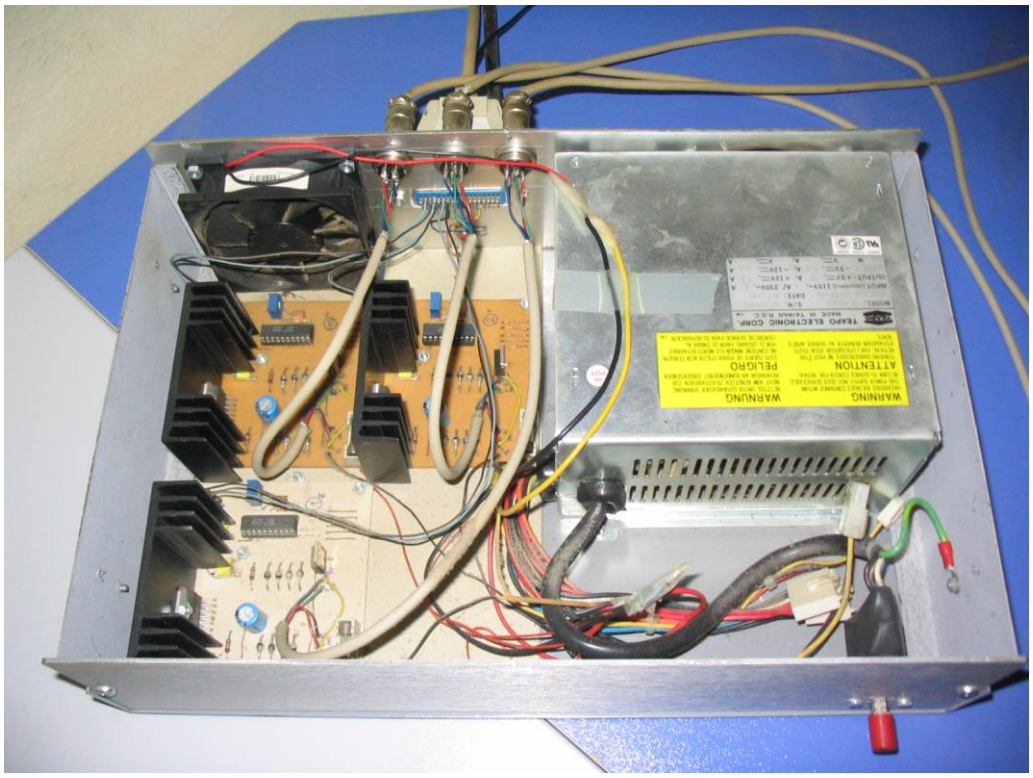
Şekil 4.4 : Step motorun adım sayısını kullanarak yazılım tarafından yükseklik hesaplanmasına ilişkin açıklayıcı şema

SPM3' ün geri dönme hareketi ile iğnenin referans düzeyine çekilmesinin hemen ardından, başlangıçta yazılıma girilmiş olan örnekleme aralığına (Δ) bağlı olarak, yüzey üzerindeki bir sonraki ölçüm noktası, SPM1 ve SPM2 tarafından iğnenin altına getirilir ve yukarıda tanımlanan işlemler tekrar eder. Yazılıma girilen örnek boyutu ve örnekleme aralığı ile sayısı ve koordinatları daha başlangıçta tanımlanmış olan yüzey üzerindeki bütün noktaların yükseklikleri ölçüldüğünde, yazılım tarafından ölçüm işlemi otomatik olarak sonlandırılır ve örnek taşıyıcı üzerindeki süreksizlik yüzeyi SPM1 ve SPM2' nin sıralı dönme hareketleri ile en baştaki başlangıç konumuna alınır. Böylelikle tüm yüzey taranarak, yüzey sayısallaştırılmış olur. Her yüzey için farklı adlar ile kayıt altına alınan veri dosyaları, diğer veri analiz yazılımları tarafından kullanıma hazır durumdadır.

Geliştirilen bu cihazda taranabilir en geniş yüzey alanı 256x256 mm' dir. Yatay eksenlerdeki (x ve y) en yüksek çözünürlük ya da en küçük örnekleme aralığı (Δ) 0.1 mm' dir. Yüzey üzerindeki yükseltiler düşey eksende (z) 1/10 mm'lik bir duyarlık ile ölçülebilmektedir. Yüzey üzerindeki herhangi bir noktanın ölçümü için geçen süre o noktanın yüksekliğine dolayısıyla da ölçüm iğnesinin o noktaya ulaşmak için harcadığı zamana bağlıdır. Bununla birlikte, yüzeyin pürüzlülüğüne bağlı olarak 1 ile 3 sn arasında değişmektedir.

4.1.4 Elektronik kontrol ünitesi

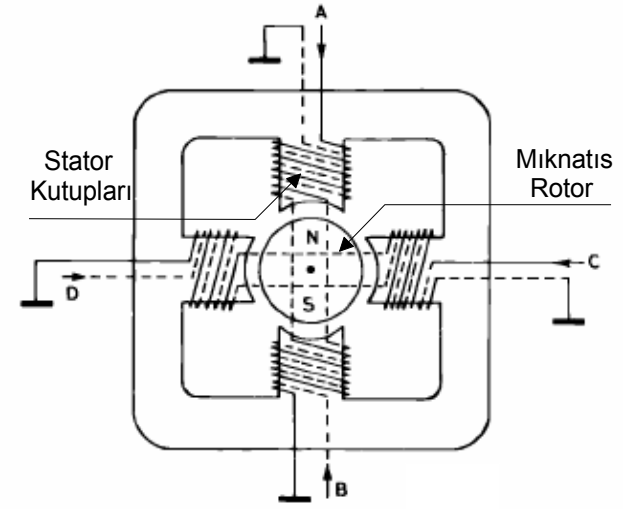
Kontrol ünitesi, bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı için özel olarak tasarımlanmış ve üretilmiştir (Şekil 4.5). Bilgisayar ile cihaz arasındaki haberleşmeyi sağlayarak arayüz görevi yapar. Bilgisayarın standart paralel (I/0) portuna bağlıdır. Kontrol ünitesinin içinde 3 adet özdeş step motor sürücü devresi bulunmaktadır. Bu devrelerden herbiri, cihaz üzerindeki ayrı bir step motoru (SPM1, SPM2, SPM3) sürmektedir. Yazılım tarafından bilgisayarın paralel portundan gönderilen kontrol bitleri, kontrol ünitesi içindeki ilgili sürücü devrelerine ulaşmakta ve bu devreler bağlı oldukları step motorların komutlandırılan dönme hareketlerini yapması için gerekli akımları hazırlayarak step motorlara göndermektedir.



Şekil 4.5 : Yüzey tarama cihazı elektronik kontrol ünitesi

4.1.5 Bipolar step motorlar ve çalışma prensibleri

Bipolar step motorlar, üzerinde sarımlar bulunan stator kutupları ile çevrelenmiş bir mıknatıs rotordan oluşur (Şekil 4.6). İki yönlü sürüş akımı kullanılarak ve sarımlar ardaşık olarak anahtarlanarak motor isteğe göre ileri veya geri yönde adımlanır. Belli bir anahtarlama dizisi kullanılarak rotorun sürekli olarak dönmesi sağlanır. Bipolar motorun merkezindeki mıknatıs rotor, etrafındaki elektrik akımı ile kutuplaşan stator kutupları tarafından itilerek veya çekilerek rotasyon hareketi yapar.



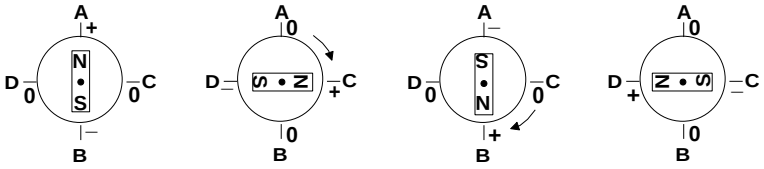
Şekil 4.6 :Bipolar bir step motorun basitleştirilmiş iç yapı şeması.

Bipolar bir step motor için mümkün olan üç sürüş seçeneği mevcuttur. İlkinde, sarımlara ardaşık olarak AB / CD / BA / DC sırasında akım verilir (BA, AB sarımının tersi yönde akım verilmesidir). Bu anahtarlama dizisi tam step dalga (tek fazlı) sürüm modu (wave drive mode - one phase on drive) olarak adlandırılır (Şekil 4.7a). Herhangi bir anda sadece bir faza akım verilir.

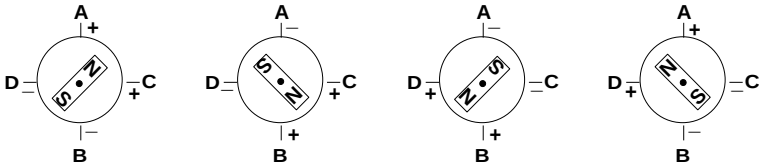
İkinci seçenekte, her iki faza birlikte akım verilir ve rotor sürekli kendini iki kutup arasında konumlandırır. Bu mod, iki fazlı tam step modu (two phase on) olarak adlandırılır. Bipolar bir step motor için normal sürüm anahtarlamasıdır ve en yüksek torku sağlar (Şekil 4.7b).

Üçüncü seçenekte, sarımlara sırasıyla; tek fazlı, ardından iki fazlı, sonra tekrar tek fazlı olacak şekilde ardaşık akım verilir. Böylelikle motor ½ ‘ lik adımlar ile döner. Bu mod, yarım adım modu (half step mode) olarak adlandırılır ve step motorun efektif (etkin) adım açısı yarıya düşürülmüş olur (Şekil 4.7c). Ancak bu modun kullanımı torkta düzensizliğe neden olur.

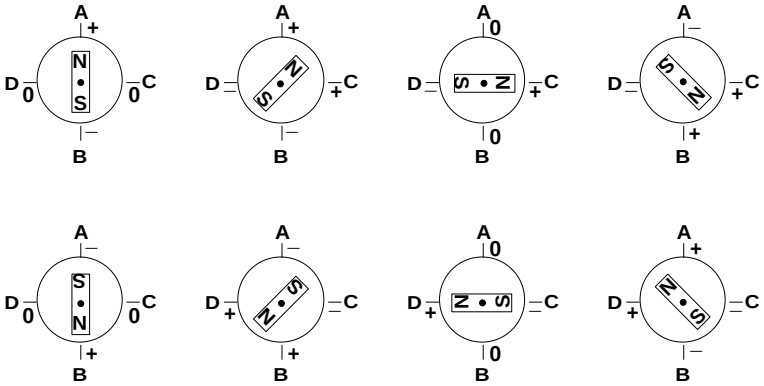
a) Dalga (tek fazlı) sürüm modu



b) İki fazlı sürüm modu

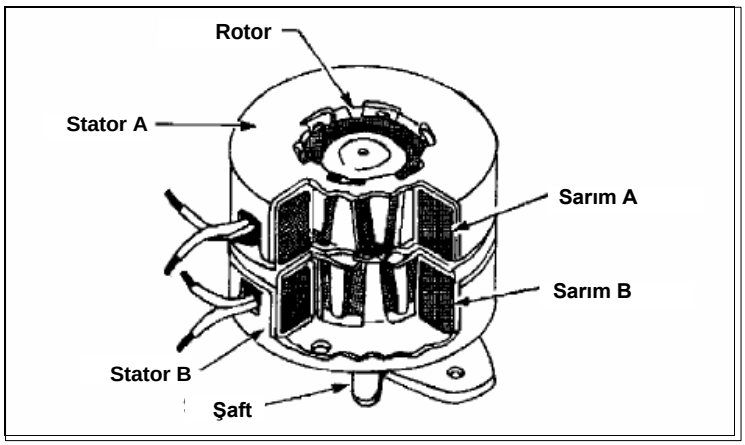


c) Yarım adım modu



Şekil 4.7 : İki fazlı bipolar step motor için sürüş modları (Dönüşler saat yönündedir).

Her bir mod için yukarıda belirtilen anahtarlama dizisi ile saat yönünde (CW) sürüm elde edilir. Saat yönünün tersinde (CCW) sürüm sağlamak için anahtarlama dizisini tersine çevirmek yeterlidir. Şekil 4.7'de görülen şematik diyagramlarda motor kabaca 90 derecelik adım açıları ile dönmektedir. Ancak gerçek bir step motorda adım açısını bir kaç dereceye düşürmek için çok sayıda kutup bulunur, ancak sarım sayısı ve anahtarlama dizisi değişmez. Tipik bir bipolar step motor Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 : Gerçek bir bipolar step motor kesiti.

Çeşitli kullanım alan ve amaçlarına uygunluk gösterebilecek şekilde, birbirinden farklı teknik özelliklerde üretilmiş bir çok step motor modeli bulunmaktadır. Geliştirilen yüzey tarama cihazında kullanılan step motorlara ait teknik özellikler Tablo 4.1' de verilmiştir. Kullanılan bu motorlar yüksek torklar verebilmekte olup, düşük sapma açılarına sahiptirler. Geliştirilen yüzey tarama cihazının x, y ve z eksenlerindeki hareket kızaklarında özel doğrusal rulmanların kullanılmış olması, sürtünmeleri en aza indirgeyerek motorlara etkiyen burulma momentlerinin büyüklüğünü azaltmakta, bu durum ise uzun süreli kullanımlarda motorlar üzerinde aşırı ısınmayı engelleyerek sistemin duraylılığını artırmaktadır.

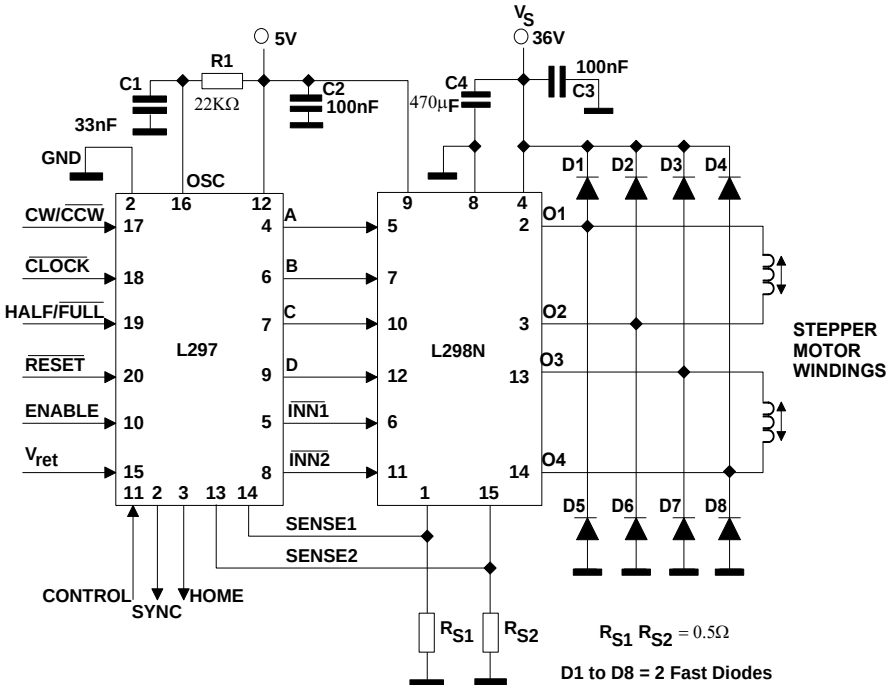
Tablo 4.1 : Kullanılan step motorların teknik özellikleri

Güç	8.3 W
Adım / Devir	200
Adım Açısı	1.8^0
Faz Akımı	1.2 A

4.1.6 Bipolar step motor sürücü devresi

Geliştirilen yüzey tarama cihazı ile bilgisayar arasındaki haberleşme, tasarımı ve imalatı bu tez kapsamında gerçekleştirilmiş olan bir kontrol ünitesi aracılığı ile sağlanmaktadır. Cihaz üzerinde 3 adet bipolar step motor bulunduğundan, bu kontrol ünitesi içinde de 3 adet özdeş bipolar step motor sürücü devresi yer almaktadır. Bu özdeş devrelerden herbiri cihaz üzerindeki bir step motoru sürmektedir. Bipolar step motor sürücü devresi; L297 step motor kontrol işlemcisi, L298N köprü sürücüsü ve çok az sayıda devre elemanından oluşmaktadır (Şekil 4.9). Devre elamanı gereksiniminin az sayıda olması; düşük maliyet, yüksek güvenirlik ve kompakt bir yapı sağlamakta, uygulama için uygun yazılımların hazırlanmasını ise kolaylaştırmaktadır. Uygun bir güç aktüatorü (L298) ile tüm bipolar ve unipolar step motorları kontrol edebilen L297 step motor kontrol işlemcisi, step motor uygulamalarında özellikle L298N yada L293E köprü sürücüsü ile birlikte kullanılmak için tasarımlanmış olup, L298N köprü sürücüsü ile birlikte kullanıldığında, bu iki çip bipolar step motor arayüzü için eksiksiz bir mikro işlemci görevi üstlenmektedir. Motor sarımlarındaki akımı regüle etmek için iki PWM (Pulse Width Modulation) devresi içeren L297, kontrol sinyallerini bir mikroprosesör ya da PC arayüzünden alabilmekte ve bir step motoru sürecek güç durumu için gerekli olan tüm sinyalleri hazırlamaktadır. L297 ayrıca normal ve yarım adım sürüş modlarını da desteklemektedir. Şekil 4.9' de verilen konfigürasyon 2 ampere kadar olan sarım akımları sağlayarak step motorları sürmekte olup, motorların çektiği

akımlar açısından kullanılan bu devre yapısı yeterli olmaktadır. Eğer daha yüksek güçlere ihtiyaç duyulursa, arayüzde daha güçlü transistörler kullanmak yeterlidir. 3.5 ampere kadar olan akımlar içinse, arayüzde birbirine paralel bağlanmış iki adet L298N köprü sürücüsünün kullanılması yeterlidir.



Şekil 4.9 :Bir motoru sürmek için kullanılan bipolar step motor sürücü devresi.

L297 step motor kontrolörü, mikro işlemci kontrolü altında dört girişe (input) sahiptir. Her bir giriş sarımlara ne şekilde enerji verileceğini belirlemektedir.

Half / Full : Bu giriş HIGH (1) konumuna getirildiğinde yarım adım modu (half step mode), LOW (0) konumuna getirildiğinde ise, tam adım modu (full step mode) seçilmiş olur.

Reset : Aktif bir LOW konumu ile daha önce gönderilmiş tüm komutlar iptal edilmiş olur, A,B,C ve D bacaklarında ABCD = 0101 konumu oluşur.

Direction (CW/CCW) : Aktif bir LOW konumu motorun saat yönünün tersinde (counter-clockwise) dönmesini sağlar. HIGH konumu ise, motoru saat yönünde (clockwise) sürer.

Clock : Buraya gönderilen aktif bir LOW sinyali motorun 1 adım dönmesini sağlar. LOW ve HIGH sinyallerinin ardaşık ve sürekli gönderilmesi motorun sürekli adım adım dönmesini sağlar.

Enable : Motorları çalıştırmak için HIGH konumunda olmalıdır. LOW konumunda olduğunda ABCD=000 olur.

Uygulamada “Half / Full” girişleri LOW olarak seçilmiştir. Diğer bir ifadeyle her üç sürücü devresinde de bu uç topraklanarak sinyal sıfıra çekilmiş ve motor “tam adım modunda” çalıştırılmıştır. Kontrol ünitesi açıldığında tüm step motorlar dönüş sinyallerine hazır konuma gelmektedir (“Enable” girişi tüm devre birimlerinde HIGH yani +5V seviyesindedir). Kontrol yazılımı ile paralel porttan her bir step motor sürücü devresi için sadece “Clock” ve “Direction” bilgileri gönderilerek sistem istenilen doğrultuda hareket ettirilmektedir.

4.2 Mekanik Sürtünme Deneyleri İçin Geliştirilen Direkt Kesme Deney Cihazı

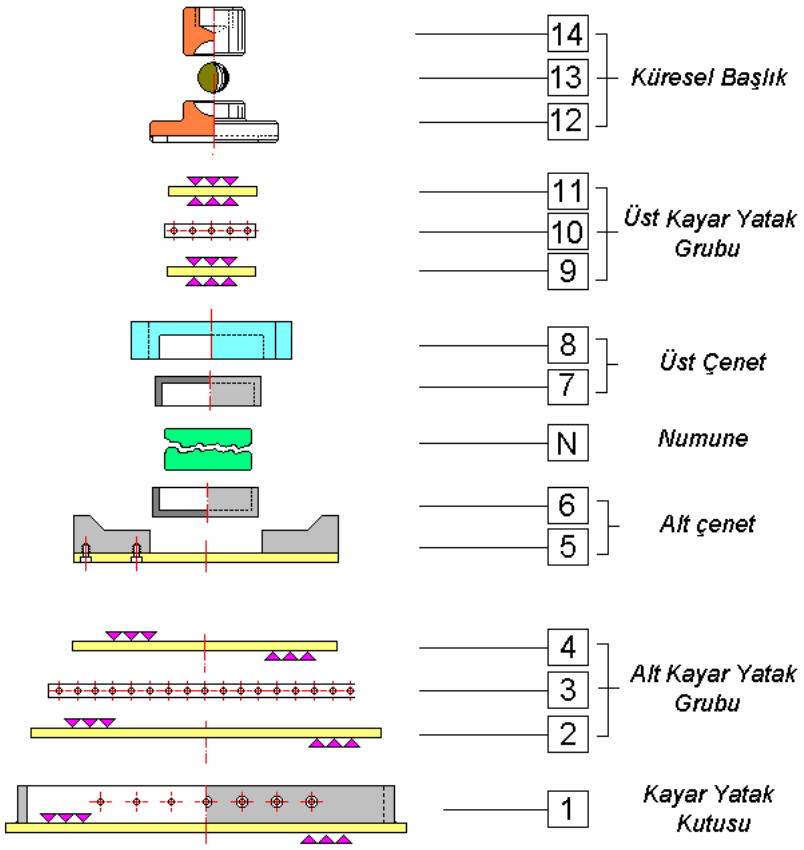
Süreksizlik düzlemlerinin dayanım ve davranış özelliklerinin dolayısıyla mekanik parametrelerinin laboratuvar ortamında deneysel olarak belirlenmesine imkan verecek bir direkt kesme deney cihazı özel olarak tasarımlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.10). Deney cihazı; kesme kutusu, hidrolik ünitesi, veri toplama ve işleme ünitesi (ölçüm sensörleri, bilgisayar ve yazılım) olmak üzere üç ana üniteden oluşmaktadır.



Şekil 4.10 : Geliştirilen laboratuvar direkt kesme deney cihazı

4.2.1 Kesme kutusu

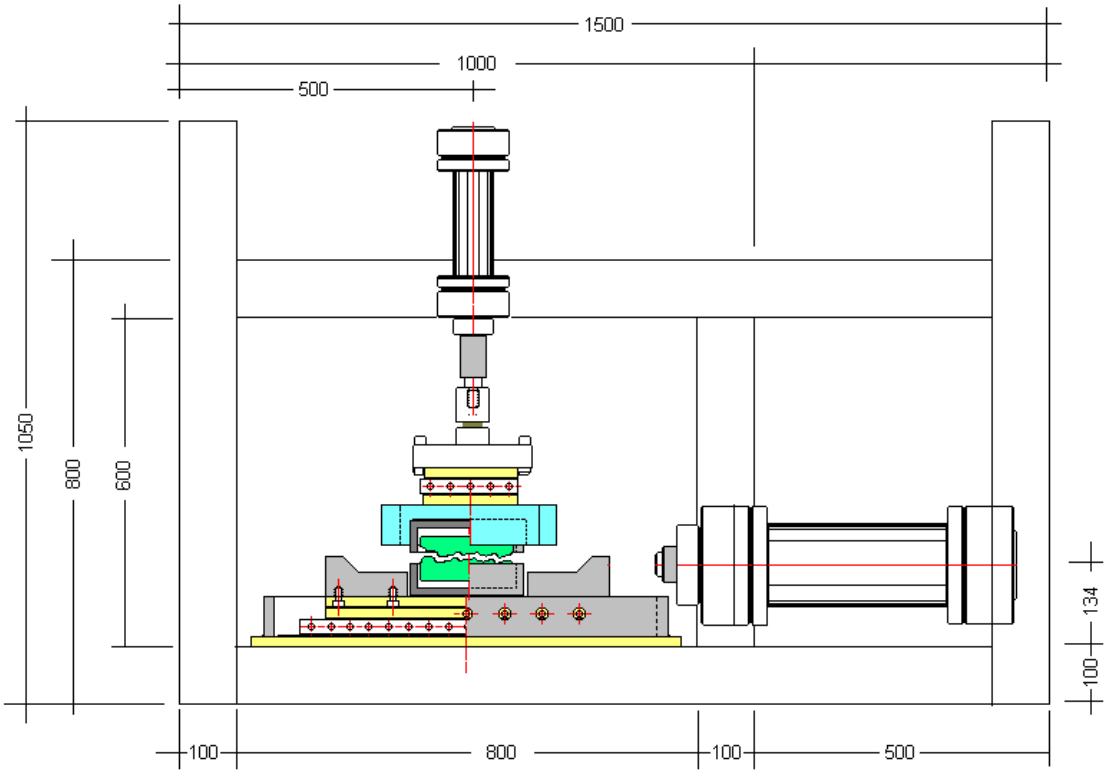
Kesme kutusu başlıca; kayar yatak kutusu, alt kayar yatak grubu, alt ve üst çenetler, üst kayar yatak grubu ve küresel başlıktan oluşmaktadır. Kesme kutusunun tasarımında, süreksizlik alt bloğunun yerleştirildiği alt çenet hareketli olup, süreksizlik üst bloğunun yerleştirildiği üst çenet ise hareketsizdir ve rijit kesme çerçevesine bağlanmıştır. Kesme kuvveti alt çenete uygulanmakta olup, bu kuvvetin etkisi altında itilen alt çenet, alt kayar yatak grubu üzerinde sola doğru ötelenerek kesme yer değiştirmesini yapmaktadır. Alt çenetin kayar yatak grubu üzerinde ötelenmesi esnasında, sürtünme kuvvetlerini en aza indirgemek amacı ile alt kayar yatak grubu içinde rulmanlar kullanılmış olup, buna ek olarak, alt kayar yatak grubu içi yağ ile dolu olan kesme çerçevesine bağlı bir kayar yatak kutusu içine alınmıştır. Düşey yükün test edilecek süreksizlik yüzeyi üzerine üniform dağılmasını ve yüzeye normal konumda etkimesini sağlamak için, düşey yük üst çenete küresel başlık ile uygulanmaktadır. Küresel başlık ile üst çenet arasındaki sürtünmeleri en aza indirgemek için arada rulmanlı üst kayar yatak grubu kullanılmıştır. Kesme kutusunu oluşturan parçalar ve montaj şeması Şekil 4.11' de verilmiştir.



Şekil 4.11 : Kesme kutusu montaj şeması

4.2.2 Hidrolik ünite

Geliştirilen bu cihazda, kesme kutusu içindeki süreksizlik örneğine kesme kuvveti hidrolik bir piston ile uygulanmaktadır. Bu piston en fazla 2 ton yükleme kapasitesine sahiptir. Deney sırasında, uygulanan kesme kuvvetinin kesilme yüzeyine üniform olarak dağılabilmesi için, bu pistonun ekseni kesilme düzlemine paralel olup, kesme doğrultusunda kesilme düzlemini ortalayan eksen ile aynı düşey düzlem içinde yeralmaktadır. Test edilecek süreksizlik düzlemi üzerine uygulanacak normal kuvvet, ekseni kesilme düzlemine dik konumda bulunan ve bu düzlemin merkezinden geçen ikinci bir hidrolik piston tarafından sağlanmaktadır. Bu pistonun en fazla yükleme kapasitesi 1 ton' dur. Cihazın tasarımına bağlı olarak, normal kuvvet, bu piston kullanılmaksızın, istendiğinde bir yük askısı ve ağırlık külçeleri ile de sağlanabilmektedir. Normal kuvvetin uygulanması ile ilgili bu ikinci seçenek, kesilme sırasında normal yük değerinde en küçük değişimlerin dahi istenmediği deney prosedürlerinde önem kazanmakta ve normal yükün deney süresince sabit kalmasına olanak tanımaktadır. Hidrolik pistonların rijit çerçeve içindeki montaj düzeni ve kesme kutusu ile olan geometrik ilişkileri
Şekil 4.12' de görülmektedir.



Şekil 4.12 : Hidrolik pistonların rijit çerçeve içindeki montaj düzeni ve kesme kutusu ile olan konfigürasyonları.

Her iki piston ayrı hidrolik pompa ve motorlar ile beslenmektedir. Bu pistonların kontrolünde kullanılan hidrolik ünite ile hidrolik pompalar, motorlar ve yağ tankının bu ünite içindeki yerleşimi Şekil 4.13' de sunulmuştur.



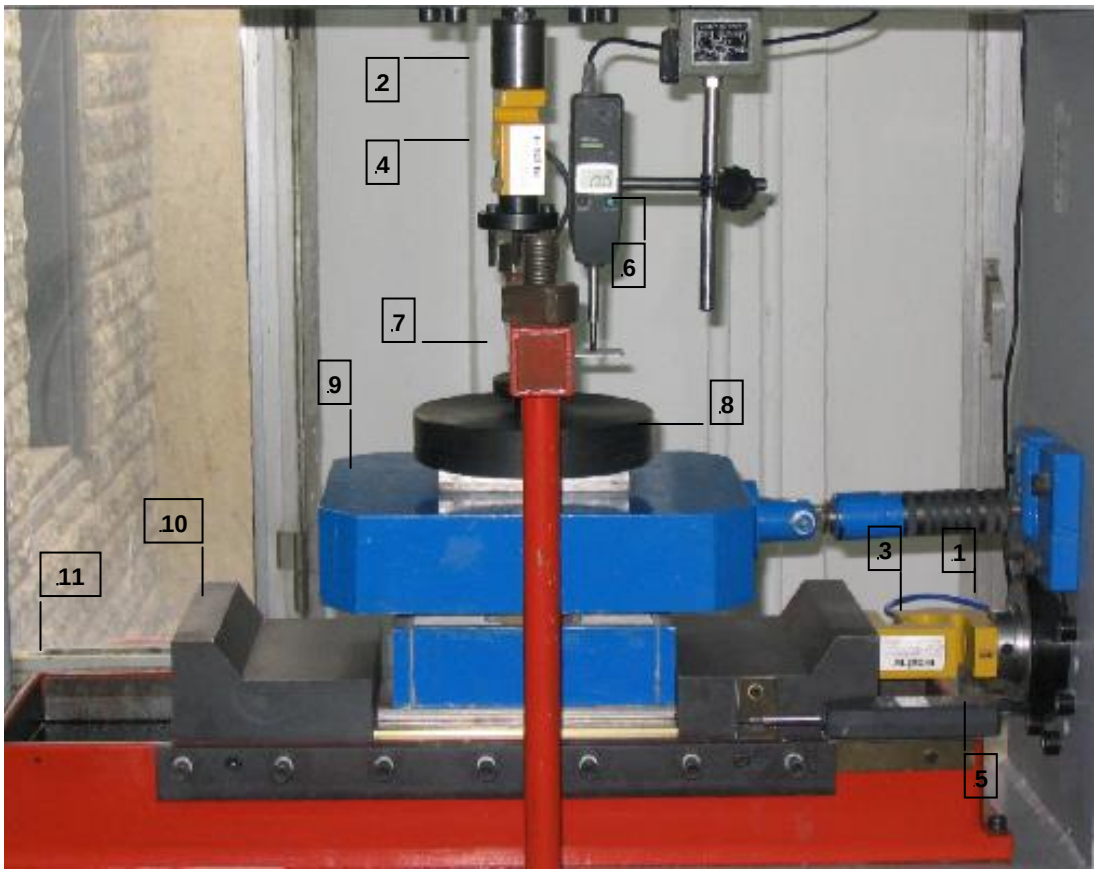
Şekil 4.13 : Direkt kesme deney cihazı hidrolik ünitesi

4.2.3 Veri toplama ve işleme ünitesi (ölçüm sensörleri, bilgisayar donanım ve yazılımı)

Deney sırasında hidrolik pistonlar aracılığıyla kesme kutusuna, dolayısıyla kesilecek süreksizlik düzlemine uygulanan kuvvetlerin büyüklükleri, iki adet S tipi yük ölçer (S-type loadcell) ile belirlenmektedir. Kesme kuvvetlerinin değişiminin izlendiği yük ölçer en fazla 2 ton kapasiteli olup, uygulanan normal kuvvetin büyüklüğü ise en fazla 1 ton kapasiteli bir yük ölçer ile tayin edilmektedir. Bu yük ölçerler birer adet sayısal göstergeye (dijital indikatör) bağlı olup, bunlardan alınan analog veriler bu göstergeler üzerinden sayısal olarak okunabilmektedir. Sayısal göstergeler üzerindeki ikinci bir çubuk gösterge sayesinde, yük ölçerlerdeki değişimler analog olarak da izlenebilmektedir. Seçilebilir RS-232, RS-485 ve RS-422 haberleşme protokollerini kullanabilen bu göstergeler saniyede 50 ölçme hızına sahiptirler. Yük ölçerlerdeki değişimler, RS-232 haberleşme protokolü sayesinde, göstergeler üzerinden sayısal olarak veri toplama ve işleme ünitesindeki bilgisayara aktarılmaktadır. Yük ölçer verileri, 4-20 mA analog çıkışların kullanımı ile,

istendiğinde analog olarak da alınabilmekte ve anolog – dijital çeviriciden okunabilmektedir.

Sabit normal kuvvet altında, kesme kuvvetlerinin etkisinde zorlanan süreksizlik örneğinin kesilmesi sırasında, normal kuvvetin uygulandığı düşey eksen doğrultusunda gerçekleşecek düşey yer değiştirmeler (dilatasyon ve konsolidasyon) ile kesme kuvvetinin uygulandığı yatay eksen boyunca gerçekleşecek yatay yer değiştirmelerin miktarlarının belirlenmesi için, iki adet sayısal (dijital) boy ölçer kullanılmıştır. Tıpkı yük ölçerlerde olduğu gibi, sayısal boy ölçerler de RS-232 haberleşme protokolüne sahiptir. Bu boy ölçerler üzerinden okunan değerler RS-232 çıkışından sayısal olarak alınarak, birer adet DMX1 bilgi transfer cihazı arayüzü aracılığıyla bilgisayara aktarılmaktadır. Üzerinde sayısal gösterge de bulunan sayısal boy ölçerlerin ölçüm aralığı 0 – 25 mm, okuma hassasiyeti ise 0.01 mm' dir. Yük ölçerler ve boy ölçerlerin deney düzeneğindeki genel yerleşimi Şekil 4.14' deki gibidir.



Şekil 4.14 : Yük ve deformasyon ölçüm sensörlerinin kesme kutusu ile olan konfigürasyonları; 1: Yatay yük pistonu, 2: Düşey yük pistonu, 3: Yatay yük ölçer, 4: Düşey yük ölçer, 5: Yatay boy ölçer, 6: Düşey boy ölçer, 7: Sabit normal yük askısı, 8: Küresel başlık, 9: Sabit üst çenet, 10: Hareketli alt çenet, 11: Kayar yatak kutusu

Deney süresince, önceden belirlenecek periyodik zaman aralıklarında, ikisi yük ölçerlerden, diğer ikisi ise boy ölçerlerden olmak üzere toplam 4 adet verinin, veri toplama ve işleme ünitesindeki bilgisayara eş zamanlı olarak aktarılaması söz konusudur. Bu işlem için, üzerinde 4 adet seri (com) port bulunduran özel bir donanım (multiserial com port) temin edilmiş ve bilgisayar donanımına eklenmiştir. Yük ve boy ölçerler bu donanım üzerinden bilgisayara bağlanmaktadır. Deney süresince bu sensörler üzerindeki değişimler, özel bir veri toplama yazılımı aracılığıyla, belirlenen örnekleme aralıklarında eş zamanlı olarak bilgisayar tarafından sorgulanmakta ve loglanmaktadır. Seçilen örnekleme aralığına bağlı olarak, periyodik zaman dilimlerinde, 4 sensörden aynı anda gelen veri satırlarından oluşan deney logları matematiksel ve grafiksel değerlendirmelere hazır durum ve formattadır. Süreksizlik örneği üzerine normal kuvvetin yük askısı ve ağırlık külçeleri ile uygulandığı, dolayısıyla düşey pistonun kullanılmadığı deney koşullarında, yük askısına asılan külçelerin toplam ağırlığı zaten bilindiğinden, normal yük ölçer devre dışı bırakılmaktadır. Bu durumda bilgisayara veri akışı, sadece yatay yük ölçer ve diğer iki boy ölçerden olmakta ve eş zamanlı sorgulama logunda sadece bu 3 adet sensörden alınan değerler yer almaktadır.

5 SÜREKSİZLİK YÜZEYLERİNİN SAYISALLAŞTIRILMASI VE LABORATUVAR DİREKT KESME DENEYLERİ

5.1 Süreksizlik Örneklerinin Hazırlanması

Süreksizlik yüzeylerinin geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı ile sayısallaştırılması, yüzeylerin dolgu malzemesi içinde kalıba alınması işleminden sonra gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamanın nedeni, süreksizlik yüzeylerinin yüzey tarama cihazında sayısallaştırılırken sahip oldukları oryantasyon ile mekanik sürtünme deneyleri sırasında kesme kutusu içinde sahip oldukları oryantasyonu birbirine eş kılmaktır. Uygulama; matematiksel hesaplamalarla bulunacak pürüzlülük değerleri ile deneysel çalışmalar sonucunda ulaşılacak mekanik dayanım değerleri arasında kurulabilecek olası ilişkilerin doğruluğu ve güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Diğer taraftan, dolgu malzemesi içinde kalıba alınmış yüzeyler yüzey tarama cihazı içinde sayısallaştırılırken, bu cihazın yatay düzlemdeki (x-y düzlemi) koordinat eksenlerinin (x ve y eksenleri) doğrultu ve yönleri yüzeylerin üzerine etiketler ile işaretlenmiştir. Süreksizlik örneğine ait olan alt ve üst blok yüzeyleri kesme kutusunun alt ve üst çenetleri içine yerleştirildiğinde, direkt kesme deney cihazının tasarımına bağlı olarak, karşıdan bakışta alt blok sola buna nazaran üst blok sağa doğru hareket etmektedir. Bu durumda alt blok yüzeyine etkiyen kesme vektörünün yönü sağa doğrudur. Saysallaştıma işleminin ardından alt blok yüzeyleri kesme kutusunun alt çeneti içine, yüzey üzerinde işaretli olan x-ekseninin doğrultusu bu yüzey üzerine etkiyecek olan kesme vektörünün doğrultusuna paralel, yönü ise bu vektörün yönüne eş olacak konumda yerleştirilmiştir. Bu uygulama ise; matematiksel hesaplamalarla elde edilecek yön bağımlı pürüzlülük parametreleri ile deneysel dayanım değerleri arasında kurulabilecek olası ilişkilerin doğruluğu ve güvenilirliği açısından önem taşımaktadır.

Kaya kütlesi içerisinde, süreksizliklerle sınırlandırılmış birbirine komşu birim kaya elemanlarının, süreksizlik yüzeyinin doğal geometrisine zarar vermeksizin, ana kütleden dikkatlice sökülerek alınması, bu araştırmada kullanılan örnekleme tekniğini oluşturmaktadır. Kaya kütlesinden sökülen birbirine komşu birim kaya elemanları, diğer bir deyişle süreksizliğin alt ve üst blokları taş kesme atölyesine taşınmış, iri boyutlu ve düzensiz şekilli bu bloklara öncelikle prizmatik şekiller verilmiştir (Şekil 5.1a ve b). Bu sayede üzerinde daha kolay çalışılabilir hale

getirilen bloklardan, süreksizlik yüzey alanı yaklaşık 70x70 mm^2 olan küp şekilli örnekler kesilmiştir (Şekil 5.1c). Ana kütleden sökme ve atölyede kesme işlemleri sırasında süreksizlik yüzeylerinin korunmasına olabildiğince özen gösterilmiştir. Örneklerin laboratuvar ortamına taşınması sırasında yüzeylerin birbirine sürtünerek zarar görmesini engellemek için, süreksizlik alt ve üst blokları arasına pamuk yerleştirilmiş, ardından birbirine sıkıca bantlanarak koruyucu kutular içinde ambalajlanmıştır (Şekil 5.1d).

a) b)



c) d)



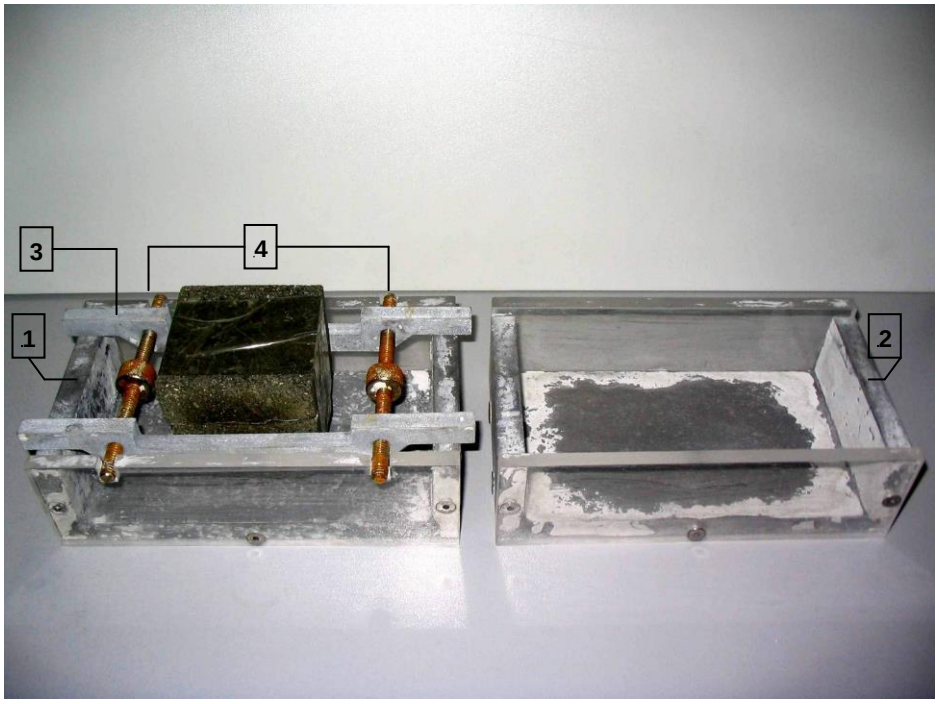
Şekil 5.1 : Prizma şekilli süreksizlik örneklerinin hazırlanması: a ve b) araziden alınmış süreksizlik örneklerinin biçimlendirilmesi c) prizma şekilli süreksizlik örneklerinin kesilerek boyutlandılması d) alt ve üst bloklar arasına pamuk yerleştirilerek orijinal yüzey geometrisinin korunması

Mekanik sürtünme deneylerinde, kesilme düzleminin deney sırasında uygulanan normal kuvvet doğrultusuna dik, kesme kuvveti doğrultusuna ise paralel konumda olması ve bu kuvvetlerin kesilme düzlemine üniform olarak dağılmasının sağlanması, deneyden elde edilecek mekanik büyüklüklerin güvenilirliğini kontrol eden önemli parametrelerdendir. Deney örneklerinin dolgu malzemesi içinde kalıba alınmasında ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemlere uyulmuştur. Kalıba alma işlemi sırasında süreksizlik düzleminin istenilen konumda sabitlenmesini sağlamak

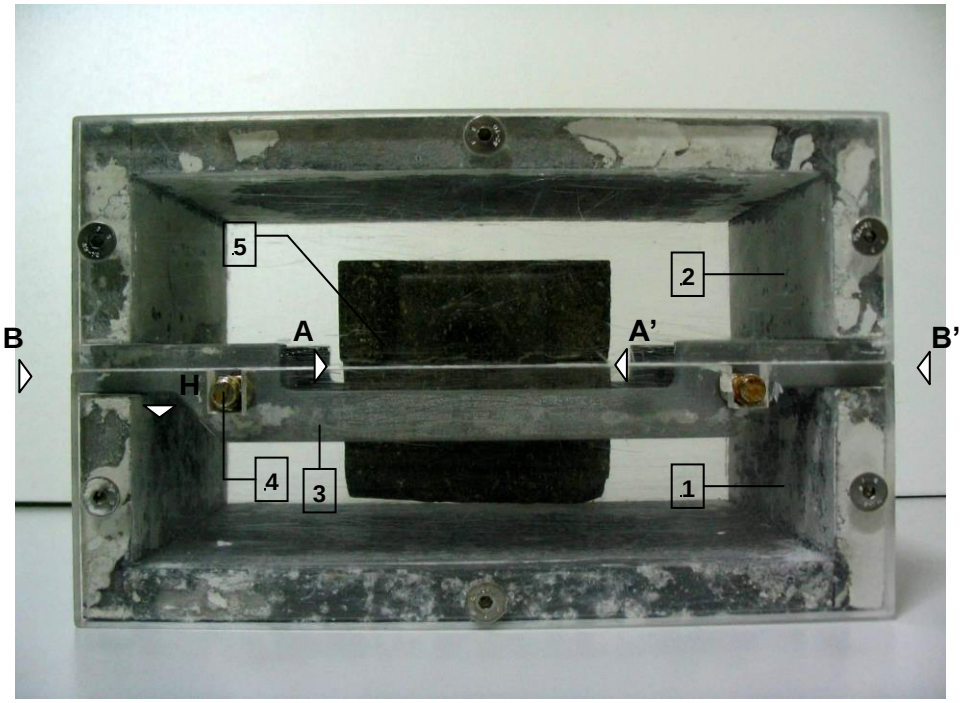
amacı ile, özel bir kalıp dökme düzeneğine gereksinim duyulmuş, Robertson portatif kesme deney aleti kalıp döküm kutuları ve konumlandırıcı kenetlerinden esinlenerek, bu araştırmada kullanılan direkt kesme deney aletinin alt ve üst çenetlerinin şekil ve boyutlarına uygun olan yeni kalıp döküm kutuları imal edilmiştir (Şekil 5.2).

Kalıba alma işleminde ilk olarak, süreksizliğe ait alt ve üst bloklar üst üste konularak hareket etmeyecek şekilde birbirine bantla sarılmıştır. Konumlandırıcı kenet, içi tamamen jelatin ile kaplanılmış olan alt blok döküm kutusunun yivleri içine yerleştirilmiştir (Şekil 5.2a). Bu kenet içindeki örnek, kesilme düzlemi ile döküm kutusu üzerinde bulunan süreksizlik referans hattı üst üste çakışıncaya dek aşağı yukarı ve sağa sola hafifçe hareket ettirilmiştir. Bu çakışma koşulunun sağlanması, ortalama kesilme düzleminin deney sırasında uygulanacak normal kuvvet doğrultusuna dik, kesme kuvveti doğrultusuna ise paralel şekilde konumlandırılmış olması anlamına gelmektedir. Alt ve üst blok döküm kutuları içinde bu konumda sabitlenmiş bir deney örneğine ait görünüm Şekil 5.2b' de verilmiştir. Çakışma sağlandığı anda, konumlandırıcı kenet üzerinde bulunan ayar vidaları sıkılarak, deney örneği alt blok döküm kutusu içinde sabitlenilmiştir. Bunun ardından, alçı-beyaz çimento-su karışımından oluşan dolgu malzemesi, alt blok döküm kutusu içine, hava boşluklarının oluşmasına izin vermeyecek şekilde yavaşça dökülmüştür. Dolgu malzemesinin kuruması için bir süre beklenilmiş, katılaşmanın gerçekleşmesinin hemen ardından bu kez üst blok döküm kutusu içine dolgu malzemesi dökülmüş ve alt blok döküm kutusu ters çevrilerek üst blok döküm kutusu üzerine yerleştirilmiştir. Dolgu malzemesi tamamen katılaştıkdan sonra kalıplar döküm kutuları içinden dikkatlice çıkarılmış olup, döküm kutularının içinin döküm öncesinde jelatin ile kaplanmış olması ise çıkarma işlemini kolaylaştırmıştır. Bunun ardından kalıplar, prizlenmenin sağlanması için, doğal nem ve oda sıcaklığı koşullarında beklemeye alınmıştır. Kalıba alma işlemi tamamlanmış bir süreksizlik örneğine ait görünümler Şekil 5.3' de verilmiştir. ISRM (1981) tarafından önerilen yönteme göre, kalıba alınmış süreksizlik yüzeyi ile kalıp yüzeyi arasında en az 5 mm mesafe ($h \geq 5$ mm) bulunması gerekmektedir (Şekil 5.3a). Döküm kutuları, döküm sırasında bu koşul kendiliğinden sağlanacak şekilde boyutlandırılmıştır. Bu süreksizlik örneğine ait alt ve üst blok yüzeylerinin kalıplar içindeki görünümü Şekil 5.3 b' de sunulmuştur.

a)

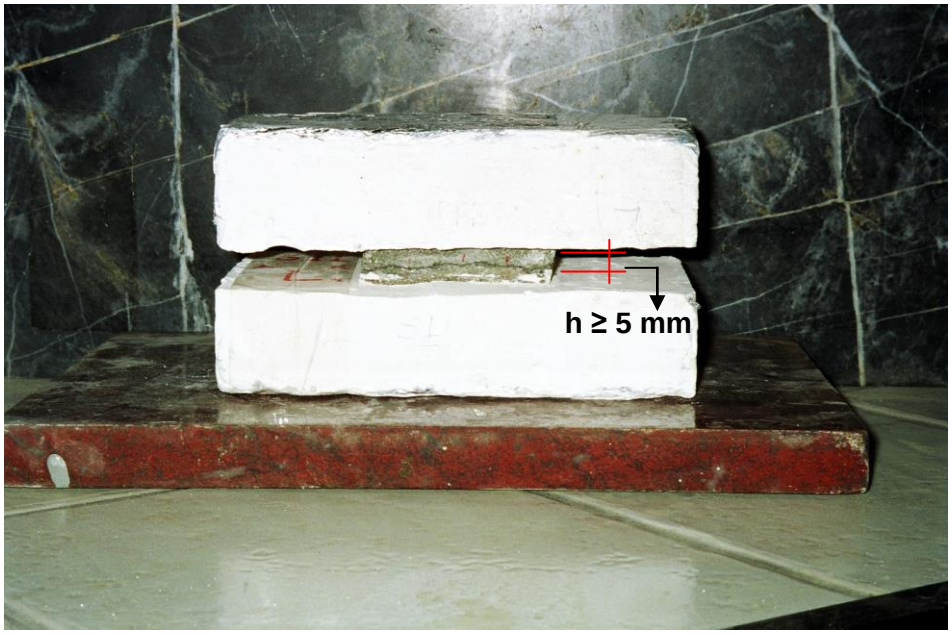


b)



Şekil 5.2 : İmal edilen alüminyum kalıp döküm kutuları: a) süreksizlik içeren örneğin konumlandırıcı kenet yardımıyla alt blok döküm kutusuna yerleştirilmesi b) süreksizlik referans hattına paralel konumlandırılmış bir örneğin döküm kutuları içindeki görünümü 1: Alt blok döküm kutusu, 2: Üst blok döküm kutusu, 3:Konumlandırıcı kenet, 4: Kenet ayar vidaları, 5: Örnek, AA' Süreksizlik hattı, BB': Süreksizlik referans hattı, H: Dolgu malzemesi döküm seviyesi

a)



b)



Şekil 5.3 : Dolgu malzemesi içinde kalıba alınmış bir süreksizlik örneği a) h ≥ 5 mm koşulunun (ISRM, 1981) sağlanması, b) süreksizlik örneği alt ve üst blok yüzeylerinin kalıblar içindeki görünümü

Araştırmada kullanılan tüm süreksizlik örnekleri için, alt ve üst blok yüzeylerinin dolgu malzemesi içinde kalıba alındığı genel bir görünüm ise Şekil 5.4' de sunulmuştur.



Şekil 5.4 : Dolgu malzemesi içinde kalıba alınmış süreksizlik örneği alt ve üst blok yüzeylerinin genel görünümü (S1L: alt blok yüzeyi, S1U: üst blok yüzeyi)

5.2 Süreksizlik Yüzeylerinin Sayısallaştırılması

Araştırmada kullanılan doğal süreksizlik yüzeyleri kare kesitli olup, boyutları 70x70 mm' dir. Topolojik olarak 2-boyutlu süreksizlik yüzeyleri fraktal geometri ile tanımlanmak istendiğinde ve bu yüzeylerin fraktal boyutlarının (D) hesaplanmasında kullanılacak yöntem olarak üçgen prizma yüzey alanı yöntemi (tpsam) seçildiğinde, yüzeylere ait sayısallaştırılmış yükselti verileri üniform aralıklı bir kare gridin düğüm noktaları üzerinde yer almalı, kare gridin boyutları ise n bir tamsayı olmak üzere 2^n+1 olmalıdır. Dolayısıyla yöntemin uygulanmasında gereksinilecek grid boyutları, "n" ' in alacağı tamsayı değerlere bağlı olarak, "3x3, 5x5, 9x9, 17x17, 33x33, 65x65,.....,513x513, 1025x1025,...." gibi olacaktır. Diğer taraftan, aynı yüzeylerin fraktal boyutları güç spektrum yoğunluğu analizi ile hesaplanmak istendiğinde, bu yüzeylere ait olan sayısallaştırılmış yükselti verilerinin yine üniform aralıklı bir kare gridin düğüm noktaları üzerinde yer alması gerekmektedir. Ancak bu kez kare gridin boyutları n bir tamsayı olmak üzere 2^n olmalıdır. Bu durumda gereksinilecek grid boyutları ise, "n" ' in alacağı tamsayı değerlere bağlı olarak, "2x2, 4x4, 8x8, 16x16, 32x32, 64x64,.....,512x512, 1024x1024,...." şeklinde olacaktır. Yöntemlerin algoritmasından kaynaklanmakta olan bu sınır koşulları altında, yüzeyler üzerinde sayısallaştırılması anlamlı en fazla alan boyutu 65x65 mm' dir. Bu nedenle sayısallaştırma işlemi; 70x70 mm boyutundaki kare kesitli süreksizlik yüzeyleri üzerinde, merkezi asıl yüzeyin merkezi ile üst üste gelecek şekilde seçilen 65x65 mm boyutundaki kare kesitli alan sınırları içinde gerçekleştirilmiştir. Sayısallaştırma sırasında yatay düzlemdeki (x-y düzlemi) çözünürlük, bir başka deyişle örnekleme aralığı (Δ) 1 mm olarak seçilmiştir. Kullanılan bu örnekleme aralığı (Δ=1 mm) ile, 65x65 mm boyutundaki kare kesitli alan sınırları içinde, yükseltileri ölçülen toplam nokta sayısı 4356' dır. Bu yükselti değerlerinin ölçülmesi sırasında düşey eksendeki (z-ekseni) duyarlık ise, 1/10 mm' dir. Araştırmada 30 adet süreksizlik örneği üzerinde çalışılmıştır. Her bir örneğe ait alt ve üst blok yüzeyleri ayrı ayrı sayısallaştırılmıştır. Her bir yüzey için elde edilen 2-boyutlu veri setleri, kontrol yazılımı tarafından, ölçümle eş zamanlı olarak, farklı isimler altında bilgisayarda oluşturulan veri dosyalarına kaydedilmiştir. Her bir veri dosyası, sayısallaştırma sırasında kullanılan 1 mm' lik örnekleme aralığına bağlı olarak 4356 adet P(x,y) koordinat noktası ve bu noktaların her birine karşılık gelen birer adet yükselti değerinden (z) oluşmaktadır. 2-boyutlu bu veri dosyalarının her biri için çizilen 3-boyutlu sayısal modeller, Şekil B.1-B.30' de sunulmuştur. Laboratuvar kesme deneylerinin öncesinde sayısallaştırılan bu yüzeyler, farklı sabit

normal gerilme değerleri altında gerçekleştirilen her kesmenin ardından tekrar sayısallaştırılmıştır.

5.3 Laboratuvar Direkt Kesme Deneyleri ve Sonuçları

Kesme deneyleri, ISRM (1981) tarafından önerilen yönteme uygun olarak yapılmıştır. Kesme yerdeğiştirmesi oranı yaklaşık 0.1 mm/dak olup, 10 mm kesme yerdeğiştirmesi süresince deneylere devam edilmiştir. Mekanik kesme deneyleri sırasında, kesme kutusuna, dolayısıyla süreksizlik örneğine uygulanan normal yük değerini deney süresince sabit tutmak amacıyla statik yük tercih edilmiş ve bu nedenle döküm külçeler kullanılmıştır. Kesme kuvveti ise, 2 ton kapasiteli hidrolik bir piston ile uygulanmıştır.

Einstein ve Dowding (1981), laboratuvar direkt kesme deneylerinin tek aşamalı (single stage testing) veya çok aşamalı (staged testing) olmak üzere farklı iki teknik ile yapılabileceğini belirtmiştir. Tek aşamalı deney tekniğinde, uygulanan normal gerilme değeri altında bir kez kesilen bir yüzey ikinci kez kesilmemekte, normal gerilme yeni değerine artırılarak arazide aynı süreksizlik düzleminden örneklenmiş yeni bir yüzey kesilmektedir. Anılan araştırmacılar, laboratuvar boyutundaki örneklerin yüzey geometrisinin, arazide ana süreksizlik yüzeyi üzerinde örneklendikleri noktanın pürüzlülüğünü temsil edeceğini, aynı süreksizlik üzerinden alınan örnek yüzeylerinin laboratuvar ölçeğinde birbirinden farklılıklar sunabileceğini, arazide özdeş yüzeylerin bulunmasının güç olduğunu, özdeş örnek alınmasındaki güçlüklerden dolayı laboratuvar kesme deneylerinin çok aşamalı (staged testing) yapılabileceğini belirtmişlerdir. Çok aşamalı deney tekniğinde, uygulanan farklı normal gerilme değerleri altında her defasında aynı yüzey kesilmektedir. Einstein ve Dowding (1981), çok aşamalı yapılan deneylerde yüzeylerde oluşan milonitik malzeme nedeniyle daha düşük dayanım değerlerinin elde edileceğini, bununla birlikte düşük normal gerilme seviyelerinde yüzey üzerindeki pürüzlerin tamamı kesilemediğinden elde edilen dayanım değerlerinin nadiren artık (rezidüel) dayanım değerleri olacağını belirterek, izleyen her kesme aşamasından önce yüzeyin temizlenerek oluşan milonitik malzemenin yüzeyden uzaklaştırılmasını önermişlerdir.

Bu çalışmada, örnek alımı ile ilgili yukarıda bahsedilen güçlüklerle karşılaşıldığından, çok aşamalı deney tekniği (staged testing) kullanılmıştır. Deneyler 3 farklı sabit normal gerilme değeri altında gerçekleştirilmiştir. Bu gerilmeler sırasıyla; σ_{n1}=300 kPa, σ_{n2}=452 kPa ve σ_{n3}=756 kPa' dır. Tüm yüzeyler

σ_{n1}=300 kPa sabit normal gerilme altında birer kez kesildikten sonra, yüzeyleri fırça ile temizlenerek kesme sırasında oluşan milonitik malzeme yüzeylerden uzaklaştırılmıştır. Yüzey geometrisi farklılaştığından kesilen yüzeyler geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı ile tekrar sayısallaştırılmış ve ardından σ_{n2}=452 kPa sabit normal gerilme değeri altında yeniden kesilmiştir. Milonitik malzeme yüzeyden temizlendikten sonra, bu yüzeyler yine sayısallaştırılmış ve son olarak σ_{n3}=756 kPa sabit normal gerilme değeri altında üçüncü kez kesilmiştir. Bu kesme işleminin ardından, yüzeyler son olarak bir kez daha sayısallaştırılmıştır. Her deney öncesi ve sonrası yapılan bu sayısallaştırma işlemi ise, daha sonra (Bölüm 8) anlatılacağı üzere yüzey geometrisindeki kesilmeye bağlı değişimlerin izlenmesine olanak tanımıştır.

Deney süresince hidrolik pistonun kesme kutusuna uyguladığı yatay yüklerin değişimi, 2 ton kapasiteli S-tipi bir yük ölçerin kullanımı ile ölçülmüştür. Sabit normal kuvvet altında kesme kuvvetlerinin etkisinde zorlanan süreksizlik örneğinin kesilmesi sırasında, normal kuvvetin uygulandığı düşey eksen doğrultusunda gerçekleşen düşey yer değiştirmeler (dilatasyon ve konsolidasyon) ile kesme kuvvetinin uygulandığı yatay eksen boyunca gerçekleşen yatay yer değiştirmelerin miktarları ise birer adet sayısal boy ölçer ile belirlenmiştir. Biri yük ölçer diğer ikisi sayısal boy ölçerler olmak üzere, bu 3 adet ölçüm sensörü üzerindeki değişimler, özel bir veri toplama yazılımı aracılığı ile deney süresince saniyede 3 defa eş zamanlı olarak bilgisayar tarafından sorgulanmış ve loglanmıştır. Bu veri logları; her 0.3 saniyede bir, 3 sensörden aynı anda gelen yatay yük ile yatay ve düşey yerdeğiştirme değerlerinin bulunduğu veri satırlarını içermektedir. Deneyler sırasında oluşturulan bu veri loglarının değerlendirilmesi ile çizilen; kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) ve normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) eğrileri Şekil B.32-B.89 arasında her örnek için ayrı ayrı verilmiştir. Kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) eğrilerinin değerlendirilmesi ile çizilen Mohr-Coulomb yenilme zarfları ise Şekil B.90-B.119 arasında her örnek için ayrı ayrı sunulmuştur. Uygulanan farklı sabit normal gerilme değerleri (σ_n) için bulunan en büyük kesme dayanımları (τ_p) Tablo 5.1' de verilmiştir. Benzer şekilde, farklı sabit normal gerilme değerleri (σ_n) için dilatasyon açıları (ν) Tablo 5.2' de verilmiştir.

Tablo 5.1 : Farklı sabit normal gerilme değerleri için en büyük kesme dayanımları

Örnek No.	En Büyük Kesme Dayanımları, τ_p (kPa)		
	σ_{n1} = 300 kPa	σ_{n2} = 452 kPa	σ_{n3} = 756 kPa
S1	272.189	392.272	474.329
S2	366.254	386.268	578.401
S3	264.183	314.218	452.314
S4	238.165	356.247	498.346
S5	248.172	306.213	478.332
S6	256.178	326.226	470.326
S7	224.156	312.217	446.310
S8	308.214	360.250	506.351
S9	364.253	412.286	584.406
S10	354.246	388.269	532.369
S11	226.157	320.222	474.329
S12	270.188	350.243	530.368
S13	242.168	354.246	430.299
S14	240.167	274.190	424.294
S15	278.193	340.236	512.356
S16	198.138	370.257	586.407
S17	382.265	444.308	566.393
S18	214.149	326.226	430.299
S20	218.151	284.197	444.308
S21	286.199	364.253	500.347
S22	278.193	318.221	434.301
S23	216.150	302.210	474.329
S25	234.163	322.224	440.306
S26	214.149	406.282	604.419
S27	372.258	468.325	616.428
S28	270.188	346.240	522.363
S29	300.208	412.286	576.400
S30	344.239	496.344	692.481
S31	176.122	340.236	488.339
S32	388.269	514.357	650.451

Tablo 5.2 : Farklı sabit normal gerilme değerleri için dilatasyon açıları

Örnek No.	Dilatasyon Açıları, $\nu(^0)$		
	σ_{n1} = 300 kPa	σ_{n2} = 452 kPa	σ_{n3} = 756 kPa
S1	18.80	16.61	15.06
S2	23.97	21.64	14.05
S3	15.33	6.08	3.39
S4	14.01	5.44	3.18
S5	8.65	5.54	3.97
S6	14.97	10.71	7.33
S7	6.58	9.85	5.52
S8	16.76	11.32	8.53
S9	27.83	17.02	14.09
S10	19.74	13.37	8.10
S11	9.67	8.22	6.46
S12	18.02	11.13	10.17
S13	16.74	10.65	7.47
S14	7.98	5.09	3.39
S15	11.86	9.39	7.11
S16	8.27	11.90	9.13
S17	29.41	22.65	10.40
S18	12.28	7.95	1.70
S20	6.91	6.26	6.04
S21	24.40	15.59	12.33
S22	17.79	10.15	9.39
S23	9.86	8.38	4.86
S25	15.24	8.42	4.94
S26	9.38	15.96	12.73
S27	17.51	14.76	11.55
S28	18.07	10.13	7.33
S29	18.01	11.93	9.86
S30	20.94	12.63	7.85
S31	9.11	7.60	5.27
S32	26.02	20.80	10.68

Tablo 5.3' de ise, Mohr-Coulomb yenilme zarflarından hesaplanan içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri görülmektedir. Farklı sabit normal gerilme değerleri altında her defasında aynı yüzey kesildiğinden bir başka değişle, çok aşamalı deney tekniği (staged testing) uygulandığından, hesaplanan içsel sürtünme açısı (ϕ) değerlerinin en büyük değerlerden bir miktar daha düşük olabileceğini söylemek mümkündür.

Süreksizliğin dayanım parametrelerinin doğrusal yenilme zarfı ile modellenmesi halinde, yüzey üzerindeki ikincil mineral sıvama veya kaplamalarının kohezyona neden olabileceği belirtilmiştir (Ulusay ve Yoleri, 1993). Bu çalışmada da, süreksizlik yüzeylerindeki pürüzlerin ezilmesi ve kesilmesi sırasında oluşan milonitik malzeme nedeni ile görünür kohezyon (c_a) elde edilmiştir (Tablo 5.3).

Tablo 5.3 : İçsel sürtünme açısı (ϕ) ve görünür kohezyon (c_a) değerleri

Örnek No.	İçsel Sürtünme Açıları ϕ (^{0})	Görünür Kohezyon c_a (kPa)
S1	35.1	108.740
S2	26.0	197.810
S3	22.7	133.190
S4	29.1	84.852
S5	27.2	86.112
S6	25.2	114.530
S7	25.7	85.981
S8	23.8	169.880
S9	26.3	204.980
S10	21.9	222.620
S11	28.3	69.345
S12	29.8	95.216
S13	28.1	93.318
S14	22.6	103.450
S15	27.5	115.020
S16	35.4	48.876
S17	22.0	261.510
S18	24.5	94.742
S20	26.6	64.044
S21	25.0	149.110
S22	19.2	168.650
S23	29.5	46.295
S25	23.9	109.560
S26	33.1	111.680
S27	27.8	219.980
S28	29.1	99.723
S29	30.8	129.900
S30	36.7	135.650
S31	33.3	4.913
S32	29.1	237.820

6 SÜREKSİZLİKLERİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN FRAKTAL GEOMETRİ YAKLAŞIMI İLE TANIMLANMASI

6.1 Fraktal Geometri Kavramı

Yapımı insanoğlu tarafından gerçekleştirilen, düzenli ve geometrik bir yapıya sahip olan, şekli ise geçmişten bu yana kullanılan öklid geometrisi (Euclidean Geometry) ile tanımlanabilen cisimlerin aksine, mimarisi doğa tarafından üstlenilmiş olan cisimler oldukça karmaşık şekillere sahip olarak karşımıza çıkmaktadır. Polonya asıllı fizikçi ve matematikçi Mandelbrot (1967) tarafından geliştirilmiş olan " Fraktal Geometri" kavramı, doğada bulunan çok sayıda karmaşık şekil için hem bir tanımlama, hem de matematiksel bir model sağlamaktadır. Mandelbrot, dağların koni, kıyı şeritlerinin yuvarlak, bulutların küre şeklinde olmadığını, topolojik boyutun doğadaki birçok nesneyi tanımlamakta yetersiz kaldığını belirtmiştir.

Öklid uzayında; topolojik olarak bir noktanın boyutu sıfır (D_T =0), bir doğru parçasının boyutu 1 (D_T=1), bir düzlemin boyutu 2 (D_T=2) ve nihayet prizmatik bir cismin boyutu 3 (D_T=3) olarak tanımlanmıştır. Anılan araştırmacı, gelişigüzel bir eğrinin topolojik olarak boyutunun 1 olmasına rağmen, uzayda bir doğru parçasından (D_T=1) daha fazla fakat bir düzlemden (D_T=2) daha az bir boşluğu doldurduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, yeryüzünde bir kara parçasının yüzeyinin (topoğrafik yüzey) uzayda bir düzlemden (D_T=2) daha fazla, ancak prizmatik bir cisimden (D_T=3) daha az bir boşluğu doldurduğunu ifade etmiştir. Dolayısıyla, gelişigüzel bir eğri için 1 ile 2 ($1<D<2$) ve topoğrafik bir yüzey için 2 ile 3 arasında ($2<D<3$) değişen boyutsal değerler söz konusu olmaktadır. Düzenli geometrik şekillere benzemeyen doğal şekillerin geometrisini nicel olarak tanımlamayı amaçlayan bu yeni boyut kavramı, Mandelbrot (1967) tarafından "Fraktal Boyut (D)" olarak adlandırılmıştır. Fraktal terimi, Latince "fractus" dan gelmekte olup; düzensiz, gelişigüzel anlamındadır.

Bir pergelin bacakları belirli bir r açıklığına kurulup, her yeni adım bir önceki adımın son bulduğu noktadan başlayacak şekilde, bu pergel düzensiz bir eğri boyunca yürütüldüğünde, eğrinin başlangıç noktasından bitiş noktasına ulaşıncaya dek yapılan adım sayısı N(r)' dir. Pergel açıklığı r ile buna karşılık gelen adım sayısı N(r) 'nin çarpılması sonucu elde edilen değer, r'nin bir fonksiyonu olarak ölçülen eğri uzunluğu L(r)'ye karşılık gelir.

$$L(r) \propto N(r).r \qquad (6.1)$$

Pergel açıklığı r, öncekinden daha küçük bir değerde seçilerek aynı eğri üzerinde yukarıdaki işlem tekrarlanırsa, bu kez yapılan adım sayısının ve dolayısıyla ölçülen uzunluğun bir öncekinden daha fazla olduğu görülecektir. Eğer bu eğri iyi tanımlanılmış bir L_N uzunluğuna sahip ise, r' nin her defasında daha da küçültülmesi ile (6.1) no'lu bağıntının sabit bir L_N değerine yaklaşacağı beklenilebilir. Ancak r büyüklüğü sıfıra yaklaştıkça, eğrinin ölçülen uzunluğu teorik olarak sınırsız bir artış eğilimi gösterir. Pergel açıklığı r ile yapılan adım sayısı N(r) arasındaki ilişki

$$N(r) \propto 1/ r^D \qquad (6.2)$$

şeklindedir (Mandelbrot, 1982). Bu ilişki,

$$-D = \log N(r) / \log r \qquad (6.3)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada "D" fraktal boyuttur. logN(r)-log(r) diyagramındaki nokta dağılımını karakterize eden doğrusal regresyon doğrusunun eğimi β ile gösterilirse, fraktal boyut (D),

$$D = - \beta \qquad 6.4)$$

eşitliğinden hesaplanır.

(6.2) no'lu eşitlik, r 'nin bir fonksiyonu olarak ölçülen uzunluk L(r) cinsinden de yazılabilir (Mandelbrot, 1982). r ile L(r) arasında orantılı bir ilişki vardır.

$$L(r) \propto r^{(1-D)} \qquad (6.5)$$

Burada D, yine fraktal boyutu temsil eder. logL(r)-log(r) eğrisinin eğimi β ile gösterilirse, fraktal boyut (D) bu kez,

$$D = 1 - \beta \qquad 6.6)$$

eşitliğinden hesaplanır. Süreksizlik yüzey profilleri gibi topolojik olarak 1-boyutlu olan düzensiz eğrilerin fraktal boyutunu hesaplamak için kullanılan bu yöntem, cetvel ya da pergel (ruler veya divider) yöntemi olarak adlandırılmaktadır.

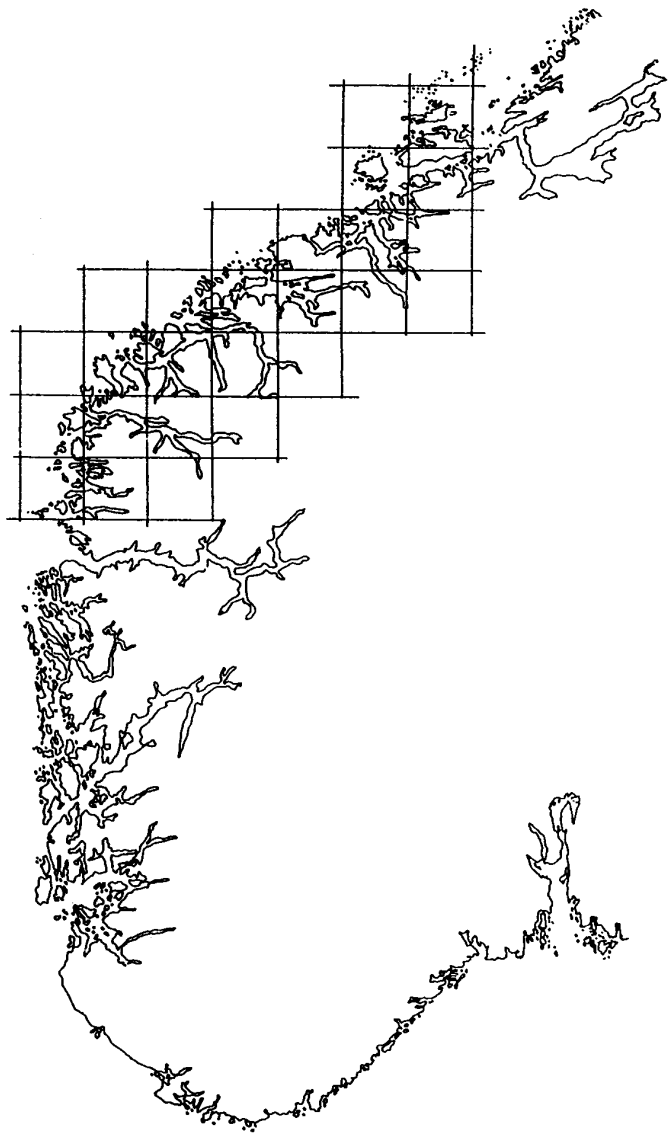
Aynı düzensiz eğri, hücre boyutu r x r olan bir grid ile kaplanıp, eğrinin herhangi bir parçasını içeren r x r boyutundaki hücre sayısı N(r) sayıldığında ve gittikçe küçülen r değerleri ile oluşturulmuş her farklı grid için aynı işlem tekrarlanıldığında, gridi oluşturan hücre boyutundaki azalış, başka bir deyişle grid sıklığındaki artış, içinde

eğriye ait herhangi bir parçayı içeren hücrelerin sayısında da bir artışa neden olur. N(r) ile r arasındaki ilişki,

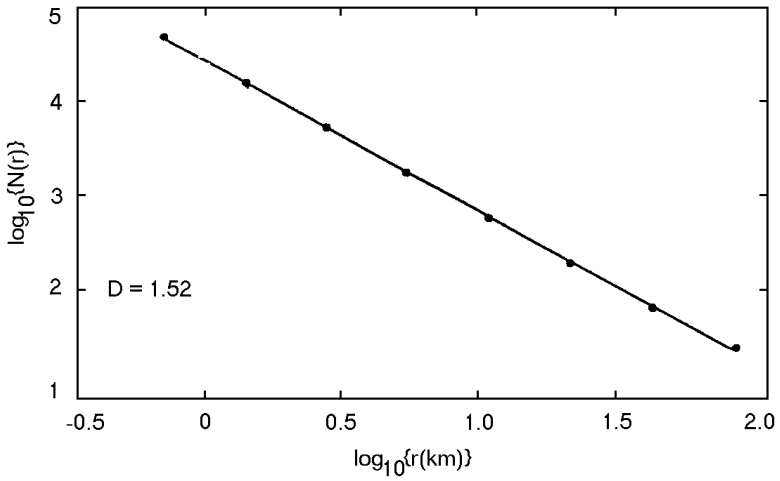
$$N_{box}(r) \propto 1/ r^{D} \qquad 6.7)$$

şeklindedir. Log $N_{box}(r)$ – log (r) diyagramı çizildiğinde, bu diyagramdaki nokta dağılımını karekterize eden doğrusal regresyon doğrusunun eğimi β ise, gelişigüzel eğrinin fraktal boyutu (D), daha önce verilen (6.4) no'lu eşitlikten hesaplanır. Pergel (divider) yöntemine benzer şekilde, süreksizlik yüzey profilleri gibi topolojik olarak 1-boyutlu olan düzensiz eğrilerin fraktal boyutunu hesaplamak için kullanılan bu yöntem ise grid ya da kutu sayma (box counting) yöntemi (Mandelbrot, 1982; Feder, 1988) olarak adlandırılmaktadır.

Pergel (divider) ve grid (box counting) yöntemleri, Mandelbrot (1982) tarafından Şekil 6.1' de görülen Güney Norveç kıyı hattının fraktal boyutunu hesaplamak için kullanılmıştır. Bu yöntemlere ilişkin algoritmaların, bu kıyı şeridine uygulanması sonucunda elde edilen ilişki Şekil 6.2' deki gibi olup, hesaplanılan fraktal boyut değeri D=1.52 ' dir.

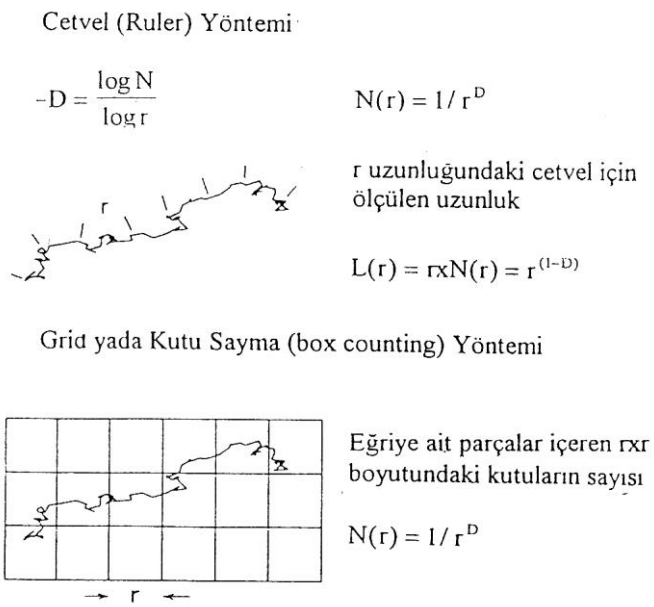


Şekil 6.1 : Güney Norveç kıyı şeridi (Mandelbrot, 1982)



Şekil 6.2 : Güney Norveç kıyı şeridi için cetvel uzunluğunun (r) fonksiyonu olarak tekrar sayısı [N(r)]. D=1.52 (Mandelbrot, 1982)

Şekilden de izlendiği gibi, kıyı şeridi üzerinde baştan sona yürütülen pergelin açıklığı (r) büyütüldükçe, adım sayısı N(r) azalmaktadır. Bunun tersi de doğrudur. r değeri küçültüldükçe, N(r) artmaktadır. Bu iki benzer yöntemin uygulanmasına ait teknikler Şekil 6.3' de özetlenmiştir.



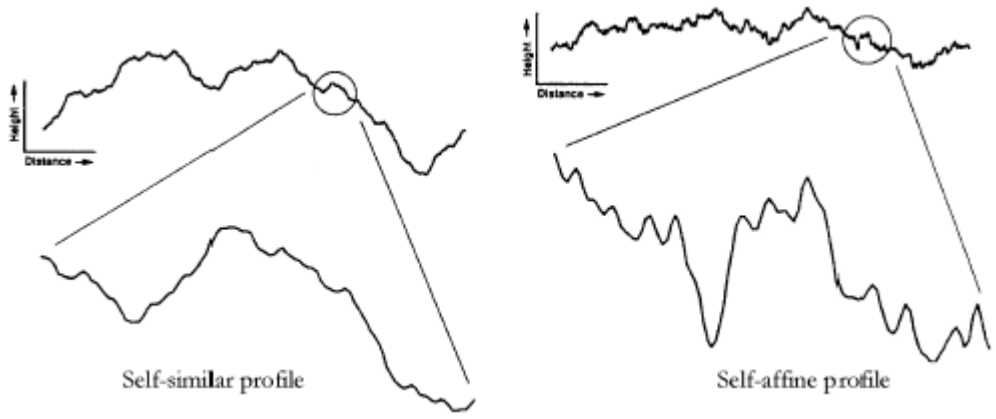
Şekil 6.3 : Topolojik olarak 1-boyutlu (D_T=1) olan gelişigüzel bir eğri için cetvel yada pergel (ruler yada divider) ile grid yada kutu sayma (box counting) yöntemlerinin uygulanması (Mandelbrot, 1988)

Gerek süreksizlik yüzeylerinin, gerekse bu yüzeylerden çıkarılan profillerin fraktal boyutlarını hesaplamak için çeşitli yöntemler mevcuttur. Pergel (divider), grid (box counting) yöntemlerinin yanı sıra, variogram analizi ve RMS (rougness length method) yöntemleri topolojik olarak 1-boyutlu yüzey profillerin fraktal boyutunu hesaplamak için kullanılan diğer yöntemlerdir. Güç spektrum yoğunluğu analizi (power spectral density analysis, psd), üçgen prizma yüzey alanı (triangular prism surface area method, tpsam) ve alan – çevre (area – perimeter method) yöntemleri ise, topolojik olarak 2-boyutlu olan süreksizlik yüzeylerinin fraktal boyutunu hesaplamak için kullanılan yöntemlerdir.

Fraktal bir nesne, boyutu tam anlamıyla topolojik boyutu aşan bir noktalar kümesidir. Bununla birlikte, Mandelbrot bu tanımın doğru olmakla beraber, sınırlayıcı olduğunu belirtmekte ve ek olarak fraktal, bütüne benzeyen parçalardan oluşan bir şekildir tanımlamasını yapmaktadır. Bu özellik, fraktal geometride kendi kendine benzerlik (self - similarity) adını almaktadır.

6.2 Kendine Benzerlik (Self-Similarity) ve Kendine Yakınsallık (Self-Affinity)

Bir nesnenin izotropik olarak büyütülmüş herhangi bir parçasının, orijinal nesnenin bütününe benzer görülmesi özelliği self-similarity (kendine benzerlik) olarak tanımlanmakta olup, bu tür özellik gösteren nesnelere self-similar (kendine benzer) nesne adı verilmektedir. Bir başka deyişle, self-similar bir nesnenin izotropik olarak büyütülmüş herhangi bir parçası bütünün kendisine benzemektedir. Diğer yandan, eğer bir nesnenin herhangi bir parçası, farklı yönlerde farklı oranlarda büyütülmesi durumunda orijinal nesneye benzerlik göstermekteyse, bu özelliğe sahip olan nesnelere self-affine nesne, bu özelliğe de self-affinity adı verilmektedir. Self similar ve self affine yüzey profillerine örnekler Şekil 6.4' de sunulmuştur.



Şekil 6.4 : Self-similar ve Self-affine yüzey profilleri (Power ve Tullis, 1991)

Self similar bir yüzey profilinin içinde seçilen herhangi bir parça, yatay ve düşey eksenlerde eş büyütme faktörü ile büyütüldüğünde, elde edilen yeni profil orijinal profilin kendisine istatistiksel olarak benzer görünümdedir. Diğer taraftan, aynı işlem self affine bir profile uygulandığında büyütülen parça orijinal profilden farklılık sunmaktadır. Self affine bir profilin içinden seçilen herhangi bir parçanın büyütülmesi ile elde edilen yeni profilin istatistiksel olarak orijinal profile benzemesi için yatay ve düşey eksenlerde farklı büyültme faktörlerinin kullanılması gerekmektedir.

Farklı disiplinlerde, yüzey pürüzlülüğü ile ilgili çalışmalarda fraktal geometri, ilk kez metal yüzeylerine uygulanmıştır (Mandelbrot ve diğ., 1984). Fraktal geometri yaklaşımı, mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniğinde süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğünün sayısal olarak tanımlanması ile ilgili araştırmalarda da kullanım alanı bulmuştur. Türk ve diğ. (1987) pergel (divider) yöntemini kullanarak, Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen 10 standart pürüzlülük profillerinin fraktal analizini yapmışlardır. 2 birimlik artışlarla 0-2 ile 18-20 aralığında değişen JRC (süreksizlik pürüzlülük katsayısı) değerleri için hesaplanan fraktal boyut (D) değerleri

sırasıyla 1.0 ile 1.0170 arasında yer almakta olup, JRC değerleri ile fraktal boyut değerleri arasında orantılı bir ilişki bulunmuştur. Carr ve Warriner (1989) yine pergel (divider) yöntemini kullanarak Libby barajı (Montana) dolayındaki eklem ve tabakalanma yüzeylerinden alınan çizgisel profillerin fraktal analizini yapmışlar, 1.0001 ile 1.022 arasında değişen fraktal boyutlar hesaplamışlardır. Bu profilleri standart profiller ile karşılaştırarak JRC değerlerini tespit etmişler ve JRC değerleri ile fraktal boyutlar (D) arasında (2.3) no' lu eşitlikte verilen ilişkiyi tanımlamışlardır. Lee ve diğ. (1990), aynı fraktal analiz yöntemini kullanarak yaptıkları çalışmada, standart pürüzlülük profilleri için 1.000446 ile 1.013435 arasında değişen fraktal boyutlar hesaplamışlardır. Bu profillere ait JRC değerleri ile hesapladıkları fraktal boyutlar (D) arasında orantılı bir ilişki bulmuşlar ve polinom regresyon analizi sonucunda bu iki parametre arasında (2.7) no' lu eşitlikte verilen ilişkiyi tanımlamışlardır. Türk ve diğ. (1987), Carr ve Warriner (1989) ve Lee ve diğ. (1990), JRC değerlendirmelerini subjektif olmaktan çıkararak objektif bir hale getirmişlerdir. JRC profilleri gibi topolojik olarak 1-boyutlu olan nesneler için fraktal boyut (D) değerleri 1-2 arasında değişecektir. Pergel (divider) yöntemi ile hesaplanan fraktal boyut değerleri 1 ile 1.022 arasındadır. Hsiung ve diğ. (1995) ve Huang ve diğ. (1992), JRC profilleri için pergel (divider) ve grid (box counting) yöntemleri ile elde edilen fraktal boyut değerlerinin 1'e çok yakın olmasının nedenini, bu profillerin self-affine özellik göstermesine bağlamışlar, self affine fraktallar için variyogram ve spektral analiz tekniklerinin uygun olduğunu belirtmişler ve bu teknikleri uygulayarak 1'in çok daha üzerinde olan değerler elde etmişlerdir. Aynı profillere, variyogram analizi ve spektral analiz yöntemleri uygulanıldığında, hesaplanılan fraktal boyut değerleri 1.33 (Sakkellariou ve diğ., 1991) ve 1.52 'e (Hsiung ve diğ., 1995) ulaşmaktadır. Bu değerler Odling (1994) tarafından hesaplanan değerler ile de uyumludur. Den Outer ve diğ. (1995), JRC profillerinin self-similar özellik göstermediğini, pergel (divider) ve grid (box counting) yöntemlerinin self-affine nesneler için uygun bir yöntem olmadığını belirtmişlerdir. Brown ve Scholz (1985), spektral analiz (psd) tekniğini kullanarak doğal süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğünü analiz etmişler ve bu yüzeylerin self-similar olmadığı sonucuna varmışlardır. Sakellariou ve diğ. (1991), Odling, (1994) ve Kulatilake ve diğ. (1995), doğal süreksizlik yüzeylerinin ve bu yüzeyler üzerinden alınan çizgisel profillerin, self-affine karakter gösterdiğini belirtmişlerdir. Develi ve Babadağlı (1998), doğal süreksizlik yüzeylerinin sayısallaştırılması ile elde edilen 2-boyutlu veri setlerine üçgen prizma yüzey alanı yöntemini (tpsam) uygulayarak bu yüzeylerin fraktal boyutlarını hesaplamıştır. Bulunan değerler 2.010 ile 2.024 arasında değişmiştir. Aynı yüzeylerden alınan 1-boyutlu çizgisel profillere pergel (divider) ve grid (box

counting) yöntemleri uygulandığında, öncekilere benzer sonuçlar elde edilmiş olup, bunlar 1 ile 1.028 arasında değişmiştir. Bu analizlerde; pergel yöntemindeki en küçük pergel açıklığı ile grid yöntemindeki en küçük kutu boyutu 2 mm olarak seçilmiştir. Yüzeyler için 2' e, profiller için 1' e, bir başka deyişle topolojik boyuta çok yakın hesaplanan bu değerler; doğal süreksizlik yüzeylerinin ve bu yüzeylerden alınan çizgisel profillerin self-similar özellik göstermemesine, bunların self-affine nesneler olmasına bağlanmıştır. Feder (1988), pergel (divider) yöntemi uygulanırken yüzey üzerindeki girinti ve çıkıntıların boyutları ile karşılaştırıldığında küçük pergel açıklıklarının kullanılması durumunda, pergel (divider) fraktal boyutunun hesaplanabileceğini belirtmiştir. Bu görüş Develi ve Babadağlı (1998) tarafından da paylaşılmış olup, üçgen prizma yüzey alanı yöntemi (tpsam) ile pergel ve grid yöntemlerinin algoritmik açıdan benzer yöntemler oldukları belirtilerek, yüzey üzerindeki girinti ve çıkıntılar ile karşılaştırıldığında uygun hücre boyutu kullanılması durumunda üçgen prizma yüzey alanı yönteminin doğal süreksizlik yüzeylerine uygulanabileceği bildirilmiştir. Bununla birlikte aynı araştırmacılar, topolojik olarak 2-boyutlu olan doğal süreksizlik yüzeyleri için güç spektrum yoğunluğu analizi (psd), bu yüzeylerden alınan 1-boyutlu çizgisel profiller için ise variyogram analizi yöntemlerinin kullanılmasının daha iyi bir çözüm olacağını ifade etmişlerdir. Pergel ve grid fraktal boyutları 1 ile 1.028 arasında hesaplanan çizgisel profillere variyogram analizi uygulandığında, hesaplanan fraktal boyut değerleri bu kez 1.205 ile 1.575 arasında değişmektedir (Develi ve Babadağlı, 1998). Benzer şekilde, topolojik olarak 2-boyutlu olan yüzeylere güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemi (psd) uygulandığında hesaplanan fraktal boyut değerleri 2.5' a ulaşmaktadır (Develi ve Babadağlı, 1998; Babadağlı ve Develi, 2001).

Süreksizliklerin yüzey geometrisi üzerine yapılan çalışmaların başlıca amacı; kişisel değerlendirmelerden arındırılmış (objektif), sayısal analizlere dayalı yeni pürüzlülük sınıflama sistemlerinin geliştirilmesi ve pürüzlülük ile süreksizliklerin kesme dayanımları arasındaki ilişkilerin sayısal veri tabanları üzerine oturtulabilmesidir. En sonunda ulaşılmak istenen hedef ise, sayısal pürüzlülük parametrelerinin yer aldığı yeni kesme dayanımı ölçütlerinin ortaya konulabilmesidir. Pürüzlülüğünün sayısal tanımına yönelik yapılan çalışmaların çoğunda pürüzlülük çizgisel bir büyüklük olarak ele alınmıştır. Benzer şekilde, pürüzlülüğün fraktal geometri ile karakterize edilmesini amaçlayan çalışmaların çoğu, 1-boyutlu çizgisel profillerin 1-boyutlu fraktal analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bir süreksizlik yüzeyi üzerinde seçilen iki nokta arasındaki doğrusal hattın sayısallaştırılarak 1-boyutlu çizgisel profil verisinin elde edilmesi, tüm yüzeyin alansal olarak

sayısallaştırılması yoluyla 2-boyutlu yüzey verisinin elde edilmesine göre daha az zaman gerektiren ve daha düşük maliyetli bir işlemdir. Tüm yüzeyin alansal olarak sayısallaştırılması daha gelişkin ve dolayısıyla daha pahalı ölçüm sistem ve tekniklerini gerektirmektedir. Buna ek olarak, yüzeylerin alansal olarak sayısallaştırılması ile elde edilen 2-boyutlu veri setleri 2-boyutlu fraktal analiz yöntemlerinin kullanılmasını gerektirmekte olup, 1-boyutlu fraktal analiz yöntemleri ile karşılaştırıldığında, bunlar daha yoğun matematiksel işlem yapan daha karmaşık hesaplama algoritmaları üzerine kurulmuştur. Bütün bunlar doğal olarak analizlerin çizgisel profiller üzerinde yoğunlaşmasında önemli etken olmuştur. Diğer taraftan, aynı çatlak yüzeyi üzerinden birbirine paralel olarak alınan profil geometrileri, çoğu kez birbirinden farklı olabilmektedir (Mc Williams ve diğ., 1991, Develi ve Babadağlı, 1998). Benzer şekilde, aynı süreksizlik yüzeyi üzerinden farklı yönlerde alınan çizgisel yüzey profillerinin geometrilerinin birbirinden farklı olduğu, yönlere göre değişim göstererek anizotrop bir özellik sergilediği bildirilmiştir (Huang ve Doong, 1990; Aydan ve diğ., 1995, 1996; Develi ve Babadağlı, 1998; Babadağlı ve Develi, 2000, 2001 ve 2003; Ünal,2000). Bu nedenle, yüzeyin genelini yansıtan 2-boyutlu analizlerin yapılması ayrı bir önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan süreksizlik yüzeyleri, özel olarak geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı ile sayısallaştırılmış, bu işlem sırasında seçilen örnekleme aralığına bağlı olarak yüzeyler üzerinde farklı P(x,y) koordinat noktalarındaki yükselti (z) değerleri ölçülerek her yüzey için 2-boyutlu veri setleri elde edilmiştir. Pürüzlülüğün çizgisel profiller ile değil de, tüm yüzey pürüzlülüğü olarak tanımlanması amaçlandığından, bu veri setlerine 2-boyutlu fraktal analiz yöntemlerinin uygulanması gerekmiştir. İlki self-affine, diğeri self-similar yöntem olarak değerlendirilen sırasıyla 2-boyutlu güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) ve üçgen prizma yüzey alanı (tpsam) yöntemleri 2-boyutlu veri setlerine uygulanmış böylece fraktal boyutlar farklı iki yöntem ile hesaplanmıştır. Topolojik olarak 1-boyutlu çizgisel profillerin 1-boyutlu güç spektrum yoğunluğu yöntemi ile fraktal analizine yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır (Brown ve Scholz, 1985; Brown, 1987; Huang ve diğ., 1992; Schmittbuhl ve diğ., 1995a; Shirono ve Kulatilake, 1997). Süreksizlik yüzeylerinin alansal olarak sayısallaştırılması ile elde edilen 2-boyutlu yüzey verilerine 2-boyutlu güç spektrum yoğunluğu analizi yakın zamanda Develi (1996), Develi ve Vardar (1998), Develi ve Babadağlı (1998), Babadağlı ve Develi (2000, 2001 ve 2003) tarafından uygulanmıştır. 2-boyutlu analiz yöntemi olan üçgen prizma yüzey alanı yönteminin uygulandığı çalışmalar ise kısıtlıdır (Develi ve Babadağlı, 1998). Bu çalışmalar ile her iki fraktal analiz yöntemi kuramsal anlamda

değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ise, doğal süreksizlik yüzeyleri için 2-boyutlu güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) ve üçgen prizma yüzey alanı (tpsam) yöntemleriyle hesaplanan fraktal boyut değerleri, aynı süreksizlikler için kesme deneylerinden elde edilen dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece, farklı iki yöntem ile hesaplanan fraktal boyutların mekanik dayanım değerleri ile ilişki kurabilme yetenekleri ayrı ayrı sınanmış ve bu yöntemlerin yüzey geometrisini tanımlamadaki başarı ölçüleri mekanik anlamda değerlendirilmiştir.

6.3 Süreksizlik Yüzeylerinin Fraktal Boyutunu Hesaplamak İçin Güç Spektrum Yoğunluğu Analizi Yöntemi

Bu analiz, gerek profillerin gerekse süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğünün fraktal boyut ile tanımlanmasında oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Topolojik olarak 1-boyutlu olan bir yüzey profilinin fraktal boyutu, logS(k) - logk diyagramındaki nokta dağılımını yansıtan doğrusal regresyon doğrusunun eğiminden hesaplanabilmektedir. Bu iki parametre arasındaki fonksiyonel ilişki,

$$S(k) \ \alpha \ k^{-\beta} \qquad (6.8)$$

şeklindedir (Brown ve Scholz, 1985; Berry ve Lewis, 1980). Burada,

S(k) : güç
k : dalga sayısı
β : doğrusal regresyon doğrusunun eğimidir.

Fraktal boyut (D) ile regresyon doğrusu eğimi (β) arasındaki ilişki ise

$$D = (5+\beta) / 2 \qquad (6.9)$$

şeklindedir. Süreksizlik yüzeyi üzerinden, bir doğru parçası boyunca elde edilen yüzey profilinin güç spektrum yoğunluğu, 1-boyutlu Fourier transformu ile hesaplanabilmektedir. Buna benzer şekilde, topolojik olarak 2-boyutlu bir süreksizlik yüzeyinin güç spektrum yoğunluğu, 2-boyutlu Fourier transformu ile hesaplanabilmektedir. Transformun yapılabilmesi için, süreksizlik yüzeyine ait sayısallaştırılmış yükselti verileri üniform aralıklı bir kare gridin düğüm noktaları üzerinde yer almalı ve kare gridin boyutları, n bir tamsayı olmak üzere, 2^n olmalıdır. İki boyutlu bir grid üzerinde tanımlanmış olan $z(p_1,p_2)$ fonksiyonunun iki boyutlu Fourier transformu, yine aynı grid üzerinde aşağıdaki eşitlik ile hesaplanılır (Press ve Teukolsky, 1992; Brigham, 1974; Saupe, 1988).

$$z(n_1,n_2)=\sum_{p_1=0}^{N_1-1}\sum_{p_2=0}^{N_2-1} z(p_1,p_2)e^{-i2\pi(\frac{p_1n_1}{N_1}+\frac{p_2n_2}{N_2})} \quad (6.10)$$

Burada; N_1 ve N_2 sırasıyla x ve y eksenleri boyunca örneklenmiş olan veri sayısıdır. N_1=N_2' dir ve ikinin tam sayı katları (2^n) olmak zorundadır. p_1 ve p_2, $0 \le p_1 \le N_1 - 1$ ve $0 \le p_2 \le N_2 - 1$ olmak üzere , uzamsal (spatial) ortamda, sırasıyla x ve y eksenleri boyunca, veri örneklemesinde kullanılan indeks değerleridir. n_1 ve n_2 ise, $0 \le n_1 \le N_1 - 1$ ve $0 \le n_2 \le N_2 - 1$ olmak üzere, dalga sayısı (frekans) ortamında, sırasıyla *x* ve *y* eksenleri boyunca dalga sayısı örneklemesinde kullanılan indeks değerleridir. Bu eşitlik ile uzamsal ortamda örneklenmiş olan 2-boyutlu veri, dalga sayısı ortamına aktarılır. Bu aktarım sonrası, güç spektrum yoğunluğu ise

$$|z(n_1,n_2)|^2 = R^2z(n_1,n_2) + I^2z(n_1,n_2) \quad (6.11)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada; $Rz(n_1,n_2)$ ve $Iz(n_1,n_2)$, Fourier transformunun sırasıyla gerçek (real) ve sanal (imaginary) kısımlarıdır. Dalga sayısı vektörü (k) 'nün x ve y bileşenleri, Fourier uzayında k_{n1} ve k_{n2} ' dir ve

$$k_{n_1} = n_1 / N_1\Delta \quad (6.12)$$

$$k_{n_2} = n_2 / N_2\Delta \quad (6.13)$$

eşitlikleri ile tanımlanır. Δ ise x ve y eksenleri boyunca veri örnekleme aralığıdır. İzotropik bir yüzey için, güç spektrum yoğunluğu (Sk) sadece dalga sayısı vektörü (k)'ya bağlıdır (Scholz ve diğ., 1988; Saupe, 1988) ve (k)' nın bir fonksiyonudur.

$$k = \sqrt{(k_{n_1})^2 + (k_{n_2})^2} = \sqrt{(\frac{n_1}{N_1\Delta})^2 + (\frac{n_2}{N_2\Delta})^2} \quad (6.14)$$

Yüzey fraktal boyutu (D) ile güç spektrum yoğunluğu diyagramındaki [logS(k)-logk diyagramı] nokta dağılımını yansıtan doğrusal regresyon doğrusunun eğimi (β) arasında daha önce (6.8) no'lu bağıntı ile verilen ilişki bu durumda da geçerli olmaktadır. Ancak bu kez süreksizlik yüzeyinin fraktal boyutu, (6.9) no'lu eşitlik yerine

$$D = (8 + \beta) / 2 \quad 6.15)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır (La Pointe ve Barton, 1995).

Yatay düzlemde x ve y eksenlerinde eşit ve 1 mm olan örnekleme aralığı (Δ=1 mm) altında yapılan sayısallaştırma işlemlerinin sonucunda, süreksizlik örneklerinin alt ve üst blok yüzeyleri üzerindeki farklı P(x,y) koordinat noktalarındaki yükselti (z) değerleri ölçülmekte ve her yüzey için uzaklık ortamında ayrık olarak örneklenmiş, sınırlı uzunlukta 2-boyutlu bir z=f(x,y) veri seti elde edilmektedir. 65x65 boyutlarındaki bu veri setleri kaynak kodu Visual C' de hazırlanmış olan özel bir yazılım ile 64x64' lük kare grid formunda gridlenmiştir. Grid aralığı, veri örnekleme aralığına (Δ) eşit seçilmiş olup, 1 mm'dir. Dolayısıyla gridi sınırlayan her iki eksen üzerindeki toplam veri örnekleme noktası sayısı $N_1=N_2=64$' dür. Bu noktalara karşılık gelen indeksler (p_1 ve p_2) sırasıyla, $0\leq p_1\leq 64-1$ ve $0\leq p_2\leq 64-1$ aralıklarında değerler almaktadır.

Gridlenilen veri setleri (6.10) nolu bağıntı ile 2-boyutlu ayrık Fourier transformuna tabi tutulmuştur. Bu şekilde, uzamsal ortamda 2-boyutlu bir grid üzerinde tanımlı olan N_1xN_2 adet yükselti verisi dalga sayısı ortamına aktarılmış ve böylece dalga sayısı ortamında yine N_1xN_2 boyutunda yeni bir grid elde edilmiştir. Transform sonrası oluşan, dalga sayısı ortamındaki bu yeni grid üzerindeki her bir farklı dalga sayısı değerine (x ekseni doğrultusunda kn_1 ve y ekseni doğrultusunda kn_2) karşılık gelen enerji yoğunlukları bir başka deyişle güç değerlerinin hesaplanılmasında ise (6.11) no' lu bağıntı ile verilen ifade kullanılmıştır. Burada n_1; x ekseni doğrultusu boyunca, n_2 ise y ekseni doğrultusu boyunca dalga sayısı örneklemesinde kullanılan indekslerdir. n_1 ve n_2 sırasıyla $0\leq n_1\leq 64-1$ ve $0\leq n_2\leq 64-1$ aralıklarında değerler almaktadır. x ve y eksenleri boyunca veri örnekleme aralığı Δ=1 mm olduğundan her farklı n_1 ve n_2 indeks değerlerine karşılık gelen dalga sayıları (6.12) ve (6.13) no'lu eşitliklere göre sırasıyla, $k_{n1} = n_1/64$ ve $k_{n2} = n_2/64$ ' tür. 2-boyutlu ayrık Fourier transformu ile güç spektrumunun hesaplanılması için kaynak kodu Visual C' de hazırlanan ikinci bir yazılım kullanılmıştır.

k_{n1} ve k_{n2}, Fourier uzayında dalga sayısı vektörünün (k) x ve y ekseni doğrultularındaki bileşenleri olduğundan, dalga sayısı vektörü (k) (6.14) no' lu bağıntıda verilen ifade ile hesaplanmıştır. Böylece transform sonrası k_{n1} ve k_{n2}' nin fonksiyonu olarak hesaplanılan güç değerleri, bileşke dalga sayısının (k) bir fonksiyonu [S(k)] olarak ifade edilmiştir. Bu aşamada ise, kaynak kodu Visual C' de hazırlanan üçüncü bir yazılım kullanılmıştır. Bu yazılım ile aynı zamanda, her bir dalga sayısı (k) ile bu dalgasayılarına karşılık gelen güç değerlerinin S(k) logaritması alınmakta ve logaritmik veri dosyası oluşturulmaktadır. Her yüzey için ayrı ayrı oluşturulan bu veri dosyaları kullanılarak, güç spektrum yoğunluğu [log S(k)-log (k)]

grafikleri elde edilmiştir (Şekil B.120-B.149). Bu grafiklerdeki nokta dağılımını en iyi şekilde yansıtan doğrusal regresyon doğruları çizilmiş ve bunların eğim değerleri (β) bulunmuştur. Bu değerler, $D = (8 + \beta) / 2$ eşitliğinde yerine konarak, her yüzey için fraktal boyutlar (D) hesaplanmıştır.

Daha önce Bölüm 5' de anlatıldığı gibi, bu çalışmada kullanılan süreksizlik örnekleri 3 farklı sabit normal gerilme değerleri altında, sırasıyla 1, 2 ve 3 no'lu direkt kesme deneyleri ile toplam üç kez kesilmiş olup, kesme deneyleri öncesinde sayısallaştırılmış olan süreksizlik örneği alt ve üst blok yüzeyleri her kesme deneyinin ardından tekrar sayısallaştırılmıştır. Dolayısıyla direkt kesme deneyleri öncesinde sayısallaştırılmış yüzeyler için yapılan fraktal boyut (D_{psd}) hesaplamaları, her kesme deneyinin ardından tekrar sayısallaştırılan yüzeyler için de tekrarlanmıştır. Bu işlem, daha sonra Bölüm 8' de kapsamlı olarak anlatılacağı üzere, yüzeylerde kesilmeye bağlı gerçekleşen değişimlerin izlenmesine olanak tanımıştır. Direkt kesme deneyleri öncesi ilksel durum için hesaplanan fraktal boyutlar ile, σ_{n1} = 300 kPa sabit normal gerilme değeri altında gerçekleştirilen 1 no'lu direkt kesme deneyleri sonrasında hesaplanan fraktal boyutlar Tablo 6.1' de sunulmuştur. Benzer şekilde, sırasıyla σ_{n2} = 452 kPa ve σ_{n3} = 756 kPa sabit normal gerilmeleri altında gerçekleştirilen 2 ve 3 no' lu direkt kesme deneyleri sonrasında hesaplanılan fraktal boyut değerleri ise Tablo 6.2' de görülmektedir. S1 no' lu süreksizlik örneğine ait olan alt ve üst blok yüzeyleri 1 ve 2 no' lu kesme deneylerinin ardından sayısallaştırılmamıştır. Bu nedenle, bu örnek için 1 ve 2 no' lu kesme deneyleri sonrasında fraktal boyutlar hesaplanmamıştır.

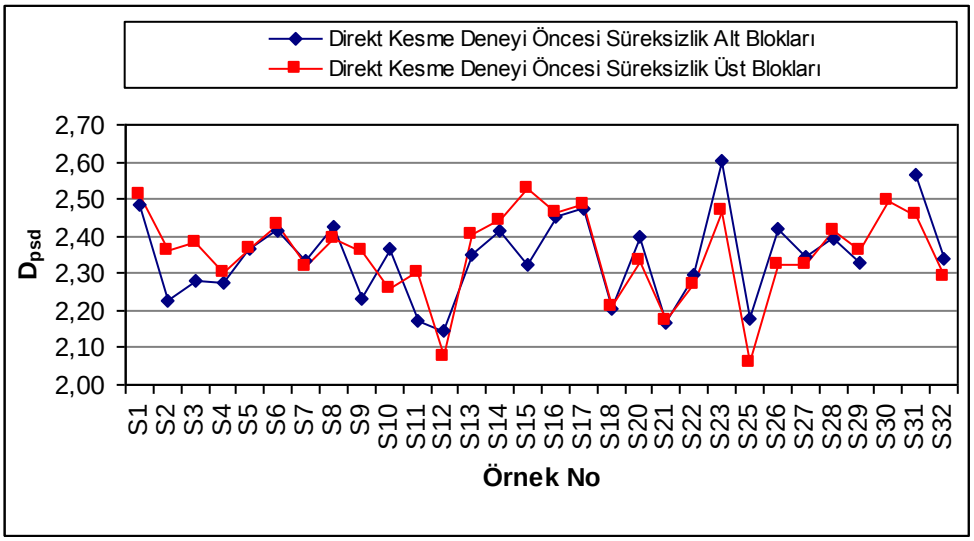
Tablo 6.1 : Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemi kullanılarak, direkt kesme deneyleri öncesi ilksel durum ve 1 no' lu direkt kesme deneyi sonrası kesilen yüzeyler için hesaplanılan fraktal boyut (Dpsd) değerleri

Örnek No	D_{psd}			
	Direkt Kesme Deneyi Öncesi		1 No'lu Direkt Kesme Deneyi Sonrası	
	Alt Bloklar	Üst Bloklar	Alt Bloklar	Üst Bloklar
S1	2.486	2.511	-	-
S2	2.225	2.363	2.114	2.386
S3	2.282	2.382	2.309	2.451
S4	2.275	2.301	2.582	2.305
S5	2.366	2.367	2.534	2.382
S6	2.414	2.428	2.358	2.427
S7	2.333	2.319	2.322	2.316
S8	2.424	2.394	2.420	2.316
S9	2.229	2.360	2.197	2.499
S10	2.367	2.259	2.292	2.266
S11	2.173	2.303	2.486	2.502
S12	2.146	2.074	2.290	2.055
S13	2.351	2.402	2.452	2.413
S14	2.413	2.441	2.454	2.417
S15	2.324	2.527	2.324	2.334
S16	2.453	2.461	2.725	2.528
S17	2.474	2.487	2.772	2.472
S18	2.205	2.209	2.497	2.151
S20	2.400	2.336	2.503	2.254
S21	2.166	2.173	2.244	2.098
S22	2.296	2.269	2.414	2.300
S23	2.603	2.468	2.426	2.359
S25	2.177	2.059	2.630	2.054
S26	2.420	2.325	2.363	2.396
S27	2.346	2.322	2.361	2.311
S28	2.395	2.412	2.450	2.387
S29	2.330	2.363	2.293	2.370
S30	-	2.497	-	2.548
S31	2.564	2.455	2.791	2.512
S32	2.338	2.289	2.422	2.155

Tablo 6.2 : Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemi kullanılarak, 2 ve 3 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası kesilen yüzeyler için hesaplanılan fraktal boyut (D_{psd}) değerleri

Örnek No	D_{psd}			
	2 No'lu Direkt Kesme Deneyi Sonrası		3 No'lu Direkt Kesme Deneyi Sonrası	
	Alt Bloklar	Üst Bloklar	Alt Bloklar	Üst Bloklar
S1	-	-	2.576	2.433
S2	2.204	2.324	2.288	2.356
S3	2.279	2.359	2.262	2.505
S4	2.639	2.274	2.580	2.293
S5	2.508	2.351	2.539	2.335
S6	2.347	2.382	2.395	2.401
S7	2.353	2.323	2.313	2.319
S8	2.322	2.452	2.350	2.423
S9	2.185	2.451	2.246	2.479
S10	2.348	2.266	2.345	2.309
S11	2.584	2.457	2.564	2.537
S12	2.248	2.071	2.337	2.087
S13	2.466	2.539	2.393	2.511
S14	2.345	2.424	2.361	2.446
S15	2.288	2.362	2.383	2.330
S16	2.664	2.507	2.587	2.558
S17	2.560	2.533	2.603	2.481
S18	2.475	2.151	2.498	2.146
S20	2.423	2.262	2.699	2.280
S21	2.301	2.124	2.337	2.115
S22	2.415	2.392	2.241	2.294
S23	2.423	2.363	2.349	2.343
S25	2.502	2.016	2.497	2.058
S26	2.404	2.382	2.446	2.348
S27	2.273	2.304	2.460	2.275
S28	2.376	2.387	2.333	2.388
S29	2.291	2.405	2.302	2.447
S30	-	2.516	-	2.579
S31	2.800	2.422	2.714	2.450
S32	2.462	2.238	2.475	2.165

Her bir örneğin alt ve üst blok yüzeyleri için hesaplanan fraktal boyut (D_{psd}) değerlerinin, birbirlerine ne ölçüde yakınsadıklarını aynı eksen takımı üzerinde daha kolay görebilmek amacıyla, kesme deneyleri öncesinde hesaplanan değerlerin örneklere göre değişim grafiği çizilmiştir (Şekil 6.5). Bu grafikden de izlenildiği gibi, bir kaç örnek dışında, karşılıklı bloklar için birbirine oldukça yakın değerler hesaplanmıştır.



Şekil 6.5 : Güç spektrum yoğunluğu analizi ile hesaplanan fraktal boyut (D_{psd}) değerlerinin örneklere göre değişimi

Bu çalışmada kullanılan örnekler, kaya kütlesi içerisinde süreksizliklerle sınırlandırılmış olan, birbirine komşu birim kaya elemanlarının, örtüşme yüzeylerinin doğal geometrisine zarar vermeksizin, ana kütleden dikkatlice sökülerek alınması yoluyla temin edilmiştir. Dolayısıyla örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri birbirlerini genellikle iyi karşılar durumdadır. Birbirleriyle iyi derecede örtüşen alt ve üst blok yüzeyleri için çok yakın fraktal boyut (D_{psd}) değerlerinin hesaplanmış olması, geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazının ölçüm doğruluğunun ve hassasiyetinin oldukça güvenilir olduğunun bir göstergesidir. Bununla birlikte; S2, S3 ve S15 no' lu örnekler için hesaplanan fraktal boyutların alt ve üst blok yüzeylerindeki farklılığını, karşılıklı bloklardaki örtüşmelerinin diğer örneklerinkine göre daha zayıf gerçekleşmiş olması ile açıklamak mümkündür. Diğer taraftan, Babadağlı ve Develi (2003) tarafından, farklı cins kayaç örnekleri laboratuvarda Brezilyan (dolaylı çekme) deneyi ile yapay olarak çatlatılmış ve elde edilen yüzeyler için hesaplanan fraktal boyut değerleri ile petrografik ve fiziksel özelikler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Gerek güç spektrum yoğunluğu analizi gerekse variyogram analizi yöntemleri ile yapılan değerlendirmeler neticesinde, aynı örneğin alt ve üst blok yüzeyleri için hesaplanan fraktal boyutlar arasındaki farklılığın, porozitesi daha

yüksek olan örnekler için daha fazla olduğu belirtilmiştir. Variyogram analizi ile karşılaştırıldığında, bu durum özellikle güç spektrum yoğunluğu analizinde daha belirgin izlenmiştir. Buna ek olarak, istatistiksel bir ilişki tespit edilememiş olmakla birlikte, genel olarak daha yüksek tane boyutuna sahip örnekler için daha düşük fraktal boyut değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın asıl konusunu oluşturmaması nedeniyle, bu çalışmada benzer bir analiz yapılmamıştır. Ancak, S2, S3 ve S15 no' lu örnekler için gerçekleşen durumun nedenleri, yukarıda bahsedilen çalışmanın bulguları ile de ilişkili olabilecektir.

6.4 Süreksizlik Yüzeylerinin Fraktal Boyutunu Hesaplamak İçin Üçgen Prizma Yüzey Alanı Yöntemi

Bu yöntem, topolojik olarak 2-boyutlu süreksizlik yüzeylerinin fraktal boyutunu (D) hesaplamak için, Clarke (1986) tarafından önerilmiştir. Tıpkı güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) yönteminde olduğu gibi, bu yöntemle de analiz edilecek süreksizlik yüzeyine ait sayısallaştırılmış yükselti verileri, uniform aralıklı bir kare gridin düğüm noktaları üzerinde yer almalıdır. Ancak kullanılacak kare gridin boyutları, güç spektrum yoğunluğu yönteminden farklı olarak, n bir tamsayı olmak üzere, 2^n+1 ' dir.

Eğer a, b, c, ve d grid içindeki bir kare hücrenin (piksel) köşe noktalarındaki yükselti değerleri ve e bu karenin geometrik merkezinde yer alan ortalama yükseklik değeri ise, sırasıyla; a, e ve b; b, e ve c; c, e ve d; d, e ve a noktaları birleştirilerek kare hücre içerisinde dört üçgen çizilebilir. Burada her bir üçgen, birer üçgen prizma olarak düşünülebilir (Şekil 6.6). Bu üçgen prizmaların her birinin tavanını oluşturan üçgenlerin alanları bilinirse, kare hücrenin tavanının toplam alanı hesaplanabilir. Bu hesaplamalar için kullanılan eşitlikler Clarke (1986) ' dan alınmış olup, üçgenlerin yüzey alanları (A, B, C, ve D) ;

$$A = \sqrt{sa(sa-w)(sa-p)(sa-o)} \qquad B = \sqrt{sb(sb-x)(sb-p)(sb-q)}$$

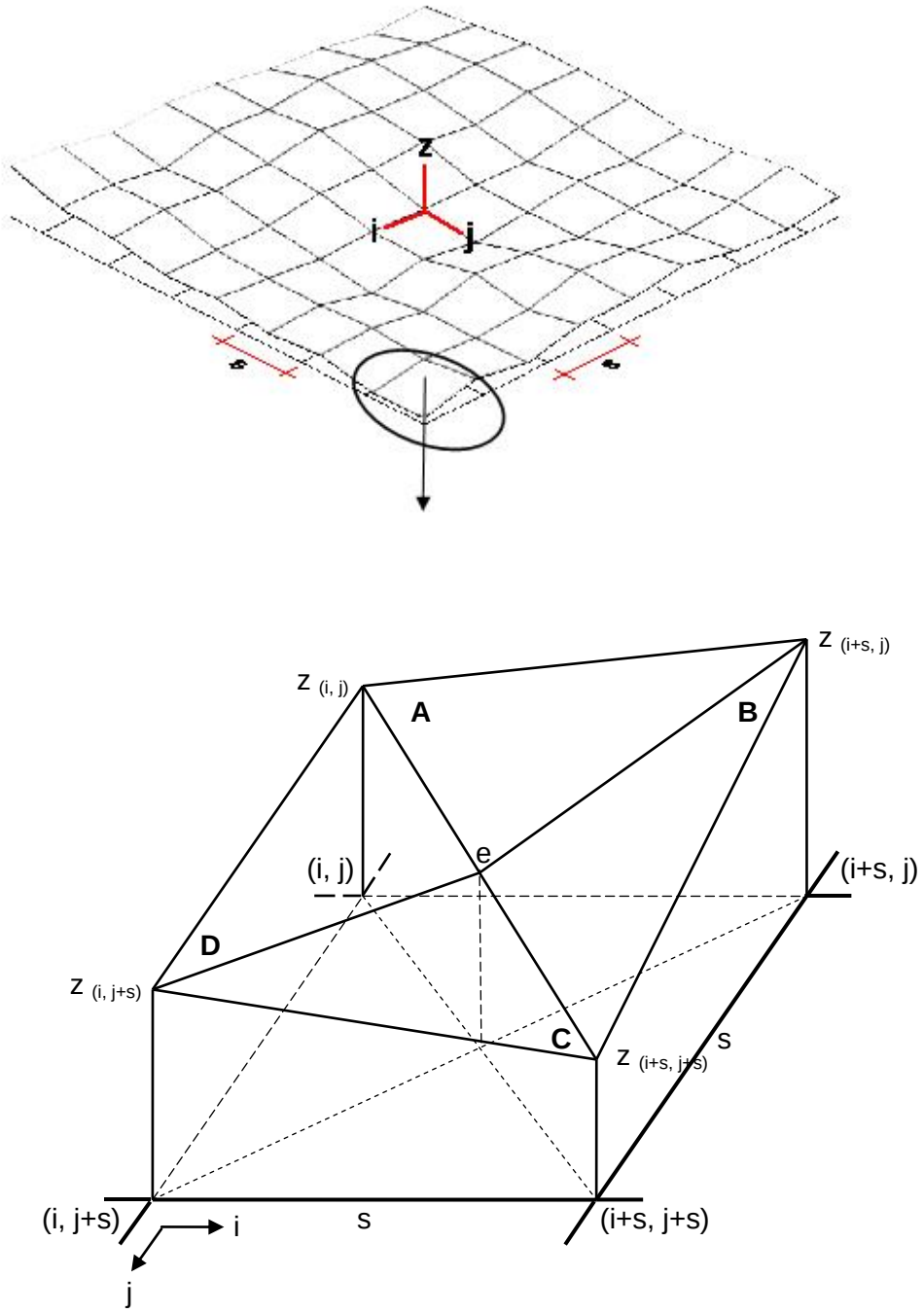
$$C = \sqrt{sc(sc-y)(sc-q)(sc-r)} \qquad D = \sqrt{sd(sd-z)(sd-o)(sd-r)} \quad (6.16)$$

ifadeleriyle verilir ve buradaki "sa, sb, sc ve sd" parametreleri Heron denklemi ile;

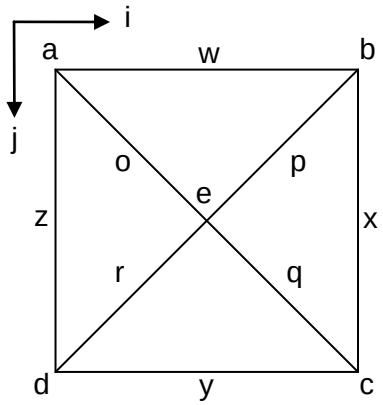
$$sa = \frac{1}{2}(w+p+o) \qquad sb = \frac{1}{2}(x+p+q)$$

$$sc = \frac{1}{2}(y+q+r) \qquad sd = \frac{1}{2}(z+o+r) \qquad 6.17)$$

şeklinde tanımlanır. (6.16) ve (6.17) no' lu eşitliklerde yer alan "w, z, x, y ve o, p, r, q" parametreleri, üçgen prizmaların tavanını oluşturan üçgenlerin kenar uzunluklarıdır (Şekil 6.7). Şekil 6.6' deki hücrenin tabanını oluşturan karenin kenar uzunluğu s olduğundan, tabana iz düşürülmüş üçgenlerin uzun kenarlarının uzunluğuda s 'dir. Dolayısıyla bu izdüşüm üçgenlerinin diğer iki kısa kenarının uzunlukları ise ($\sqrt{2}$ /2)s olacaktır.



Şekil 6.6 : sxs boyutundaki kare hücre (piksel) içinde oluşturulan üçgen prizmaların şematik görünümü



$a = z_{(i, j)}$; $b = z_{(i+s, j)}$; $c = z_{(i+s, j+s)}$; $d = z_{(i, j+s)}$

$e = (a + b + c + d) / 4$

Şekil 6.7 : Taban kenar uzunluğu s olan hücrenin üst görünümü (Clarke, 1986).

Bu durumda; izdüşüm üçgenlerin kenar uzunlukları ile hücrenin köşe noktaları arasındaki yükseklik farkları kullanılarak, üçgen prizmaların tavanını oluşturan üçgenlerin kenar uzunlukları "w, z, x, y" ve "o, p, r, q", Pythagoras teoremine gore;

$$w = \sqrt{(b-a)^2 + s^2} \qquad x = \sqrt{(c-b)^2 + s^2}$$

$$y = \sqrt{(d-c)^2 + s^2} \qquad z = \sqrt{(a-d)^2 + s^2}$$

$$o = \sqrt{(a-e)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}s\right)^2} \qquad p = \sqrt{(b-e)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}s\right)^2}$$

$$q = \sqrt{(c-e)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}s\right)^2} \qquad r = \sqrt{(d-e)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}s\right)^2} \qquad (6.18)$$

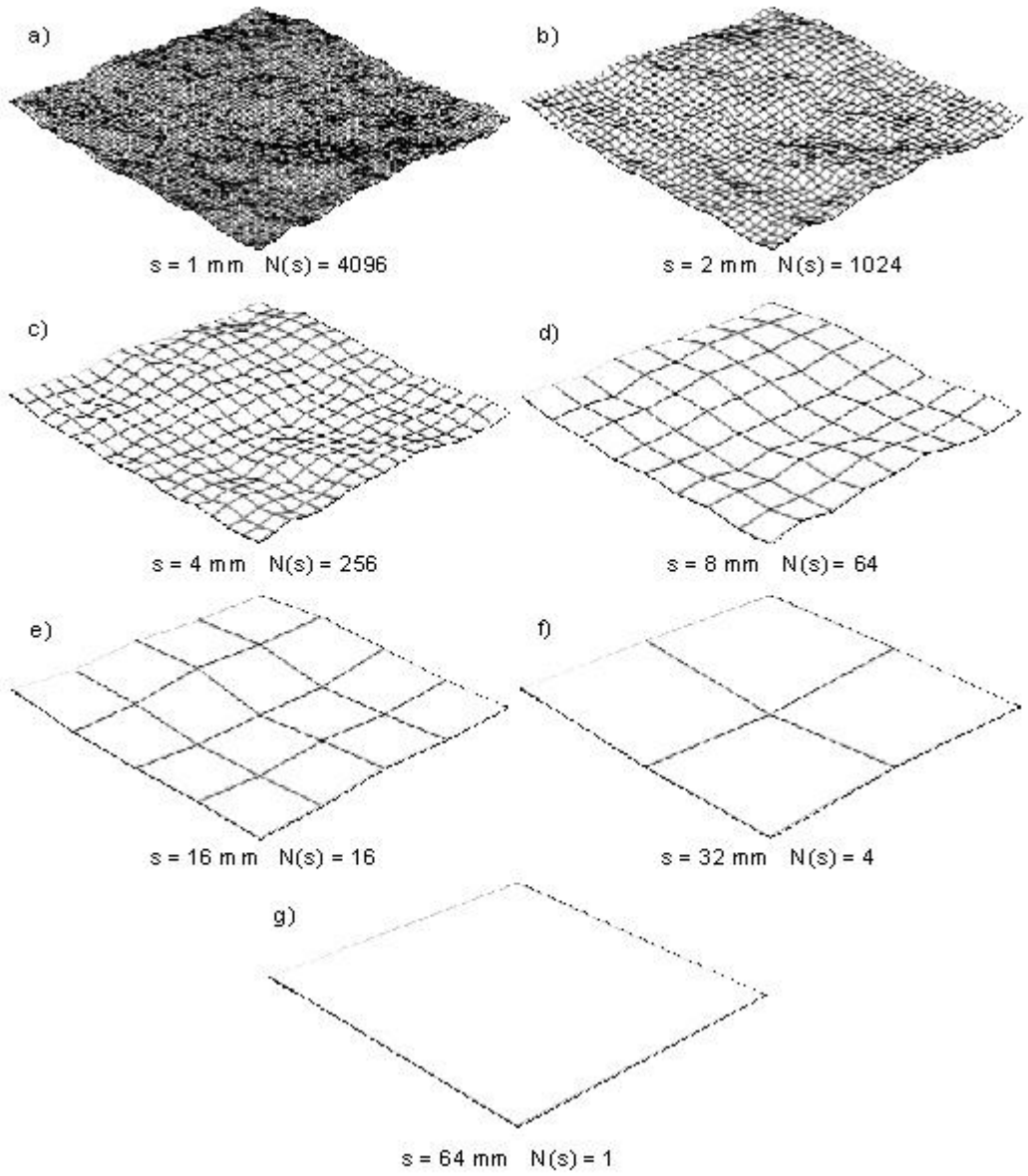
ifadeleri ile hesaplanır. (6.16) no' lu denklem ile tanımlanan alanların toplamı sxs boyutundaki kare hücre yüzeyinin toplam alanını ($S_{i, j}$) verir.

$$S_{i, j} = A + B + C + D \qquad 6.19)$$

Süreksizlik yüzeyinin toplam alanı ise, grid içindeki tüm hücrelerin alanlarının toplamına eşittir.

$$S(s) = \sum_{i, j=1}^{N(s)} S_{i, j} \qquad 6.20)$$

Burada; N(s), süreksizlik yüzeyine ait grid içindeki sxs boyutundaki toplam hücre sayısıdır. Artan hücre boyutları için (Şekil 6.8) hesaplamalar tekrarlanılarak, her bir farklı hücre boyutu (sxs) için grid başka bir deyişle süreksizlik toplam yüzey alanı S(s) hesaplanır.



Şekil 6.8 : Artan hücre boyutları için toplam yüzey alanı hesaplama aşamaları

Toplam yüzey alanı, hücre boyutunun bir fonksiyonudur. Her defasında artırılan hücre boyutlarına karşılık, hesaplanılan grid toplam yüzey alanında bir düşüş gerçekleşir ve bu ilişki ln yüzey alanı – ln hücre alanı (rezolasyon alanı) grafiğinden izlenebilir. Yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) ;

$$D = 2 - b \qquad (6.21)$$

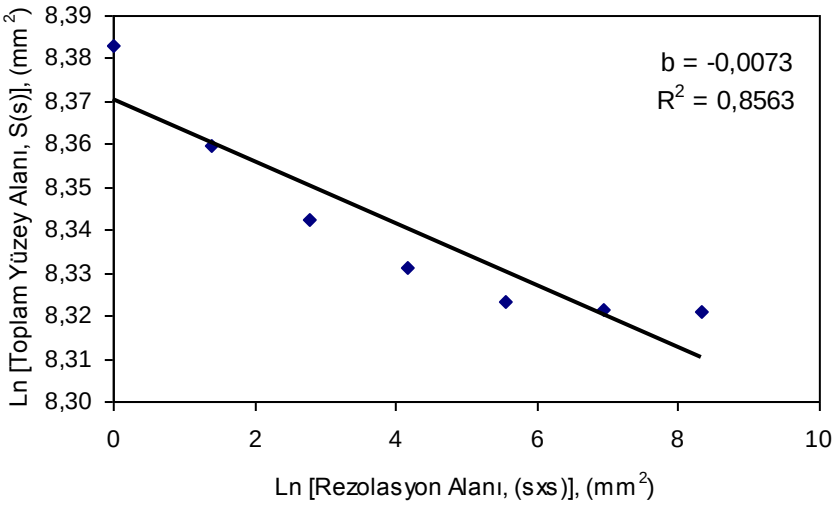
eşitliği ile tanımlanır. Bu eşitlikteki b, ln [S(s)] – ln (sxs) grafiğindeki ilişkiyi temsil eden regresyon doğrusunun eğimidir.

Şekil 6.8a' da, bir milimetrelik örnekleme aralığı (Δ=1mm) kullanılarak sayısallaştırılmış bir süreksizlik yüzeyine ait olan, 3-boyutlu sayısal model görülmektedir. Modele ait olan 2-boyutlu veri seti gridlenirken grid aralığı (s), örnekleme aralığına eşit seçilmiş (s=Δ) olup, bu grid 65x65 adet düğüm noktasından oluşmaktadır. Bir başka deyişle 65x65 boyutundaki bu kare grid içinde 64x64 adet hücre bulunmaktadır. İlk adımda hücre boyutu (s) örnekleme aralığına (Δ) eşit (s=Δ=1 mm) seçilmiş, (6.16) – (6.20) no' lu denklemler kullanılarak süreksizlik yüzeyinin toplam alanı [S(s)] hesaplanmıştır. İkinci adımda hücre boyutu artırılmış (s = 2 mm) ve yüzey toplam alanı tekrar hesaplanmıştır.

Tablo 6.3 : Hücre boyutuna (s) bağlı olarak toplam yüzey alanının [S(s)] değişimi

Adım	1	2	3	4	5	6	7
s (mm)	1	2	4	8	16	32	64
N(s)	64x64	32x32	16x16	8x8	4x4	2x2	1x1
sxs (mm^2)	1	4	16	64	256	1024	4096
S(s) (mm^2)	4372.9	4270.1	4198.1	4151.1	4118.6	4110.7	4109.4
Ln(sxs)	0.00000	1.38629	2.77259	4.15888	5.54518	6.93147	8.31777
Ln [S(s)]	8.38320	8.35954	8.34249	8.33123	8.32321	8.32137	8.32104

İzleyen adımlarda, artan hücre boyutları için (Şekil 6.8 b, c, d, e, f, g), işlemler tekrarlanmış, hesaplanan değerler Tablo 6.3' de sunulmuştur. Seçilen hücre boyutlarına bağlı olarak, rezolasyon alanları (hücre alanı, sxs) ve bu alanlara karşılık hesaplanan toplam yüzey alanları [S(s)] değerlerinin doğal logaritmaları alınmış, birbirleri ile olan ilişkileri, Şekil 6.9' de görülen ln [S(s)] – ln (sxs) grafiğinde verilmiştir.



Şekil 6.9 :Rezolasyon alanı (sxs) - toplam yüzey alanı S(s) ilişkisi. D_{tpsam} = 2,0073

Şekil 6.9' dan görüleceği gibi, hücre boyutu dolayısıyla da rezolasyon alanı arttıkça hesaplanan toplam yüzey alanı değeri azalmaktadır. Grafikteki bu ilişkiyi temsil eden doğrusal regresyonun eğim değeri (b = - 0,0073), 6.20 no' lu eşitlikte yerine konulmuş ve süreksizlik yüzeyinin fraktal boyutu D_{tpsam} = 2,0073 olarak bulunmuştur.

Araştırmada kullanılan bütün süreksizlik örneklerinin alt ve üst bloklarına ait sayısallaştırılmış yüzey verilerine bu yöntem uygulanmış, her yüzey için ln [S(s)] – ln (sxs) grafikleri çizilmiş ve bu grafiklerdeki nokta dağılımını temsil eden doğrusal regresyon eğim değerleri (b) bulunmuştur. Bu değerler daha önce verilen 6.20 no' lu eşitlikte yerine konularak yüzeylere ait fraktal boyutlar (D_{tpsam}) hesaplanmıştır. Tıpkı güç spektrum yoğunluğu analizi yönteminin uygulanmasında olduğu gibi, bu yöntem uygulanırken direkt kesme deneyleri öncesinde sayısallaştırılmış yüzeyler için yapılan fraktal boyut hesaplamaları, her kesme deneyinin ardından tekrar sayısallaştırılan yüzeyler için de tekrarlanmıştır. Direkt kesme deneyleri öncesi ilksel durum için hesaplanan fraktal boyutlar ile, 1 no'lu direkt kesme deneyleri sonrasında hesaplanan fraktal boyutlar Tablo 6.4' de sunulmuştur. Benzer şekilde, sırasıyla 2 ve 3 no' lu direkt kesme deneyleri sonrasında hesaplanan fraktal boyut değerleri ise, Tablo 6.5' de görülmektedir.

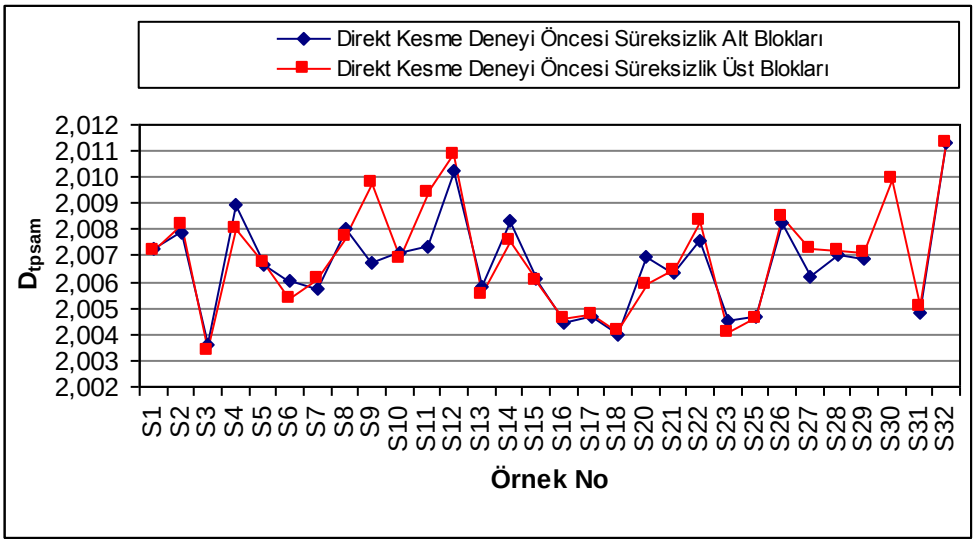
Tablo 6.4 : Üçgen prizma yüzey alanı yöntemi kullanılarak, direkt kesme deneyleri öncesi ilksel durum ve 1 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası kesilen yüzeyler için hesaplanılan fraktal boyut (Dtpsam) değerleri

Örnek No	D_{tpsam}			
	Direkt Kesme Deneyi Öncesi		1 No'lu Direkt Kesme Deneyi Sonrası	
	Alt Bloklar	Üst Bloklar	Alt Bloklar	Üst Bloklar
S1	2.007267	2.007207	-	-
S2	2.007848	2.008212	2.008448	2.007792
S3	2.003601	2.003405	2.003849	2.005835
S4	2.008915	2.008064	2.008886	2.007584
S5	2.006639	2.006704	2.006996	2.006675
S6	2.006047	2.005338	2.005464	2.004796
S7	2.005703	2.006093	2.006128	2.006021
S8	2.008057	2.007749	2.010228	2.007589
S9	2.006735	2.009796	2.006546	2.009767
S10	2.007126	2.006854	2.007858	2.006325
S11	2.007374	2.009378	2.009339	2.007923
S12	2.010251	2.010882	2.012530	2.010920
S13	2.005803	2.005479	2.007988	2.005130
S14	2.008356	2.007569	2.008333	2.007671
S15	2.006124	2.006039	2.006209	2.008083
S16	2.004427	2.004616	2.005387	2.004705
S17	2.004701	2.004754	2.011039	2.004619
S18	2.003984	2.004109	2.012487	2.003552
S20	2.006991	2.005913	2.007389	2.005625
S21	2.006358	2.006454	2.011028	2.006979
S22	2.007556	2.008360	2.011079	2.008347
S23	2.004524	2.004035	2.005957	2.003744
S25	2.004653	2.004633	2.015193	2.004964
S26	2.008292	2.008452	2.011361	2.011209
S27	2.006189	2.007271	2.010203	2.007148
S28	2.007074	2.007199	2.010865	2.008043
S29	2.006888	2.007138	2.008311	2.009651
S30	-	2.009910	-	2.009736
S31	2.004822	2.005051	2.004495	2.005206
S32	2.011319	2.011351	2.017009	2.013533

Tablo 6.5 : Üçgen prizma yüzey alanı yöntemi kullanılarak, 2 ve 3 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası kesilen yüzeyler için hesaplanılan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri

Örnek No	D_{tpsam}			
	2 No'lu Direkt Kesme Deneyi Sonrası		3 No'lu Direkt Kesme Deneyi Sonrası	
	Alt Bloklar	Üst Bloklar	Alt Bloklar	Üst Bloklar
S1	-	-	2.007145	2.007299
S2	2.007722	2.007856	2.008386	2.007588
S3	2.004003	2.008531	2.003792	2.008640
S4	2.008832	2.007300	2.008514	2.007000
S5	2.006991	2.006438	2.007118	2.006280
S6	2.005151	2.004671	2.005429	2.004534
S7	2.005775	2.005824	2.005742	2.005825
S8	2.010803	2.007790	2.009775	2.007405
S9	2.006586	2.010055	2.006563	2.009688
S10	2.007743	2.005893	2.006839	2.005664
S11	2.008517	2.007761	2.007985	2.008032
S12	2.012098	2.010863	2.015610	2.010737
S13	2.007695	2.004907	2.007669	2.005123
S14	2.007859	2.008091	2.007565	2.007917
S15	2.006464	2.007903	2.007515	2.007566
S16	2.005607	2.004391	2.005293	2.004360
S17	2.009130	2.004715	2.009135	2.004433
S18	2.010994	2.003769	2.009452	2.003340
S20	2.006264	2.005407	2.007705	2.005398
S21	2.011896	2.006785	2.011141	2.006771
S22	2.010906	2.008515	2.010495	2.008699
S23	2.005493	2.003540	2.005809	2.003460
S25	2.014582	2.004967	2.014224	2.005032
S26	2.010616	2.011074	2.010579	2.010642
S27	2.009179	2.007264	2.009694	2.006829
S28	2.010114	2.007833	2.009267	2.007610
S29	2.011176	2.009425	2.010956	2.009280
S30	-	2.009433	-	2.009019
S31	2.003902	2.004893	2.007539	2.004752
S32	2.015460	2.012841	2.014571	2.013234

Her bir örneğin alt ve üst blok yüzeyleri için hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerlerinin birbirlerine ne ölçüde yakınsadıklarını aynı eksen takımı üzerinde daha kolay görebilmek amacıyla, kesme deneyleri öncesinde hesaplanılan değerlerin örneklere göre değişim grafiği çizilmiştir (Şekil 6.10). Bu grafikden de görüleceği gibi, bir örnek dışında, karşılıklı bloklar için birbirine oldukça yakın değerler hesaplanmıştır.



Şekil 6.10 : Üçgen prizma yüzey alanı yöntemi ile hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerlerinin örneklere göre değişimi

Daha öncede belirtildiği gibi, bu çalışmada kullanılan örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri birbirlerini karşılar durumdadır. Tıpkı güç spektrum yoğunluğu analizi yönteminde olduğu gibi, birbirleriyle iyi derecede örtüşen alt ve üst blok yüzeyleri için çok yakın fraktal boyut (D_{tpsam}) değerlerinin hesaplanmış olması, geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazının ölçüm doğruluğunun ve hassasiyetinin oldukça güvenilir olduğunun diğer bir göstergesidir.

7 ÖTELENEN SÜREKSİZLİKLERDE DEĞME ALANLARININ GELİŞİM MEKANİZMASI

Laboratuvar direkt kesme deneyleri sırasında yapılan gözlemlere göre, üzerinde hareketin gerçekleştiği süreksizlik yüzey alanının ancak küçük bir kısmı kesme işleminden etkilenmektedir. Bir başka deyişle; deney sırasında, kaymanın gerçekleştiği süreksizlik düzleminin altında ve üstünde yer alan bloklar, düzlem üzerindeki belirli alanlarda birbirlerine değmektedir. Deney sonrasında, kesilme yüzeyinin her iki tarafı incelendiğinde, sürtünmeye bağlı olarak oluşan yerel kayma izleri; bu yüzeylerin birbirleri üzerinde ötelenirken ancak belirli bölgelerde birbirlerine değdiklerini, bu bölgelerde ezilme ve/veya kesilme oluştuğunu ve hareket düzlemine göre bu değme alanlarının alt ve üst bloklarda birbirlerine karşılık geldiğini göstermektedir. Daha önemli bir bulgu ise; kesmenin gerçekleştiği alanların rastgele olmadığı, bunların boyut, şekil ve uzamsal dağılımlarının yüzey geometrisi (pürüzlülük) tarafından denetlendiği ve çoğunlukla kesme yönünde, kesme vektörüne karşı görünür eğimli olan en dik alanlarda gelişmekte olduğudur.

Gentier ve diğ. (1997), Yeo ve diğ. (1998), Graselli ve diğ. (2002) kesme kuvveti uygulandığında, yüzey üzerinde kesme yönünde, kesme vektörüne karşı görünür eğimli olan pürüzlerde elastik deformasyon başladığını bu sırada kesme vektörünün yönüne doğru görünür eğimli olan pürüzlerin ise kesme doğrultusuna dik gelişen boşluklar oluşturacak şekilde birbirinden uzaklaştığını belirtmişlerdir.

Gentier ve diğ. (2000) tarafından doğal granit süreksizliklerinden kopyalanan modeller üzerinde laboratuvarda kesme deneyleri yapılmış, deneyler sonrası kesilen yüzeyler üzerinde görüntü işleme teknikleri kullanılarak yön bağımlı eğim vektörleri (gradiant) hesaplanmıştır. Kesilen yüzeylerin hasara uğramış kesimlerinin (değme alanları) biçim ve boyutlarının, kesme yönünde kesmeye karşı koyan en büyük eğimin bulunduğu alanlar ile yakın bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Değme alanlarının çoğunlukla;

a) lokal eğim yönünün kesme yönüne yakın olduğu ve kesme vektörüne karşı koyan en dik eğimli bölgelerde ortaya çıktığı,
b) boyut, şekil ve uzamsal dağılımlarının kesme yönüne olduğu kadar uygulanılan gerilmelerin büyüklüğüne ve gerçekleşen kesme yerdeğiştirmesinin miktarına da bağlı olduğu,

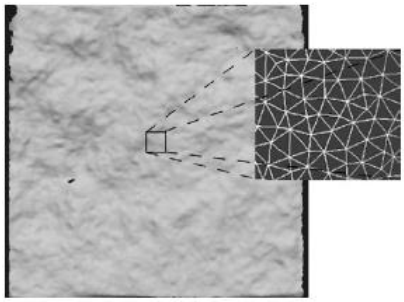
c) daha henüz en büyük kesme gerilmesine ulaşılmadan başlangıçta çok küçük olduğu, ancak kesme işleminin deformasyon yumuşaması (post peak softening) ve rezidüel evreleri süresince genişleme gösterdiği

adı geçen araştırmacıların önemli bulguları olmuştur.

Graselli ve diğ. (2002), kesilme sırasında değme alanlarının gelişeceği yerleri saptamak için ilk önce kesme yönünün tanımlanmasının gerekli olduğunu bildirmiş, değme alanlarının kesme yönünde sadece kesme vektörüne bakan (kesme vektörüne karşı koyan) ya da kesme vektörüne paralel olan lokal alanların üzerinde gelişebileceğini, diğer yandan kesme vektörünün yönüne doğru görünür eğimli olan lokal alanlarda ise değme oluşamayacağını varsaymıştır.

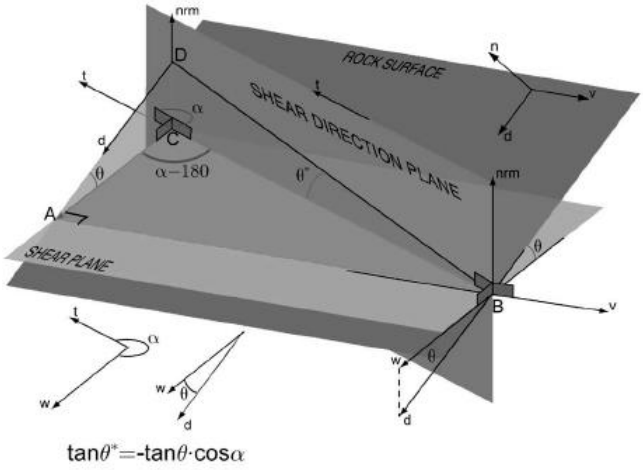
Yang ve Chiang (2000), üzerinde farklı eğim açılarına sahip iki üçgen pürüz bulunduran testere dişli model (saw-tooth model) üzerinde yaptıkları deney sırasında, daha yüksek eğim açısına sahip olan pürüzün kesme işleminde baskın rol oynadığını, kontağın bu pürüz üzerinde geliştiğini, ancak bu pürüz kesildikten sonra daha düşük eğim açısına sahip olan diğer pürüzün aktif duruma geçtiğini belirlemişlerdir.

Graselli ve diğ. (2002), laboratuvar gözlemlerine dayanarak doğal süreksizlik yüzeyleri için bu olayı; "kesme sırasında gerilmenin eğimi en dik olan pürüzden başlayarak farklı eğimlere sahip pürüzler arasında dağılacağı" şeklinde genelleştirmiş ve potansiyel hasar başka bir deyişle değme alanlarının belirlenmesi için "kesme yönünde, sadece kesme vektörüne bakan (kesme vektörüne karşı eğimli olan) ve bunların içinde kesilme olayında rol alabilmek için yeterince dik olan alanların tanımlanmasının gerekli olduğu" tezini savunmuşlardır. Adı geçen araştırmacılar, kesme olayı sırasında gelişecek değme alanlarının, kesme yönüne bağlı olarak önceden tahmin edilebilmesine olanak sağlayan bir yöntem geliştirmişlerdir. Süreksizlik yüzeyleri, ATS (advanced topometric sensor) adı verilen ve aslında otomotiv endüstrisinde kalite kontrol işlemi için geliştirilmiş olan optik bir ölçüm sistemi kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Elde edilen yüzey verisine, yine otomobil dijital tasarımı için ETHZ tarafından özel olarak geliştirilen bir üçgenleştirme algoritması (triangulation algorithm) uygulanmış, sayısallaştırılmış yüzey; sonlu sayıda, ayrık, üçgen şekilli hücrelere bölünmüştür (Şekil 7.1).



Şekil 7.1 : Sayısallaştırılmış yüzey verisinin üçgenleştirilmesi (Graselli ve diğ.,2002)

Yüzey üzerinde farklı lokal düzlemleri temsil eden her bir üçgen için gerçek eğim vektörleri (d) hesaplanmış ve ait oldukları üçgenlerin ağırlık merkezlerine yerleştirilmiştir. Böylece, her bir üçgenin uzaydaki duruşu üçgenin azimut (α) ve eğim açısı (θ) ile tanımlanmıştır (Şekil 7.2).



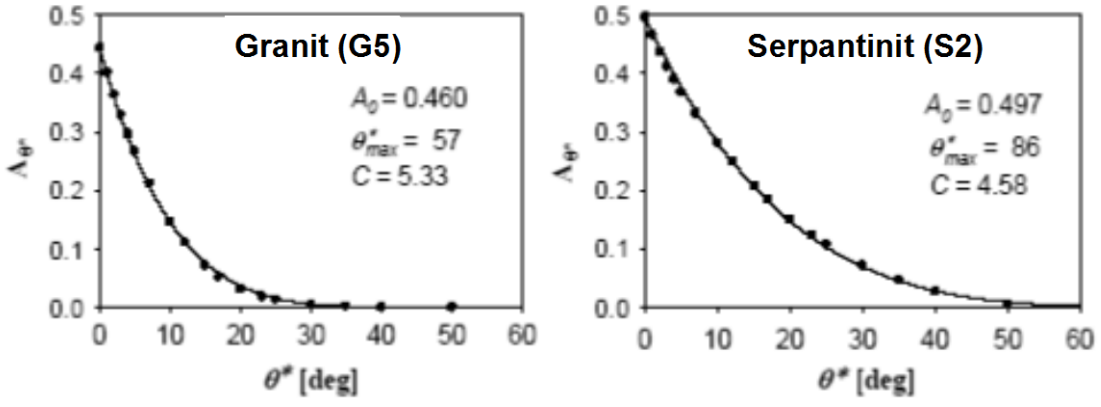
Şekil 7.2 : Kesme yönünün bir fonksiyonu olarak görünür eğim açısının (θ*) geometrik tanımı (Graselli ve diğ.,2002)

Azimut açısı (α); gerçek eğim vektörünün (d) kesme düzlemindeki izdüşümü (w) ile kesme vektörü (t) arasında kalan açı olarak tanımlanmış olup, kesme vektöründen saat yönünde ölçülmektedir. θ, doğrultuya dik yönde üçgen ile kesme düzlemi arasında kalan gerçek eğim açısıdır. Üçgenin kesme yönündeki görünür eğim açısı (θ*) ; kesme vektörünü içine alan ve kesme düzlemine düşey konumda bulunan kesme yönü düzleminin üçgen ile olan arakesit doğrusunun, kesme düzlemi ile yaptığı açı olup, $\tan\theta^* = -\tan\theta \cos\alpha$ eşitliği ile tanımlanmıştır. Bu yöntem ile, kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı eğimli olan üçgenlerin her birinin görünür eğim açıları (θ*) hesaplanmıştır. 0^0 ile θ^*_{max} arasında değişen görünür eğim açısı (θ*) değerlerine sahip olan bu üçgenlerin alanlarının toplamı, “kesme yönündeki

maksimum olası değme alanı (maximum possible contact area, A_0)" olarak tanımlanmıştır. Kesme mekanizması;

"yüzey üzerinde kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı görünür eğimli olup, uygulanılan farklı normal yükler için farklı değerler alan görünür bir eşik eğim açısından (threshold apparent inclination, θ^*_{cr}) daha yüksek görünür eğim açılarına sahip olan lokal bölgeler kesme işleminde rol alır"

kuramı ile basitleştirilmiştir. Seçilecek herhangi bir görünür eşik eğim açısı (θ^*_{cr}) ve bu açıdan daha yüksek diğer tüm görünür eğim açıları ile tanımlı olup, kesme yönünde sadece kesme vektörüne doğru eğimli olan alanların toplamı, "toplam potansiyel değme alanı (total potential contact area, A_θ^*)" olarak adlandırılmıştır. Bu alan, görünür eşik eğim açısına bağlı olarak, kesme sırasında üzerinde değme oluşması olası tüm alanların toplamını ifade etmektedir. Kesme yönünde sadece kesme vektörüne bakan lokal bölgeler içinde, tam olarak θ^*_{cr} açısı ile eğimli olan alanların değme zonlarını oluşturacağı, θ^*_{cr} açısından daha yüksek açı değerleri ile eğimli olan alanların ise uygulanılan normal yükün dağılımına bağlı olarak deforme olacağı, kesileceği ya da ezileceği belirtilmiştir. Görünür eşik eğim açısı (θ^*_{cr}), uygulanan farklı normal yükler için farklı değerler aldığından, toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) doğal olarak normal yük miktarına da bağlıdır. Toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) ile karşılık gelen görünür eğim açısı arasındaki ilişkiyi araştırmak için, sayısallaştırılmış yüzey verisi kullanılarak farklı görünür eğim açısı (θ^*) değerleri için toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) değerleri hesap edilmiş ve bu değerler x-y eksen takımına taşınılarak A_θ^* - θ^* grafiği çizilmiştir (Şekil 7.3).



Şekil 7.3 : İki farklı yüzey için, görünür eğim açısı (θ^*) ile toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*), arasındaki ilişki (Graselli ve diğ., 2002)

Bu grafikteki noktaların dağılımına regresyon analizi uygulanarak A_{θ}^{*} ile θ^{*} arasında;

$$A_{\theta^*} = A_0 \left(\frac{\theta^*_{max} - \theta^*}{\theta^*_{max}} \right)^C \qquad (7.1)$$

ilişkisi tanımlanmıştır (Graselli ve diğ., 2002). Burada,

A_{θ}^{*} : kesme yönündeki toplam potansiyel değme alanı

A_0 : kesme yönündeki maksimum olası değme alanı

θ^{*}_{max} : kesme yönündeki en büyük görünür eğim açısı

C : şekil parametresidir

Yukarıdaki ilişki ile tanımlanan eğri konkav olup, konkavlık derecesi şekil parametresi olan "C" ile tanımlanmıştır. C parametresi arttıkça eğrinin konkavlığı da artmaktadır. Yüksek konkavlık, en büyük değerle karşılaştırıldığında daha düşük görünür eğim değerlerine sahip olan daha çok alan olduğu anlamına gelir. Dolayısıyla daha yüksek C değerleri, daha düşük pürüzlülük derecesine sahip yüzeyleri tanımlamaktadır. Örneğin, sabit bir A_0 ve θ^{*}_{max} değeri için, artan konkavlığın (yüksek C değerlerinin); kesme yönünde kesmeye karşı koyan daha az oranda yüksek eğimli alanlar içeren, daha az pürüzlü bir yüzeyi işaret edeceği belirtilmiştir. Bununla birlikte, yüzeyin kesme yönündeki kesmeye karşı koyan en büyük görünür eğim açısı değeri (θ^{*}_{max}), yine kesme yönünde kesmeye karşı koyan görünür eğim açılarının dağılımını karakterize eden şekil parametresi (C) ile normalize edilmiş ve farklı yüzeylerin pürüzlülük derecelerinin birbirleri ile sayısal olarak kıyaslanmasında θ^{*}_{max}/C oranı kullanılmıştır. Bu oran, kesme yönünde yüzeydeki açısallığın değişimini tanımlamaktadır. Bu oranın düşük değerleri, A_{θ}^{*} - θ^{*} grafiğinde yüksek konkavlık derecesi sergileyen, dolayısıyla az miktarda yüksek eğimli alanlar içeren az pürüzlü yüzeyleri işaret etmektedir. Pürüzlülük derecesi arttıkça θ^{*}_{max}/C oranıda artmaktadır. Graselli (2001), θ^{*}_{max}/C değerinin süreksizliğin kesme dayanımı ile orantılı olduğunu belirtmiştir. Bu yöntem sayesinde, seçilecek bir görünür eşik eğim açısı (θ^{*}_{cr}) değerine bağlı olarak, kesme işleminde yüzeyler arasında birbirine değmesi olası alanların önceden kestirilmesi mümkün olabilmektedir.

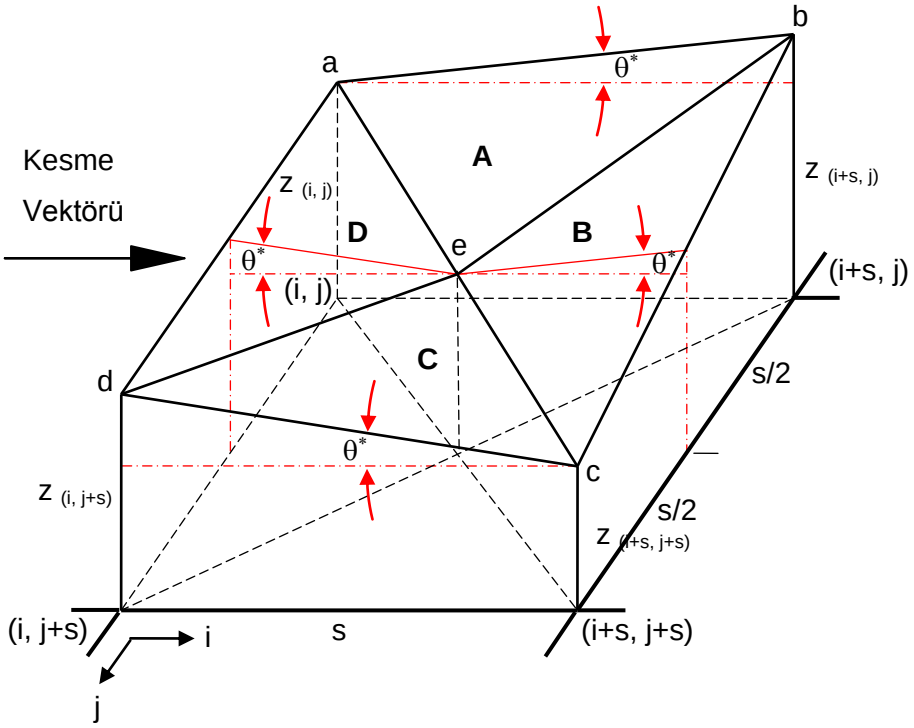
7.1 Değme Alanlarının Hesabı İçin Yeni Bir Yaklaşım

Bu çalışma kapsamında, süreksizliklerin kesilmesi sırasında gelişebilecek değme alanlarının, kesme yönüne bağlı olarak önceden tahmin edilebilmesine olanak sağlayan yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yeni yaklaşım, yukarıda değinilen diğer araştırmacıların da görüş ve bulgularına uygun olarak;

I. olası değme alanlarının kesme yönünde sadece kesme vektörüne bakan başka bir deyişle kesme vektörüne karşı görünür eğimli olan ve/veya kesme vektörüne paralel olan lokal alanlar üzerinde gelişebileceği,
II. görünür eğim yönü kesme vektörünün yönüne doğru olan alanlarda ise değme oluşamayacağı, bu alanların kesme doğrultusuna dik gelişen boşluklar oluşturacak şekilde birbirinden uzaklaşacağı,
III. yüzey üzerinde kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı görünür eğimli olup, uygulanılan farklı normal yükler için farklı değerler alan görünür bir eşik eğim açısından (θ^*_{cr}) daha yüksek eğim açılarına sahip olan lokal bölgelerin kesme işleminde rol alacağı,

varsayımlarına dayanmaktadır. Bu yeni yaklaşım, daha önce tanıtılmış olan "topolojik olarak 2-boyutlu süreksizlik yüzeylerinin fraktal boyutu" nu hesaplamak için Clarke (1986) tarafından önerilen "üçgen prizma yüzey alanı yöntemi"' nin temel algoritması üzerine kurulmuştur.

Eğer a, b, c, ve d, uniform aralıklı bir kare grid içindeki herhangi bir kare hücrenin köşe noktalarındaki yükselti değerleri ve e, e=(a+b+c+d)/4 olmak üzere, bu karenin geometrik merkezinde yer alan ortalama yükseklik değeri ise, sırasıyla; a, e ve b; b, e ve c; c, e ve d; d, e ve a noktaları birleştirilerek kare hücre içerisinde dört üçgen oluşturmak mümkündür (Şekil 7.4). Bu üçgenlerin herbiri birer üçgen prizmanın tavanını oluşturur. Daha önce verilmiş olan (6.16), (6.17) ve (6.18) no'lu eşitliklerle her bir üçgenin alanını hesaplamak mümkündür. Bu dört üçgenin alanlarının toplamı, toplam hücre alanını verir. Grid içindeki bütün hücrelerin alanlarının toplamı ise "toplam yüzey alanını (A_T)" tanımlar.



$a = z_{(i,\,j)}$; $b = z_{(i+s,\,j)}$; $c = z_{(i+s,\,j+s)}$; $d = z_{(i,\,j+s)}$; $s = 1$

$e = (a + b + c + d) / 4$

Şekil 7.4 :sxs boyutundaki kare grid hücresi içinde oluşturulan üçgenlerin kesme yönündeki görünür eğim açıları (θ^*)

Şekil 7.4' e dikkat edilirse, kesme vektörünün yönü sağa doğrudur. Buradaki kare hücre süreksizliğin alt bloğuymuş gibi düşünülürse, süreksizliğin üst bloğu alt bloğa nazaran sağa doğru hareket etmektedir. Laboratuvar direkt kesme deneyleri ile de uyumlu olan bu konfigürasyon içinde hareket "sağa doğru kesme" olarak adlandırılmıştır. Kesme yönünde, görünür eğim yönü kesme vektörüne karşı olan (kesme vektörüne karşı koyan) üçgenler pozitif, kesme vektörünün yönüne doğru olan üçgenler ise negatif eğimli üçgenler olarak ele alınmıştır. Yukarıda verilmiş olan (I) ve (II) no' lu varsayımlara bağlı olarak, değme alanları pozitif eğimli ve/veya kesme vektörüne paralel olan yatay konumlu üçgenler üzerinde gelişebilecektir. Negatif eğimli üçgenler üzerinde ise, herhangi bir değme gelişmeyecektir.

Üçgenlerin kesme yönündeki görünür eğimleri ($\tan\theta^*$),

A üçgeni için;

$$\tan\theta^* = \frac{(b-a)}{s} \qquad (7.2)$$

B üçgeni için;

$$\tan\theta^* = \frac{\left(\frac{b+c}{2} - e\right)}{s/2} \quad \Rightarrow \quad \tan\theta^* = \frac{2\left(\frac{b+c}{2} - e\right)}{s} \tag{7.3}$$

C üçgeni için;

$$\tan\theta^* = \frac{(c-d)}{s} \tag{7.4}$$

D üçgeni için;

$$\tan\theta^* = \frac{\left(e - \frac{a+d}{2}\right)}{s/2} \quad \Rightarrow \quad \tan\theta^* = \frac{2\left(e - \frac{a+d}{2}\right)}{s} \tag{7.5}$$

bağıntıları ile hesaplanır. Dikkat edilecek olursa bu bağıntılar, kesme yönündeki görünür eğimler dört üçgen için de sanki hep kesme vektörüne karşıymış gibi yazılmıştır. Oysa Şekil 7.4' den de açıkca görüleceği üzere, kesme yönünde sadece A ve B üçgenlerinin görünür eğimleri kesme vektörüne karşı olup, C ve D üçgenlerinin görünür eğimleri ise kesme vektörünün yönüne doğrudur. Dolayısıyla yukarıdaki bağıntılar hesaplandığında bulunan görünür eğim değerleri A ve B üçgenleri için pozitif (+), C ve D üçgenleri için negatif (-) işaretli olacaktır. Anlaşılacağı üzere bu bağıntılar algoritmik olup, yazımında işaret kontrolü esas alınmıştır. Şekil 7.4' te görülen temsili kare hücre içinde, görünür eğimi ($\tan\theta^*$) pozitif işaretli olan A ve B üçgenleri üzerinde, I ve II no' lu varsayımlara paralel olarak değme gelişebilecek, diğer taraftan görünür eğimi ($\tan\theta^*$) negatif işaretli olan C ve D üçgenleri üzerinde değme gelişemeyecektir. A ve B üçgenlerinin alanlarının toplamı hücre içindeki "olası değme alanının" sayısal değerini tanımlayacaktır.

Sayısallaştırılmış süreksizlik yüzeyi verilerinden oluşturulmuş üniform aralıklı kare grid içinde bulunan her bir kare hücre için bu üçgenleştirme işlemi yapılır ve anlatılan algoritma uygulanırsa, kesme yönünde her bir hücre içindeki kesme vektörüne karşı görünür eğimli olan alanlar bulunmuş olur. Bu alanların tüm süreksizlik yüzeyi genelindeki toplamı, "kesme yönündeki maksimum olası değme alanını (A_0)" verir. Maksimum olası değme alanı, yüzey üzerinde 0^0 ile θ^*_{max} arasında değişen görünür eğim açıları (θ^*) ile sadece kesme vektörüne karşı eğimli olan alanların toplamını ifade eder.

III no' lu varsayım kapsamında, seçilecek herhangi bir görünür eşik eğim açısı (θ^*_{cr}) ve bu açıdan daha yüksek olan diğer tüm görünür eğim açıları ile tanımlı olup, kesme yönünde sadece kesme vektörüne doğru eğimli olan alanların toplamı ise "toplam potansiyel değme alanını (A_θ^*)" verecektir. Bu alan görünür eşik eğim açısına (θ^*_{cr}) bağlı olarak, kesme sırasında üzerinde değme oluşması olası tüm alanların toplamını ifade etmektedir. Daha öncede ifade edildiği gibi, görünür eşik eğim açısı kesme işlemi sırasında uygulanılan farklı normal yükler için farklı değerler alabilecektir. Bu nedenle, toplam potansiyel değme alanının (A_θ^*) değeri doğal olarak normal yük miktarına da bağlı olacaktır.

S25 ve S27 no'lu süreksizlik örneklerinin alt blok yüzeylerine (S25A ve S27A) ait sayısallaştırılmış yüzey verilerine bu yeni yaklaşım uygulanmış, 0^0 ile θ^*_{max} arasında 2.86 derecelik artışlar ile değerler alan farklı görünür eğim açıları (θ^*) için toplam potansiyel değme alanları (A_θ^*) hesap edilmiştir (Tablo 7.1). Toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) ile karşılık gelen görünür eğim açısı (θ^*) arasındaki ilişki Şekil 7.5' de sunulmuştur. Bu grafiklerdeki herhangi bir A_θ^* değeri; bu değere karşılık gelen görünür eşik eğim açısı (θ^*_{cr}) ve bu açıdan daha yüksek olan diğer tüm görünür eğim açıları ile tanımlı olup, kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı görünür eğimli olan alanların toplamını (toplam potansiyel değme alanını) ifade etmektedir. $\theta^* = 0$ için hesaplanan A_θ^* değeri ise, sıfır derece ve bunun üzerindeki diğer tüm görünür eğim açıları ile kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı eğimli olan bütün bölgelerin alanlarının toplamını tanımlamaktadır. Dolayısıyla, $\theta^* = 0$ için hesaplanılan A_θ^*, aynı zamanda kesme yönündeki maksimum olası değme alanına (A_0) eşittir ($\theta^* = 0$ için $A_\theta^* = A_0$). S25A ve S27A yüzeyleri için kesme yönündeki maksimum olası değme alanı (A_0), sırasıyla 2083,152 mm^2 ve 2284,120 mm^2 olup, bu yüzeyler üzerinde kesme yönünde karşılaşılacak en büyük görünür eğim açısı (θ^*_{max}) değerleri ise, sırasıyla 48,62 ve 51,48 derecedir.

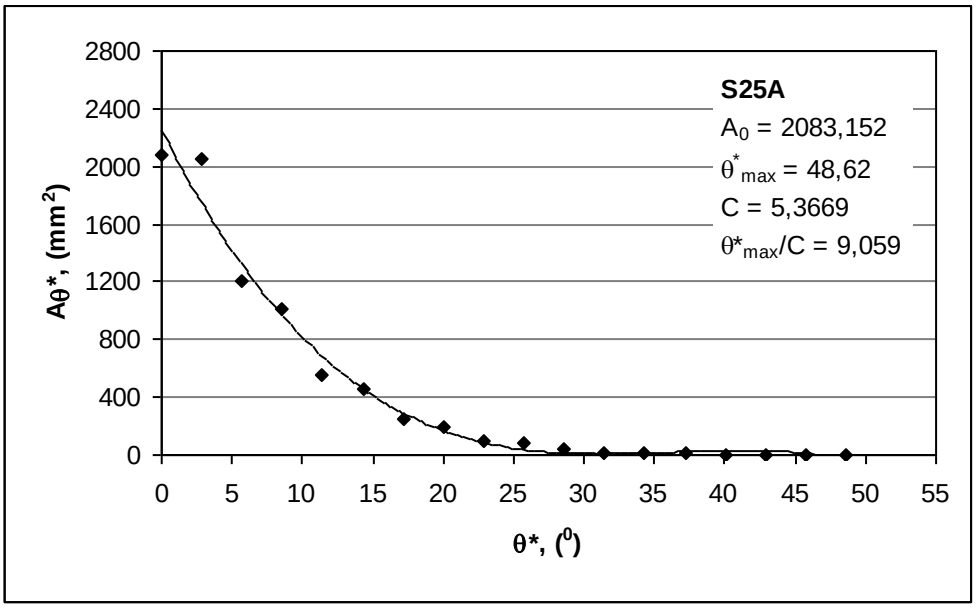
Tablo 7.1 : S25 ve S27 no'lu süreksizlik örneklerinin alt blok yüzeyleri (S25A ve S27A) için hesaplanan toplam potansiyel değme alanları (A_θ^*)

θ^* (^{0})	A_θ^* (mm^2)	
	S25A	**S27A**
0.00	2083.152	2284.120
2.86	2053.080	2267.342
5.72	1202.635	1581.379
8.58	1006.653	1387.189
11.44	561.242	948.810
14.30	463.159	832.341
17.16	243.472	538.206
20.02	195.258	465.324
22.88	99.597	276.483
25.74	80.913	233.836
28.60	43.745	132.375
31.46	19.837	58.046
34.32	16.764	53.145
37.18	7.770	23.392
40.04	4.456	12.926
42.90	3.068	6.757
45.76	1.627	2.399
48.62	0.846	1.642
51.48	0.000	0.856
54.34	0.000	0.000

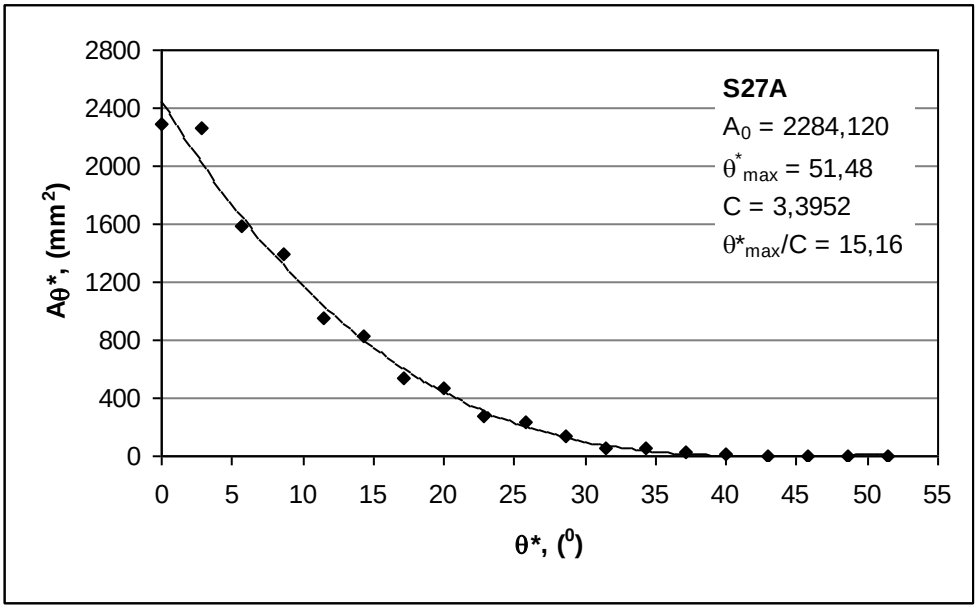
A_θ^* - θ^* ilişkisindeki nokta dağılımının şekli konkav olup, bu ilişkiyi en iyi kübik regresyon modeli tanımlamaktadır. "$Y=b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3$" denklemi ile ifade edilen kübik regresyon eğrisinin konkavlık derecesi bu denklemdeki "b_2" sabiti tarafından denetlenmektedir ve daha önce verilen (7.1) no'lu eşitlikteki şekil parametresine (C) karşılık gelmektedir. Daha öncede ifade edildiği gibi, eğrinin konkavlığı arttıkça C parametresi de artmaktadır. Yüksek konkavlık, en büyük değerle karşılaştırıldığında, daha düşük görünür eğim açısı (θ^*) değerine sahip olan daha çok alan olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla daha yüksek C değerleri daha düşük pürüzlülük derecesine sahip yüzeyleri tanımlamaktadır.

S25A ve S27A yüzeyleri için C (şekil parametresi) değerleri, sırasıyla 5.3669 ve 3.3952 olarak bulunmuştur. Şekil 7.5a ve b' de sunulan A_{θ}^{*}-θ^{*} grafikleri birbiri ile karşılaştırıldığında, daha yüksek C değerine sahip S25A yüzeyine ait regresyon eğrisinin, daha düşük C değerine sahip S27A yüzeyinin regresyon eğrisine nazaran daha konkav olduğu görülmektedir.

a

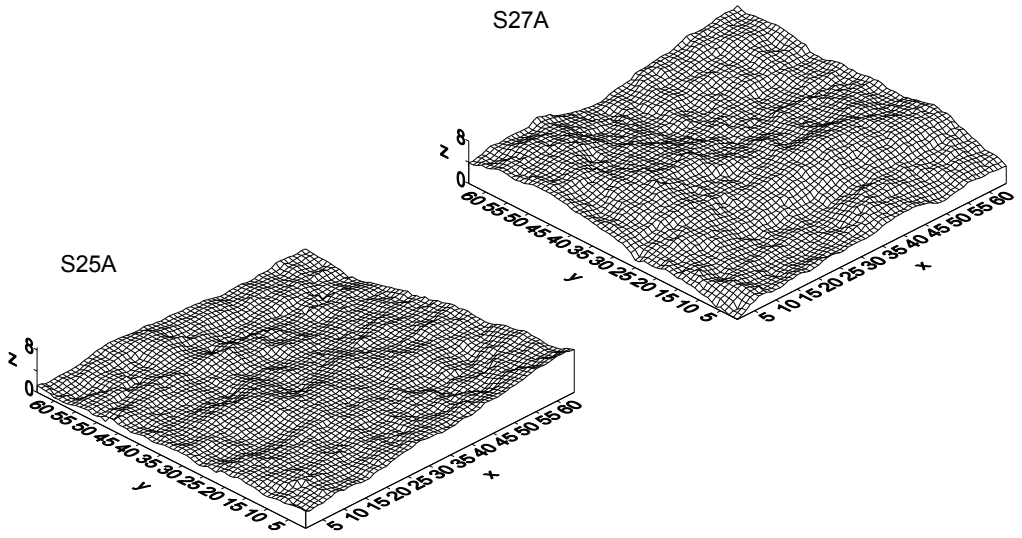


b



Şekil 7.5 : Toplam potansiyel değme alanı (A_{θ}^{*}) ile görünür eğim açısı (θ^{*}) arasındaki ilişki a) S25A yüzeyi için b) S27A yüzeyi için

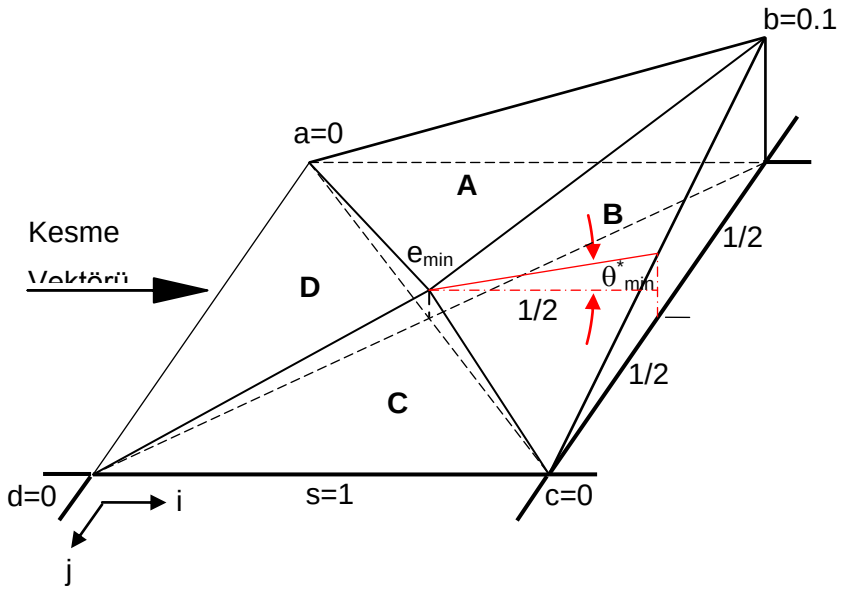
Daha yüksek C değerleri daha az pürüzlü yüzeyleri tanımladığından, S27A yüzeyinin S25A yüzeyinden daha pürüzlü olması beklenecektir. Bu durumu fraktal yöntemler ile sınamak mümkündür. Güç spektrum yoğunluğu analizi ve üçgen prizma yüzey alanı yöntemleri ile hesaplanan fraktal boyutlar (D_{psd} ve D_{tpsam}); S25A yüzeyi için sırasıyla 2.177 ve 2.00465 olup, S27A yüzeyi için 2.346 ve 2.00618'dir. Her iki yöntem ile de S27A yüzeyi için bulunan fraktal boyut değerleri, S25A yüzeyi için bulunan değerlerden daha yüksektir. Yüzey pürüzlülüğü ile fraktal boyut doğru orantılı olduğundan, S27A yüzeyinin S25A yüzeyinden daha pürüzlü olduğu söylenebilecektir. Bu yüzeylere ait olan 3 boyutlu sayısal görünümler fiziksel olarak karşılaştırıldığında S27A yüzeyi, S25A yüzeyine oranla daha pürüzlü bir geometri sergilemektedir (Şekil 7.6).



Şekil 7.6 : S25A ve S27A yüzeylerinin 3-boyutlu sayısal görünümleri (S25A ve S27A sırasıyla S25 ve S27 no'lu süreksizlik örneklerinin alt blok yüzeyleridir.)

Bu yeni yaklaşımın uygulanması sırasında, yüzey üzerinde değeri sıfırdan büyük olan hesaplanabilir en küçük görünür eğim açısı (θ^*_{min}) değeri, yüzeyin sayısallaştırılmasında kullanılan çözünürlük değerlerine bağlıdır. Bu çalışmada, süreksizlik yüzeylerinin geliştirilen yüzey tarama cihazı ile sayısallaştırılması sırasında, yatay düzlemdeki (x-y) veri örnekleme aralığı (Δ) 1 mm seçilmiştir. Bu değer aynı zamanda, sayısallaştırılmış yüzeye ait kare grid içinde tanımlanabilecek en küçük kare hücrenin kenar uzunluğunu (s) belirlemektedir. Ölçüm cihazının tasarımına bağlı olarak, yüzey üzerindeki yükselti değerlerinin ölçümündeki duyarlık 1/10 mm' dir. Bu değer ise, yüzey üzerinde okunabilecek en küçük yükseltiyi tanımlamaktadır.

Kenar uzunluğu (s) sayısallaştırma sırasında kullanılan yatay düzlemdeki (x-y) veri örnekleme aralığına (Δ) eşit ve 1 mm, köşe noktalarından birinin yükselti değeri ölçüm cihazının düşey düzlemdeki (z) duyarlığına eşit ve 0.1 mm, ancak diğer üç köşe noktasının yükselti değerleri ise sıfır olan bir kare hücre düşünülsün (Şekil 7.7).



$a=z_{(i,\,j)}=0$; $b=z_{(i+s,\,j)}=0.1$; $c=z_{(i+s,\,j+s)}=0$; $d=z_{(i,\,j+s)}=0$

$e = (a + b + c + d) / 4 \Rightarrow e = e_{min} = 0.025$; $s = 1$

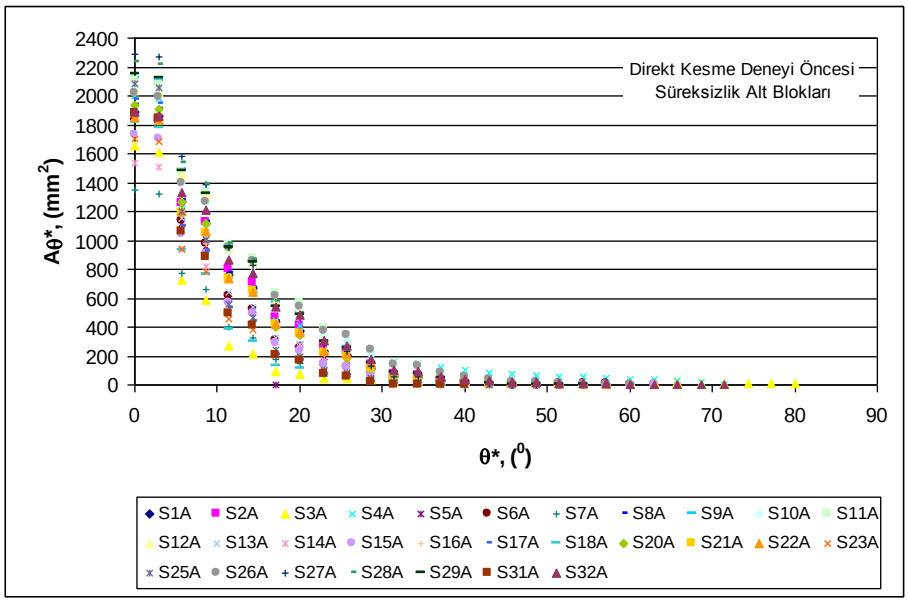
Şekil 7.7 :Değeri sıfırdan büyük olan hesaplanabilir en küçük görünür eğim açısını (θ^*_{min}) tanımlayan hücre

Komşu köşelerdeki yükselti değerlerinin birbirleri ve geometrik merkezde yer alan ortalama yükselti değeri ile bağlanılması suretiyle kare hücre içinde A, B, C ve D üçgenleri oluşturulsun. Bu durumda kare hücrenin geometrik merkezinde yer alan ortalama yükseklik değeri (e), sıfırdan büyük olan en küçük değerini alacaktır ve e_{min} = 0.025 mm olacaktır.

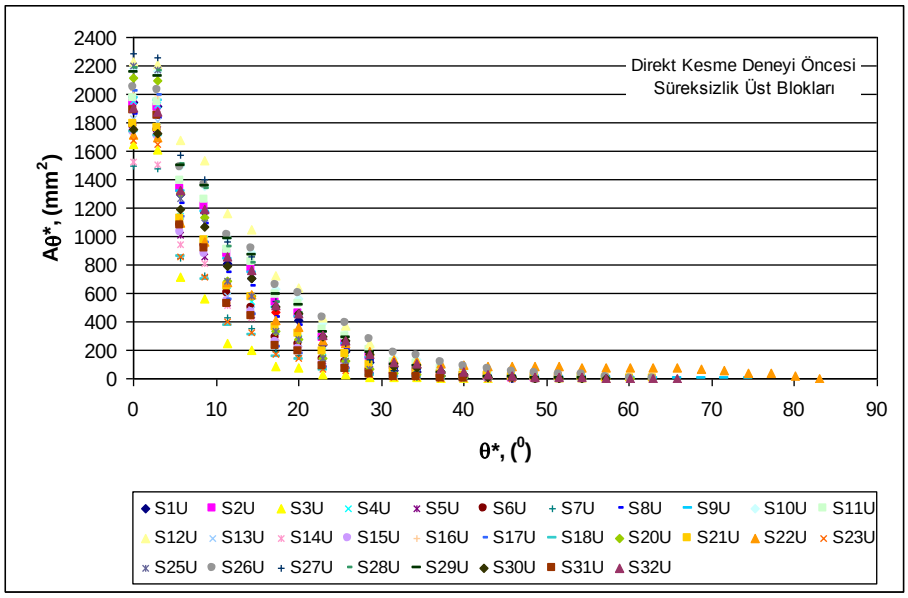
Kesme vektörü yönünde, A, B, C ve D üçgenlerine ait eğim açıları daha önce verilen (7.2), (7.3), (7.4) ve (7.5) no'lu bağıntılar yardımı ile sırasıyla 5.71^0, 2.86^0, 0^0 ve 2.86^0 olarak hesaplanır. Bu açı değerleri arasında 2.86 derece, sayısallaştırma sırasında kullanılan çözünürlüğe bağlı olarak, kare hücre içinde dolayısıyla yüzey üzerinde değeri sıfırdan büyük olan hesaplanabilir en küçük görününür eğim açısını (θ^*_{min}) tanımlamaktadır ($\theta^*_{min}=2.86^0$). Hesaplanan değerler, kesme vektörü yönünde A, B ve C üçgenleri için görünür (θ^*), D üçgeni için gerçek (θ) eğim açılarıdır.

Araştırmada kullanılan bütün süreksizlik örneklerinin alt ve üst bloklarına ait kesme deneyleri öncesinde sayısallaştırılmış yüzey verilerine bu yeni yaklaşım uygulanmış, 2.86 derecelik artışlar ile 0^0 ile θ^*_{max} arasında değerler alan farklı görünür eğim açıları (θ^*) için toplam potansiyel değme alanları (A_θ^*) hesap edilmiştir. Toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) - görünür eğim açısı (θ^*) ilişkileri, alt blok yüzeyleri için Şekil 7.8a' da, üst blok yüzeyleri içinse Şekil 7.8b' de sunulmuştur.

a)



b)



Şekil 7.8 : Direkt kesme deneyleri öncesi sayısallaştırılmış yüzeyler için, toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) - görünür eğim açısı (θ^*) ilişkileri
a) süreksizlik alt blokları için, b) süreksizlik üst blokları için

Bu yüzeyler için, kesme yönündeki; maksimum olası değme alanı (A_0), en büyük görünür eğim açısı (θ^*_{max}) ve şekil parametresi (C) ile θ^*_{max}/C oranı değerleri Tablo 7.2' de sıralanmıştır.

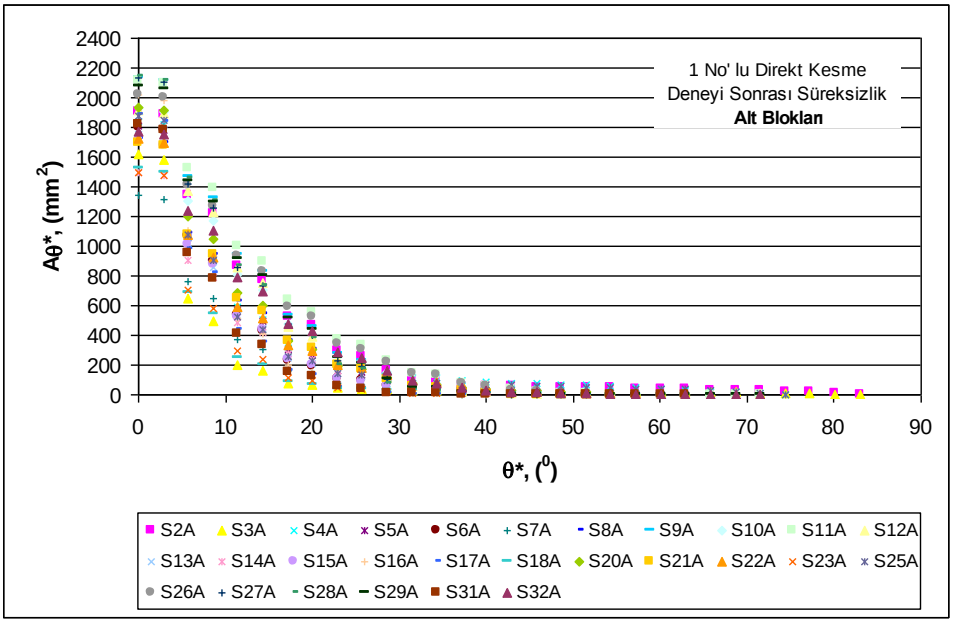
Tablo 7.2 : Direkt kesme deneyleri öncesi sayısallaştırılmış süreksizlik alt ve üst blokları için hesaplanan kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler

Direkt Kesme Deneyleri Öncesi								
Örnek No	Süreksizlik Alt Bloğu				Süreksizlik Üst Bloğu			
	A_0	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C	A_0	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C
	(mm^2)	(^{0})	[0]	(^{0})	(mm^2)	(^{0})	[0]	(^{0})
S1	1883.734	51.48	2.9264	17.592	1943.763	45.76	2.8378	16.125
S2	1859.408	48.62	2.5995	18.704	1932.409	48.62	2.382	20.411
S3	1652.410	80.08	2.5111	31.890	1644.899	40.04	6.8707	5.828
S4	1998.838	68.64	2.878	23.850	1951.375	57.20	3.8713	14.775
S5	1876.369	51.48	3.9862	12.915	1782.816	54.34	3.9741	13.674
S6	1843.814	60.06	3.4729	17.294	1767.412	48.62	3.729	13.038
S7	1351.321	42.90	3.4521	12.427	1498.443	51.48	3.5696	14.422
S8	1939.052	54.34	3.1243	17.393	1855.285	45.76	3.0102	15.202
S9	2122.240	54.34	2.7721	19.602	1970.602	71.50	2.4963	28.642
S10	2063.625	57.20	2.7713	20.640	2178.839	54.34	2.7745	19.586
S11	2098.068	51.48	2.5237	20.399	1968.767	54.34	2.3361	23.261
S12	2035.798	60.06	2.5095	23.933	2230.330	54.34	2.0135	26.988
S13	1880.639	51.48	3.8242	13.462	1831.008	45.76	4.2327	10.811
S14	1531.675	62.92	2.5351	24.820	1526.707	48.62	3.224	15.081
S15	1728.474	60.06	3.2424	18.523	1736.489	40.04	4.0867	9.798
S16	2100.034	51.48	5.3764	9.575	2027.320	54.34	4.8742	11.148
S17	1971.737	40.04	5.5313	7.239	2021.910	57.20	4.598	12.440
S18	1811.604	40.04	6.394	6.262	1735.528	57.20	4.3017	13.297
S20	1934.491	54.34	3.3129	16.403	2117.972	57.20	4.2155	13.569
S21	1869.856	48.62	3.1447	15.461	1792.125	60.06	3.009	19.960
S22	1854.593	62.92	2.8159	22.345	1709.756	80.08	2.0414	39.228
S23	1703.471	57.20	3.7957	15.070	1680.388	42.90	5.2699	8.141
S25	2083.152	48.62	5.3669	9.059	2200.045	54.34	4.7179	11.518
S26	2017.258	57.20	2.3578	24.260	2046.100	60.06	2.2134	27.135
S27	2284.120	51.48	3.3952	15.163	2282.306	48.62	3.2132	15.131
S28	2235.580	57.20	3.0662	18.655	2184.304	51.48	3.1934	16.121
S29	2144.868	51.48	2.9045	17.724	2153.808	51.48	2.7118	18.984
S30	-	-	-	-	1750.090	54.34	2.1541	25.226
S31	1877.191	37.18	5.1581	7.208	1883.575	37.18	4.9461	7.517
S32	1885.418	68.64	2.2275	30.815	1901.749	62.92	2.4194	26.006

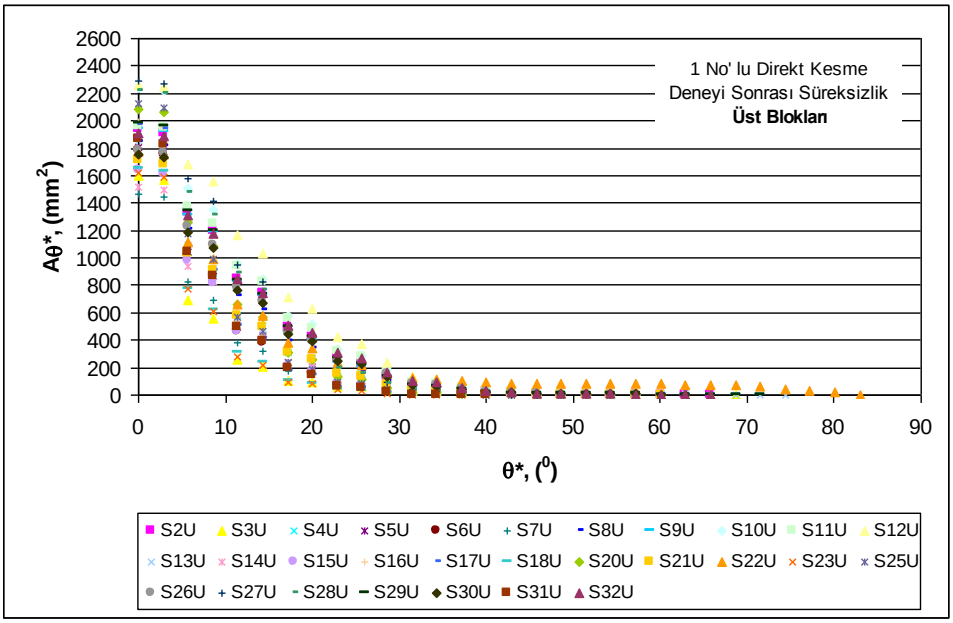
Sırasıyla 300, 452 ve 756 kPa sabit normal gerilme değerleri altında üç kez kesilen alt ve üst blok yüzeylerinin, her bir kesme işleminin hemen ardından tekrar

sayısallaştırılmış olması, bu yüzeylere ait sayısal parametrelerin kesme işlemlerinin ardından tekrar hesaplanmasına ve kesilmeye bağlı değişimlerinin izlenmesine olanak tanımıştır. 300, 452 ve 756 kPa' lık sabit normal gerilme değerleri altında gerçekleştirilen 1, 2 ve 3 no'lu direkt kesme deneyleri sonrasında, toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) - görünür eğim açısı (θ^*) ilişkileri sırasıyla Şekil 7.9, Şekil 7.10 ve Şekil 7.11' de sunulmuştur.

a)

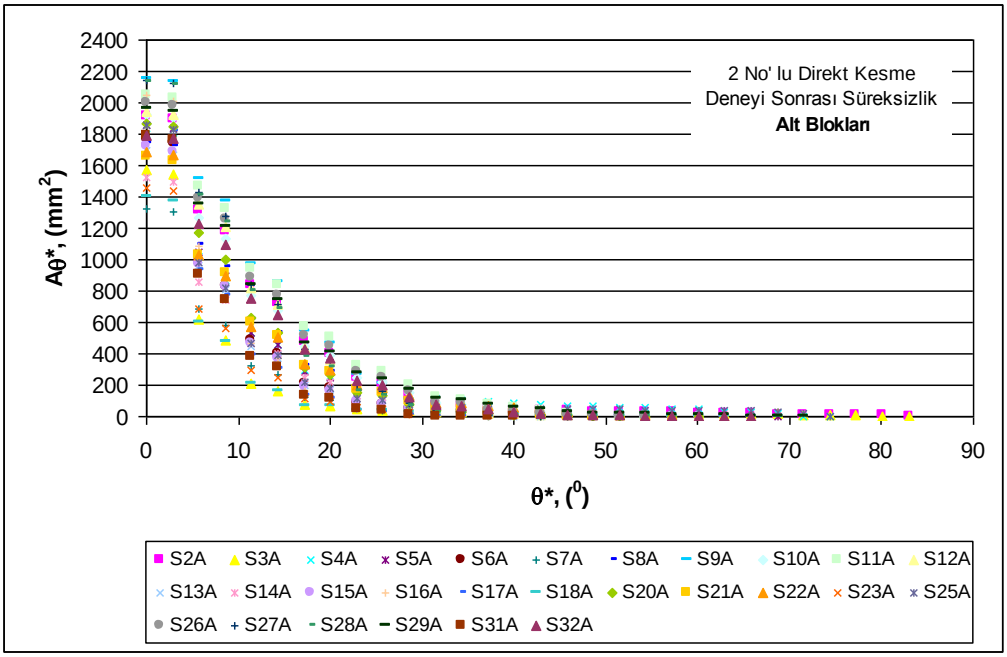


b)

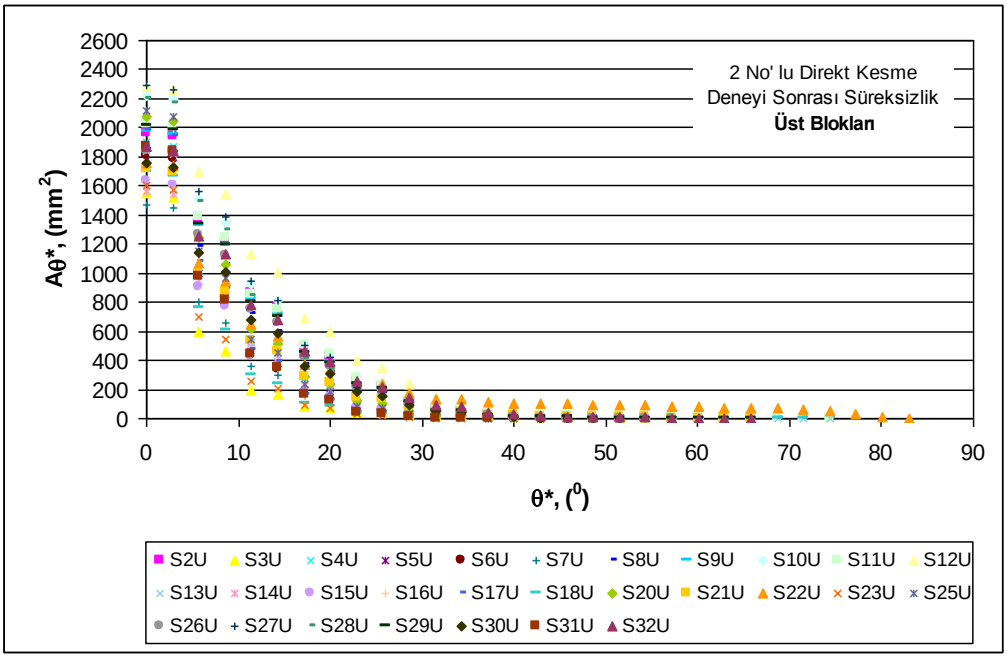


Şekil 7.9 : 1 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış yüzeyler için, toplam potansiyel değme alanı (Aθ*) - görünür eğim açısı (θ*) ilişkileri a) süreksizlik alt blokları için b) süreksizlik üst blokları için

a)

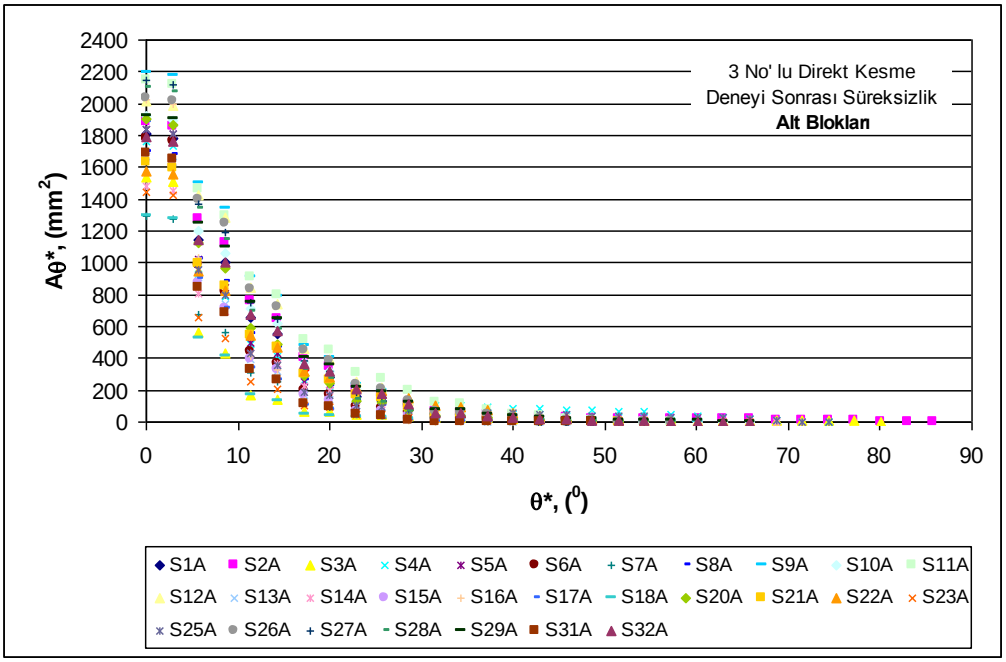


b)

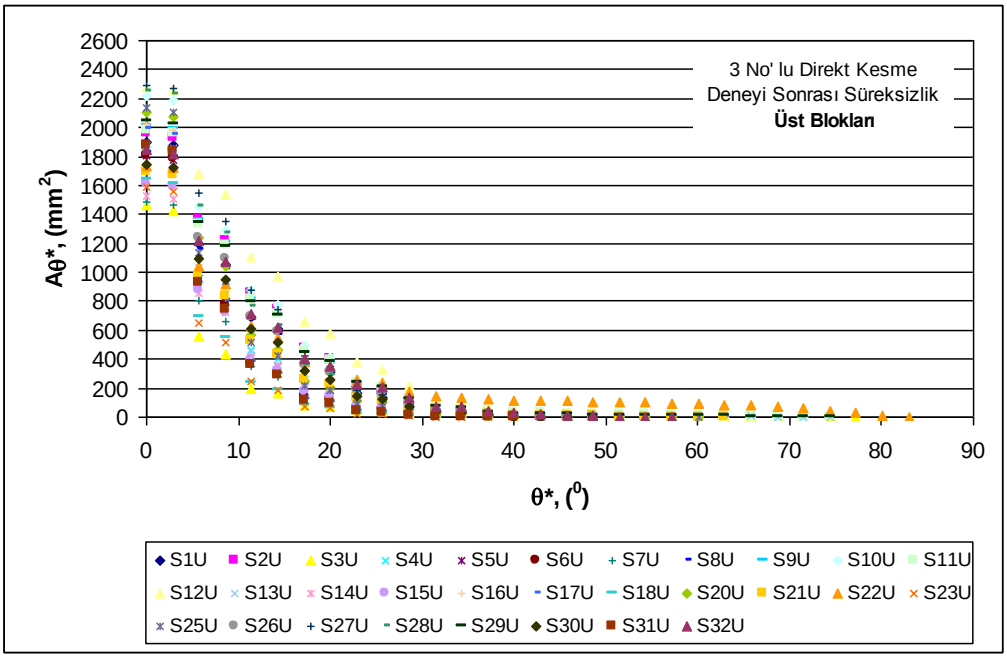


Şekil 7.10 : 2 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış yüzeyler için, toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) - görünür eğim açısı (θ^*) ilişkileri a) süreksizlik alt blokları için b) süreksizlik üst blokları için

a)



b)



Şekil 7.11 : 3 no' lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış yüzeyler için, toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) - görünür eğim açısı (θ^*) ilişkileri a) süreksizlik alt blokları için b) süreksizlik üst blokları için

Benzer şekilde, Tablo 7.3, Tablo 7.4 ve Tablo 7.5' de, sırasıyla 1, 2 ve 3 no'lu direkt kesme deneyleri sonrasında, kesilen yüzeyler için hesaplanan, kesme yönündeki; maksimum olası değme alanı (A_0), en büyük görünür eğim açısı (θ^*_{max}) ve şekil parametresi (C) ile θ^*_{max}/C oranı değerleri verilmiştir.

Tablo 7.3 : 1 no'lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış süreksizlik alt ve üst blokları için hesaplanan kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler

1 No'lu Direkt Kesme Deneyleri Sonrası								
Örnek No	Süreksizlik Alt Bloğu				Süreksizlik Üst Bloğu			
	A_0	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C	A_0	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C
	(mm^2)	(^{0})	[0]	(^{0})	(mm^2)	(^{0})	[0]	(^{0})
S2	1906.575	80.08	2.1401	37.419	1935.130	62.92	2.5828	24.361
S3	1620.160	80.08	2.4885	32.180	1597.910	65.78	3.4051	19.318
S4	1841.663	71.50	2.8884	24.754	1876.651	57.20	3.7776	15.142
S5	1812.564	54.34	3.7340	14.553	1803.698	48.62	4.5422	10.704
S6	1803.774	57.20	3.9576	14.453	1788.936	37.18	5.0101	7.421
S7	1346.869	40.04	3.6568	10.949	1467.190	40.04	4.2597	9.400
S8	1719.144	45.76	3.2137	14.239	1843.158	51.48	3.1203	16.498
S9	2131.208	54.34	2.9049	18.706	1943.405	68.64	2.6273	26.126
S10	1929.410	60.06	2.7782	21.618	2241.646	57.20	3.1423	18.203
S11	2116.382	68.64	2.3619	29.061	1963.632	51.48	2.3087	22.298
S12	1913.047	51.48	2.5747	19.995	2261.003	54.34	2.1506	25.267
S13	1751.151	54.34	3.8287	14.193	1855.245	71.50	3.1002	23.063
S14	1493.791	54.34	2.9909	18.168	1517.273	51.48	3.1458	16.365
S15	1702.274	54.34	3.7223	14.599	1641.878	42.90	4.1819	10.258
S16	2020.909	45.76	5.7171	8.004	1987.514	45.76	5.4564	8.386
S17	1883.889	34.32	6.0064	5.714	1969.132	60.06	4.4124	13.612
S18	1528.298	54.34	4.5254	12.008	1653.610	37.18	6.6233	5.614
S20	1937.586	60.06	3.4482	17.418	2087.384	57.20	4.2254	13.537
S21	1695.036	51.48	2.9728	17.317	1711.279	57.20	3.2098	17.820
S22	1728.134	60.06	3.0628	19.610	1771.241	80.08	2.2195	36.080
S23	1497.021	60.06	3.6067	16.652	1621.011	45.76	5.6756	8.063
S25	1874.234	71.50	3.1406	22.766	2121.446	51.48	5.3453	9.631
S26	2018.212	48.62	2.6268	18.509	1786.285	54.34	2.5022	21.717
S27	2129.696	54.34	3.4032	15.967	2295.290	42.90	3.0485	14.072
S28	2139.711	45.76	3.2823	13.941	2221.751	42.90	3.4003	12.617
S29	2075.283	68.64	2.7546	24.918	1982.328	68.64	2.6176	26.222
S30	-	-	-	-	1753.825	60.06	2.3987	25.039
S31	1818.551	60.06	4.2201	14.232	1868.489	37.18	5.2915	7.026
S32	1773.346	68.64	2.1525	31.889	1910.746	62.92	2.4613	25.564

Tablo 7.4 : 2 no'lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış süreksizlik alt ve üst blokları için hesaplanan kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler

2 No'lu Direkt Kesme Deneyleri Sonrası								
Örnek No	Süreksizlik Alt Bloğu				Süreksizlik Üst Bloğu			
	A_0	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C	A_0	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C
	(mm^2)	(^{0})	[0]	(^{0})	(mm^2)	(^{0})	[0]	(^{0})
S2	1913.692	80.08	2.2482	35.620	1965.210	57.20	2.7273	20.973
S3	1574.950	80.08	2.4103	33.224	1556.609	62.92	3.7246	16.893
S4	1799.373	71.50	2.8714	24.901	1903.217	57.20	4.1038	13.938
S5	1860.219	65.78	3.2623	20.164	1779.995	48.62	4.7289	10.281
S6	1774.596	57.20	4.0090	14.268	1805.082	37.18	5.5864	6.655
S7	1327.573	42.90	4.0574	10.573	1470.859	40.04	4.5064	8.885
S8	1744.312	45.76	3.4631	13.214	1851.698	45.76	3.3623	13.610
S9	2155.287	48.62	2.6270	18.508	1974.672	71.50	2.6333	27.152
S10	1922.104	57.20	2.9987	19.075	2219.354	57.20	3.3039	17.313
S11	2048.667	51.48	2.6621	19.338	2019.833	71.50	2.6123	27.371
S12	1945.020	54.34	2.9710	18.290	2283.703	54.34	2.4300	22.362
S13	1693.331	48.62	4.4042	11.039	1843.997	71.50	3.1963	22.370
S14	1523.473	54.34	3.2719	16.608	1560.744	54.34	3.3102	16.416
S15	1720.299	57.20	3.9035	14.654	1633.924	42.90	4.6178	9.290
S16	2044.771	62.92	4.4789	14.048	2026.097	45.76	6.3538	7.202
S17	1853.593	34.32	6.5234	5.261	1980.554	68.64	3.7977	18.074
S18	1403.801	65.78	3.0822	21.342	1691.898	68.64	3.3950	20.218
S20	1870.835	57.20	3.5874	15.945	2071.681	54.34	4.5473	11.950
S21	1653.758	45.76	3.3291	13.745	1720.041	62.92	3.1026	20.280
S22	1684.784	60.06	2.9955	20.050	1761.607	80.08	2.1860	36.633
S23	1459.857	60.06	3.4544	17.387	1606.440	37.18	7.0047	5.308
S25	1855.217	71.50	3.2000	22.344	2115.159	48.62	5.6715	8.573
S26	2000.967	51.48	2.7412	18.780	1839.621	54.34	2.8069	19.359
S27	2141.958	48.62	3.6143	13.452	2290.049	45.76	3.3606	13.617
S28	2136.858	54.34	3.8847	13.988	2196.939	40.04	3.2986	12.138
S29	1958.627	68.64	2.6150	26.249	2009.974	62.92	2.9943	21.013
S30	-	-	-	-	1755.821	48.62	3.0891	15.739
S31	1792.645	37.18	6.2654	5.934	1870.918	34.32	5.9075	5.810
S32	1794.638	62.92	2.5692	24.490	1869.855	62.92	2.6326	23.900

Tablo 7.5 : 3 no'lu direkt kesme deneyleri sonrası sayısallaştırılmış süreksizlik alt ve üst blokları için hesaplanan kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler

3 No'lu Direkt Kesme Deneyleri Sonrası								
Örnek No	Süreksizlik Alt Bloğu				Süreksizlik Üst Bloğu			
	A_0	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C	A_0	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C
	(mm^2)	(^{0})	[0]	(^{0})	(mm^2)	(^{0})	[0]	(^{0})
S1	1810.803	45.76	3.5761	12.796	1897.838	42.90	3.5560	12.064
S2	1887.818	82.94	2.2261	37.258	1957.571	51.48	2.7395	18.792
S3	1541.690	77.22	2.5222	30.616	1465.244	77.22	2.3451	32.928
S4	1762.927	71.50	2.9314	24.391	1850.327	54.34	4.4157	12.306
S5	1833.671	57.20	3.9475	14.490	1805.091	51.48	4.8684	10.574
S6	1785.024	54.34	4.4321	12.261	1804.163	45.76	5.7217	7.998
S7	1291.330	40.04	4.1153	9.730	1489.437	40.04	4.7559	8.419
S8	1700.923	45.76	3.8358	11.930	1827.611	51.48	3.3662	15.293
S9	2191.877	57.20	3.3988	16.829	2014.422	62.92	3.1052	20.263
S10	1923.697	62.92	3.1284	20.113	2213.781	68.64	3.1391	21.866
S11	2145.854	54.34	3.3168	16.383	1978.286	71.50	2.6815	26.664
S12	2016.171	62.92	2.9582	21.270	2275.371	57.20	2.6333	21.722
S13	1665.322	45.76	4.8748	9.387	1876.250	71.50	3.2999	21.667
S14	1477.977	68.64	2.4436	28.090	1531.985	54.34	3.5508	15.304
S15	1632.963	51.48	4.3549	11.821	1613.430	37.18	5.0835	7.314
S16	2021.888	40.04	7.0637	5.668	2018.018	48.62	6.3282	7.683
S17	1884.055	37.18	7.4508	4.990	1987.468	60.06	4.8601	12.358
S18	1298.327	57.20	3.7264	15.350	1642.788	40.04	7.0152	5.708
S20	1902.167	54.34	4.0766	13.330	2100.346	57.20	4.6806	12.221
S21	1627.286	48.62	3.4444	14.116	1693.999	60.06	3.2939	18.234
S22	1573.281	60.06	2.7579	21.777	1736.655	80.08	2.1656	36.978
S23	1445.119	62.92	3.2973	19.082	1591.396	37.18	7.1765	5.181
S25	1836.769	71.50	3.2387	22.077	2135.690	57.20	5.0649	11.293
S26	2037.947	54.34	3.2442	16.750	1857.611	45.76	3.3670	13.591
S27	2142.268	51.48	4.1593	12.377	2294.432	42.90	3.8031	11.280
S28	2095.587	54.34	4.2443	12.803	2253.962	42.90	4.5077	9.517
S29	1919.383	62.92	2.9975	20.991	2039.094	71.50	2.8096	25.448
S30	-	-	-	-	1743.967	45.76	3.5689	12.822
S31	1688.010	45.76	5.5663	8.221	1873.686	37.18	7.0318	5.287
S32	1793.643	62.92	2.8494	22.082	1845.342	54.34	3.0925	17.572

Sayısallaştırılmış bir süreksizlik yüzeyine ait olan gridin, tanımlanan herhangi bir yöndeki birinci türevi, o yönde yüzey üzerindeki görünür eğimlerin değişimini tanımlar. Bir süreksizlik yüzeyinin sayısallaştırılması sonucunda elde edilmiş bir gridin; i, j eksenlerindeki veri örnekleme noktası sayısı sırasıyla N_1 ve N_2 ise, $1 \leq i \leq N_1\text{-}1$ ve $1 \leq j \leq N_2\text{-}1$ olmak üzere, bu yüzeyin "i" ekseni yönündeki birinci türevi,

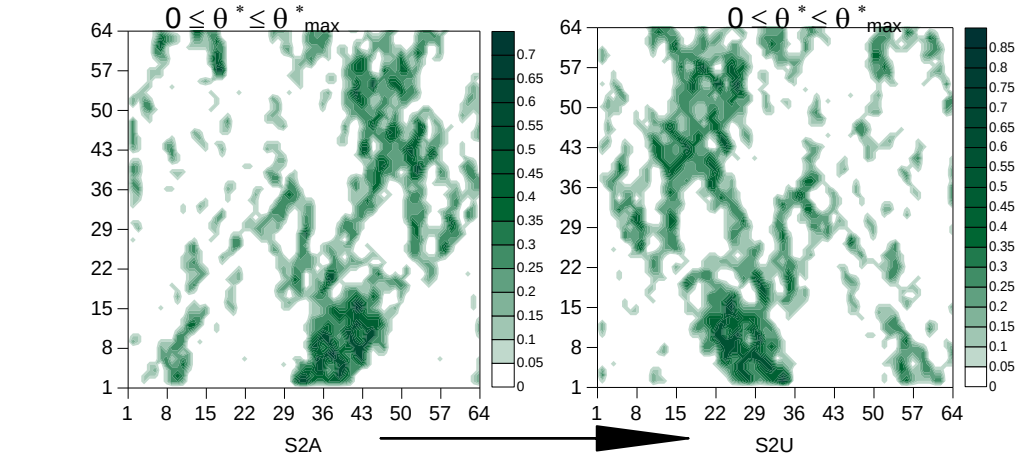
$$\frac{dz}{ds} = \tan\theta^*(i,j) = \frac{z(i+s,j) - z(i,j)}{s} \tag{7.6}$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada "z" yüzey üzerinde herhangi bir i, j noktasındaki yükselti değeridir. "s" ise, grid içinde aynı satır veya sütun üzerinde birbirine komşu olan herhangi iki düğüm noktası arasındaki yatay mesafe olup, veri örnekleme aralığına eşittir ($s=\Delta$). Bu ifade ile, "i" ekseni yönünde, grid üzerinde mevcut olan her bir satırda, ardışık noktalar arasındaki görünür eğim değerleri ($\tan\theta^*$) hesaplanır ve yeni bir grid elde edilir. Bu yeni grid, "i" ekseni yönünde görünür eğimlerin değişimini tanımlar.

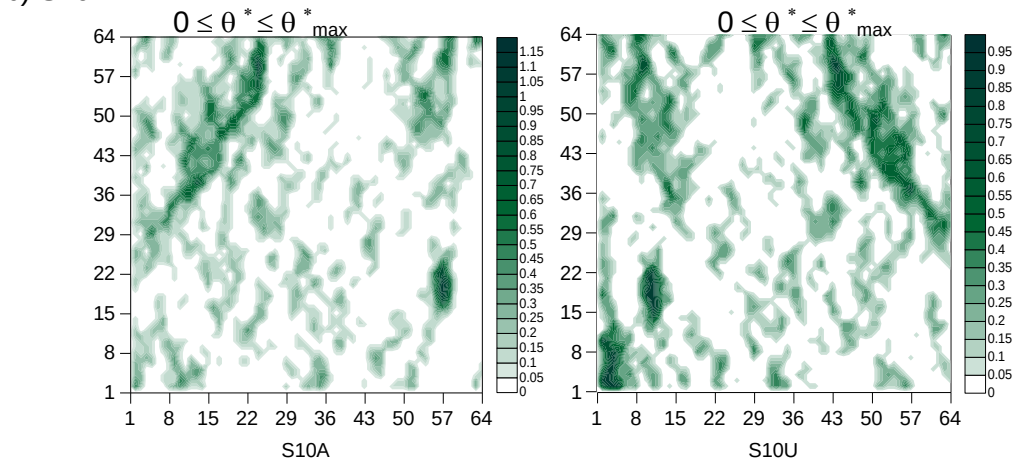
Şekil 7.4' e dikkat edilirse, kesme vektörünün doğrultusu, laboratuvar direkt kesme deneyleri ile de uyumlu bir konfigürasyon içinde, "i" eksenine paralel olup yönü sağa doğrudur. Hesaplanan görünür eğim değeri ($\tan\theta^*$) ; $z_{(i+s,\,j)} > z_{(i,\,j)}$ olması durumunda pozitif (+) işaretli, $z_{(i+s,\,j)} < z_{(i,\,j)}$ durumunda ise negatif (-) işaretli olacaktır. Pozitif işaretli görünür eğimler kesme yönünde kesme vektörüne bakacak, negatif işaretli olanlar ise kesme vektörünün yönüne doğru eğimli olacaktır.

Daha önce verilmiş olan (I) ve (II) no' lu varsayımlara bağlı olarak, değme alanları pozitif eğimli ve/veya kesme vektörüne paralel olan yatay konumlu bölgeler üzerinde gelişecek, negatif eğimli bölgeler üzerinde ise herhangi bir değme gelişmeyecektir. Birinci türevin alınması ile oluşturulan yeni gride sadece pozitif işaretli görünür eğimler yazılır ve haritalanırsa, yüzey üzerinde $0 \leq \theta^* \leq \theta^*_{max}$ aralığında değerler alan farklı görünür eğim açıları (θ^*) ile kesme yönünde sadece kesme vektörüne karşı görünür eğimli olan bütün bölgeler tanımlanmış olur. Bu işlemin, üzerinde direkt kesme deneyi yapılacak olan bir süreksizlik yüzeyinin sayısallaştırılmış verisine uygulanması; kesme işlemi sırasında, o yüzey üzerinde gelişebilecek "maksimum olası değme alanlarının" lokasyon, şekil ve uzamsal dağılımlarının daha henüz kesme işlemi öncesinde tahmin edilmesine olanak sağlayacaktır. S2 ve S10 no' lu süreksizlik örneklerinin hem alt, hem de üst blokları için hesaplanan maksimum olası değme alanları, sırasıyla Şekil 7.12a ve Şekil 7.12b' de sunulmuştur. Bu şekillerdeki yeşil bölgeler maksimum olası değme alanlarını tanımlamaktadır.

a) S2



b) S10

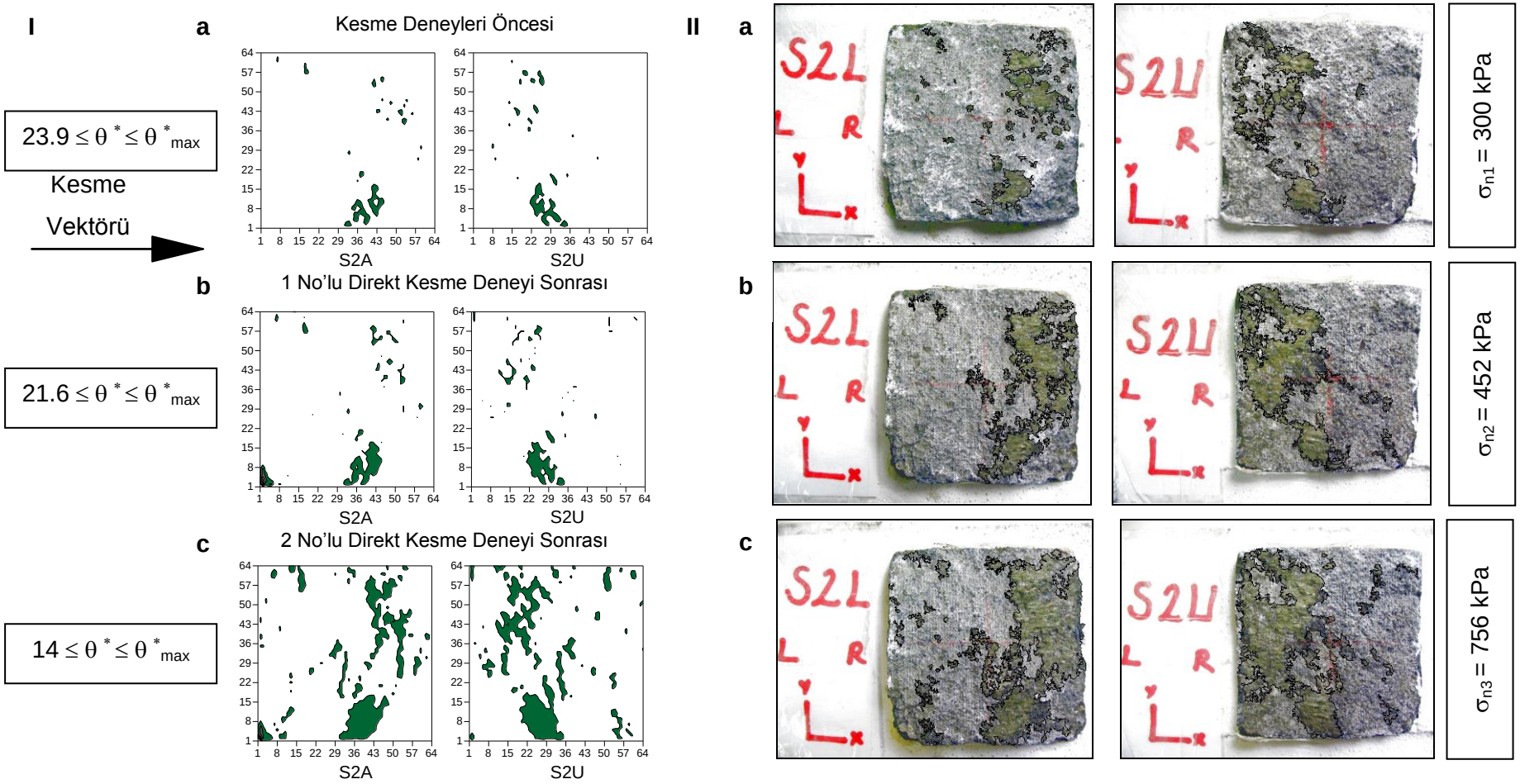


Şekil 7.12 :İki farklı yüzey için hesaplanan maksimum olası değme alanları
a) S2 no'lu süreksizlik örneğinin alt (S2A) ve üst (S2U) blokları için
b) S10 no'lu süreksizlik örneğinin alt (S10A) ve üst (S10U) blokları için

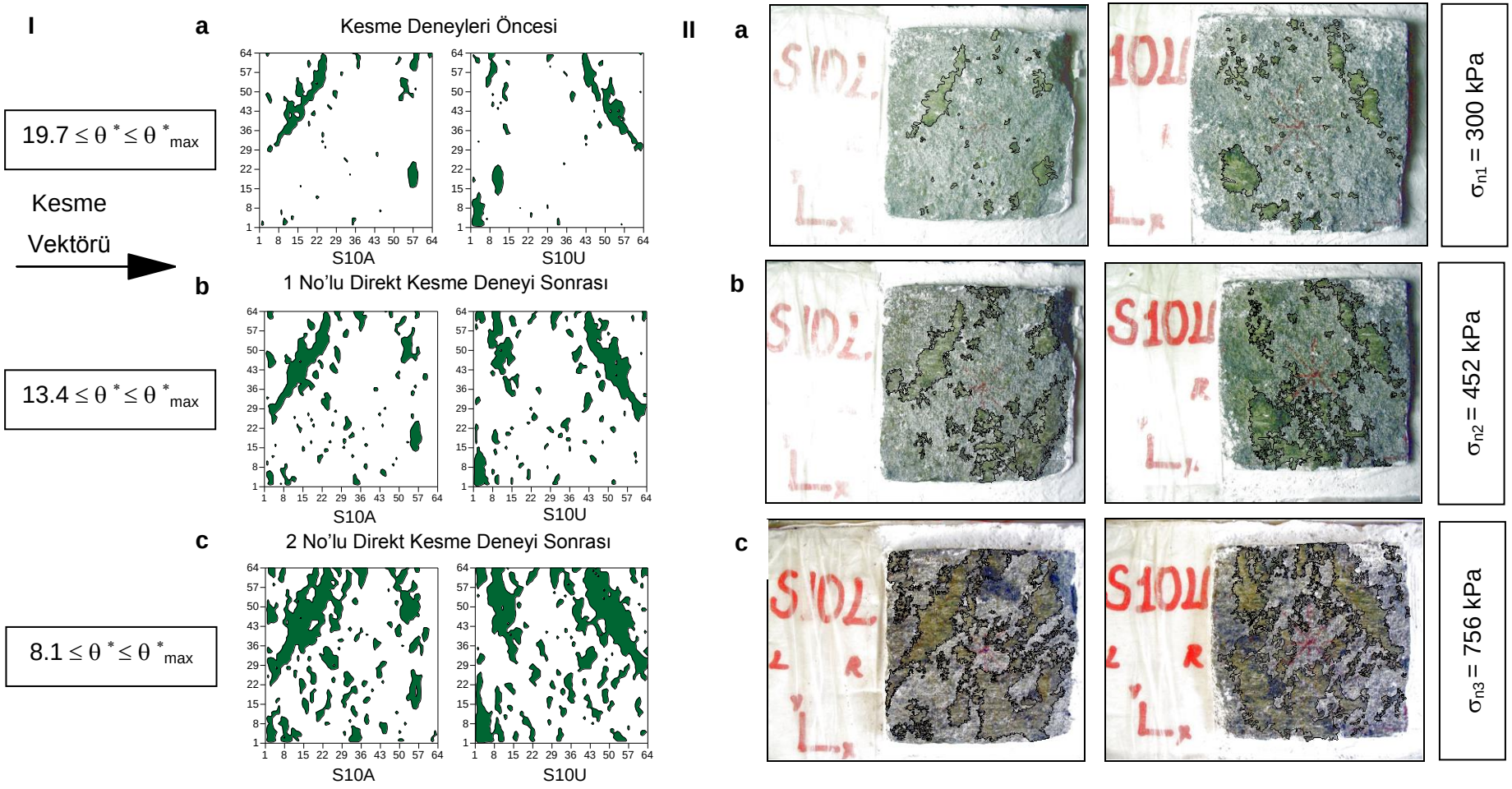
Benzer şekilde, III no' lu varsayıma koşut olarak, $0 \leq \theta^* \leq \theta^*_{max}$ aralığında bulunmak üzere, uygulanılan farklı normal yükler için farklı değerler alacak olan eşik bir görünür eğim açısı (θ^*_{cr}) ve bu açıdan daha yüksek olan diğer tüm görünür eğim açıları ile yüzey üzerinde kesme yönünde sadece kesme vektörüne bakan pozitif görünür eğimlerin haritalanması; kesme işlemi sırasında o yüzey üzerinde gelişebilecek "potansiyel değme alanlarının" lokasyon, şekil ve uzamsal dağılımlarının kesme işlemi öncesinde tahmin edilmesine olanak sağlayacaktır (Şekil 7.13).

Şekil 7.13(Ia), (Ib) ve (Ic)' de S2 no'lu süreksizlik örneğinin alt (S2A) ve üst (S2U) bloklarının, sırasıyla 300, 452 ve 756 kPa sabit normal gerilme değerleri altında kesilmelerinden önce hesaplanmış olan potansiyel değme alanı haritaları görülmektedir. Yeşil renkli bölgelerin gelişebilecek potansiyel değme alanlarını temsil ettiği bu haritalar hesaplanırken kullanılan eşik görünür eğim açısı (θ^*_{cr})

değerleri, izleyen kesme deneyi aşamalarında gerçekleşen dilatasyon açısı (ν) değerlerine eşit alınmış olup, sırasıyla 23.9, 21.6 ve 14 derecedir. Bu potansiyel değme alanı haritalarının sağ tarafında ise, izleyen kesme aşamasının hemen ardından çekilmiş olan alt ve üst blok yüzey fotografları yer almaktadır [Şekil 7.13(IIa), (IIb) ve (IIc)]. Bu fotoğraflarda sınırları siyah renkle çizilen yeşil renkli bölgeler ise kesme deneyleri sırasında üzerinde değmenin gerçekleştiği gerçek alanları göstermektedir. Kesme deneylerinin hemen öncesinde hesaplanan potansiyel değme alanı haritaları ile kesme deneylerinin sonrasında elde edilen bu gerçek yüzey görüntüleri karşılaştırıldığında, harita ve karşılık gelen fotoğraflardaki değme alanlarının; şekil, boyut ve uzamsal dağılımlarının birbirleri ile yaklaşık bir uyum içerisinde olduğu, ayrıca artan normal gerilme değerleri ile yüzey üzerinde daha da yaygınlaştığı izlenmektedir. Kesme deneylerinin öncesinde hesaplanan potansiyel değme alanı haritaları ile kesme deneylerinin sonrasında elde edilen yüzey görüntüleri arasındaki karşılaştırma S10 no'lu süreksizlik örneğinin alt ve üst blokları (S10A ve S10U) için de yapılmış ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 7.14).



Şekil 7.13 : S2 no'lu süreksizlik örneğinin alt (S2A) ve üst (S2U) blokları için hesaplanan potansiyel değme alanları (Ia, Ib, Ic) ile kesme sırasında gelişen gerçek değme alanlarının (IIa, IIb, IIc) karşılaştırılması



Şekil 7.14 :S10 no'lu süreksizlik örneğinin alt (S10A) ve üst (S10U) blokları için hesaplanan potansiyel değme alanları (Ia, Ib, Ic) ile kesme Sırasında gelişen gerçek değme alanlarının (IIa, IIb, IIc) karşılaştırılması

Daha öncede ifade edildiği gibi, farklı yüzeylerin pürüzlülük derecelerinin birbirleri ile sayısal olarak kıyaslanmasında θ^*_{max}/C oranı kullanılmıştır (Graselli ve diğ., 2002). Pürüzlülük derecesi arttıkça θ^*_{max}/C oranıda artmaktadır. θ^*_{max}/C değerinin süreksizliğin kesme dayanımı ile doğru orantılı olduğu bildirilmiştir (Graselli, 2001). A_0 parametresi, kesme yönündeki maksimum olası değme alanlarını tanımlamaktadır. Bu değer arttıkça kesme yönünde kesmeye karşı koyan alanlar artacaktır. C parametresi ise pürüzlülük ile ters orantılı bir parametredir. Daha yüksek C değerleri daha az pürüzlü yüzeyler anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, bir süreksizlik yüzeyinin en büyük kesme dayanımı; A_0 parametresi ile doğru orantılı, C parametresi ile ters orantılı olacaktır. Buradan hareketle bu çalışmada, kesme yönünde hesaplanan yeni bir parametre olarak A_0/C oranı tanımlanmıştır.

8 FARKLI YÖNTEMLER İLE HESAPLANAN PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİNİN KESME DENEYLERİ İLE DEĞİŞİMİ

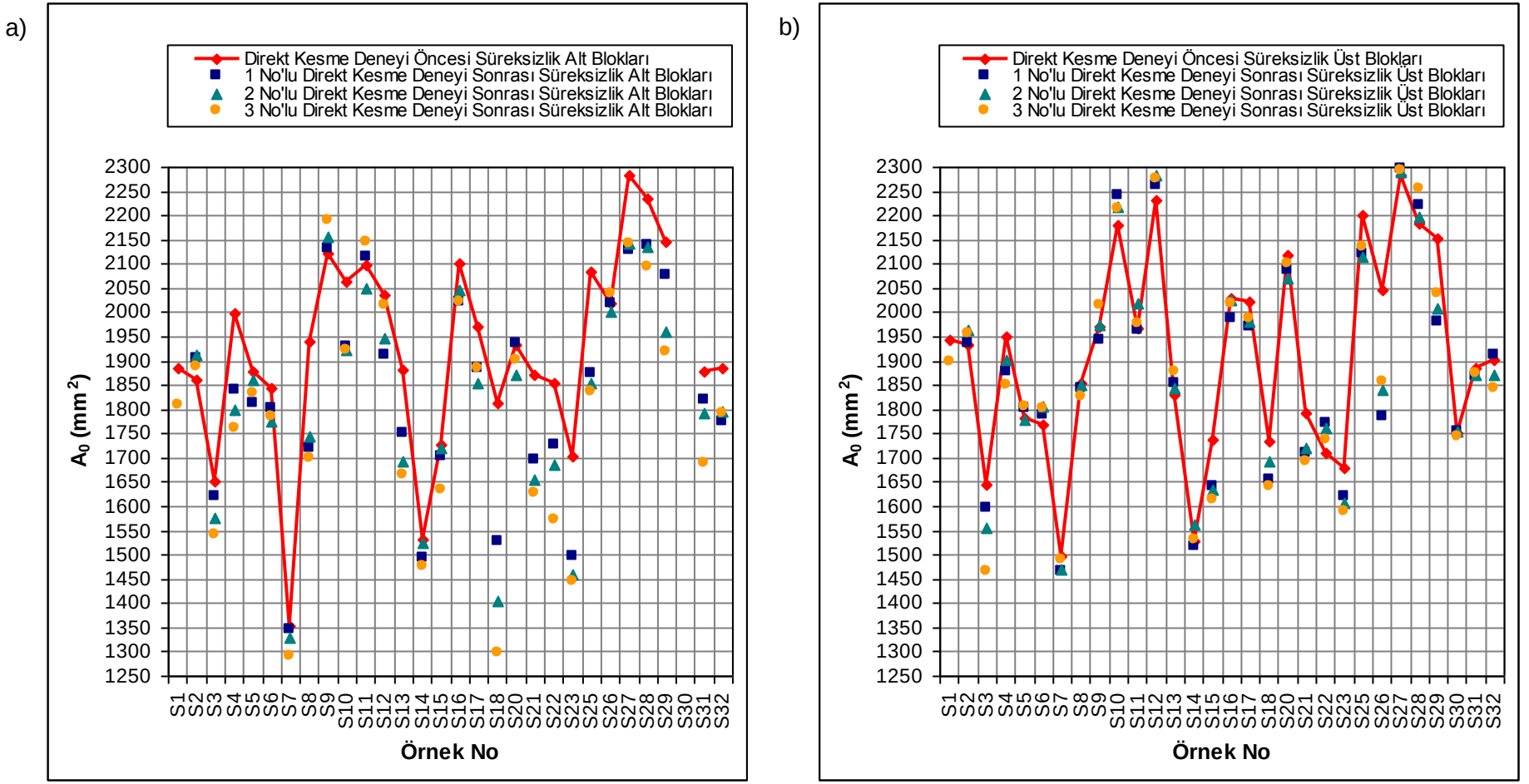
Bu çalışmada, süreksizlik örnekleri sırasıyla 300, 452 ve 756 kPa sabit normal gerilme değerleri altında ard arda üç kez kesilmiştir. Kesme deneyleri öncesinde sayısallaştırılan alt ve üst blok yüzeyleri, her bir kesme işleminin hemen ardından tekrar sayısallaştırılmıştır. Kesme deneyleri öncesinde hesaplanan fraktal boyutlar (D_{psd} ve D_{tpsam}), kesme yönündeki maksimum olası değme alanı (A_0), şekil parametresi (C) ile θ^*_{max}/C ve A_0/C oranları her kesmenin ardından tekrar hesaplanmış ve kesilmeye bağlı değişimleri izlenmiştir. D_{psd}, D_{tpsam}, θ^*_{max}/C ve A_0/C pürüzlülükle doğru, C ise ters orantılıdır. Kesilme ile D_{psd}, D_{tpsam}, θ^*_{max}/C ve A_0/C değerlerinde azalış, C değerlerinde ise artış beklenecektir.

8.1 Kesme Yönündeki Maksimum Olası Değme Alanının (A_0) Kesme ile Değişimi

Maksimum olası değme alanı (A_0); yüzey üzerinde, kesme yönünde, sadece kesme vektörüne karşı eğimli olan alanların toplamını ifade etmektedir. Yüzey kesildikçe, hem alt hem de üst bloklarda, örneklerin büyük bir çoğunluğu için, maksimum olası değme alanı değerleri azalmaktadır (Şekil 8.1). Maksimum olası değme alanlarının kesilme ile değişimini gösteren alt bloklara ait grafik (Şekil 8.1a) ile üst bloklara ait grafik (Şekil 8.1b) karşılaştırıldığında, alt bloklarda gerçekleşen azalmanın üst bloklarda gerçekleşen azalmadan çok daha fazla olduğu görülmektedir.

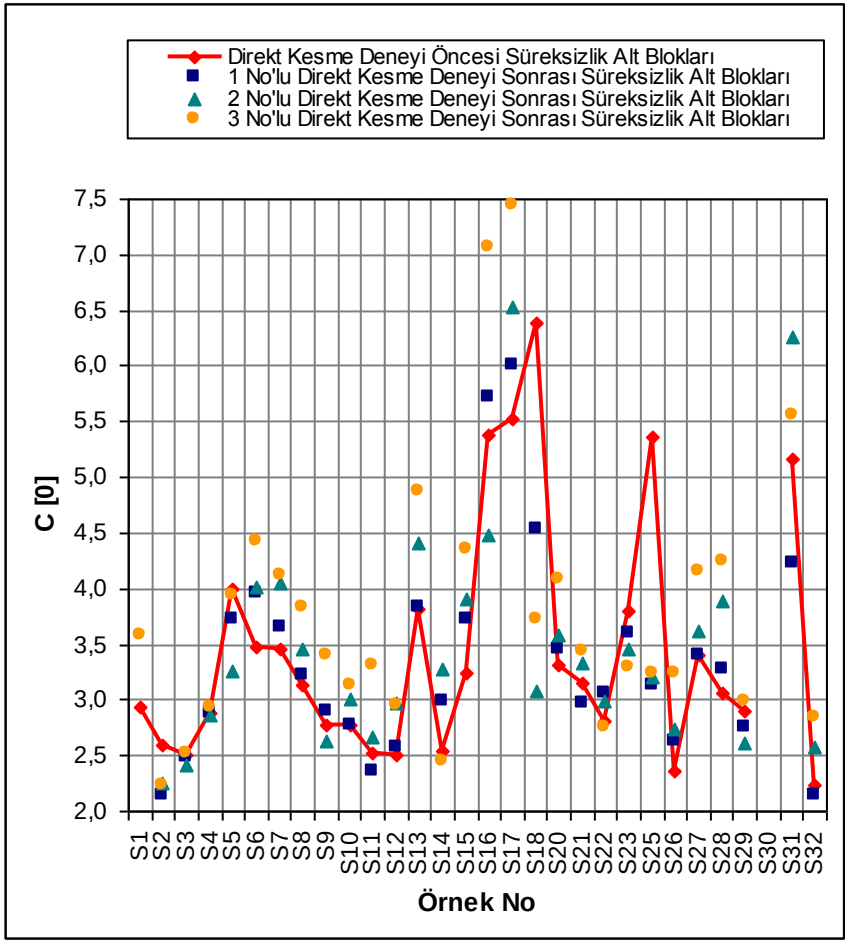
8.2 Kesme Yönündeki Şekil Parametresinin (C) Kesme İle Değişimi

Şekil 8.2' ye bakıldığında, kesilme ile birlikte, $A_\theta{}^*$-θ^* eğrisinin konkavlığını tanımlayan şekil parametresinin (C) değerinin, hem alt hem de üst bloklarda, örneklerin büyük bir çoğunluğu için arttığı görülmektedir. Daha yüksek C değerleri, yüzey üzerinde kesme yönünde kesmeye karşı koyan daha düşük görünür eğim açılarına sahip daha fazla alan olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla daha yüksek C değerleri daha az pürüzlü yüzeyleri tanımladığından, bir başka deyişle C parametresi pürüzlülük ile ters orantılı olduğundan, Şekil 8.2' deki durum kesilme ile birlikte pürüzlülüğün azaldığını göstermektedir.

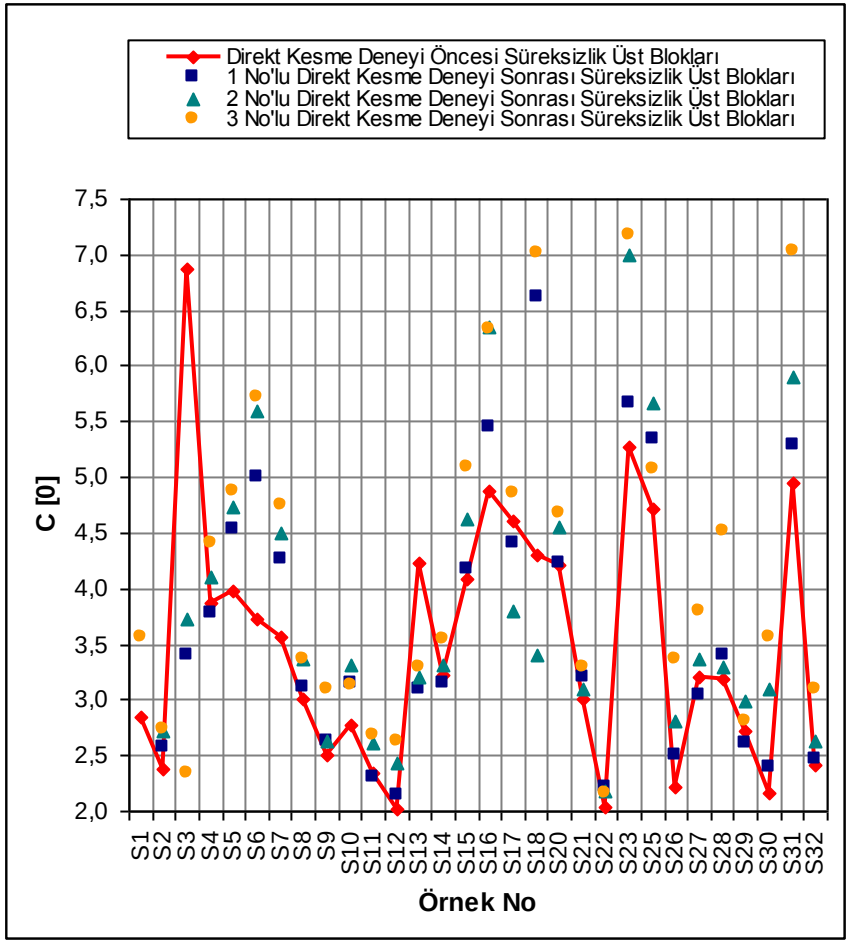


Şekil 8.1 : Kesme yönündeki maksimum olası değme alanlarının (A_0) kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları

a)



b)



Şekil 8.2 : Kesme yönündeki şekil parametresinin (C) kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları

8.3 Kesme Yönündeki θ^*_{max}/C ve A_0/C Oranlarının Kesme İle Değişimi

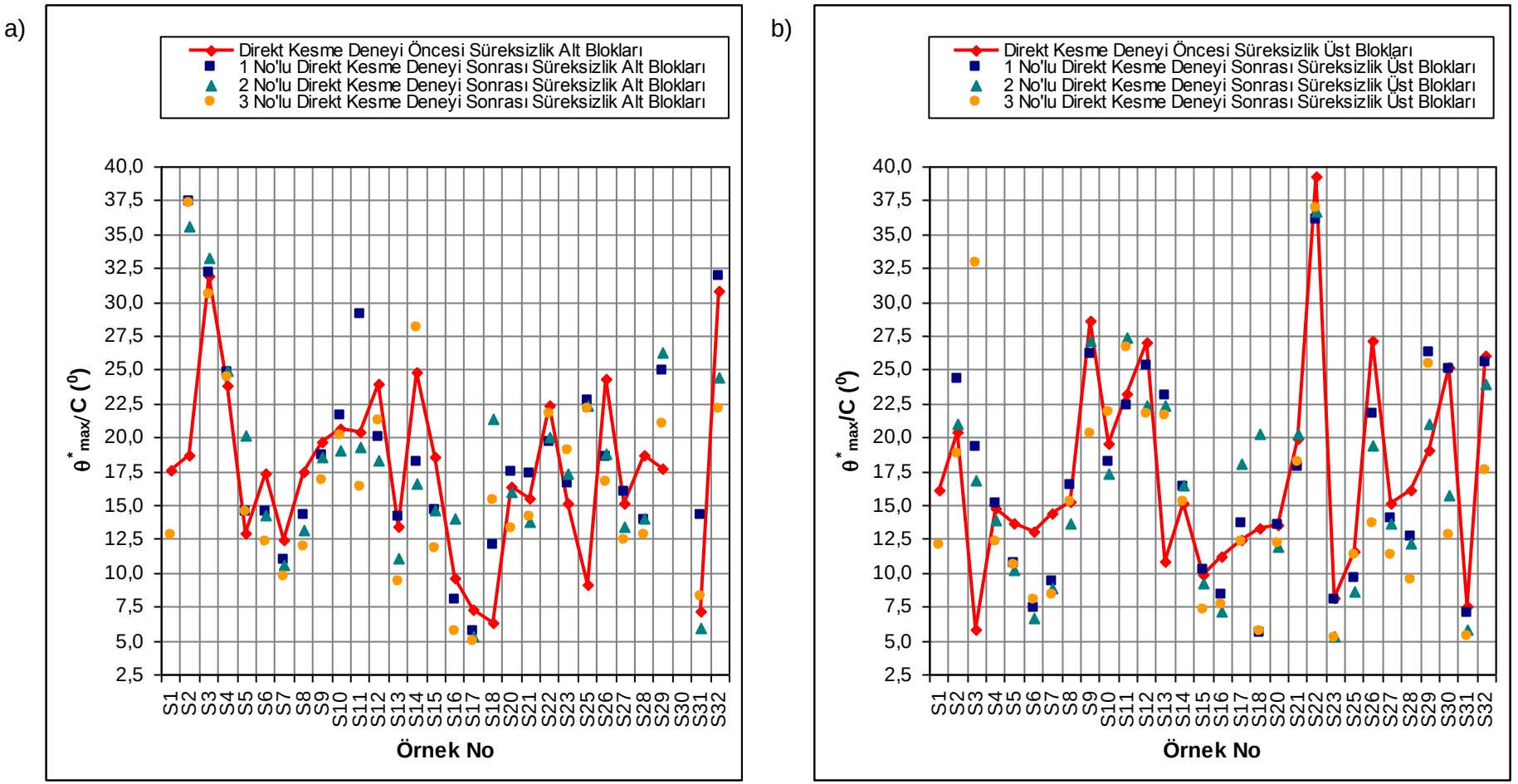
θ^*_{max}/C oranı, yüzey açısallığının kesme yönündeki değişimini tanımlamakta olup, pürüzlülük ile doğru orantılı olan bir parametredir. Bu oranın kesilme ile değişimi Şekil 8.3' de sunulmuştur. Bu şekilden görüldüğü gibi, hem alt hem de üst bloklarda, örneklerin büyük bir çoğunluğu için, θ^*_{max}/C oranının değeri kesilme ile birlikte azalmaktadır. Bu da, yine kesilme ile birlikte pürüzlülüğün azaldığını göstermektedir. Tıpkı θ^*_{max}/C oranı gibi A_0/C oranıda pürüzlülük ile doğru orantılı bir parametre olup, kesilme ile birlikte, örneklerin neredeyse tamamı için, A_0/C oranı azalmaktadır (Şekil 8.4).

8.4 Fraktal Boyutların (D_{psd} ve D_{tpsam}) Kesme Deneyleri İle Değişimi

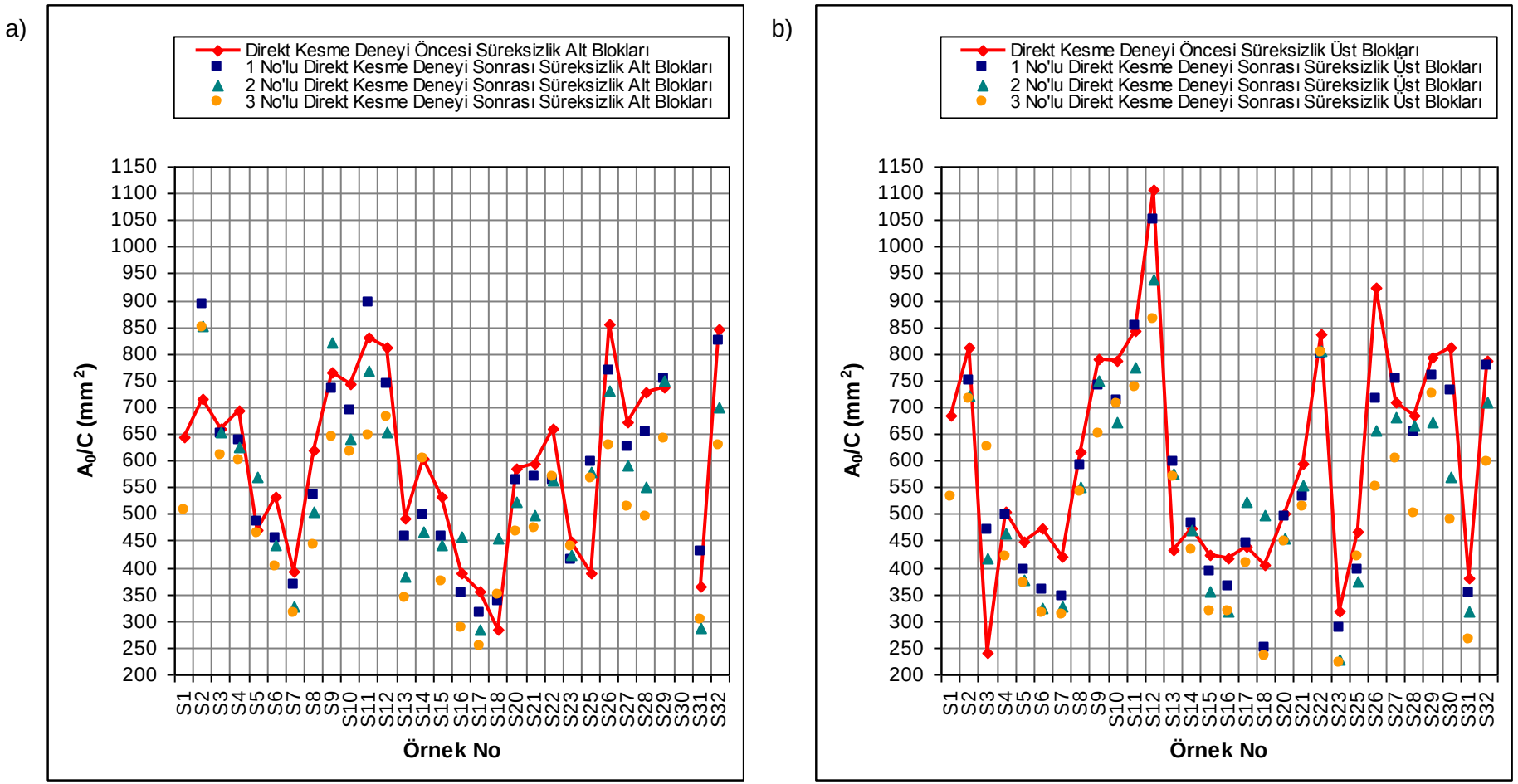
Güç spektrum yoğunluğu analizi ve üçgen prizma yüzey alanı yöntemleriyle hesaplanmış fraktal boyut (D_{psd} ve D_{tpsam}) değerlerinin kesilme ile değişimi sırasıyla Şekil B.150 ve Şekil B.151'de görülmektedir. Kesilme ile birlikte, beklenenin aksine, gerek alt bloklarda gerekse üst bloklarda, örneklerin neredeyse yarısı için, her iki yöntemle hesaplanan fraktal boyut değerleri artış göstermektedir. Bunun nedenleri aşağıda açıklanmaktadır.

8.5 Yenilme Mekanizmalarında Pürüzlülüğün Artma ve Azalma Koşullarının İrdelenmesi

Laboratuvar direkt kesme deneylerinde, süreksizlik üst bloğu alt bloğa nazaran sağa doğru hareket etmektedir. Bu deney konfigürasyonu içinde; alt blok üzerinde etkili olan kesme vektörünün yönü sağa, üst blok üzerinde etkili olan kesme vektörünün yönü ise sola doğrudur. Kesme yer değiştirmesinin başlaması ile birlikte, alt ve üst blok yüzeyleri üzerinde etkili olan kesme vektörlerinin yönünde yer alıp, bu vektörlerin doğrultusuna dik olan kenarlarda (alt blok için sağ, üst blok için sol kenarda) gerilme yoğunlaşması gerçekleşmektedir. Bu kenarlar üzerinde yoğunlaşan gerilmeler çekmeye çalışmakta ve bazı örneklerde bu gerilmeler kaya malzemesinin çekme dayanımını aşan değerlere ulaştığında, bu bölgelerdeki malzemenin kenarlar boyunca koparak bloktan ayrılmasına neden olmaktadır. Kopma olayının olmadığı deneylerde, birbiri üzerinde ötelenen iki yüzeyin değme bölgelerindeki pürüzler ezilmekte ve kesilmekte, yüzeylerden eksilen malzeme miktarı ise sadece bununla sınırlı kalmaktadır. Deney sırasında kopma olayı da

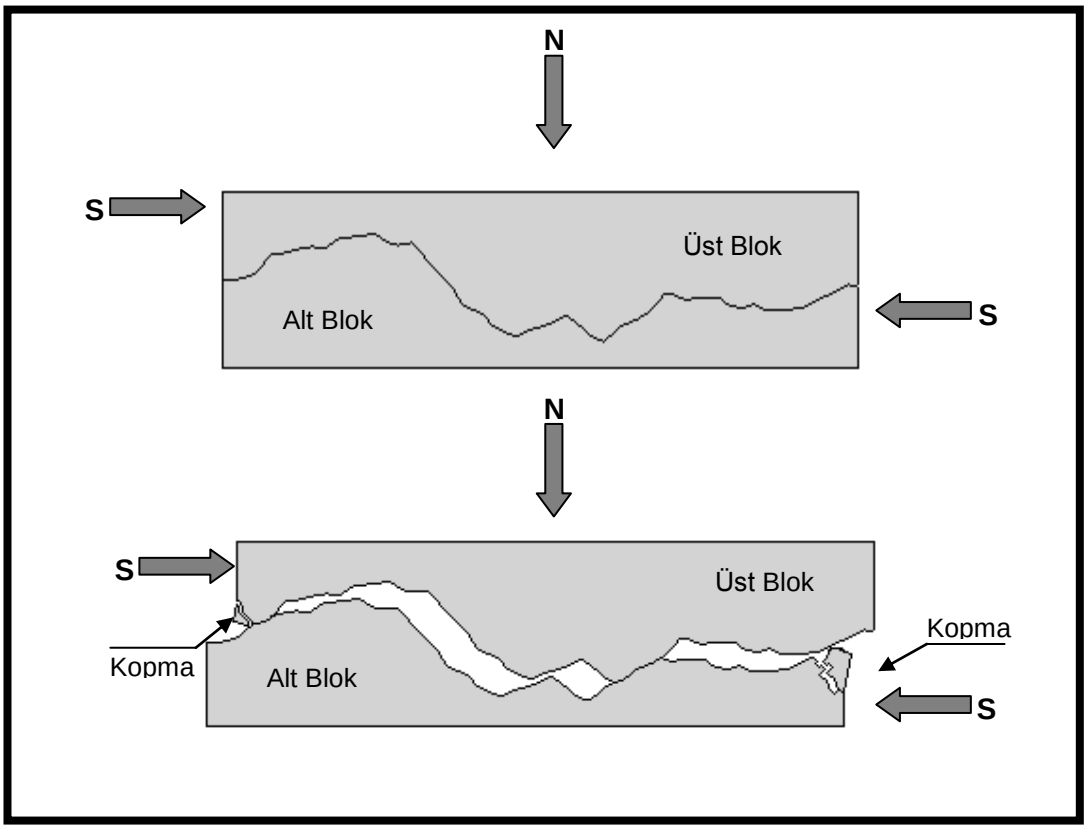


Şekil 8.3 : Kesme yönündeki θ^*_{max}/C oranının kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları



Şekil 8.4 : Kesme yönündeki A_0/C oranının kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları

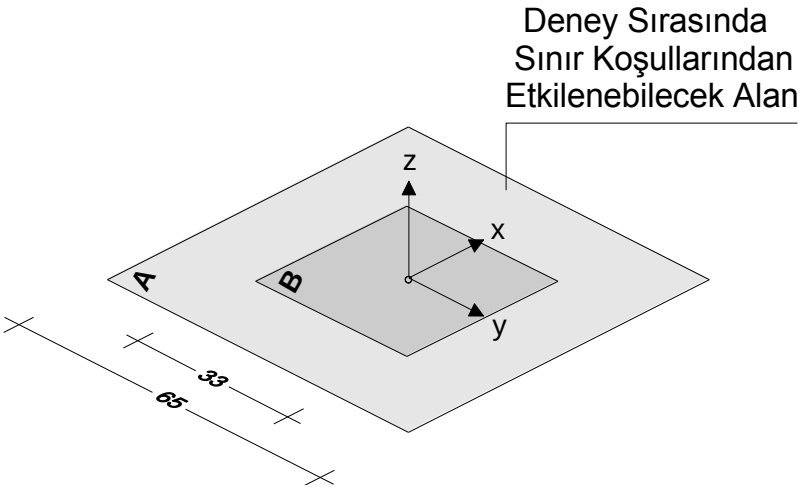
gerçekleşirse, pürüzlerin kesilmesi ile yüzeyden eksilen malzemeden daha fazla miktardaki bir malzeme, gerisinde kesme vektörünün yönüne doğru eğimli olan ve üzerinde yeni pürüzler bulunduran eğimli küçük yüzeyler bırakarak yüzeyden ayrılmaktadır (Şekil 8.5).



Şekil 8.5 : Kesme sırasında gerilme yoğunlaşması olan kenarlarda gerçekleşen kopma olayının şematik gösterimi

Değme bölgelerindeki mevcut pürüzlerin kesilmesi ile pürüzlülük bir taraftan azalırken, diğer taraftan kopmalarla birlikte yeni pürüzler de yüzeye dahil olmaktadır. Bu olayın gerçekleşme sıklığının ve gerçekleştiği örneklerde kopan malzeme miktarının, üst bloklara nazaran alt bloklarda genellikle daha fazla olduğu, deneyler sırasında yapılan gözlemlerle izlenmiştir. Bu gözlemlere koşut olarak, gerek güç spektrum yoğunluğu analizi, gerekse üçgen prizma yüzey alanı yöntemleri kullanılarak kesilme sonrası hesaplanan fraktal boyut (D_{psd} ve D_{tpsam}) değerlerinde, önceki değerlere nazaran artış gerçekleşme sıklığı ve artışın miktarı, üst bloklara nazaran alt bloklarda daha fazla olmuştur (Şekil B.150 ve Şekil B.151). Ayrıca, her iki yöntemle de hesaplanan değerler, fraktal boyut değerlerindeki artış miktarının, azalma miktarından daha fazla olduğunu göstermekte ve bu alt bloklarda daha iyi gözlenmektedir. Bu durumu ise, kopma olayı ile yüzeyden eksilen malzeme miktarının, kesilme ile eksilen malzeme miktarından daha fazla olmasıyla ilişkilendirmek mümkün olabilir.

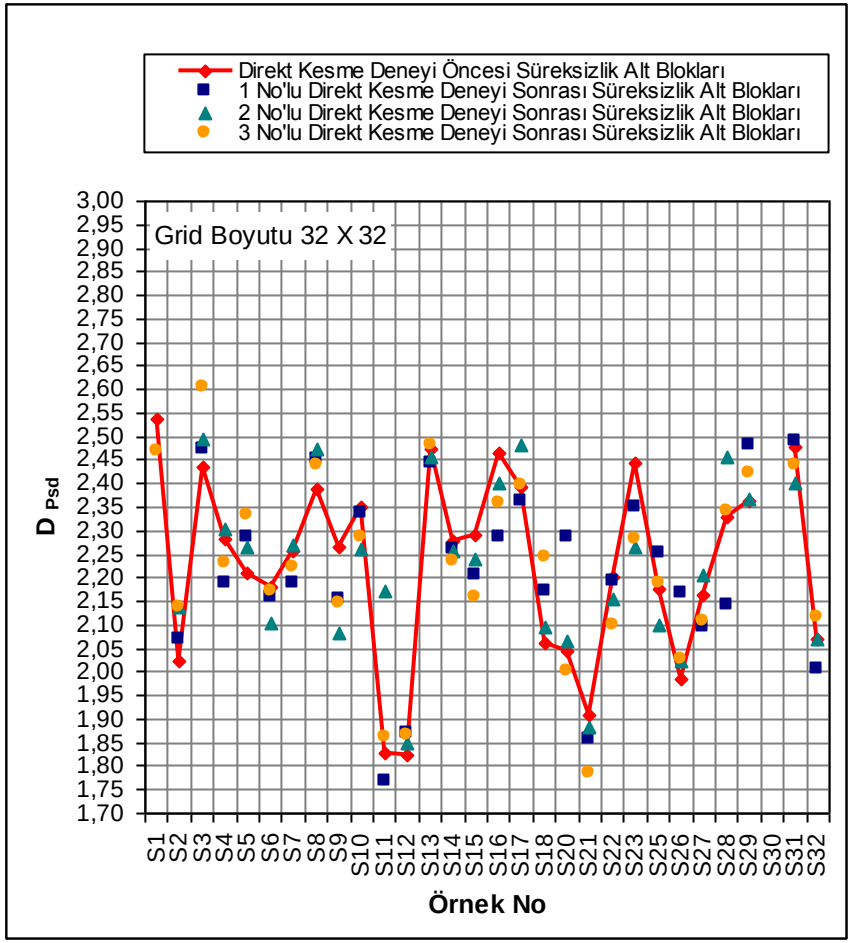
Direkt kesme deneylerinde kesilen süreksizlik yüzeyleri kare kesitli olup, boyutları 70x70 mm' dir. Kesme deneyleri öncesinde ve sonrasında yapılan yüzey sayısallaştırma işlemleri, merkezi yüzeyin geometrik merkezi ile özdeş olan 65x65 mm'lik kısımlarda gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni, algoritmik olarak güç spektrum yoğunluğu analizi yönteminin, n bir tam sayı olmak üzere, boyutu 2^n, üçgen prizma yüzey alanı yöntemi ile potansiyel değme alanları yönteminin ise boyutu 2^n+1 olan gridler üzerinde çalışmasıdır. Bu sınır koşulları altında, her üç yöntem için de yüzey üzerinden alınması anlamlı en büyük veri boyutu 65x65' dir. Deneylerden sonra yüzeylerin sayısallaştırılması sırasında, kopmaların gerçekleştiği bölgelerin az ya da çok bir kısmı 65x65 mm boyutundaki tarama alanının içinde kalmıştır. Kesilme öncesine nazaran, kesilme sonrasında D_{psd} ve D_{tpsam} değerlerinde beklenenin aksine artış gerçekleşmesinde, kopma olayının etkisinin olup olmadığını araştırmak amacı ile veri boyutu 65x65 olan orjinal gridler içinden, merkezi bu gridin merkezi ile özdeş olan 32x32 'lik ve 33x33' lük gridler alınmış, D_{psd} ile D_{tpsam} değerleri tekrar hesaplanmıştır. Bu işlem ile deney sırasında sınır koşullarından etkilenebilecek alan, hesaplama alanının dışında bırakılmıştır (Şekil 8.6).



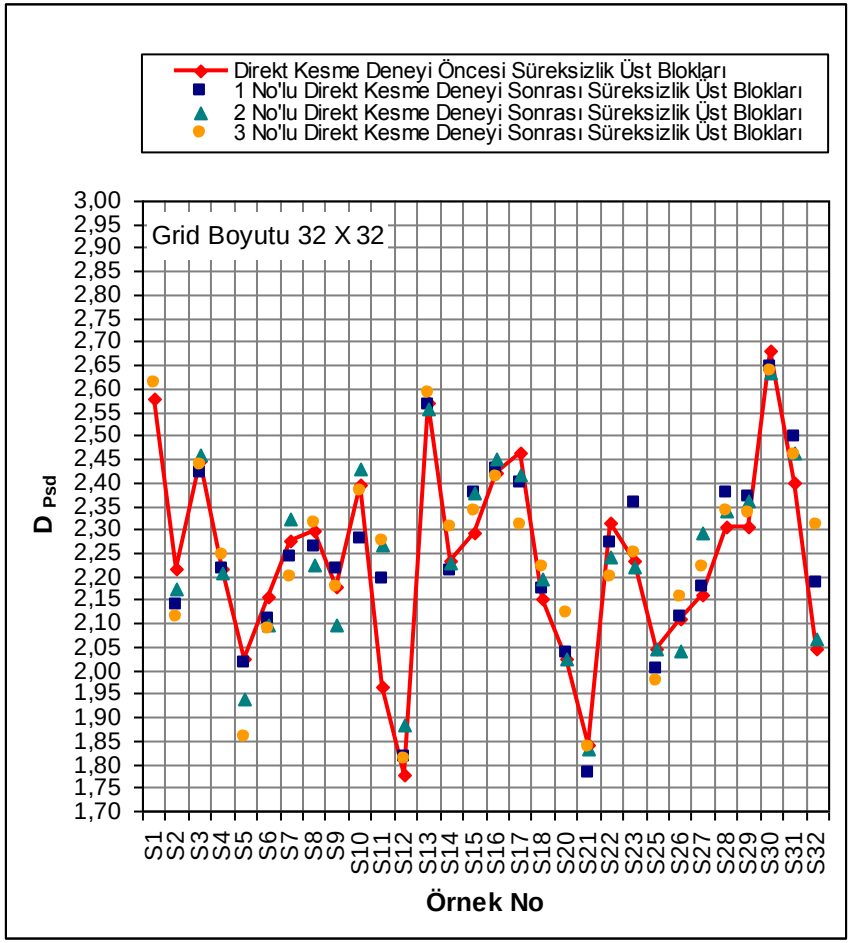
Şekil 8.6 : Fraktal boyut değerlerinin tekrar hesaplandığı sınır koşullarından etkilenmeyen alanının (B alanı) şematik gösterimi

Kopmaların olduğu kenarlar, yüzey üzerinde bu yeni gridler ile tanımlı bölgelerin dışında kalacağından, D_{psd} ve D_{tpsam} değerlerinin deneylerle değişimi üzerinde sadece kesilme olayının etkili olması beklenecektir. 32x32' lik ve 33x33' lük grid durumlarında süreksizlik örneklerinin alt ve üst blok yüzeyleri için D_{psd} ve D_{tpsam} parametrelerin kesilmeye bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 8.7ve Şekil 8.8' deki grafiklerde sunulmuştur.

a)

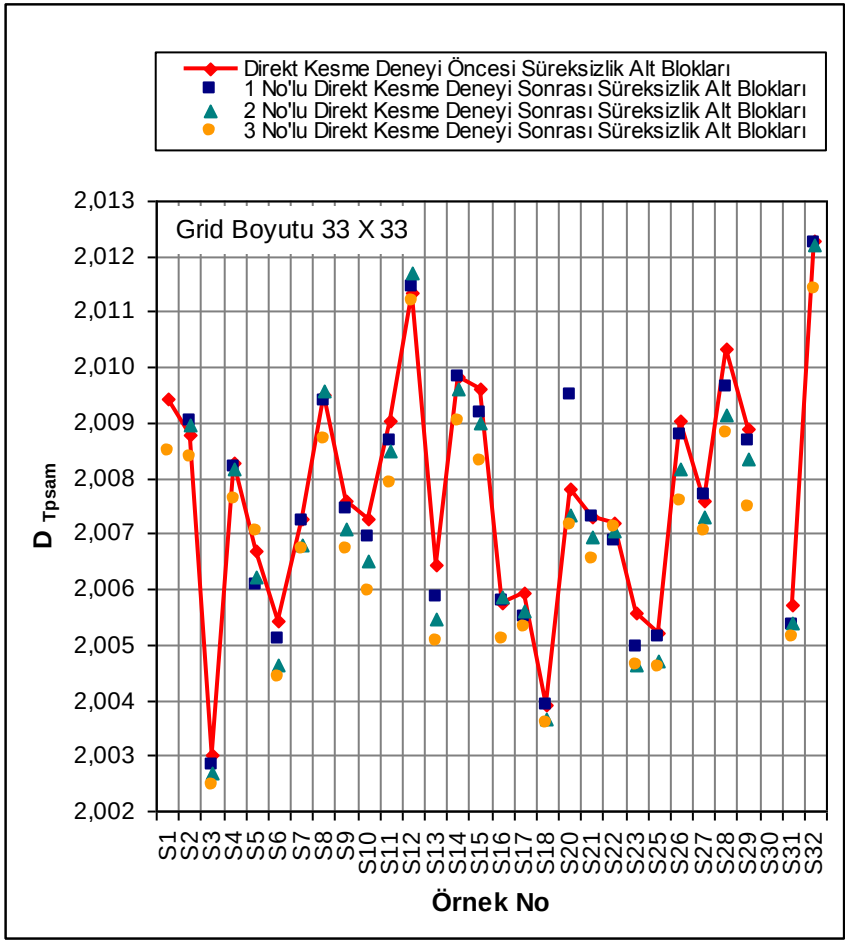


b)

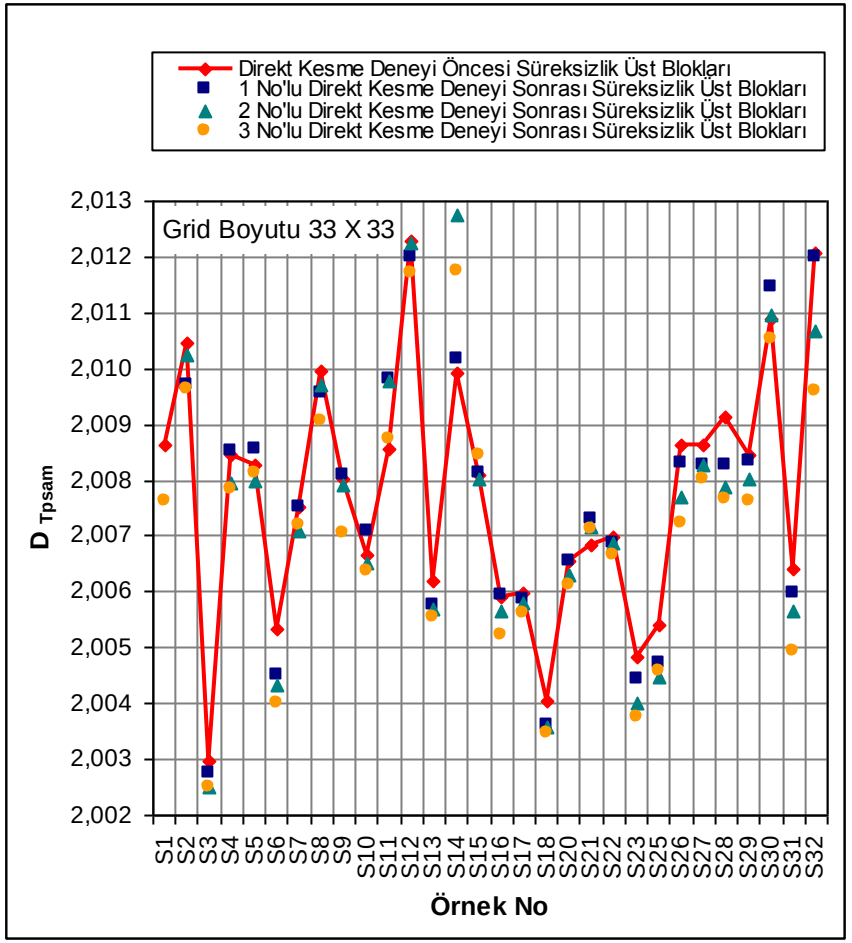


Şekil 8.7 : Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemiyle 32x32' lik gridler için hesaplanmış fraktal boyut (D_{psd}) değerlerinin kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları

a)



b)



Şekil 8.8 : Üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle 33x33' lük gridler için hesaplanmış fraktal boyut (D_{tpsam}) değerlerinin kesilme ile değişimi a) süreksizlik alt blokları b) süreksizlik üst blokları

Bu grafikler, örneklerin büyük bir çoğunluğu için, kesilmenin ardından aslında fraktal boyut değerlerinin, dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığını, ancak kopma olayına bağlı olarak gerçekleşen yüzey geometrisi değişimlerinin hesaplanan fraktal boyutlar üzerinde etkili olduğunu, deneyler sonrasında hesaplanan fraktal boyut değerlerindeki artışın (Şekil B.150 ve Şekil B.151) büyük oranda kopma olayından kaynaklandığını ortaya koymaktadır.

Kesme deneyleri sırasında gelişen kopma olayına bağlı olarak, yüzey geometrisiyle ilgili değişimlerin, A_0, C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametrelerinin kesilme sonrası hesaplanan değerleri üzerinde de etkili olacağı düşünülecektir. Nitekim, az sayıda da olsa, kesilme ile birlikte bazı örneklerin A_0, θ^*_{max}/C ve A_0/C değerlerinde artış, C değerlerinde ise azalma gerçekleşmiştir. Diğer taraftan, örneklerin büyük bir çoğunluğu için A_0, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametrelerinin değerleri kesilme ile birlikte azalmış, C parametresinin değeri ise artmış olup, bu durum kesilmeye bağlı yenilme mekanizmaları için asıl beklenen sonuçtur. Kopma olayına bağlı olarak yüzey geometrisinde gerçekleşen değişimler, her deneyin ardından tekrar hesaplanan D_{psd} ve D_{tpsam} değerleri üzerindeki önemli etkisine karşın, A_0, C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametrelerinin kesilme sonrası hesaplanan değerleri üzerinde fazla etkili olmamıştır. Bunun nedenlerini ise, D_{psd} ve D_{tpsam} parametreleri ile A_0, C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan yöntemlerin algoritmik farklılıklarında aramak mümkündür. A_0, C, θ^*_{max}/C ve A_0/C, değerleri yöne bağımlı olan parametrelerdir. Bu parametreler, aynı yüzey üzerinde seçilecek farklı yönlerde farklı değerler almaktadır. Bu değerler hesaplanırken, direkt kesme deneylerindeki kesme yönü dikkate alınmıştır.

Kopmaların, alt ve üst blok yüzeyleri üzerinde etkili olan kesme vektörlerinin yönünde yer alıp, bu vektörlerin doğrultusuna dik olan kenarlar boyunca gerçekleşmiş olması, ilk bakışta bu parametrelerin oldukça fazla etkileneceğini düşündürecektir. Ancak kopan malzeme, gerisinde kesme vektörünün yönüne doğru eğimli yüzeyler bırakarak yüzeyden ayrılmaktadır. Dolayısıyla oluşan eğimli yüzeyler kesme vektörüne karşı eğimli olmadığından, A_0, C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametrelerinin bu durumdan etkilenmesi beklenmeyecektir. Bununla birlikte, bu eğimli yüzeyler üzerinde yer alan çok daha küçük boyuttaki yeni pürüzlerden ancak kesme vektörüne karşı eğimli olanlar, bu parametrelerin değişimleri üzerinde etkili olabilecek ve değerlerini artırabilecektir. Diğer taraftan, fraktal boyutlar olan D_{psd} ve D_{tpsam} yönden bağımsız olarak tüm yüzeyin pürüzlülüğünü tanımlayan parametrelerdir. Yüzey geometrisindeki herhangi bir değişim bu parametreleri

doğrudan etkileyecektir. A_0, C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametrelerinin, kopan malzemenin gerisinde bıraktığı eğimli yüzeyler üzerinde yer alan ve sadece kesme vektörüne karşı eğimli olan daha küçük pürüzlerden etkilenmesi söz konusu iken, D_{psd} ve D_{tpsam} parametreleri hem bu yeni oluşan eğimli yüzeylerden hem de bu eğimli yüzeyler üzerindeki daha küçük boyutlu pürüzlerin tamamından etkilenecektir.

Ünal (2000), küçük boyutlu örnekler üzerinde yaptığı kesme deneyleri sırasında yüzeylerin kenar ve köşelerinde kırılmaların gerçekleştiğini, bunun ise deney sonrası pürüzlülükteki değişimlerin hassas bir şekilde belirlenememesine sebep olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı yüzeylerin kenar ve köşelerindeki kırılmaların nedenlerinin; kesme deneyleri sırasında kullandığı kesme kutusu ve örnek boyutlarının küçük olmasından, buna ek olarak uygulanan normal gerilmelerin deney süresince yeterli hassasiyette sabit tutulamamasından kaynaklandığını bildirmiştir.

Bu çalışma kapsamında yapılan laboratuvar kesme deneylerinde normal kuvvet kesilme yüzeyine yük askısı ve ağırlık külçeleri ile uygulandığından, bunun doğal bir sonucu olarak da normal gerilme deney süresince sabit tutulduğundan, bazı yüzeylerde gerçekleşen kopmaları normal gerilmenin sabit tutulamaması ile ilişkilendirmek bu çalışma için mümkün değildir. Ancak bununla birlikte, bu çalışmada gerçekleşen kopmaların kullanılan örnek boyutundan kaynaklanabileceğini söylemek mümkün olabilecektir.

9 FARKLI YÖNTEMLERLE HESAPLANAN PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİNİN BİRBİRLERİ VE EN BÜYÜK KESME DAYANIM ORANLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

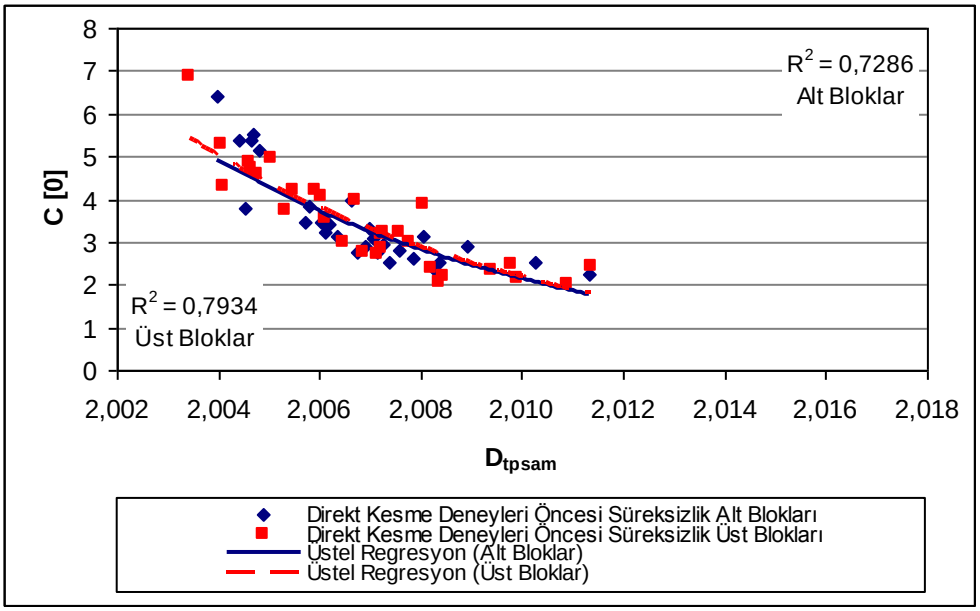
9.1 Fraktal Boyut Değerleri ile Kesme Yönündeki Yüzey Geometrisini Tanımlayan Parametreler Arasındaki İlişkilerin Araştırılması

Değme alanları yöntemiyle hesaplanan C (şekil) parametresi ile θ^*_{max}/C ve A_0/C oranları yöne bağımlı parametrelerdir. İleride Bölüm 10' da anlatılacağı gibi bu parametreler aynı yüzey üzerinde seçilecek farklı yönlerde farklı değerler alabilmektedir. Çalışmada bu parametreler hesaplanırken, laboratuvar direkt kesme deneylerindeki kesme yönü dikkate alınmıştır. Diğer taraftan güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) ve üçgen prizma yüzey alanı (tpsam) yöntemleri ile hesaplanan fraktal boyutlar (D_{psd} ve D_{tpsam}) ise yönden bağımsız olarak tüm yüzeyin pürüzlülüğünü tanımlayan parametrelerdir. Bununla birlikte, kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayan sayısal parametreler (C, θ^*_{max}/C ve A_0/C) ile yönden bağımsız olarak tüm yüzeyin pürüzlülüğünü ifade eden fraktal boyut değerleri (D_{psd} ve D_{tpsam}) birbirleriyle karşılaştırılarak aralarındaki olası ilişkiler araştırılmıştır. Araştırmada kullanılan yüzeyler için hesaplanan fraktal boyut değerleri ile kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayan sayısal parametrelerin değerleri x-y eksen takımlarında birbirleriyle eşlenmiş ve regresyon analizleri ile aralarındaki determinasyon (belirleme) katsayılarına (R^2) bakılmıştır. Güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) yöntemiyle hesaplanan fraktal boyutlar (D_{psd}) ile diğer pürüzlülük parametreleri arasında önemli bir ilişki gözlenemediğinden, bununla ilgili analizlere yer verilmemiştir.

9.1.1 Kesme yönündeki şekil parametresi (c) ile fraktal boyutlar (dtpsam) arasındaki ilişki

Şekil parametresi olarak adlandırılan C parametresinin daha yüksek değerleri daha az pürüzlü yüzeyleri tanımlamakta olup, C parametresi pürüzlülük ile ters orantılıdır (Graselli ve diğ., 2002). Diğer taraftan daha yüksek fraktal boyutlar daha pürüzlü yüzeyleri tanımlamakta olup, fraktal boyut yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılı bir ilişki içindedir. Araştırmada kullanılan süreksizlik örneklerinin, hem alt hem de üst blok yüzeyleri için kesme yönünde hesaplanan şekil parametresi (C) değerleri ile üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri arasındaki ilişki Şekil 9.1' de sunulmuştur. Yukarıdaki tanımlamalara uygun olarak,

fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri arttıkça bir başka deyişle pürüzlülük arttıkça, kesme yönündeki şekil parametresi (C) değerleri azalmaktadır.

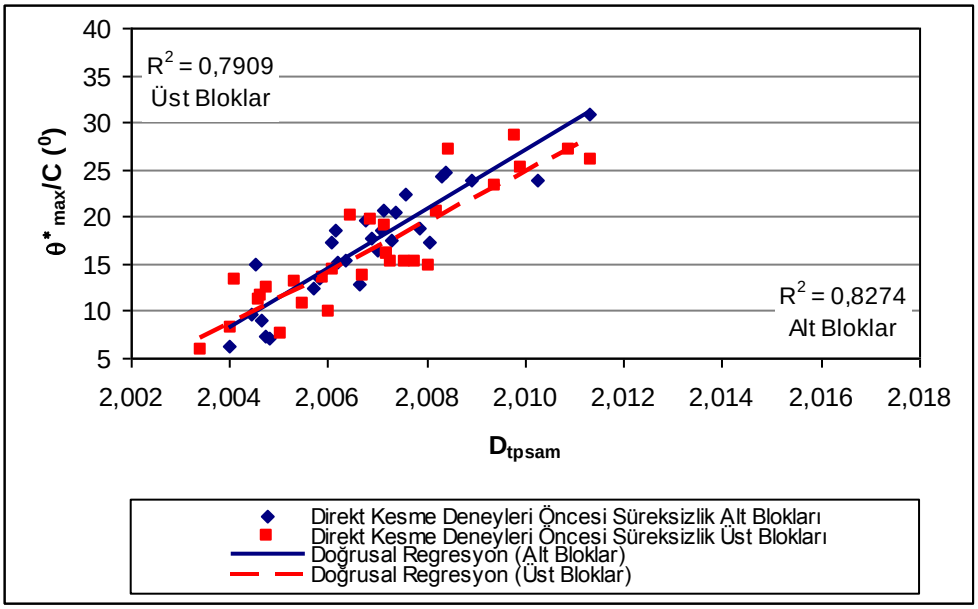


Şekil 9.1 : Kesme yönünde hesaplanan şekil parametresi (C) ile yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) arasındaki ilişki

Şekil parametresi (C) ile yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) arasındaki ilişki üstel olup, regresyon eğrilerinin çizilmesindeki determinasyon katsayıları; alt blok yüzeyleri için R^2=0.73, üst blok yüzeyleri için R^2=0,79' dur.

9.1.2 Kesme yönündeki θ^*_{max}/C oranı ile fraktal boyutlar (D_{tpsam}) arasındaki ilişki

Bir süreksizlik yüzeyinin kesme yönündeki kesmeye karşı koyan maksimum görünür eğim açısı değeri (θ^*_{max}), yine aynı yöndeki şekil parametresi (C) ile normalize edilerek, farklı yüzeylerin pürüzlülüklerinin birbirleri ile sayısal olarak karşılaştırılmasında θ^*_{max}/C oranı kullanılmıştır (Graselli ve diğ., 2002). Bu oran, kesme yönünde yüzeydeki açısallığın değişimini tanımlamaktadır. Bu oranın düşük değerleri, A_θ^* - θ^* grafiğinde yüksek konkavlık derecesi sergileyen, dolayısıyla az miktarda yüksek eğimli alanlar içeren az pürüzlü yüzeyleri işaret etmekte olup, pürüzlülük derecesi arttıkça θ^*_{max}/C oranıda artmaktadır. Bu durumda, θ^*_{max}/C oranı değerleri ile fraktal boyutlar (D_{tpsam}) arasında doğru orantılı bir ilişki beklenecektir. Çalışmada kullanılan süreksizlik örneklerinin, hem alt hem de üst blok yüzeyleri için kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C oranı değerleri ile aynı yüzeyler için hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri karşılaştırılmış ve aralarındaki ilişki Şekil 9.2' de sunulmuştur.

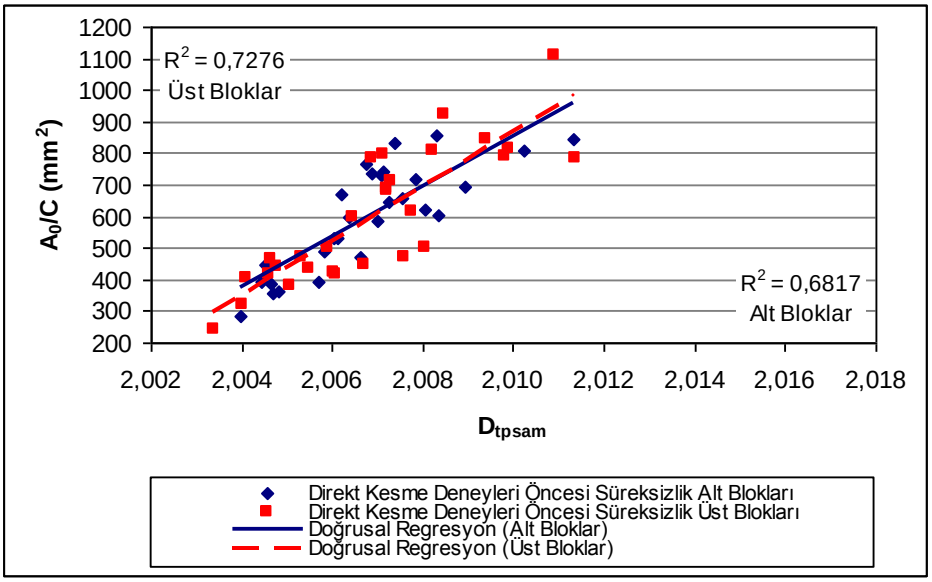


Şekil 9.2 : Kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C oranı ile yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) arasındaki ilişki

Fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri arttıkça, bir başka deyişle pürüzlülük arttıkça, kesme yönündeki θ^*_{max}/C oranının değerleri de artmaktadır. Bu iki parametre arasındaki ilişki doğrusal olup, regresyon doğrularının çizilmesindeki determinasyon katsayıları; alt blok yüzeyleri için R^2=0.83, üst blok yüzeyleri için R^2=0,79' dur.

9.1.3 Kesme yönündeki A_0/C oranı ile fraktal boyutlar (D_{tpsam}) arasındaki ilişki

Bu çalışmada, bir süreksizlik yüzeyinin kesme yönündeki kesmeye karşı koyan maksimum olası değme alanı (A_0) değeri, yine aynı yöndeki şekil parametresi (C) ile normalize edilerek A_0/C oranı tanımlanmıştır. Tıpkı θ^*_{max}/C oranında olduğu gibi, A_0/C oranın düşük değerleri, A_θ^* - θ^* grafiğinde yüksek konkavlık derecesi sergileyen, dolayısıyla az miktarda yüksek eğimli alanlar içeren az pürüzlü yüzeyleri işaret edecektir. Çalışmada kullanılan süreksizlik örneklerinin, hem alt hem de üst blok yüzeyleri için kesme yönünde hesaplanan A_0/C oranı değerleri ile aynı yüzeyler için fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri arasındaki ilişki Şekil 9.3' de sunulmuştur. Fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri arttıkça, bir başka deyişle pürüzlülük arttıkça, kesme yönündeki A_0/C oranının değerleri de artmaktadır. Bu iki parametre arasındaki ilişki doğrusal olup, regresyon doğrusunun çizilmesindeki determinasyon katsayıları; alt blok yüzeyleri için R^2=0.68, üst blok yüzeyleri için R^2=0.73' dür.

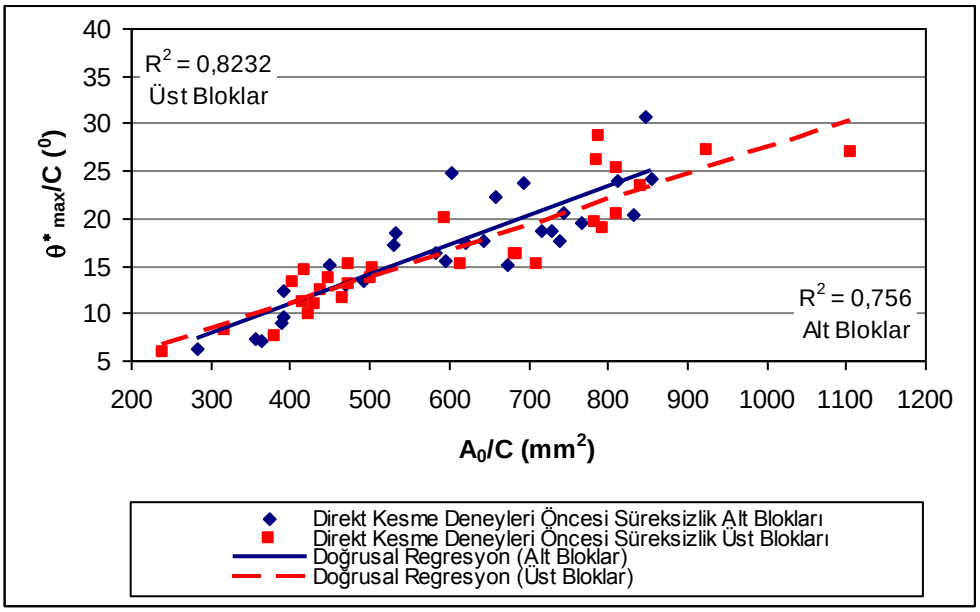


Şekil 9.3 : Kesme yönünde hesaplanan A_0/C oranı ile yüzey fraktal boyutu (D_{tpsam}) arasındaki ilişki

9.1.4 Kesme yönündeki θ^*_{max}/C ile A_0/C Oranları arasındaki ilişki

Pürüzlülük ile orantılı olup, kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C ve A_0/C oranları ile yönden bağımsız olarak tüm yüzeyin pürüzlülüğünü ifade eden fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Bu durumda, her ikisi de yöne bağımlı olan θ^*_{max}/C ile A_0/C oranları arasında doğru orantılı bir ilişki beklenecektir.

Bu ilişkiyi araştırmak amacıyla, araştırmada kullanılan süreksizlik örneklerinin alt ve üst blok yüzeyleri için kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C ile A_0/C oranlarının değerleri x-y eksen takımında birbirleriyle eşlenmiş ve çizilen grafik Şekil 9.4' de verilmiştir. Görüldüğü gibi, bu iki parametre arasındaki ilişki doğrusal olup, regresyon doğrularının çizilmesindeki determinasyon katsayıları; alt blok yüzeyleri için R^2=0.76, üst blok yüzeyleri için R^2=0.82' dir. Kesme yönünde yüzeydeki açısallığın değişimini tanımlayıp, bu yöndeki pürüzlülüğün sayısal ifadesinde kullanılan θ^*_{max}/C oranının değeri arttıkça, yine kesme yönünde hesaplanan A_0/C oranının da değeri artmaktadır. Dolayısıyla A_0/C oranı, bir yüzey üzerinde seçilecek herhangi bir yöndeki pürüzlülüğü tanımlamaya uygun bir parametredir.



Şekil 9.4 : Kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C ile A_0/C oranları arasındaki ilişki

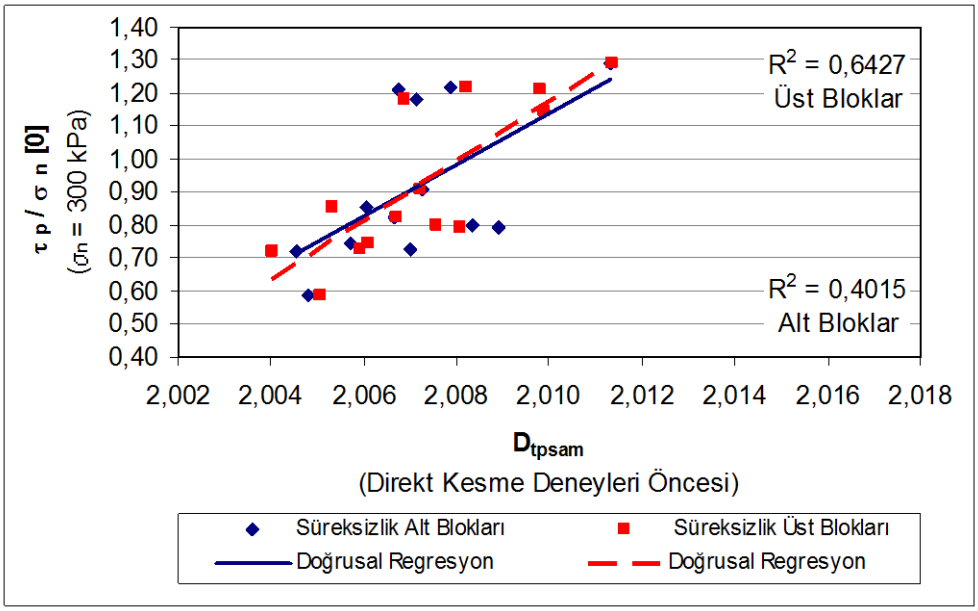
9.2 Fraktal Boyut Değerleri ve Kesme Yönündeki Pürüzlülüğü Tanımlayan Parametrelerin En büyük Kesme Dayanım Oranları İle Karşılaştırılması

Araştırmada kullanılan süreksizlik örneklerinin alt ve üst blok yüzeyleri için, üçgen prizma yüzey alanı (tpsam) yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri ile toplam potansiyel değme alanları yaklaşımıyla hesaplanan kesme yönündeki pürüzlülük parametresi (C), θ^*_{max}/C ve A_0/C oranı değerleri, bu örneklerin laboratuvar direkt kesme deneyinde σ_N = 300 kPa sabit normal gerilme değeri altında kesilmesiyle elde edilen en büyük kesme dayanımları (τ_p) ile karşılaştırılmış ve yüzey pürüzlülüğünün süreksizliklerin kesme dayanımı üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalarda, güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut (D_{psd}) değerleri ile en büyük kesme dayanımları arasında iyi bir ilişki gözlenmediğinden, bu karşılaştırma ile ilgili sonuçlara yer verilmemiştir. Kesme deneyleri sırasında, kesme yer değiştirmesinin başlaması ile birlikte, yüzeyler üzerinde etkili olan kesme vektörlerinin yönünde yer alıp, bu vektörlerin doğrultusuna dik olan kenarlarda yoğunlaşan çekme gerilmelerinin, bazı örneklerde bu kenarlardaki bir miktar malzemeyi koparark yüzeyden ayırdığı daha önce belirtilmişti. Deneylerden elde edilen en büyük dayanım değerlerinin, yüzeyler üzerindeki pürüzleri kesmek için gerekli olan gerilmeler olduğundan emin olmak ve dayanım değerleri ile pürüzlülük arasındaki karşılaştırmaların güvenilirliğini artırmak için, burada yapılan karşılaştırmalarda kopma olayından etkilenmemiş ya da çok az etkilenmiş örnekler kullanılmıştır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen en büyük kesme gerilmesi (τ_p) değerleri, uygulanan sabit normal gerilme değerlerine (σ_N = 300

kPa) bölünmüş, karşılaştırmalarda en büyük kesme gerilmesi oranları (τ_p/σ_N) kullanılmıştır.

9.2.1 En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile yüzey fraktal boyutları (D_{tpsam}) arasındaki ilişki

Alt ve üst blok yüzeylerinin pürüzlülüğünü tanımlamak amacıyla üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri ile bu yüzeylerin σ_N = 300 kPa sabit normal gerilme altında kesilmesi sonucunda elde edilen en büyük kesme gerilmesi oranları arasındaki ilişki Şekil 9.5' de sunulmuştur. Fraktal boyut değerleri bir başka deyişle yüzey pürüzlülüğü arttıkça, en büyük kesme gerilmesi oranları da artış göstermektedir. Regresyon doğrularıyla ilgili determinasyon katsayıları alt blok yüzeyleri için R^2=0.40 olup, üst blok yüzeyleri için R^2=0,64' tür.

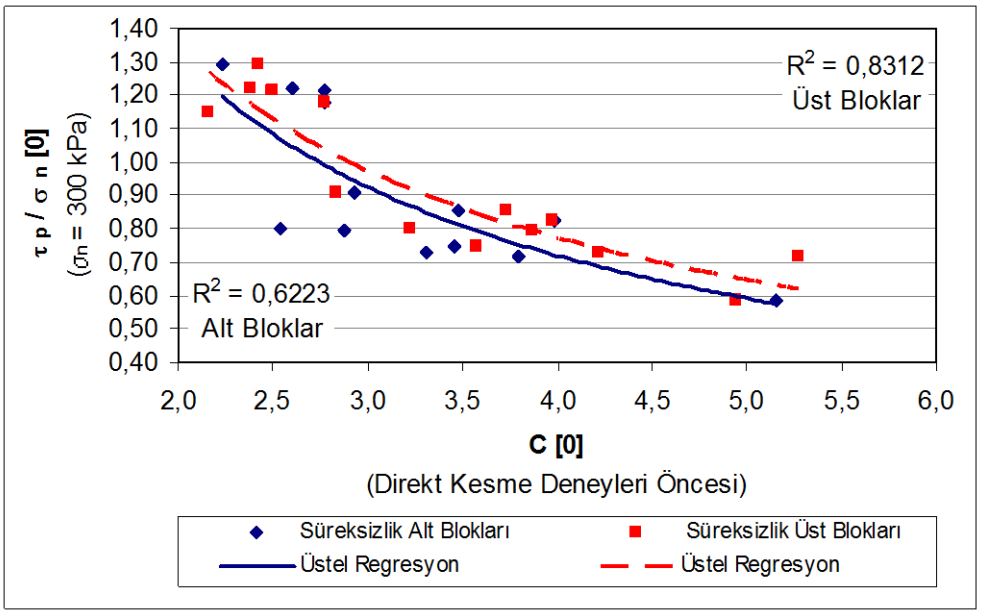


Şekil 9.5 : En büyük kesme dayanım oranları (τ_p/σ_N) ile yüzey fraktal boyutlarının (D_{tpsam}) karşılaştırılması

9.2.2 En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönündeki pürüzlülük parametreleri (C) arasındaki ilişki

Şekil parametresi olarak adlandırılan "C", yöne bağımlı bir parametre olup, kesme yönünde hesaplanmıştır. Daha yüksek C değerleri, daha düşük pürüzlülüğe sahip yüzeyleri tanımlamaktadır. Bir başka değişle bu parametre pürüzlülük ile ters orantılıdır. Alt ve üst blok yüzeyleri için kesme yönünde hesaplanan pürüzlülük parametresi (C) değerleri ile en büyük kesme gerilmesi oranları arasındaki ilişki Şekil 9.6' de verilmiştir. Kesme yönündeki pürüzlülük parametresi (C) değerleri arttıkça, bir başka deyişle kesme yönündeki yüzey pürüzlülüğü azaldıkça, en büyük

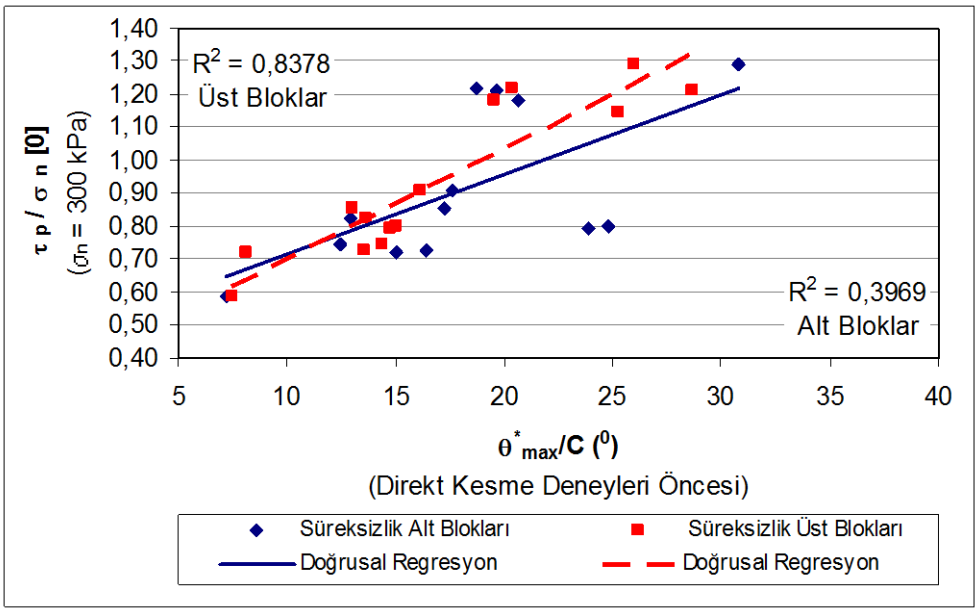
kesme gerilmesi oranları da azalmaktadır. Bu iki parametre arasındaki ilişki üstel olup, regresyon eğrilerinin çizilmesindeki determinasyon katsayıları; alt blok yüzeyleri için R^2=0.62, üst blok yüzeyleri için R^2=0.83' tür.



Şekil 9.6 : En büyük kesme dayanım oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönünde hesaplanan pürüzlülük parametresi (C) değerlerinin karşılaştırılması

9.2.3 En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönündeki θ^*_{max}/C oranları arasındaki ilişki

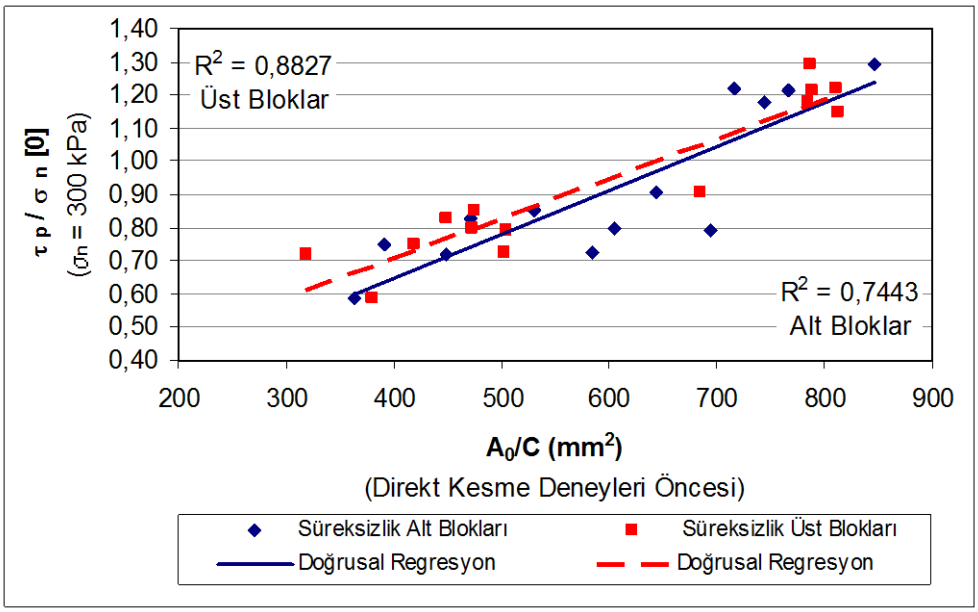
Kesme yönünde, yüzey üzerindeki açısallığın değişimini tanımlayan θ^*_{max}/C oranının daha yüksek değerleri, daha pürüzlü yüzeyleri ifade etmektedir. Pürüzlülük arttıkça bu oranın değeri de artmaktadır. Alt ve üst blok yüzeyleri için kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C oranı değerleri ile en büyük kesme gerilmesi oranları arasındaki ilişki Şekil 9.7' de görülmektedir. Kesme yönündeki θ^*_{max}/C oranı değerleri arttıkça bir başka deyişle pürüzlülük arttıkça, en büyük kesme gerilmesi oranı da artmaktadır. Bu iki parametre arasındaki ilişki doğrusal olup, regresyon doğrusuna ait determinasyon katsayıları; alt blok yüzeyleri için R^2=0.40, üst blok yüzeyleri için R^2=0,84' dür.



Şekil 9.7 : En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C oranı değerlerinin karşılaştırılması

9.2.4 En büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönündeki A_0/C oranları arasındaki ilişki

Bu çalışmada, bir süreksizlik yüzeyinin kesme yönündeki kesmeye karşı koyan maksimum olası değme alanı (A_0) değeri, yine aynı yöndeki şekil parametresi (C) ile normalize edilerek A_0/C oranı tanımlanmıştır. Araştırmada kullanılan süreksizlik örneklerinin tamamı üzerinde yapılan değerlendirmede, kesme yönündeki A_0/C oranı değerleri ile fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri arasındaki ilişki doğru orantılı olup, regresyon doğrularının çizilmesindeki determinasyon katsayıları alt ve üst blok yüzeyleri için sırasıyla R^2=0.68 ve R^2=0.73' dür. Aynı değerlendirme A_0/C oranı ile kesme yönündeki açısallığın değişimini tanımlayan θ^*_{max}/C arasında yapıldığında ilişki yine doğru orantılı olup, regresyon doğrularının çizilmesindeki determinasyon katsayıları, alt ve üst blok yüzeyleri için sırasıyla R^2=0.76 ve R^2=0.82' dir. Anlaşılacağı üzere A_0/C oranının değeri pürüzlülük ile artmaktadır. Bu durumda, bu oran ile en büyük kesme gerilmesi oranı arasında orantılı bir ilişki beklenecektir. Kesme yönünde hesaplanan A_0/C oranı değerleri ile en büyük kesme gerilmesi oranları arasındaki ilişki Şekil 9.8' de sunulmuştur. Kesme yönündeki A_0/C oranı değerleri arttıkça, bir başka deyişle pürüzlülük arttıkça, en büyük kesme gerilmesi oranı değerleri de artmaktadır. İlişki doğrusal olup, regresyon doğrusuna ait determinasyon katsayıları; alt blok yüzeyleri için R^2=0.74, üst blok yüzeyleri için R^2=0.88' dir.



Şekil 9.8 : En büyük kesme dayanım oranları (τ_p/σ_N) ile kesme yönünde hesaplanan A_0/C oranı değerlerinin karşılaştırılması

Yapılan karşılaştırmalarda, güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut değerleri (D_{psd}), hem diğer pürüzlülük parametreleri ile hem de laboratuvar direkt kesme deneylerinden elde edilen en büyük kesme dayanımı oranları ile iyi korelasyon göstermemiştir. Daha önce yapılmış olan çalışmalar ile de ilişkilendirerek, aşağıda bunun olası nedenleri tartışılmıştır.

Develi (1996) doğal süreksizliklerden aldığı yüzeyleri geliştirdiği bilgisayar kontrollü prototip bir yüzey tarama cihazı ile alansal olarak sayısallaştırmış ve elde ettiği 2-boyutlu veri setlerine güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemini uygulayarak bu yüzeylerin fraktal analizlerini yapmıştır. Topolojik olarak 2-boyutlu olan süreksizlik yüzeyleri için hesaplanan fraktal boyutların $2 < D < 3$ arasında değerler alması gerekecektir. Bu koşulun sağlanabilmesi için güç spektrumu [log S(k) - log (k)] grafiklerine çizilen regresyon doğrularının eğimleri (β), (6.15) eşitliğine göre $-4 \leq \beta \leq -2$ aralığında olmalıdır. Oysa bahsedilen çalışmada $-4.64 \leq \beta \leq -3.49$ aralığında değişen eğim değerleri bulunmuş, dolayısıyla hesaplanan boyut değerleri $1.68 \leq D \leq 2.26$ aralığında yer almıştır. Bahsedilen çalışmada sayısallaştırma işleminde kullanılan veri örnekleme aralığı (Δ) 1 mm olup, analiz edilen yüzeyler 32x32 mm boyutundadır. Araştırmacı, 2' nin altında hesaplanan fraktal boyut değerlerinin, analizlerde kullanılan yüzeylerin küçük olmasından kaynaklanabileceğini, aynı boyuttaki yüzeylerin daha küçük veri örnekleme aralığı ile sayısallaştırılması yada aynı veri örnekleme aralığı ile daha büyük boyuttaki yüzeylerin sayısallaştırılması ve analiz edilmesiyle, $2 < D < 3$ aralığında yer alan fraktal boyut değerlerinin

hesaplanabileceğini belirtmiştir. Buna ek olarak, log S(k) - log (k) grafiklerinde, enerji yoğunluklarının dağılımını karakterize eden noktaların geniş bir saçılım gösterdiği, dolayısıyla regresyon analizlerindeki hata oranlarını artırarak trend doğrularının çizilmesini güçleştirdiği, hesaplanacak fraktal boyutların bu doğruların eğimine son derece duyarlı olduğu belirtilmiştir. Brown ve Scholz (1985), güç spektrum yoğunluğu grafiklerinin farklı kısımlarında yaptıkları regresyon analizleri sonucunda, kullanılan frekans bantlarının çizilen regresyon doğrularının eğimini (β) dolayısıyla da hesaplanan fraktal boyutları etkilediğini belirtmiştir. Benzer bir analiz Develi ve Babadağlı (1998) ile Babadağlı ve Develi (2001) tarafından da yapılmış, spektrum grafiğinin daha yüksek dalga sayısı değerlerine ait kısımları kullanıldığında, daha düşük eğim (β) değerlerinin dolayısıyla da daha yüksek fraktal boyutların hesaplandığını belirtilmiştir. Spektrum grafiklerinin değerlendirilmesindeki benzer güçlükler Klinkenberg (1994) tarafından da tartışılmıştır. Babadağlı ve Develi (2001), fraktal yüzey üretim algoritmalarını kullanarak fraktal boyutları bilinen ancak farklı veri yoğunlukları içeren 2-boyutlu sentetik veri setleri üretmişlerdir. Gerçek boyutları 2.1 ile 2.9 arasında olan fraktal yüzeyleri temsil eden bu veri setlerine 2-boyutlu Fourier transformu uygulayarak güç spektrum yoğunluğu analizi ile tekrar fraktal boyutlarını hesaplamışlardır. 16x16 ve 32x32' lik veri setleri (grid) için hesaplanan fraktal boyutlar gerçek fraktal boyutlar ile doğru orantılı bir trend sergilemiştir. Bununla birlikte, 16x16 ve 32x32' lik veri setleri için hesaplanan fraktal boyutlar gerçek fraktal boyutlardan daha düşük bulunmuştur. Veri seti boyutu 16x16' dan 128x128' e doğru artırıldıkça, hesaplanan fraktal boyut değerleri gerçek fraktal boyutlara daha da yaklaşmış, gerçek fraktal boyutlar ile hesaplanan fraktal boyutlar arasındaki en iyi korelasyon ise 128x128' lik veri seti boyutlarında elde edilmiştir. Diğer taraftan, 512x512 ve 1024x1024' lük veri seti boyutları için yapılan analizlerde; gerçek fraktal boyutu 2.5' den daha düşük olan yüzeyler için gerçek boyutların çok daha üzerinde, gerçek fraktal boyutu 2.5' den daha yüksek olan yüzeyler için gerçek boyutların daha altında fraktal boyut değerleri hesaplanmıştır. Daha öncede belirtildiği gibi, literatürde güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemi ile fraktal analizlerin yapıldığı çalışmalar genellikle 1-boyutlu çizgisel profiller ile sınırlı kalmıştır. Shirono ve Kulatilake (1997) fraktal yüzey üretim algoritmaları ile fraktal boyutları bilinen sentetik profiller üretmişler ve 1-boyutlu veri setleri ile temsil edilen bu profiller üzerinde spektral analiz yönteminin detaylı analizini yapmışlardır. Araştırmacılara göre, toplam uzunluğu 100 birim olan bir profilin birim uzunluğu içinde en az 10 noktada veri örneklemesinin yapılmış olması gerekmektedir. Diğer bir öneri ise güç spektrumu diyagramlarına uygun filtreleme tekniklerinin uygulanmasıdır. Diğer taraftan Schmittbuhl, v.d., (1995b), doğal süreksizliklerden

alınan profiller üzerinde yaptıkları analizler sonucunda, filtreleme tekniklerinin uygulanmasının önemli olmadığını belirtmişlerdir. Schmittbuhl, v.d., (1995a), fraktal boyutları bilinen ve 1.1 ile 1.9 arasında değişen farklı veri boyutlarına sahip 1-boyutlu sentetik profiller üreterek, bu profillere spektral analiz tekniğini uygulamışlardır. Hesaplanan fraktal boyutlar ile gerçek fraktal boyutları karşılaştırarak veri boyutunun (profili oluşturan veri noktası sayısı) hesaplanan fraktal boyutlar üzerine etkisini analiz etmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışma ile; güç spektrum yoğunluğu analizi yönteminin veri noktası sayısına oldukça duyarlı olduğunu, veri noktası sayısı arttıkça hesaplanan fraktal boyutların gerçek fraktal boyutlara yakınsadığını, gerçek fraktal boyutlar ile hesaplanan fraktal boyutlar arasındaki en iyi uyumun ise 16384 veri noktasından oluşan profil durumunda elde edildiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, güç spektrum yoğunluğu analizi yönteminin uygulandığı doğal süreksizlik yüzeylerine ait veri setlerinin boyutu (grid boyutu) 64x64' dür. Hesaplanan fraktal boyutlar (D_{psd}), Develi (1996) tarafından 32x32 boyutundaki gridler üzerinde aynı yöntemle yapılan çalışmada bulunan değerlerden farklı olarak, tüm yüzeyler için 2 ile 3 arasında değerler almıştır. Yukarıda anılan araştırmacıların bulgularına uygun olarak, güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) yönteminde artan grid boyutları gerçeğe daha yakın fraktal boyut (D_{psd}) değerlerini sonuçlamaktadır. Kullanılan grid boyutu bu yöntemle hesaplanan fraktal boyut değerleri üzerinde oldukça etkilidir. Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemi (psd) ile hesaplanan fraktal boyutların, üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle (tpsam) hesaplanan fraktal boyutlar, yöne bağlı yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler ve kesme deneylerinden elde edilen maksimum kesme dayanımları ile iyi korelasyon göstermemesinin nedenleri; analizlerde kullanılan veri seti boyutlarından ve spektrum grafiklerinin değerlendirilmesindeki güçlüklerden kaynaklanmış olabilecektir. Benzer bir çalışmanın artan boyuttaki yüzeyler üzerinde de yapılması, spektrum grafiklerine filtreleme tekniklerinin uygulanarak bunun etkisinin araştırılması bundan sonra yapılacak çalışmalar arasında olmalıdır.

10 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜN SAYISAL DEĞERİNE ETKİYEN FAKTÖRLER

10.1 Veri Örnekleme Aralığının Üçgen Prizma Yüzey Alanı Yöntemi İle Hesaplanan Fraktal Boyutlar Üzerine Etkisi

Yüzey pürüzlülüğünü, seçilecek herhangi bir matematiksel analiz yöntemi ile sayısal olarak tanımlamayı hedefleyen araştırmalarda, yüzey üzerindeki yükselti değerlerinin koordinatları ile birlikte ölçülmesi, bir başka deyişle yüzey geometrisinin sayısallaştırılması, kullanılacak matematiksel analiz yöntemine veri teşkil etmesi yönünden zorunludur. Bu çalışmada kullanılan matematiksel analiz yöntemleri, Δ=1mm örnekleme aralığı ile sayısallaştırılmış olan yüzeylerden elde edilen 65x65 boyutundaki grid dosyalarına uygulanmıştır. Bununla birlikte aynı süreksizlik yüzeyinin sayısallaştırılması sırasında kullanılacak farklı örnekleme aralıklarının, o yüzeyin morfolojisini tanımlamak amacıyla hesaplanacak sayısal parametreler üzerine olan etkisi araştırılmak istenmiştir.

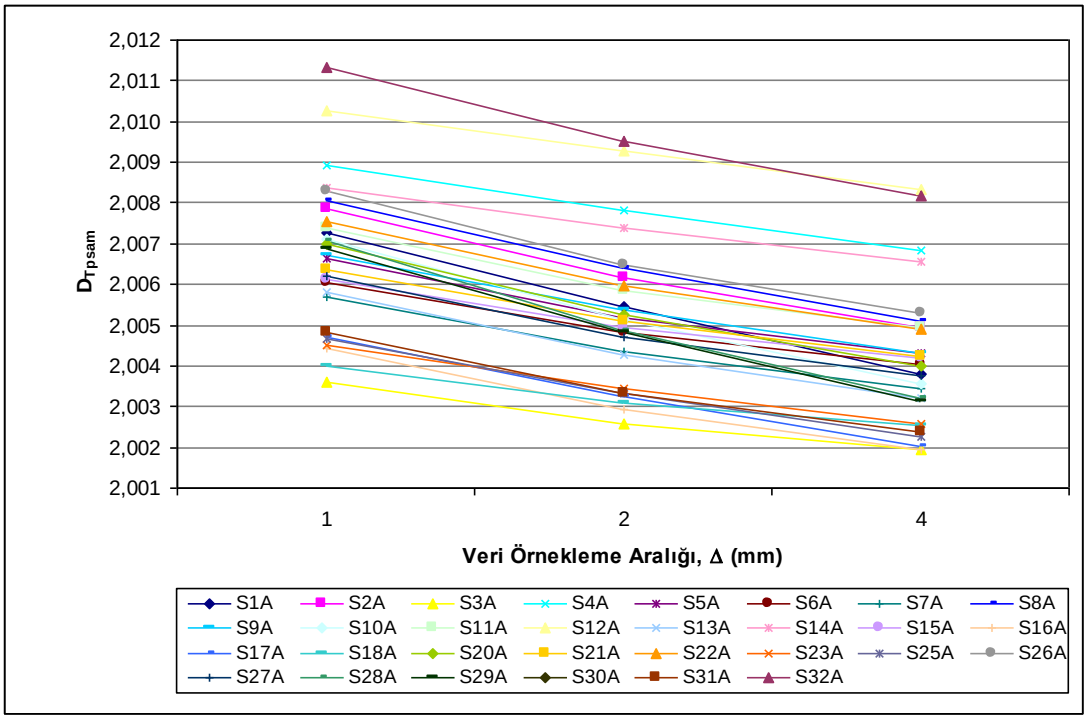
Δ=1 mm örnekleme aralığı ile sayısallaştırılan süreksizlik örneği alt blok yüzeylerine ait olan 65x65 boyutundaki grid dosyalarına, kaynak kodu Visual C' de hazırlanan özel bir yazılım ile veri seyreltme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem ile 65x65 boyutundaki orijinal grid dosyaları örnekleme aralığı Δ=2 mm ve Δ=4 mm olacak şekilde tekrar gridlenmiş, sırasıyla 33x33 ve 17x17 boyutlarında yeni grid dosyaları elde edilmiştir. Burada yapılan programsal işlem ile elde edilen seyreltilmiş yeni grid dosyaları, yüzeylerin 2 ve 4 mm' lik örnekleme aralıkları ile tekrar sayısallaştırılması halinde elde edilecek grid dosyaları ile tümüyle özdeştir. Başka bir deyişle yapılan bu işlem, 1 mm' lik örnekleme aralığı ile sayısallaştırılmış olan yüzeylerin, 2 ve 4 mm' lik örnekleme aralıkları ile tekrar sayısallaştırılması işlemine eşdeğerdir. Bu yeni grid dosyalarına üçgen prizma yüzey alanı (tpsam) yöntemi uygulanarak, fraktal boyutlar (D_{tpsam}) tekrar hesaplanmıştır. Süreksizlik alt blok yüzeylerinin, Δ=1 mm örnekleme aralığı ile sayısallaştırılması sonucunda elde edilen orijinal gridler kullanılarak hesaplanan fraktal boyut değerleri ile bu gridlerin Δ=2 mm ve Δ=4 mm olacak şekilde seyreltilmesi sonucunda elde edilen yeni gridler kullanılarak hesaplanan fraktal boyut değerleri Tablo 10.1' de sunulmuştur. Farklı örnekleme aralığı (Δ) değerlerinin aynı yüzeyler için hesaplanan fraktal boyutlar (D_{tpsam}) üzerine olan etkisi Şekil 10.1' de verilmiştir. İzlendiği gibi, aynı yüzeylerin farklı örnekleme aralıkları altında sayısallaştırılması, aynı yüzeyler için birbirinden farklı fraktal boyut

değerlerinin hesaplanmasıyla sonuçlanmakta, dolayısıyla sayısallaştırma sırasında kullanılan veri örnekleme aralığı, hesaplanan değerler üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Örnekleme aralığı değeri azaldıkça, bir başka deyişle yüzey üzerindeki yükselti değerlerinin okunmasındaki sıklık arttıkça, aynı yüzey için daha yüksek fraktal boyut değerleri hesaplanmaktadır.

Tablo 10.1 :Aynı yüzeylerin farklı örnekleme aralıkları (Δ) ile sayısallaştırılmasından oluşturulan veri setleri için üçgen prizma yüzey alanı yöntemi ile hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri

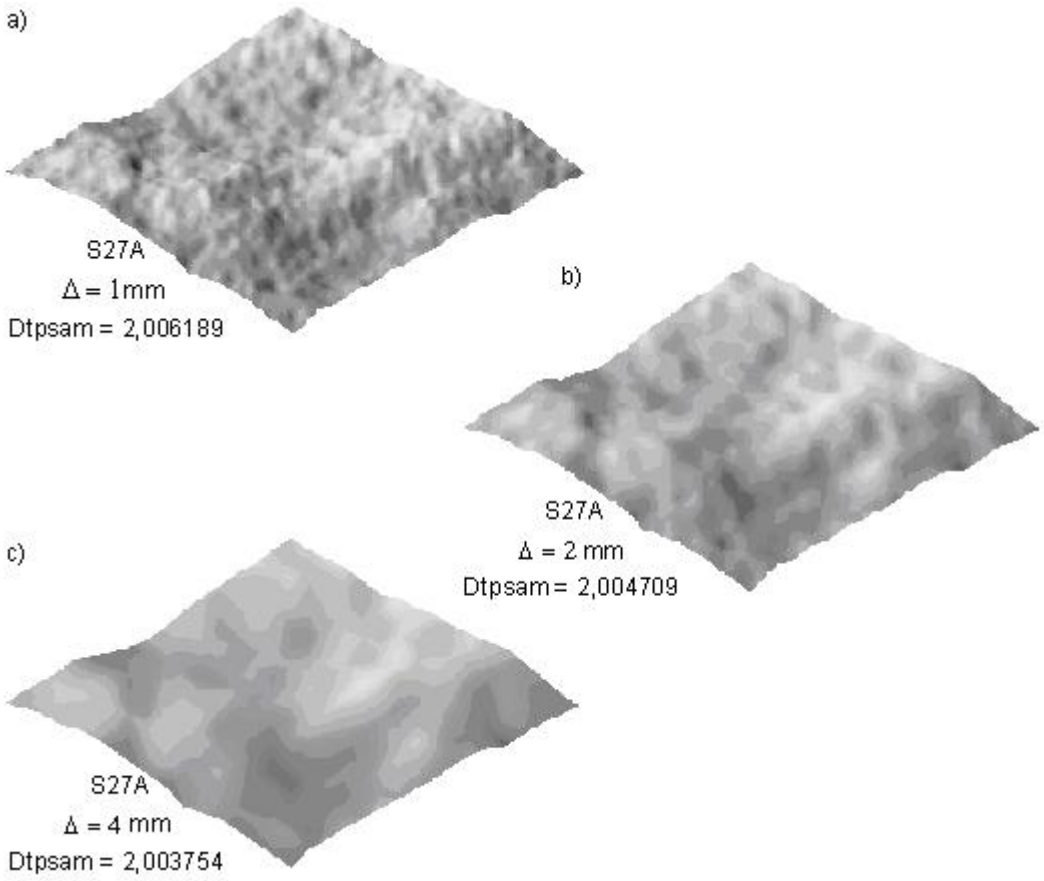
Yüzey No	Süreksizlik Alt Blok Yüzeyleri İçin Üçgen Prizma Yüzey Alanı Yöntemi ile Hesaplanan Fraktal Boyutlar (D_{tpsam})		
	Δ=1 (mm)	Δ=2 (mm)	Δ=4 (mm)
S1A	2.007267	2.005438	2.003805
S2A	2.007848	2.006172	2.004962
S3A	2.003601	2.002588	2.001945
S4A	2.008915	2.007818	2.006835
S5A	2.006639	2.005198	2.004298
S6A	2.006047	2.004807	2.004023
S7A	2.005703	2.004339	2.003426
S8A	2.008057	2.006394	2.005116
S9A	2.006735	2.005394	2.004311
S10A	2.007126	2.005140	2.003569
S11A	2.007374	2.005856	2.004934
S12A	2.010251	2.009261	2.008327
S13A	2.005803	2.004284	2.003210
S14A	2.008356	2.007378	2.006573
S15A	2.006124	2.004948	2.004213
S16A	2.004427	2.002917	2.001932
S17A	2.004701	2.003228	2.002011
S18A	2.003984	2.003075	2.002551
S20A	2.006991	2.005260	2.003998
S21A	2.006358	2.005115	2.004222
S22A	2.007556	2.005982	2.004892
S23A	2.004524	2.003448	2.002592
S25A	2.004653	2.003343	2.002275
S26A	2.008292	2.006482	2.005306
S27A	2.006189	2.004709	2.003754
S28A	2.007074	2.004851	2.003221
S29A	2.006888	2.004813	2.003128
S30A	-	-	-
S31A	2.004822	2.003331	2.002394
S32A	2.011319	2.009521	2.008194

Daha yüksek fraktal boyutlar daha pürüzlü yüzeyler anlamına geldiğinden, daha düşük örnekleme aralığı değerlerinde yüzey üzerindeki daha küçük pürüzler ölçülebilmekte, bu yolla elde edilen veri setleri yüzeyin pürüzlülüğünü gerçeğe daha yakın yansıtmaktadır.



Şekil 10.1 : Sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarının (Δ) üçgen prizma yüzey alanı yöntemi ile hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri üzerine etkisi

Diğer taraftan, daha yüksek örnekleme aralığı değerleri altında yapılan sayısallaştırma işlemlerinde, yüzey üzerindeki ayrıntılara ilişkin veriler toplanamamakta, bu yolla oluşturulan veri setleri üzerinde gerçekleştirilen analizlerde ise, yüzeyler gerçekte olduklarından daha az pürüzlü olarak hesaplanmaktadır. Şekil 10.2a 'da, S27A yüzeyinin Δ=1 mm örnekleme aralığı altında sayısallaştırılması ile oluşturulmuş veri setinden çizilen 3-boyutlu sayısal modeli görülmektedir. Aynı yüzeyin, Δ=2 mm ile Δ=4 mm örnekleme aralıkları altında sayısallaştırılması sonucunda oluşturulmuş veri setlerinden çizilen 3-boyutlu sayısal modelleri ise, sırasıyla Şekil 10.2b ve Şekil 10.2c' de verilmiştir. Bu şekillerden görüleceği gibi, aynı yüzey, daha büyük örnekleme aralığı ile sayısallaştırıldığında, morfolojisindeki ayrıntılara ilişkin verilerin toplanamamasına bağlı olarak, 3-boyutlu sayısal modelde gerçekte olduğundan daha az pürüzlü görülmektedir (Şekil 10.2 b ve c). Artan örnekleme aralıklarına bağlı olarak 3-boyutlu sayısal modellerinin morfolojisi sadeleşirken, buna paralel olarak hesaplanan fraktal boyut değerleri de azalmaktadır.



Şekil 10.2 : S27A yüzeyinin farklı örnekleme aralıkları (Δ) ile sayısallaştırılmasından elde edilen veri setleri için çizilen 3-boyutlu sayısal modeller ve hesaplanan fraktal boyutlar (D_{tpsam})

10.2 Veri Örnekleme Aralığının Yöne Bağlı Yüzey Geometrisini Tanımlayan Parametreler Üzerine Etkisi

Süreksizlik alt blok yüzeylerinin, Δ=1 mm örnekleme aralığı altında sayısallaştırılmasıyla elde edilen 65x65 boyutundaki orijinal grid dosyaları ile, bu grid dosyalarının Δ=2 mm ve Δ=4 mm olacak şekilde seyreltilmesi sonucunda elde edilen sırasıyla 33x33 ve 17x17 boyutundaki yeni grid dosyalarına, değme alanlarının hesaplanmasında kullanılan yeni yaklaşım uygulanmıştır. Böylelikle, sayısallaştırma sırasında kullanılan veri örnekleme aralığının, morfolojiyi tanımlayıcı yöne bağımlı sayısal parametreler (kesme yönündeki; en büyük görünür eğim açısı (θ^*_{max}), şekil parametresi (C) ile θ^*_{max}/C ve A_0/C oranları) üzerine olan etkisi analiz edilmiştir. Aynı yüzeylerin farklı örnekleme aralıklarıyla sayısallaştırılmasından elde edilen veri setleri için, kesme yönünde hesaplanan bu parametreler, Tablo 10.2' de topluca sunulmuştur.

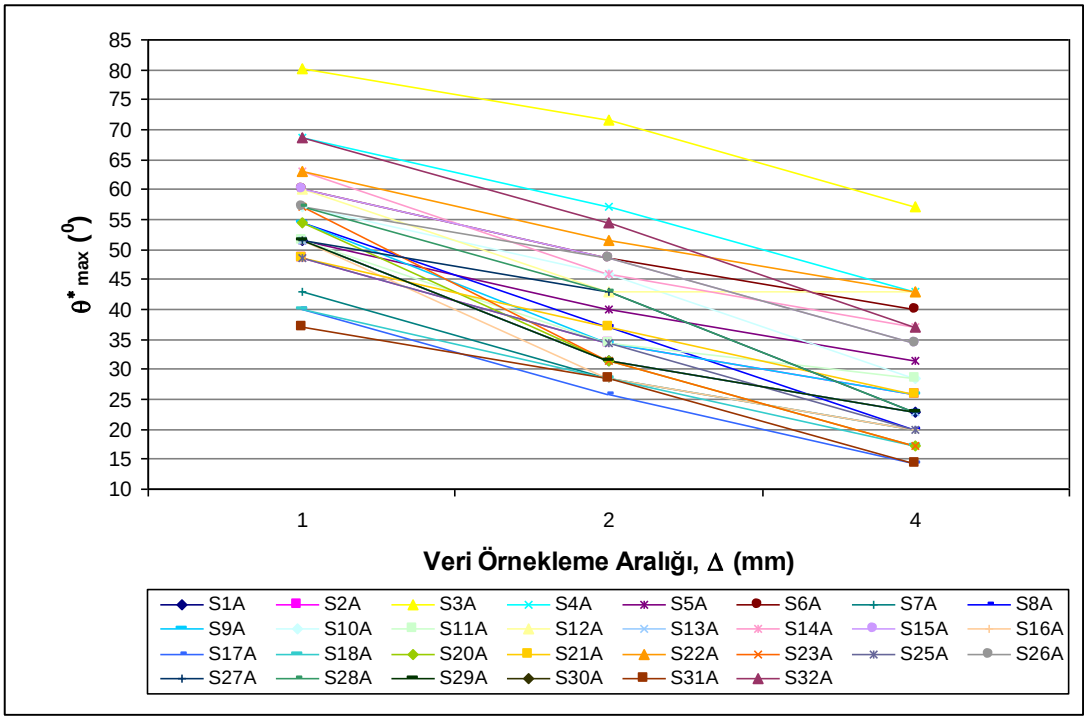
Tablo 10.2 :Aynı yüzeylerin farklı veri örnekleme aralıklarıyla (Δ) sayısallaştırılmasından oluşturulan veri setleri için değme alanları yöntemi ile hesaplanan kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı parametreler.

Süreksizlik Alt Blok Yüzeyleri İçin Değme Alanları Yöntemi ile Hesaplanan Kesme Yönündeki Yüzey Geometrisini Tanımlayıcı Parametreler												
Yüzey No	**Δ = 1 mm**				**Δ = 2 mm**				**Δ = 4 mm**			
	θ^*_{max}	**C**	θ^*_{max}/C	A_0/C	θ^*_{max}	**C**	θ^*_{max}/C	A_0/C	θ^*_{max}	**C**	θ^*_{max}/C	A_0/C
	(^{0})	**[0]**	(^{0})	(mm^2)	(^{0})	**[0]**	(^{0})	(mm^2)	(^{0})	**[0]**	(^{0})	(mm^2)
S1A	51.48	2.926	17.59	643.704	31.46	5.003	6.29	400.114	22.88	6.553	3.49	304.833
S2A	48.62	2.600	18.70	715.295	34.32	3.449	9.95	546.306	25.74	7.200	3.58	264.725
S3A	80.08	2.511	31.89	658.042	71.50	3.513	20.35	522.822	57.20	5.480	10.44	355.366
S4A	68.64	2.878	23.85	694.523	57.20	4.593	12.45	453.918	42.90	7.454	5.76	278.038
S5A	51.48	3.986	12.91	470.716	40.04	8.046	4.98	251.506	31.46	12.517	2.51	160.967
S6A	60.06	3.473	17.29	530.915	48.62	6.221	7.82	324.554	40.04	8.834	4.53	229.277
S7A	42.90	3.452	12.43	391.449	28.60	6.078	4.71	221.033	20.02	7.245	2.76	167.567
S8A	54.34	3.124	17.39	620.636	37.18	5.872	6.33	352.225	20.02	5.686	3.52	364.248
S9A	54.34	2.772	19.60	765.571	34.32	3.892	8.82	606.239	25.74	1.209	21.29	2044.979
S10A	57.20	2.771	20.64	744.642	45.76	5.909	7.74	396.699	28.60	9.781	2.92	257.453
S11A	51.48	2.524	20.40	831.346	34.32	4.431	7.75	498.464	28.60	4.651	6.15	472.876
S12A	60.06	2.510	23.93	811.236	42.90	3.724	11.52	593.378	42.90	5.639	7.61	409.114
S13A	51.48	3.824	13.46	491.773	31.46	6.219	5.06	313.355	22.88	10.443	2.19	198.984
S14A	62.92	2.535	24.82	604.187	45.76	4.934	9.27	336.233	37.18	8.230	4.52	198.699
S15A	60.06	3.242	18.52	533.085	48.62	5.460	8.91	336.547	34.32	8.802	3.90	200.722
S16A	51.48	5.376	9.58	390.602	28.60	12.252	2.33	189.110	20.02	19.184	1.04	132.816
S17A	40.04	5.531	7.24	356.469	25.74	10.864	2.37	205.688	14.30	6.856	2.09	357.459

(Tablo 10.2' nin devamı)

Yüzey No	Δ = 1 mm				Δ = 2 mm				Δ = 4 mm			
	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C	A_0/C	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C	A_0/C	θ^*_{max}	C	θ^*_{max}/C	A_0/C
	(^{0})	[0]	(^{0})	(mm^2)	(^{0})	[0]	(^{0})	(mm^2)	(^{0})	[0]	(^{0})	(mm^2)
S18A	40.04	6.394	6.26	283.329	28.60	10.828	2.64	181.529	17.16	15.277	1.12	140.415
S20A	54.34	3.313	16.40	583.927	31.46	5.944	5.29	347.165	17.16	5.726	3.00	350.564
S21A	48.62	3.145	15.46	594.606	37.18	6.334	5.87	320.124	25.74	10.160	2.53	213.679
S22A	62.92	2.816	22.34	658.615	51.48	5.167	9.96	380.000	42.90	7.646	5.61	264.223
S23A	57.20	3.796	15.07	448.790	31.46	8.878	3.54	209.063	17.16	13.674	1.25	142.797
S25A	48.62	5.367	9.06	388.148	34.32	11.111	3.09	211.450	20.02	19.406	1.03	132.490
S26A	57.20	2.358	24.26	855.568	48.62	4.174	11.65	521.429	34.32	4.927	6.97	446.489
S27A	51.48	3.395	15.16	672.750	42.90	6.756	6.35	385.615	22.88	2.501	9.15	1111.606
S28A	57.20	3.066	18.66	729.104	42.90	6.743	6.36	374.578	22.88	6.265	3.65	415.468
S29A	51.48	2.905	17.72	738.464	31.46	5.237	6.01	454.278	22.88	7.401	3.09	345.469
S30A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S31A	37.18	5.158	7.21	363.931	28.60	9.722	2.94	196.419	14.30	17.707	0.81	119.954
S32A	68.64	2.228	30.81	846.428	54.34	3.973	13.68	487.021	37.18	7.829	4.75	254.619

Süreksizlik alt blok yüzeyleri için kesme yönündeki en büyük görünür eğim açısı (θ^*_{max}) değerlerinin, sayısallaştırma sırasındaki veri örnekleme aralığına (Δ) bağlı olarak değişimi Şekil 10.3' deki grafikte verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, aynı yüzey daha yüksek örnekleme aralığı ile sayısallaştırıldığında, kesme yönündeki en büyük görünür eğim açısının değeri daha küçük hesaplanmaktadır.

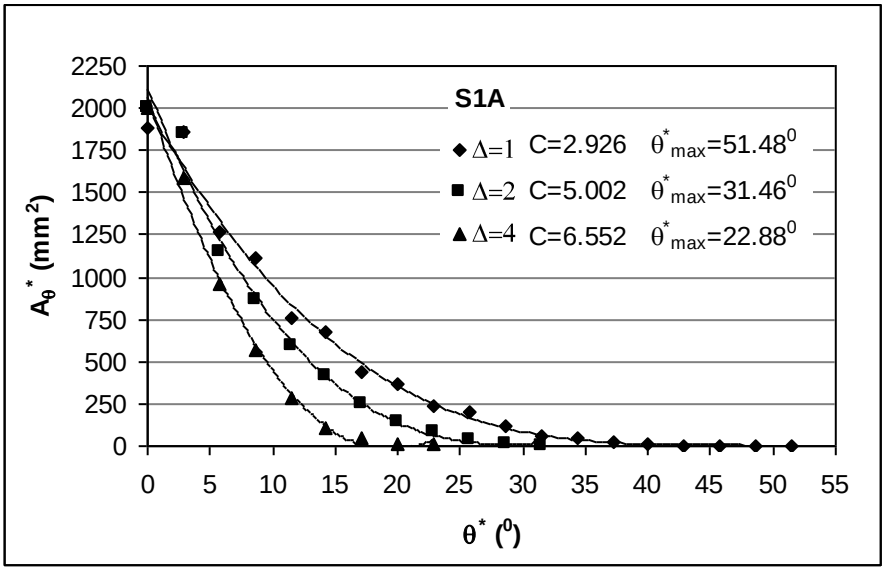


Şekil 10.3 : Sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarının (Δ) kesme yönündeki en büyük görünür eğim açısı (θ*max) değerleri üzerine olan etkisi

Süreksizlik yüzeyleri üzerinde belirli bir gözlem hattı içinde nispeten büyük dalga boyuna, ancak küçük frekansa sahip olan çizgisel geometri Patton (1966) tarafından yüzey dalgalılığı olarak adlandırılmıştır. Diğer taraftan, ana dalgalanmalar üzerinde yer alan, ancak ana dalgalanmalara oranla aynı gözlem hattı içinde daha düşük dalga boyuna dolayısıyla yüksek frekanslara sahip olan çizgisel geometri ise, yüzey pürüzlülüğü olarak tanımlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün referans düzlemi ile yapmış olduğu açılar pürüzlülük açısı ($i_{pürüzlülük}$), yüzey dalgalılığının referans düzlemi ile yapmış olduğu açılar ise dalgalılık açısı ($i_{dalgalılık}$) olarak isimlendirilmiş olup, pürüzlülük açılarının dalgalılık açılarından çok daha yüksek değerlere sahip olduğu belirtilmiştir. Bu tanımlamalara göre Şekil 10.3' deki durum şu şekilde açıklanacaktır. Belirli bir süreksizlik yüzeyinin sayısallaştırılması sırasında, veri örnekleme aralığı değeri büyük seçildiğinde, hesaplanan değer, gözlem ölçeği içinde, daha çok dalga boyu yüksek olup frekansı küçük olan geometrik yapılara ait eğim açılarına, yani dalgalılık açılarına yakınsayarak azalmaktadır. Ancak, aynı yüzeyin

sayısallaştırılması sırasında küçük örnekleme aralığı değerleri seçildiğinde, bu kez hesaplanan değer, yine gözlem ölçeği içinde, ana dalgalanmalar üzerinde bulunan yüksek frekansa düşük dalga boyuna sahip olan geometrik yapılara ait eğim açılarına, yani pürüzlülük açılarına yakınsamakta ve artmaktadır.

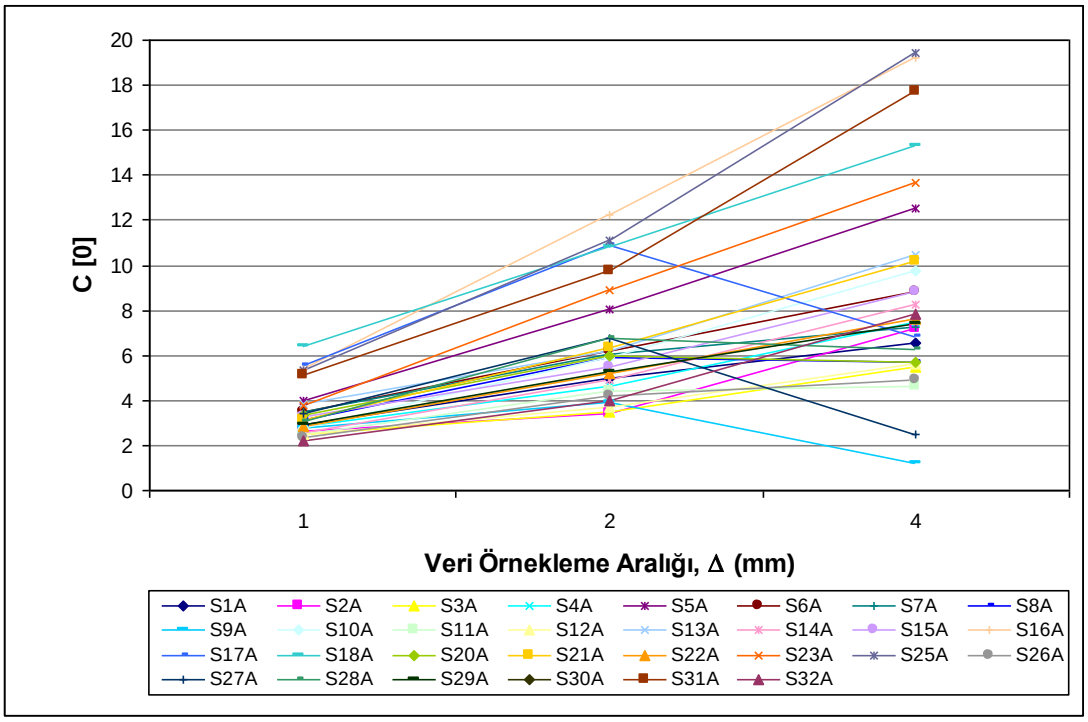
Hatırlanacağı üzere, bir süreksizlik yüzeyi üzerinde seçilen bir yönde, farklı görünür eğim açısı (θ^*) değerleri için toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*) değerlerinin değişmini ifade eden A_θ^* - θ^* grafiğindeki eğri konkav olup, konkavlık derecesi şekil parametresi olan "C" ile tanımlanmıştı (Graselli vd., 2002). C parametresi arttıkça eğrinin konkavlığı da artmakta, yüksek konkavlık, en büyük değerle karşılaştırıldığında daha düşük görünür eğim değerine sahip olan daha çok alan olduğu anlamına gelmekte, dolayısıyla yüksek C değerleri, daha düşük pürüzlülük derecesine sahip yüzeyleri tanımlamaktaydı. Daha önce verilen Şekil 10.2' deki S27A örneğinden de görüldüğü gibi, aynı yüzey daha büyük örnekleme aralığı ile sayısallaştırıldığında, morfolojisindeki ayrıntılarına ilişkin veriler toplanamadığından, artan örnekleme aralığı ile birlikte C parametresinin hesaplanan değerlerinde artış beklenecektir. Şekil 10.4' de, S1A yüzeyi için kesme yönünde, A_θ^* - θ^* eğrisinin konkavlığının, sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarına bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 10.4 : S1A yüzeyinin farklı örnekleme aralıkları (Δ) ile sayısallaştırılmasından elde edilen veri setlerinden hesaplanarak çizilen A_θ^* - θ^* ilişkileri

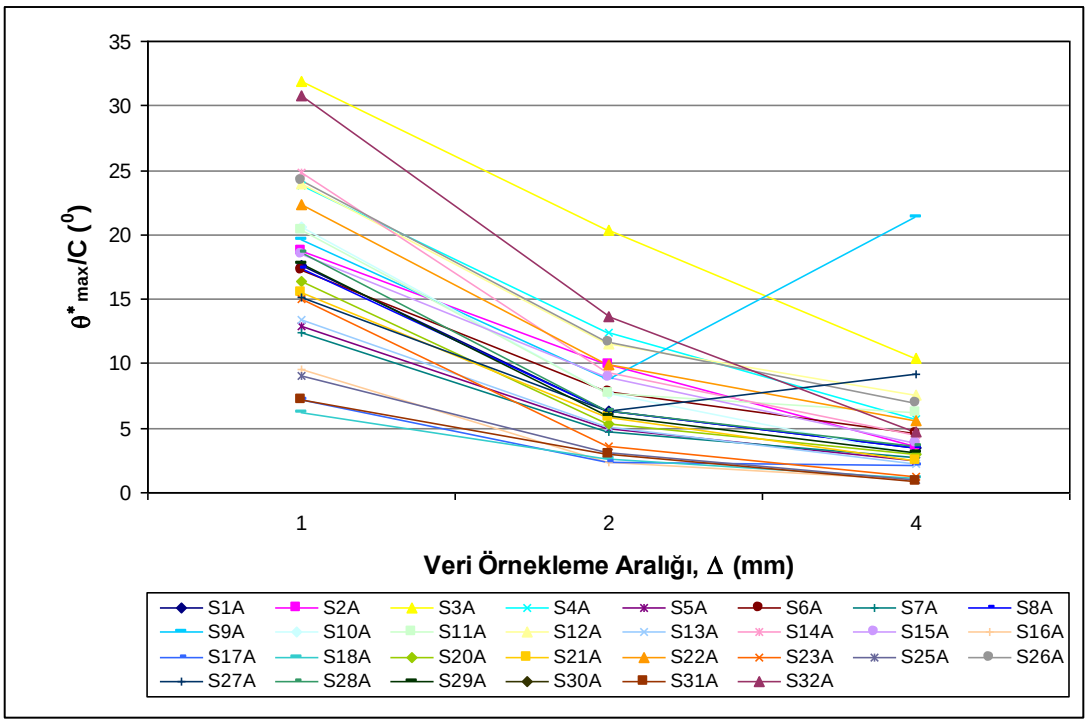
Beklendiği gibi, örnekleme aralığı arttıkça, eğrinin konkavlığı dolayısıyla C parametresinin değeri de artmaktadır. Örnekleme aralığına bağlı olarak, C

parametresinin kesme yönünde hesaplanan değerlerindeki değişim Şekil 10.5' de sunulmuştur. Δ=4 mm için S9A, S17A ve S27A yüzeyleri dışında tüm yüzeylerde C parametresinin değeri artmaktadır.

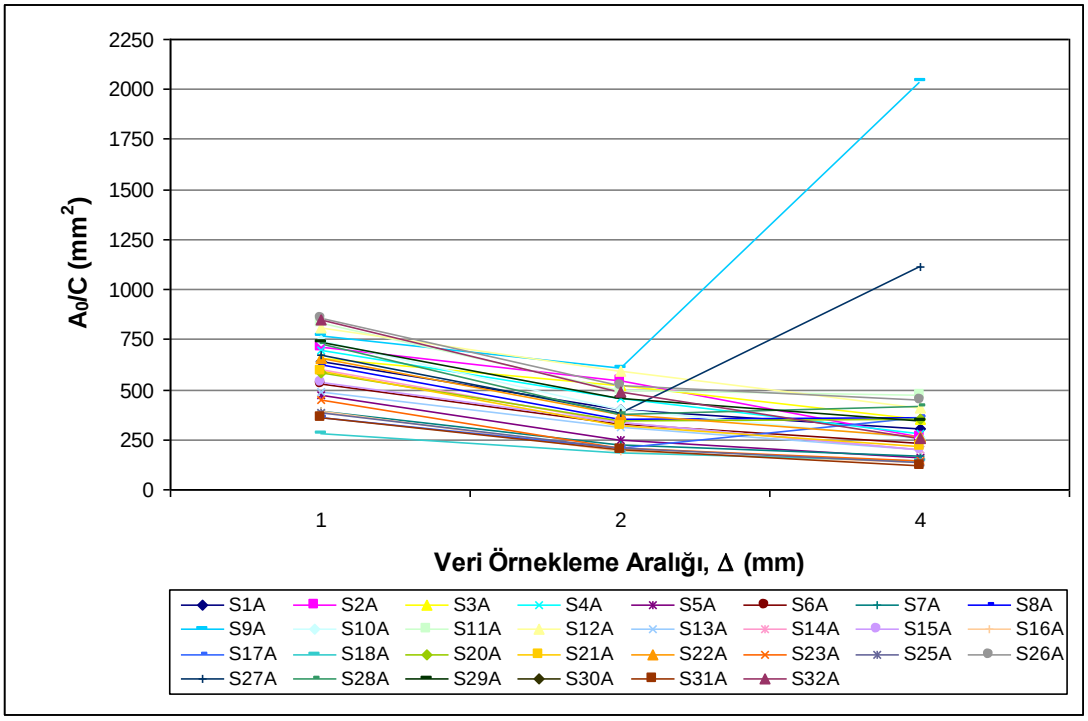


Şekil 10.5 : Sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarının (Δ) kesme yönündeki şekil parametresi (C) üzerine olan etkisi

Graselli (2001), farklı yüzeylerin yöne bağlı pürüzlülük derecelerinin birbirleri ile sayısal olarak karşılaştırılmasında θ^*_{max}/C oranını kullanmış, bu oranın yüzey üzerinde seçilen herhangi bir yönde açısallığın değişimini tanımladığını, pürüzlülük derecesi arttıkça θ^*_{max}/C oranın da arttığını ifade etmiştir. Örnekleme aralığına bağlı olarak, θ^*_{max}/C oranının kesme yönünde hesaplanan değerlerindeki değişim Şekil 10.6' da sunulmuştur. Aynı yüzeyin sayısallaştırılması sırasında kullanılacak farklı örnekleme aralığı değerleri, o yüzey üzerinde belirli bir yöndeki pürüzlülüğü tanımlamak için hesaplanacak θ^*_{max}/C oranının değerini etkilemekte, örnekleme aralığı arttıkça, Δ=4 mm için S9A ve S27A yüzeyleri haricinde, genel beklentiye uygun olarak, aynı yüzeyler için aynı yönlerde daha düşük θ^*_{max}/C değerleri elde edilmektedir. Benzer şekilde, örnekleme aralığına bağlı olarak A_0/C oranının kesme yönünde hesaplanan değerlerindeki değişim Şekil 10.7' de verilmiştir.



Şekil 10.6 : Sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarının (Δ) kesme yönünde hesaplanan θ^*_{max}/C oranı üzerine olan etkisi



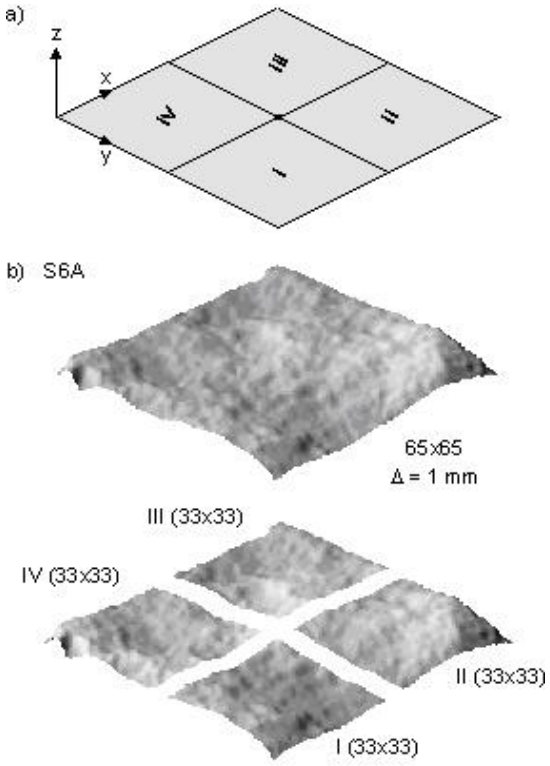
Şekil 10.7 : Sayısallaştırma sırasında kullanılan farklı veri örnekleme aralıklarının (Δ) kesme yönünde hesaplanan A_0/C oranı üzerine olan etkisi

Bir yüzeyin belirli bir yöndeki pürüzlülüğünü tanımlamak için hesaplanan A_0/C oranının değeri, o yüzeyin sayısallaştırılması sırasında kullanılan farklı örnekleme aralığı değerlerinden etkilenmektedir. Örnekleme aralığı arttıkça, Δ=4 mm için S9A,

S17A ve S27A yüzeyleri haricinde, aynı yüzeyler için aynı yönlerde daha düşük A_0/C değerleri elde edilmektedir.

10.3 Heterojenlik Etkisi

Yüzey pürüzlülüğünün heterojenliğini araştırmak için, S1, S6, S10 ve S27 no'lu süreksizlik örneklerinin alt blok yüzeylerinin (S1A, S6A, S10A ve S27A) Δ=1 mm örnekleme aralığı ile sayısallaştırılması sonucunda elde edilen 65x65 boyutundaki orjinal kare gridler, Şekil 10.8a' da görüldüğü gibi dört eşit bölgeye ayrılmış ve her bölge 33x33 boyutunda yeni bir grid olarak ele alınmıştır. Bu yeni gridlerin aynı kolon veya satırı üzerindeki komşu iki nokta arasındaki mesafe (Δ), orijinal gridde olduğu gibi 1 mm' dir.



Şekil 10.8 : Yüzey pürüzlülüğünün heterojenliğinin araştırılması. a) Sayısallaştırılmış yüzeylere ait 65x65 boyutundaki orjinal kare gridlerin bölünmesi ile oluşturulan yeni gridler ve bölgeleri b) S6A yüzeyine ait orijinal grid için ve bu gridin bölünmesi ile oluşturulan 33x33 boyutundaki yeni gridler için çizilen 3-boyutlu sayısal modeller

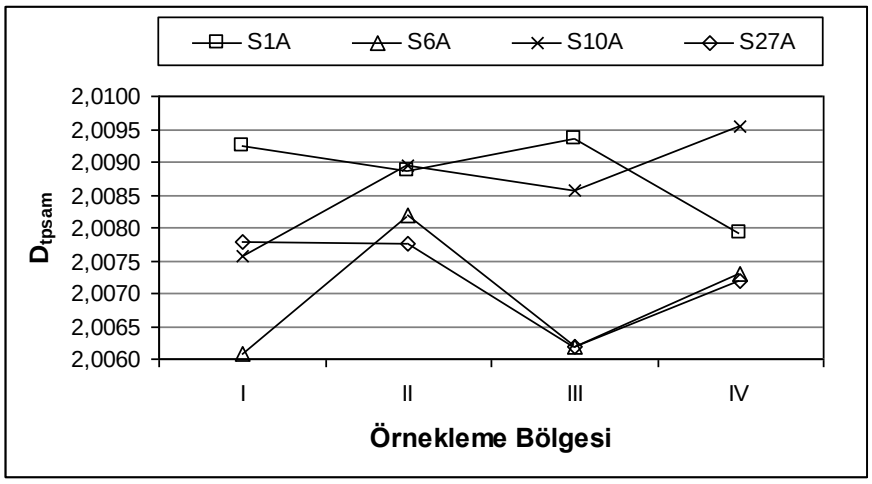
65x65 boyutundaki orijinal grid için çizilen 3-boyutlu sayısal model ile 33x33 boyutundaki yeni gridler (I, II, III, IV) için çizilen 3-boyutlu sayısal modeller, S6A no'lu yüzey örneğinde görülmektedir (Şekil 10.8b).

S1A, S6A, S10A ve S27A yüzeylerinin 65x65 boyutundaki orijinal gridlerine, üçgen prizma yüzey alanı yöntemi daha önce uygulanmış ve bu yüzeylerin fraktal boyut değerleri (D_{tpsam}) hesaplanmıştı. Bu yüzeylere ait orjinal gridlerin dört eşit bölgeye ayrılması ile oluşturulan 33x33 boyutundaki I, II, III ve IV no' lu yeni gridlere de aynı yöntem uygulanmış ve fraktal boyutlar hesap edilmiştir. Hesaplanan bu değerler, orijinal gridlerin fraktal boyutları ile birlikte Tablo 10.3' de sunulmuş, bölgelere göre değişimleri ise Şekil 10.9' daki grafikte çizilmiştir

Tablo 10.3 :Aynı yüzeyler üzerindeki farklı bölgeleri için hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri

Yüzey No	D_{tpsam}				
	I (33 X 33) Δ=1mm	**II (33 X 33) Δ=1mm**	**III (33 X 33) Δ=1mm**	**IV (33 X 33) Δ=1mm**	**Tüm Yüzey (65x65) Δ=1mm**
S1A	2,009246	2,008866	2,009363	2,007925	2,007267
S6A	2,006089	2,008197	2,006184	2,007291	2,006047
S10A	2,007566	2,008943	2,008580	2,009552	2,007126
S27A	2,007777	2,007763	2,006197	2,007201	2,006189

.

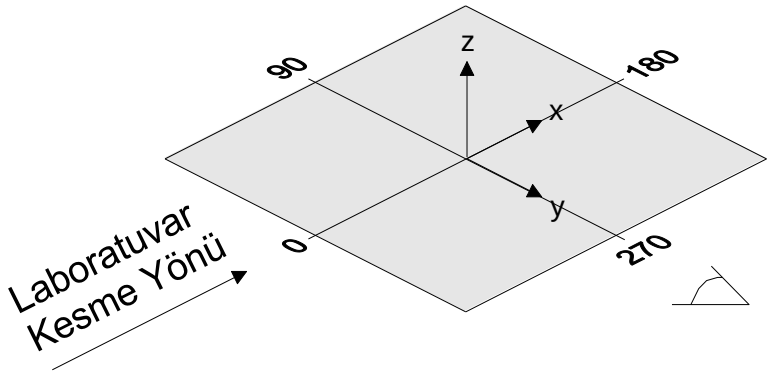


Şekil 10.9 : Aynı yüzeylerin farklı bölgeleri için hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerlerinin bölgelere göre değişimi ve yüzey pürüzlülüğünün heterojenliği

Şekil 10.9' da görüldüğü gibi, yüzey pürüzlülüğü homojen olmayıp, aynı yüzeylerin farklı bölgeleri için hesaplanan fraktal boyut değerleri birbirinden farklıdır. Yüzey pürüzlülüğü heterojen özellik göstermekte olup, aynı yüzey üzerindeki farklı bölgelerinin pürüzlülük değerleri birbirinden ve tüm yüzeyin pürüzlülük değerinden farklı olmaktadır.

10.4 Anizotropi Etkisi

Laboratuvar direkt kesme deneylerinde, karşıdan bakışda, süreksizlik üst bloğu alt bloğa nazaran sağa doğru hareket etmektedir. Süreksizlik alt bloğuna etkiyen kesme vektörünün yönü x-ekseni doğrultusu boyunca sağa doğrudur. Şekil 10.10' da çizilen şemadaki kare, süreksizlik alt blok yüzeyi gibi düşünülürse, laboratuvar deneylerinde bu yüzeye etkiyen kesme vektörü 0^0-180^0 yönündedir. Morfolojiyi tanımlayıcı A_0, θ^*_{max}, C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametreleri bu yön için hesaplanmıştır.



Şekil 10.10 : Yüzey pürüzlülüğünün anizotropisinin araştırıldığı yönler

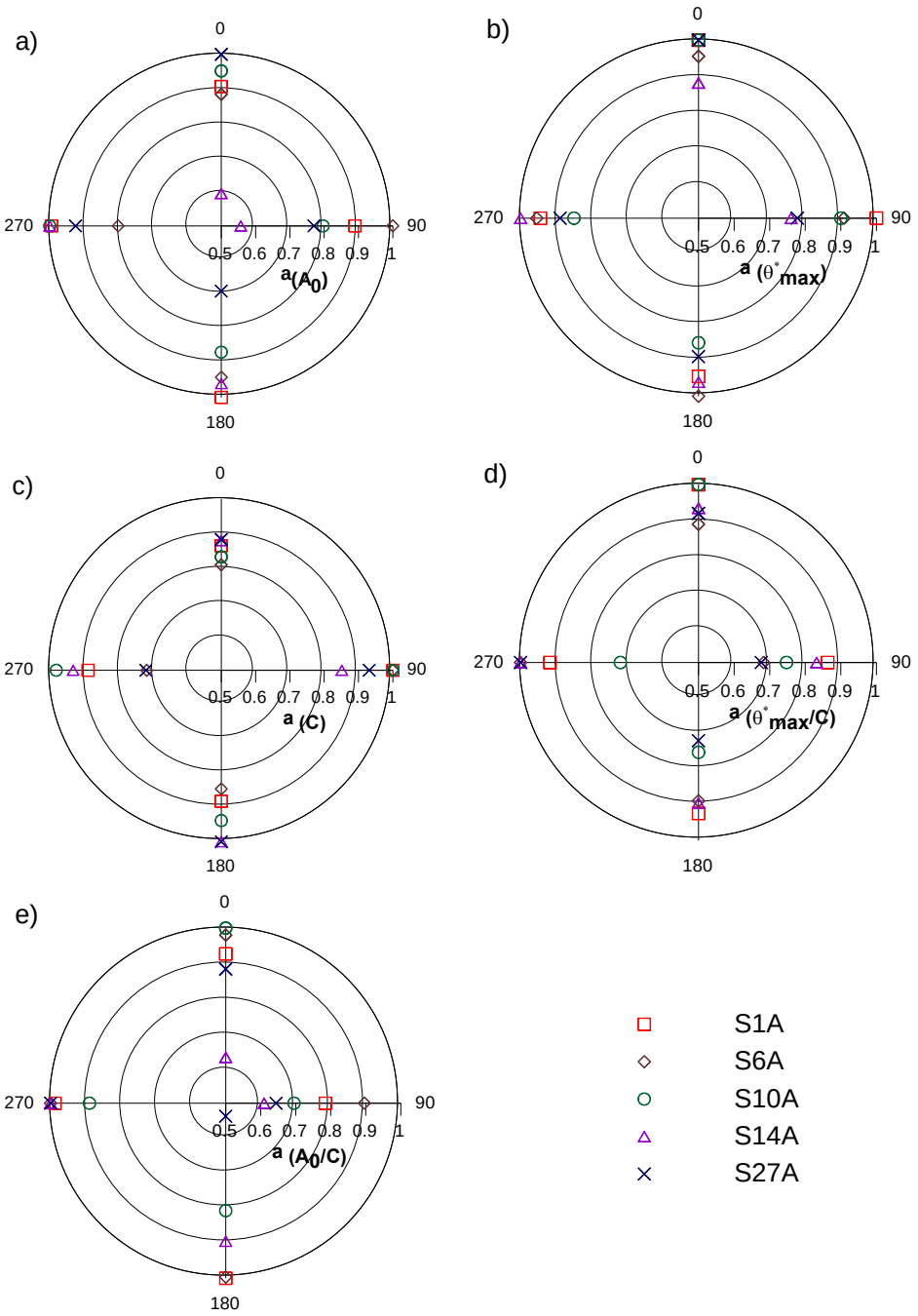
Yüzey üzerinde seçilecek farklı kesme yönlerinde bu parametrelerin değerlerindeki değişimleri analiz etmek, bir başka deyişle yüzey geometrisinin anizotropisini araştırmak amacı ile; S1A, S6A, S10A, S14A ve S27A yüzeyleri üzerinde 90 derecelik açılar ile farklı yönler seçilmiş ve bu parametreler her bir yön için tekrar hesaplanmıştır. A_0, θ^*_{max}, C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametrelerinin, Şekil 10.10' da görülen 90^0-270^0, 180^0-0^0 ve 270^0-90^0 yönleri için hesaplanan yeni değerleri, daha önce 0^0-180^0 yönü için hesaplanan değerleri ile birlikte Tablo 10.4' de verilmiştir.

Her bir yüzey için, A_0, θ^*_{max}, C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametrelerinin dört farklı yönde hesaplanan değerlerinin değişimi, sırasıyla Şekil 10.11a, b, c, d ve e' de görülen kutupsal diyagramlarda sunulmuştur. Bu parametrelerden herhangi birinin, herhangi bir yüzey üzerinde, farklı yönlerdeki değerlerinin, o yüzey üzerindeki en büyük değerinden ne oranda sapma gösterdiğini pratik olarak ifade etmek için, farklı yönlerdeki değerlerinin herbiri, bunların en büyük değerine oranlanmış ve kutupsal diyagramlarda "a" ile tanımlanan bu oran cinsinden ifade edilmiştir. Herhangi bir parametrenin en büyük değerine ulaştığı yönde o parametreye ait olan oran 1 değerini alacak, bu oranın diğer üç yöndeki değerleri ise 1' den daha küçük olacaktır.

Tablo 10.4 :Yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametrelerin aynı yüzey üzerinde seçilen farklı yönler için aldıkları değerler

Yüzey Parametreleri	Yüzey No	Yönler			
		0^0	90^0	180^0	270^0
A_0 (mm^2)	S1A	1883.734	1848.218	2077.916	2066.313
	S6A	1843.814	2087.013	1963.849	1670.937
	S10A	2063.625	1727.437	1881.548	2168.040
	S14A	1531.675	1433.756	2470.161	2575.084
	S27A	2284.120	1759.075	1576.502	2112.293
θ^*_{max} (^{0})	S1A	51.48	51.48	48.62	48.62
	S6A	60.06	57.20	62.92	60.06
	S10A	57.20	51.48	48.62	48.62
	S14A	62.92	54.34	68.64	71.50
	S27A	51.48	40.04	45.76	45.76
C [0]	S1A	2.9264	3.3903	2.9910	3.0122
	S6A	3.4729	4.3009	3.6373	3.0852
	S10A	2.7713	3.3373	3.1312	3.2738
	S14A	2.5351	2.4571	2.8862	2.6894
	S27A	3.3952	3.5874	3.8527	2.7729
θ^*_{max}/C (^{0})	S1A	17.59	15.18	16.26	16.14
	S6A	17.29	13.30	17.30	19.47
	S10A	20.64	15.43	15.53	14.85
	S14A	24.82	22.12	23.78	26.59
	S27A	15.16	11.16	11.88	16.50
A_0/C (mm^2)	S1A	643.704	545.149	694.723	685.981
	S6A	530.915	485.250	539.920	541.598
	S10A	744.642	517.615	600.903	662.240
	S14A	604.187	583.516	855.852	957.494
	S27A	672.750	490.348	409.194	761.763

Kuramsal olarak, herhangi bir parametre için bu oranın aynı yüzey üzerindeki tüm yönlerde 1 değerini alması, o parametrenin o yüzey üzerindeki tüm yönlerde aynı değere sahip olması anlamına gelecek ve bu durumda o parametre açısından yüzey izotropisinden bahsedilecektir. Diğer taraftan, herhangi bir parametre için bu oranın, aynı yüzey üzerindeki tüm yönlerde birbirinden farklı değerler alması, o parametre için yüzeyin anizotrop olması anlamına gelecektir.



Şekil 10.11 : Yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametrelerin anizotropisi a) maksimum olası değme alanı (A_0) b) en büyük görünür eğim açısı (θ^*_{max}) c) şekil parametresi (C) d) θ^*_{max}/C oranı e) A_0/C oranı

Şekil 10.11' de sunulan kutupsal diyagramlardan görüleceği gibi; maksimum olası değme alanı (A_0), en büyük görünür eğim açısı (θ^*_{max}), $A_\theta{}^*$ - θ^* eğrisinin konkavlığını tanımlamakta olan şekil parametresi C ile θ^*_{max}/C ve A_0/C oranları aynı yüzey üzerinde seçilecek farklı yönlerde farklı değerler almaktadırlar. Bu durum, yüzey pürüzlülüğünün yöne bağımlı (anizotrop) olduğunu, aynı yüzey aynı sabit normal gerilme değeri altında farklı yönlerde kesildiğinde, farklı yönler için farklı kesme dayanımlarının elde edileceğini göstermektedir.

11 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Süreksizlik yüzeylerinin sayısallaştırılması için tamamen bilgisayar kontrollü yeni bir yüzey tarama cihazı, bu yüzeylerin kesme dayanım ve davranışlarının laboratuvar ortamında belirlenebilmesi için bir direkt kesme deney cihazı bu çalışma için özel olarak tasarımlanmış ve geliştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün sayısal olarak tanımlanmasında fraktal geometri kavramı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan süreksizlik örneklerinin alt ve üst blok yüzeylerinin sayısallaştırılmasıyla elde edilen 65x65 mm boyutundaki 2-boyutlu veri setlerine, güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) ve üçgen prizma yüzey alanı (tpsam) yöntemleri uygulanmış, bu yüzeyler için fraktal boyutlar (sırasıyla, D_{psd} ve D_{tpsam}) iki farklı yöntem ile hesaplanmıştır. Yüzey fraktal boyutları hesaplanan süreksizlik örnekleri üzerinde mekanik kesme deneyleri yapılmış olup, bu deneyler 3 farklı sabit normal gerilme değeri (σ_n) altında gerçekleştirilmiştir. Çok aşamalı deney tekniği (staged testing) kullanılmış, her kesme işleminin ardından yüzeylerde oluşan milonitik malzeme temizlenerek yüzeylerden uzaklaştırılmış ve yüzeyler tekrar sayısallaştırılmıştır. Bu çalışmada, birbiri üzerinde ötelenen yüzeyler arasındaki değme alanlarının kesme yönüne bağlı olarak önceden hesaplanmasına olanak sağlayan ve hesaplama tekniği üçgen prizma yüzey alanı yönteminin temel algoritması üzerine kurulmuş olan yeni bir yaklaşım (değme alanları yaklaşımı) geliştirilmiştir. Daha önce Graselli ve diğ. (2002) tarafından tanımlanan kesme yönündeki; toplam potansiyel değme alanı (A_θ^*), maksimum olası değme alanı (A_0), en büyük görünür eğim açısı (θ^*_{max}), şekil parametresi (C) ve θ^*_{max}/C oranı bu yeni yaklaşım ile de hesaplanabilmektedir. Sayısallaştırma işlemi ile elde edilen 2-boyutlu veri setlerine bu yaklaşım uygulanmış ve yukarıda belirtilen kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametreler hesaplanmıştır. Ayrıca bu çalışmada, yeni bir parametre olarak A_0/C oranı tanımlanmış ve hesaplanmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır.

Geliştirilen yüzey tarama cihazı tüm yüzeyi alansal olarak sayısallaştırmakta ve 2-boyutlu veri [z(x,y)] toplamaktadır. Ölçümlerin insan eli değmeksizin bilgisayar denetiminde gerçekleşmesi, özel yazılımı sayesinde doğrudan sayısal veri toplaması, bunların ölçümle eş zamanlı olarak bilgisayarda dosyalanması ve ölçüm

sonrasında hiç bir ikincil ek işlem gerektirmeksizin matematiksel analizlerde doğrudan kullanılabilir formatta olması kullanıcıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Geliştirilen direkt kesme deney cihazının bilgisayar denetimindeki veri toplama ve işleme ünitesi, hem kesme gerilmesi (τ) – kesme yerdeğiştirmesi (u) ve normal yerdeğiştirme (v) – kesme yerdeğiştirmesi (u) grafiklerinin oldukça hassas elde edilmesini mümkün kılmakta hem de deney sırasında kullanıcıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Gerek güç spektrum yoğunluğu analizi (psd) gerek üçgen prizma yüzey alanı (tpsam) yöntemleri ile yapılan analizlerde, aynı örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri için birbirine çok yakın fraktal boyut değerleri elde edilmiştir. Örneklerin alt ve üst blok yüzeyleri birbirleri ile iyi örtüşür durumdadır. Birbirleri ile iyi örtüşen iki yüzey için birbirine çok yakın fraktal boyut değerlerinin elde edilmiş olması, geliştirilen yüzey tarama cihazının ölçüm doğruluğu ve hassasiyetinin oldukça güvenilir olduğunun bir göstergesidir.

Kesme deneyleri öncesinde sayısallaştırılan süreksizlik örneği alt ve üst blok yüzeylerinin her kesme işleminin hemen ardından tekrar sayısallaştırılmış olması, kesilen yüzeyler için fraktal boyutlar (D_{psd} ve D_{tpsam}) ile değme alanları yöntemiyle kesme yönünde hesaplanan yüzey geometrisini tanımlayıcı sayısal parametrelerin (A_0, C, θ^*_{max}/C ve A_0/C) tekrar hesaplanmasına ve hesaplanan değerlerin kesilmeye bağlı değişimlerinin izlenmesine olanak sağlamıştır. D_{psd}, D_{tpsam}, θ^*_{max}/C ve A_0/C yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılı, C ise ters orantılıdır. Yüzeylerin kesilmesi ile birlikte pürüzlülüğün azalmasına bağlı olarak D_{psd}, D_{tpsam}, θ^*_{max}/C ve A_0/C değerlerinde azalma, C parametresinin değerinde ise beklendiği gibi artma gerçekleşmiştir. A_0 parametresi kesme yönündeki maksimum olası değme alanını tanımladığından kesilme ile birlikte bu parametrenin değerinde de düşüş gerçekleşmiştir. Bu durum hesaplanan fraktal boyutların ve özelliklede kesme yönündeki yüzey geometrisini tanımlayan sayısal parametrelerin yüzeylerdeki değişimleri hassas bir şekilde algıladığını ve bu yüzeyleri tanımlamada başarılı olduklarını ortaya koymaktadır.

C, θ^*_{max}/C ve A_0/C değerleri yöne bağımlı yüzey geometrisini tanımlayıcı parametrelerdir. Bu parametreler hesaplanırken, direkt kesme deneylerindeki kesme yönü dikkate alınmış ve bu yönde hesaplanmışlardır. Fraktal boyutlar olan D_{psd} ve D_{tpsam} değerleri ise, yönden bağımsız olarak tüm yüzeyin pürüzlülüğünü tanımlayan parametrelerdir. Yönden bağımsız olan fraktal boyutlar (D_{psd} ve D_{tpsam}) ile kesme

yönünde hesaplanan C, θ^*_{max}/C ile A_0/C parametreleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Üçgen prizma yüzey alanı (tpsam) yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) değerleri ile C, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametreleri arasında önemli ilişkiler elde edilmiştir. Pürüzlülükle doğru orantılı olan D_{tpsam} değeri arttıkça, yine pürüzlülük ile doğru orantılı olan θ^*_{max}/C ve A_0/C değerleri de artmaktadır. C pürüzlülük ile ters orantılı olduğundan, D_{tpsam} arttıkça C parametresinin değeri azalmaktadır. Yüzey pürüzlülüğün sayısal tanımı için farklı yöntemler ile hesaplanan yöne bağımlı ve yönden bağımsız olan bu parametreler birbirleri ile uyum içindedir. Diğer önemli bir bulgu ise, Graselli ve diğ. (2002) tarafından tanımlanan ve kesme yönünde yüzeydeki açısallığın değişimini ifade eden θ^*_{max}/C oranı ile bu çalışmada tanımlanan A_0/C oranı arasında önemli ilişki elde edilmiştir. Buna karşın, güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemiyle hesaplanan fraktal boyutlar (D_{psd}) ile diğer pürüzlülük parametreleri arasında önemli bir ilişki bulunamamıştır.

Süreksizlik örneklerinin alt ve üst blok yüzeyleri için, üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle (tpsam) hesaplanan fraktal boyut değerleri (D_{tpsam}) ve değme alanları yaklaşımıyla kesme yönünde hesaplanan C, θ^*_{max}/C, A_0/C parametrelerinin değerleri, bu örneklerin laboratuvar direkt kesme deneyinde σ_N = 300 kPa sabit normal gerilme değeri altında kesilmesiyle elde edilen en büyük kesme dayanımı oranları (τ_p / σ_N) ile karşılaştırılmış ve yüzey pürüzlülüğünün kesme dayanımı üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Kesme deneyleri sırasında, kesme yer değiştirmesinin başlaması ile birlikte, yüzeyler üzerinde etkili olan kesme vektörlerinin yönünde yer alıp, bu vektörlerin doğrultusuna dik olan kenarlarda yoğunlaşan çekme gerilmeleri, bazı örneklerde bu kenarlardaki bir miktar malzemeyi koparark yüzeyden ayırmıştır. Deneylerden elde edilen en büyük dayanım değerlerinin, yüzeyler üzerindeki pürüzleri yenmek için gerekli olan gerilmeler olduğundan emin olmak ve dayanım değerleri ile pürüzlülük arasındaki korelasyonların güvenilirliğini artırmak için, yapılan karşılaştırmalarda kopma olayından etkilenmemiş ya da çok az etkilenmiş örnekler kullanılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalarda, güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemiyle (psd) hesaplanan fraktal boyut değerleri (D_{psd}) ile en büyük kesme dayanımı oranları (τ_p / σ_N) arasında iyi bir ilişki bulunamamıştır. Diğer taraftan, gerek üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle (tpsam) hesaplanan fraktal boyut değerleri (D_{tpsam}), gerekse değme alanları yaklaşımıyla hesaplanan kesme yönündeki şekil parametresi (C) ve θ^*_{max}/C oranı değerleri, deneysel olarak elde edilen en büyük kesme dayanımı oranları (τ_p/σ_N) ile önemli ilişkiler sunmuştur. Yapılan

karşılaştırmalarda en yüksek belirleme katsayısı, en büyük kesme dayanımı oranı (τ_p/σ_N) ile A_0/C oranı arasında belirlenmiştir.

Aynı süreksizlik yüzeyinin sayısallaştırması sırasında kullanılacak farklı örnekleme aralıklarının, o yüzeyin morfolojisini tanımlamak amacı ile hesaplanacak sayısal parametreler üzerine olan etkisi de araştırılmıştır. Veri örnekleme aralığı (Δ) azaldıkça, bir başka deyişle sayısallaştırma işleminde aynı yüzey üzerinden daha fazla veri toplandıkça, hesaplanan fraktal boyut (D_{tpsam}) ve yöne bağlı olan θ^*_{max}, θ^*_{max}/C ve A_0/C parametrelerinin değerleri artış göstermektedir. Pürüzlülük ile ters orantılı olan C parametresinin değeri ise doğal olarak azalmaktadır. Diğer taraftan, yüksek örnekleme aralığı (Δ) değerleri altında yapılan sayısallaştırma işlemlerinde, yüzey üzerindeki ayrıntılara ilişkin veriler toplanamamakta, bu yolla oluşturulan veri setleri üzerinde gerçekleştirilen analizlerde yüzeyler gerçekte olduklarından daha az pürüzlü hesaplanmaktadır.

Aynı süreksizlik yüzeyi üzerinde seçilen farklı bölgelere üçgen prizma yüzey alanı yöntemi (tpsam) uygulanmış ve her bölge için fraktal boyutlar (D_{tpsam}) tekrar hesaplanmıştır. Farklı bölgeler için hesaplanan fraktal boyut değerleri birbirinden ve tüm yüzeyin fraktal boyut değerinden farklı olmaktadır. Dolayısıyla, aynı süreksizlik yüzeyi üzerindeki farklı bölgeler birbirlerinden ve tüm yüzeyden farklı pürüzlülük derecelerine sahip olmakta ve yüzey pürüzlülüğü heterojen bir özellik göstermektedir.

Maksimum olası değme alanı (A_0), en büyük görünür eğim açısı (θ^*_{max}), şekil parametresi (C) ile doğrudan pürüzlülüğü tanımlayan θ^*_{max}/C ve A_0/C değerleri kesme yönünde hesaplanmıştır. Yüzey üzerinde seçilecek farklı kesme yönlerinde bu parametrelerin değerlerindeki değişimleri analiz etmek, bir başka deyişle yüzey morfolojisinin anizotropisini araştırmak amacı ile yüzeyler üzerinde 90 derecelik açılar ile farklı yönler seçilmiş ve bu parametreler her bir yön için tekrar hesaplanmıştır. Bu parametreler aynı yüzey üzerinde seçilen farklı yönlerde farklı değerler almaktadırlar. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün yöne bağımlı (anizotrop) olduğunu göstermektedir. Bu durum, aynı yüzey aynı sabit normal gerilme değeri altında farklı yönlerde kesildiğinde, farklı yönler için farklı kesme dayanımlarının elde edileceği anlamına gelmektedir.

KAYNAKLAR

Aydan, Ö., Shimizu, Y., and Kawamoto, T., 1995. A portable system for in-situ characterization of surface morphology and frictional properties of rock discontinuities. *Proceedings of the Field Measurements in Geomechanics 4th Intnl. Symp.,* 463-470.

Aydan, Ö., Shimizu, Y., and Kawamoto, T., 1996. The anisotropy of surface morphology characteristics of rock discontinuities. *Rock Mech. Rock Eng.,* **29** (1), 47-59.

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

Babadagli, T. ve Develi, K., 2001. On the application of methods used to calculate the fractal dimension of fracture surfaces, *Fractals* **9** (1) 105-128.

Babadagli, T. ve Develi, K., 2003. Fractal characteristics of rocks fractured under tension, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* **39**, 73-88.

Babadagli,T., and Develi, K., 2000. Fractal analysis of natural and synthetic fracture surfaces of geothermal reservoir rocks, *Proceedings 2000 World Geothermal Congress,* Kyushu-Tohoku, Japan*,* May 28-June **10**, 2515-2520.

Bandis, S.C., 1993. Engineering properties and characterization of rock discontinuities,in *Comprehensive Rock Engineering. Principles, Practice & Projects. Vol. 1: Fundamentals*, pp. 155-83.

Barton N. R and Choubey V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech.*, **10**,1-54.

Barton N. R., 1973. Rewiev of a new shear strength criterion for rock joints, *Eng. Geol*. **7**, 287-332.

Barton, N. R. and Bandis, S. C., 1982. Effect of block size on the shear behaviour of jointed rock. In: *'23rd US Symp. On Rock Mech.'*, 736-60.

Barton, N. R., 1971. A relationship between joint roughness and joint shear strength, *Proc. Symp. Rock Fracture*, Nancy-France, 1-8.

Berry M. V., Lewis Z. V., 1980. On the Weierstrass-Mandelbrot fractal function, *Proc. Roy. Soc. London. Ser*., A370, 459-484.

Brigham, O. E., 1974. The Fast Fourier Transform, Prentice-Hall, Inc., Newjersey, USA.

Brigham, O. E., 1988. The Fast Fourier Transform and Its Application, Prentice Hall Signal Processing Series, New Jersey U.S.A.

Brinksmeier, E., Riemer, O., 1998. Measurement of optical surfaces generated by diamond turing. International Journal Machine Tools and Manufacture **38** (5-6), 699-705.

Brown S. R., Scholz C. H., 1985. Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, *J. Geophys. Res.*, **90**, 575-582.

Brown, S.R., 1987. A note on the description of surface roughness using fractal dimension, *Geophys. Res. Lett.* **14**(11), 1095-1098.

Bulut, F., 1989. Çambaşı (Trabzon-Çaykara) Barajı ve Uzungöl hidroelektrik santral yerlerinin mühendislik jeolojisi açısından incelenmesi, *Doktora Tezi*, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Canıtez, N., 1987. Spectral Analiz ve Jeofizik Uygulamaları, *TMMOB Jeofizik Müh. Odası, Eğitim Yayınları*, No.1.

Carr J. R., Warriner J. B., 1989. Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient, *Bull. Assoc. Eng. Geol.*, **26**, 253-264.

Carr, J. R., Warriner, J. B., 1987. Rock mass characterisation using fractal dimension, Rock Mechanics, Tucson, Arizona, Balkema, Rotterdam, 73-80.

Carter, J. P. (eds). Proceeding of the ınternational conference on computer methods and advances in geomechanics, Balkema, Rotterdam, pp: 87-91.

Clarke, K. C., 1986. Computation of the farctal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method*: Computers & Geosciences*, **12**, no. 5, 713-722.

Corthouts, L.T., 1966. Sliding resistance of brittle surfaces. *S.M. Thesis*, M.I.T.,Cambridge.

Çağlan, D., 2000. Pürüzlü eklem yüzeylerinin makaslama dayanımı parametrelerinin saptanmasında Barton görgül yenilme ölçütünün pratiğe uygulanabilirliğinin araştırılması. *Doktora Tezi*, Hacettepe Üniv., Jeoloji Müh. Böl.

Çoğulu Ersen, 1975. Gümüşhane ve Rize Bölgelerinde Petrolojik ve Jeokronometrik Araştırmalar, İ.T.Ü. Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.

Den Outer A., Kaashoek J. F., and Hach H.R.G.K., 1995. Difficulties with using continuous fractal theory for discontinuity surfaces, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **32**,1, 3-9.

Develi, K. ve Babadagli, T., 1998. Quantification of natural fracture surfaces using fractal geometry. *Mathematical Geology* **30** (8), 971-998.

Develi, K. ve Vardar, M., 1998. Süreksizliklerin yüzey pürüzlülüğünün fraktal geometri yardımıyla sayısal tanımı, *4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 22-23 Ekim 1998, Zonguldak Türkiye, s. 217 – 225.

Develi, K., 1996. Harşit vadisi-Kürtün barajı aks yeri kayaçlarında çatlak yüzeylerindeki pürüzlülüğün sayısal tanımı*, Master Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi.

Develi, K., Babadagli, T and Comlekci, C., 2001. A new computer controlled surface scanning device for measurement of fracture surface roughness, *Comput. Geosci*. **27** (3) 265–277.

Einstein, H. H., Bruhn, R. W. and Hirschfeld, R. C., 1970. Mechanics of jointed rock. Experimental and theoretical studies. *M.I.T., Cambridge, Dept. Civil Engng.,* Rep., Aug.

Einstein, H.H. and Dowding C.H., 1981. Shear resistance and deformability of rock discontinuities, in *Physical Properties of Rocks and Minerals Vol II-2, in CINDAS Series on Material Properties*, pp. 177-219, Eds. Touloukian, Y.S., Judd, W.R. & Roy, R.F.

Ercan, T., and Gedik, A., 1983. Pontidlerdeki volkanizma jeoloji mühendisliği, Eylül 5-22.

Erguvanlı, K., 1950. Trabzon-Gümüşhane Arasındaki Bölgenin Jeolojik Etüdü. Rap. No. 2273.

Erguvanlı, K., 1982. Mühendislik Jeolojisi, İ.T.Ü. Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.

Eyüboğlu, R., 1999. 'Harşit vadisi Doğankent (Giresun)-Yurtköyü (Gümüşhane) arasının yamaç duraylığı açısından incelenmesi' ,*Doktora Tezi*, İTÜ Maden Fak. (yayınlanmamış).

Fecker, E., 1970. Geologische Kartierung des Gabietes nordwestlich von Neustadt/Weinstrabe sowie Bau und Anwendung eines Profilographen, *Diplom-Thesis*, University of Karlsruhe.

Fecker, E., and Rengers, N., 1971. Measurements of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass, *Proceedings Symposium Rock Fracture, Nancy,* 1-18.

Feder, J., 1988. Fractals, Plenum Press, New York.

Ferraro, A. M., Giani, G. P., 1990. Geostatistical description of the joint surface roughness, In: Hustrulid, W. A., Johnson, G. A. (eds), *Proceedings of 31st. U.S. Symp. on Rock Mechanics,* Golden, Colorada, Rock Mechanics Contributions and Challenges. Balkema, Rotterdam, 463-470.

Gedikoğlu, A., 1978. Harşit granit karmaşığı ve çevre kayaçları, Giresun-Doğankent, *Doçentlik Tezi*, K.T.Ü. Yerbilimleri Fak., Jeoloji Böl., Trabzon.

Gentier, S., Lamontagne, 1997. E., Archambault, G., Riss, J., Anisotropy of flow in a fracture undergoing shear and its relationship to the direction of shearing and injection pressure.*Int J Rock Mech. Min. Sci*., **34**, 412.

Gentier, S., Riss, J., Archambault, G., Flamand, R., Hopkins, DL., 2000. Influence of fracture geometry on sheared behaviour. *Int J Rock Mech. Min. Sci. Geomech Abstr* ; **37**, 161-74.

Gleyzes, P., Loriette, V., Saint-Jalmes, H., Boccara, A.C., 1998. Roughness measurement in the picometric range using a polarization interferometer and a multichannel lockin detection tecnique. *International Journal Machine Tools and Manufacture* **38** (5-6), 715-717.

Goodman, R. E., Heuze, F. E., Ohnishi, Y., 1972. Research on strength, deformability water perssure relationship for faults in direct shear, Rep. *ARPA Contract H0210020*, Univ. Calif., Berkeley.

Grasselli, G., 2001. Shear strength of rock joints based on quantified surface description, *PhD Thesis*, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL).

Grasselli, G., Wirth, J., Egger, P., 2002. Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing, *Int. J Rock. Mech. Min. Sci.,* **3**9, 789-800.

Grigoriev, A. Y., Chizhik, S. A., Myshkin, N. K., 1998. Texture classification of engineering surfaces with nanoscale roughness. *International Journal Machine Tools and Manufacture* **38** (5-6), 719-724.

Hsiung, S. M., Ghosh, A., Chowdhury, A.H., 1995. On natural rock joint profile characterization using self-affine fractal approach, in *Rock Mechanics*: pp. 681-687, Eds. Daemen & Schultz, Balkema, Rotterdam.

Huang S. L., Oelfke S. M. and Speck R. C., 1992. Applicability of fractal characterization and modelling to rock joint profiles, *Int. J. Rock Mech. Min Sci & Geomech. Abstr.,* **29**, 89-98.

Huang, T. H., Doong, Y. S., 1990. Anisotropic shear strength of rock joints, In: Barton and Stephanson (eds), *Proceeding of the International Symp. on Rock Joints*, Loen, Norway, Balkema, Rotterdam, 211-218.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. Rock characterization testing and monitoring- suggested methods. ET BROWN Pergamon Press.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **15**, 319-368.

İskenderoğlu, A., 1990. Çayeli-Pazar (Rize) arası sahil yolu şevlerinin mühendislk jeolojisi açısından incelenmesi , *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü. Maden Fak., Trabzon (yayınlanmamış).

Jakops, S., Duparre, A., Truckenbrodt, H., 1998. AFM and light scattering measurements of optical thin flms for applications in the UV spectral region. *International Journal Machine Tools and Manufacture* **38** (5-6), 733-739.

Ketin, İ. 1959. Türkiyenin orojenik gelişmesi, *M.T.A.* 53, 78.

Ketin, İ. 1960. 2.500.000 ölçekli Türkiye tektonik haritası hakkında açıklama, *M.T.A*. **54**, 1-56.

Klinkenberg, B., 1994. A review of methods used to determine the fractal dimension of linear features, *Math. Geology* **36**(1), 23-46.

Korkmaz, S. ve Gedik. A., 1988. Rize-Fındıkl-Çamlıhemşin arasında kalan bölgenin jeolojsi ve petrol oluşumları*. Jeoloji Mühendisliği Dergisi.* 32-**33**, 5- 15.

Krohn, C. E., Thompson, A. H., 1986. Fractal sandstone pores: automated measurements using scaning-electron-microscope images. *Physical Review* B **33** (9), 6366-6374.

Kulatilake P.H.S.W., Shou G., Huang T. H., and Morgan R. M., 1995. New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr*., **32**, 7, 673-697.

La Pointe, P. R., Barton, C. C., 1995. Creating resorvoir simulations. In *Fractals in Petroleum Geology and Earth Process*, pp. 267-268. Eds. Barton, C.C. & La Pointe, P.R., Plenum Press, New York.

Ladanyi, B. and Archambault, G., 1969. Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass. Conference, *Proceedings of 11th US. Symposium on Rock Mechanics,* Berkeley, 105-25.

Ladanyi, B. and Archambault, G., 1980. Direct and indirect determinantion of shear strength of rock mass. *Society of mining engineers of AIME, AIME annual meeting*, Las Vegas, Nevada.

Lee Y. H., Carr J. R., Barr D. J., Haas C. J., 1990. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr*., **27**, 6, 453-464.

Lin, T. Y., Peng, G. S., 1998. Nanometrology of surface topography: application to the research in development of a new mass standard. *International Journal Machine Tools and Manufacture* **38** (5-6), 707-713.

Mandelbrot B. B., 1967. How long is the coast of Britain ?, Statistical Self-Similarity and Fractal Dimension, *Science*, **155**, 636-638.

Mandelbrot B. B., Passoja D. E. and Paullay A. J., 1984. Fractal character of fracture surfaces of metals, *Letters to Nature*, **308**, 721-722.

Mandelbrot, B. B., 1982. The Fractal Geometry of Nature. Freeman, San Francisco.

Mandelbrot, B. B., 1988. The Science of Fractal Images. Springer-Verlag, New York USA.

Mandelbrot, B. B., Passoja, D. E., Paullay, A. J., .1984. Fractal character of facture surfaces of metals, *Letters to Nature*, **308**, 721-722.

Mc Williams, P. C., Miller, S. M., Kekering, J. C., 1991. Fractal characterisation of rock rougness for estimating shear strength, Rossmanith, H. P. (eds), Mechanics of Jointed and Faulted Rock, *Proc. Int. Conf*., Vienna, Balkema, Rotterdam, 331-336.

Nowicki, B., Jarkiewicz, A., 1998. The in-process surface roughness measurement using fringe field capacitive (FFC) method. *International Journal Machine Tools and Manufacture* **38** (5-6) 725-732.

Odling N. E., 1994 Natural fracture profiles, fractal dimension and joint roughness coefficient, *Rock Mech. Rock Eng*., **27**, 3,135-153.

Ord, A., Cheung, C. C., 1991. Image analysis techniques for determining the fractal dimensions of rock joint and fragment size distributions, In: Beer, G., Booker, J. R.,

Önalp, A., 1975. Yamaçların dengesindeki etkenlerin incelenmesi, *Doçentlik Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Özsayar, T., 1977. Karadeniz kıyı bölgesindeki Neojen formasyonları ve bunların Mollusk faunasının incelenmesi, *KTÜ yayını* 79, 77 Trabzon.

Özsayar, T., Pelin, S. ve Gedikoğlu, A., 1981. Doğu Pontidler'de Kretase, *KTÜ Yer Bilimleri Dergisi, Jeoloji,* C.1,S.2, 65-114.

Patton, F. D., 1966. Multiple modes of shear failure in rock., *Proceedings of 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, **1**, 509-513.

Piteu, D. R., 1970. Geological Factors Significant to The Stability of Slope Cut in Rock, *Proc. Symp. Planning Open Pit Mines*, Johannesburg, 33-53.

Power, W. L. and Tullis, T. E., 1991. Euclidean and fractal models for the description of rock surface roughness. *Journal of Geophysical Research*, **96**, B1, 415-424.

Power, W.L., Tullis, T. E., Brown, S.R., Biornott, G.N., Scholz, C.H., 1987. Roughness of natural fault surfaces. *Geophysical Research Letters* **14** (1), 29-32.

Press, W. H., Teukolsky, S. A., 1992. Numerical Recipes in C, Cambridge Univ. Press. USA.

Rengers, N., 1970. Influence of surface roughness on the friction properties of rock planes In: *Proceedings 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech*., Belgrade, **1**, 229-234.

Rowe, P. W., Barden, L. and Lee, I. K., 1964. Energy components during the triaxial cell and direct shear test. *Geotechnique*, **14**, No. 3, Sept., 247-261.

Sakkellariou, M., Nakos, B., and Mitsakaki, C., 1991. On the fractal character of rock surface*, Int. Jour. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr*., **28**, no. 6, 527-533.

Saupe, D., 1988. Algorithms for random fractals, in *The Science of Fractal Images*, pp. 71-113, Eds. Peitgen, H. O. & Saupe, D., Springer-Verlag, New York.

Schmittbuhl, J., Gentier, S., Roux, S., 1993. Field measurements of the roughness of fault surfaces. *Geophysical Research Letters* **20** (8), 639-641.

Schmittbuhl, J., Schmitt, F., Scholz, C., 1995. Scaling invariance of crack surfaces. *Journal of Geophysical Research* **100** (B4), 5953-5973.

Schmittbuhl, J., Violette, J.P. and Roux, S., 1995a. Reliability of Self-Affine Measurements, *Phys. Rev.* **E51**(1), 131-147.

Scholz C. H., Wang J., Narasimhan T. N., 1988. Aperture correlation of a fractal fracture, *Journal of Geophysical Research*, **93**, B3, 2216-2224.

Shirino, T. and Kulatilake, P.H.S.W., 1997. Accuracy of the spectral method in estimation fractal/spectral parameters for self-affine roughness profiles, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.,* **34**(5), 708-904.

Tse, R. and Cruden, D.M., 1979, Estimating joint roughness coefficients, *Int. J. Rock Mech. Min.Sci. Geomech. Abstr.* **16**, 303-7

Tsoutrelis, C. A., Exadactylos, G. E., Kapenis, A. P,1990. Study of the rock mass discontinuity system using photo analysis, In: Rossmanith, H. P. (ed), *Proceeding of the International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Vienna, Austria, Balkema, Rotterdam, 103-112.

Turk, N., Greig, M. J., Dearman, M. R., Amin, F. F., 1987. Characterisation of rock joint surfaces by fractal dimension, In: Farmer, I. W., Daeman, J. J. K., DESAI, C. S., Glass, C. E., Neuman, S. P. (eds), Rock Mechanics, *Proceedings of 28th U.S. Symp. on Rock Mechanics,* Tucson, Arizona, Balkema, Rotterdam, 1223-1236.

Ulusay, R. and Yoleri, M.F., 1993. Shear strength characteristics of discontinuities in weak, stratified, clay-bearing coal measures encountered in Turkish surface coal minning, *Bull. of IAEG*, **48**, 110-117.

Ünal, M., 2000. Süreksizlik yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi ve makaslama dayanımı üzerindeki etkilerinin incelenmesi ,*Doktora Tezi*, Hacettepe Üniv., Maden Müh. Böl., Ankara.

Vardar, M., Develi, K. ve Çömlekçi, C., 2001. Çatlaklı ortamların mekanik ve hidrolik modellemesi için pürüzlülüğün deneysel ve teorik yöntemlerle sayısal tanımı, TÜBİTAK Projesi, **Proje No YDABÇAG – 198Y016.**

Wyant, J. C., Schmit, J., 1998. Large field of view, high spatial resolution, surface measurements*. International Journal Machine Tools and Manufacture* **38** (5-6), 691-698.

Yang Z, Chiang D., 2000. An experimental study on the progressive shear behaviour of rock joints with tooths-shaped asperities. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech* Abstr., **37**,1247-59.

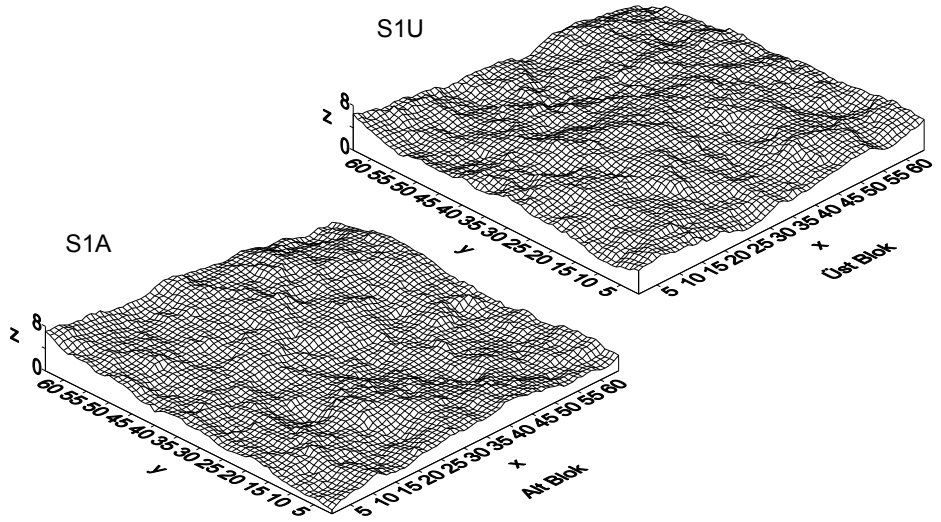
Yeo IW, de Freitas MH, Zimmermann RW ., 1998. Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture*. Int J Rock Mech Min Sci*., **35**,1051-70.

Yüzer, E., Vardar, M., 1983. Kaya Mekaniği*,* İ.T.Ü. Maden Fakültesi, İstanbul.

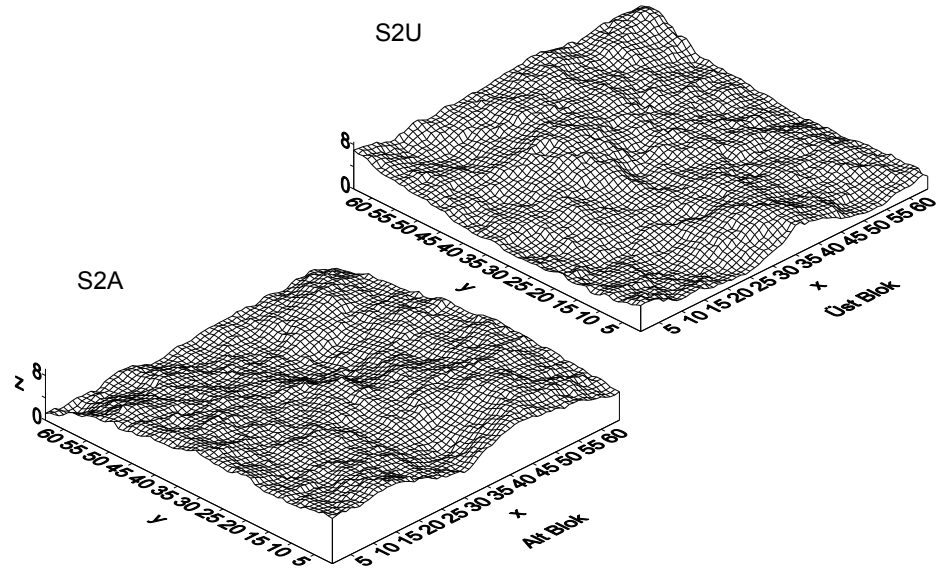
Yüzer, E., Zanbak, C., 1974. Jeolojide Deneysel Kaya Mekaniği, İ.T.Ü. Kütüphanesi, İstanbul.

Zhao J., 1997. Joint surface matching and shear strength. part b: JRC-JMC shear strength criterion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*., **34**,2,179-185.

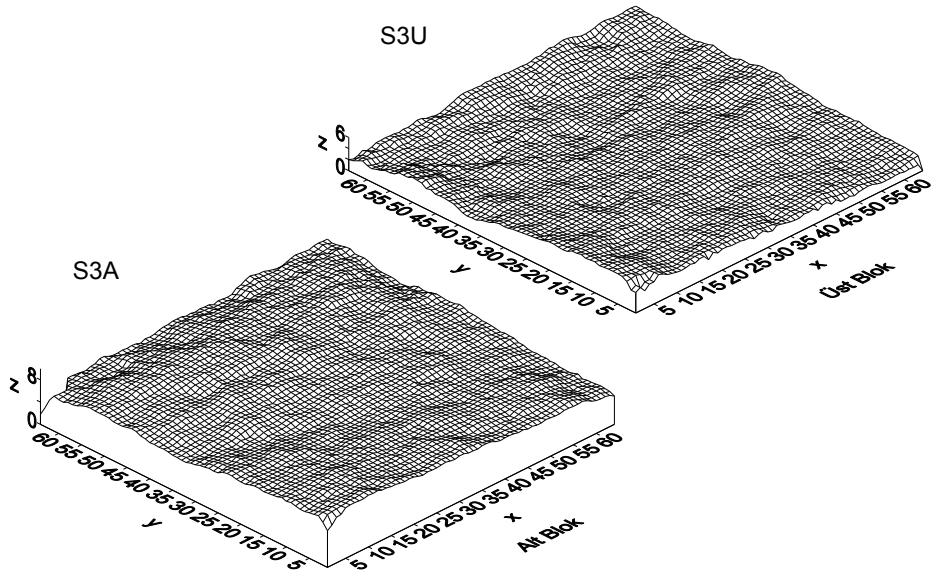
EKB



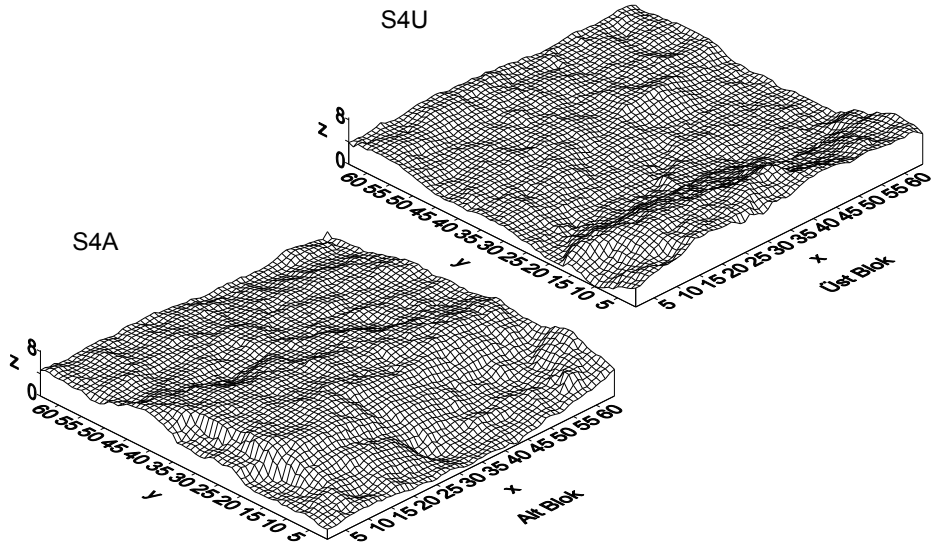
Şekil B.1 : S1 örneği alt (S1A) ve üst (S1U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



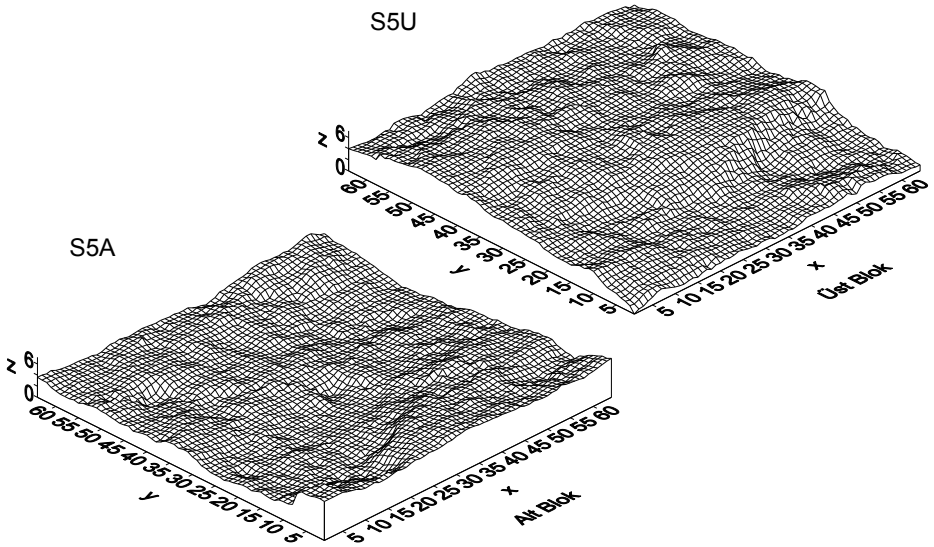
Şekil B.2 : S2 örneği alt (S2A) ve üst (S2U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



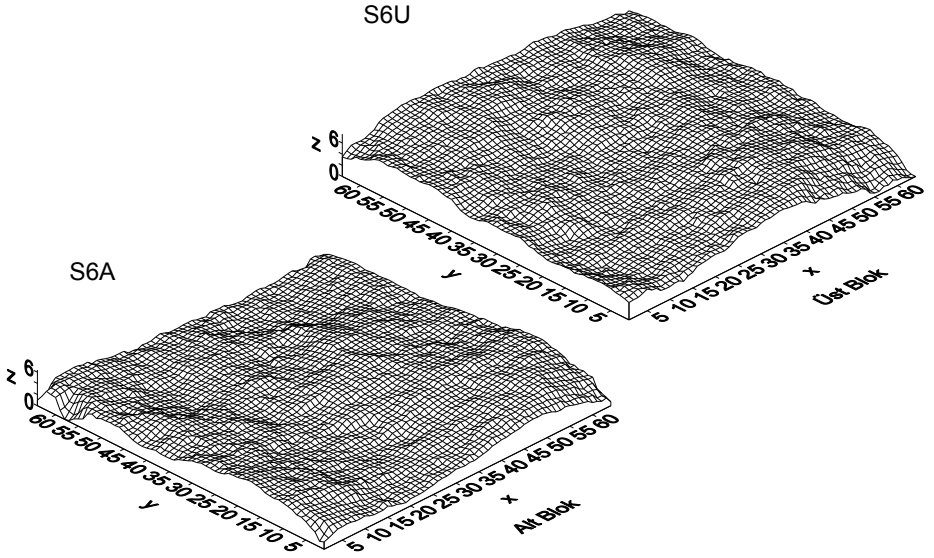
Şekil B.3 : S3 örneği alt (S3A) ve üst (S3U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



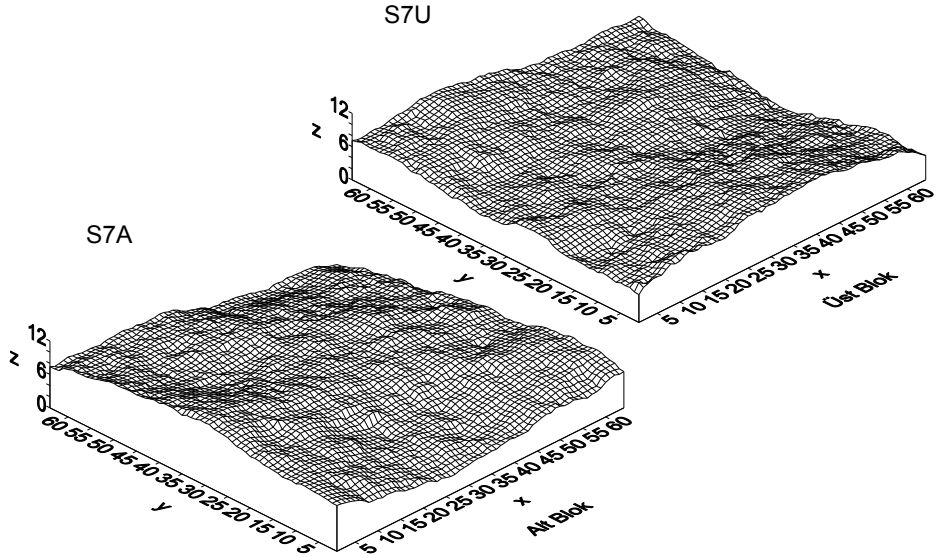
Şekil B.4 : S4 örneği alt (S4A) ve üst (S4U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



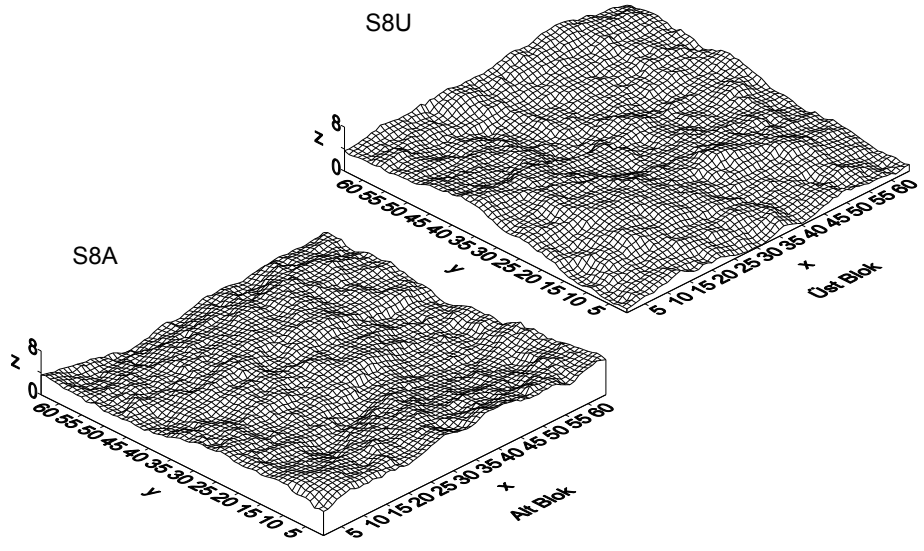
Şekil B.5 : S5 örneği alt (S5A) ve üst (S5U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



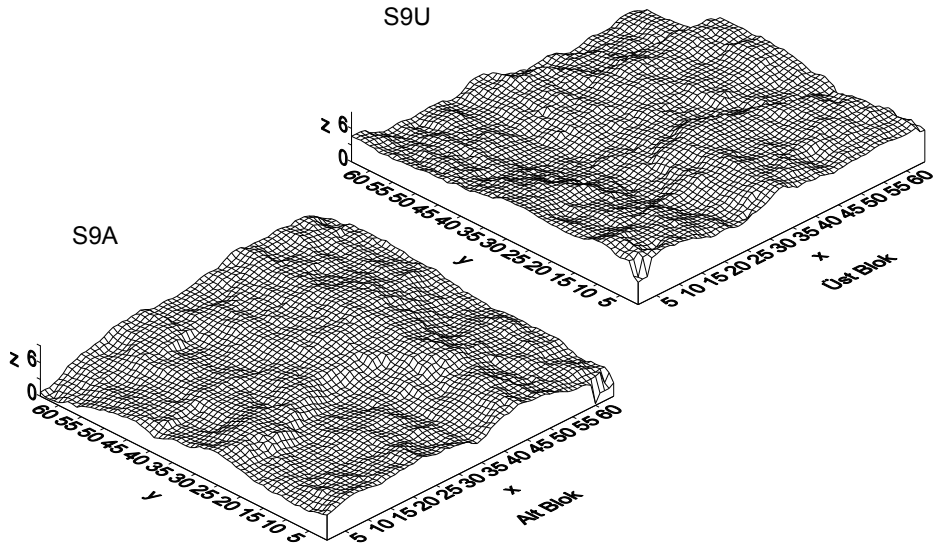
Şekil B.6 : S6 örneği alt (S6A) ve üst (S6U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



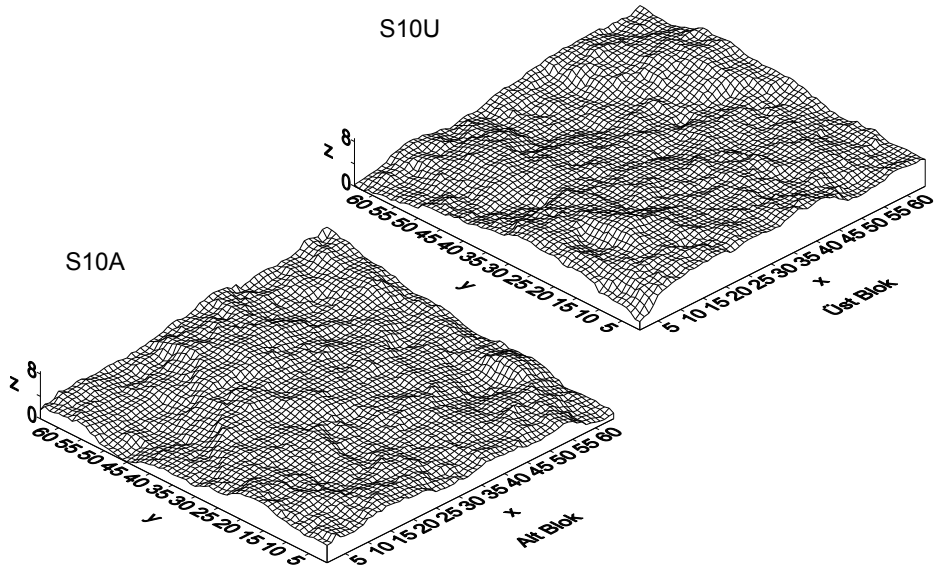
Şekil B.7 : S7 örneği alt (S7A) ve üst (S7U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



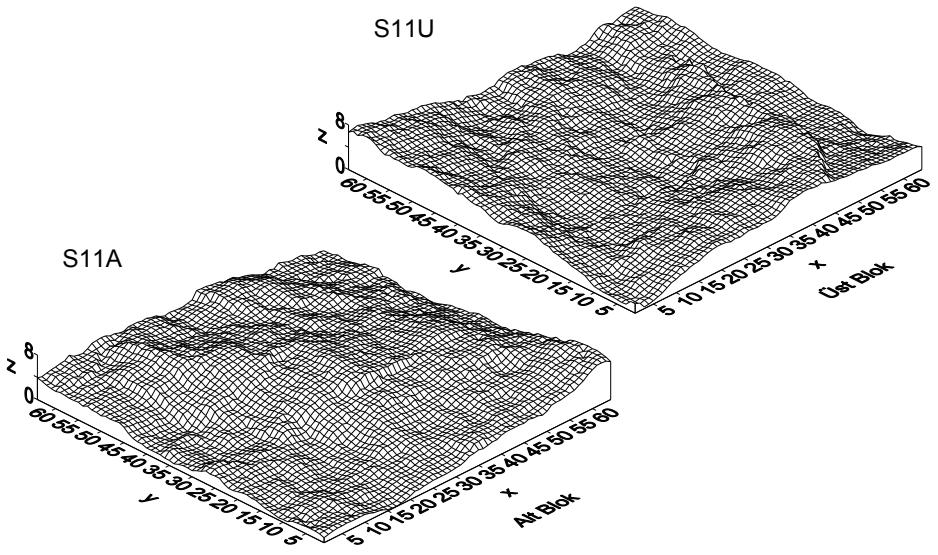
Şekil B.8 : S8 örneği alt (S8A) ve üst (S8U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



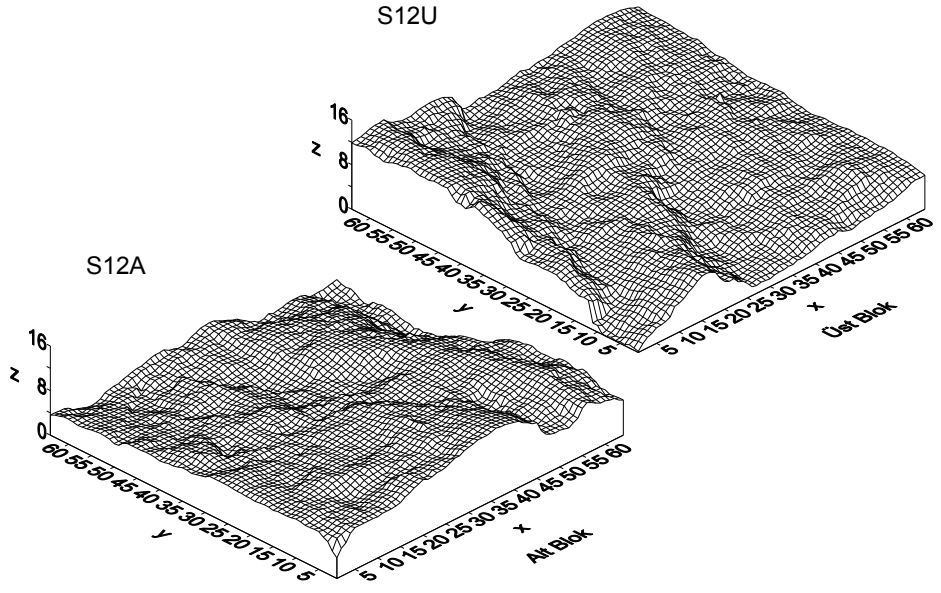
Şekil B.9 : S9 örneği alt (S9A) ve üst (S9U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



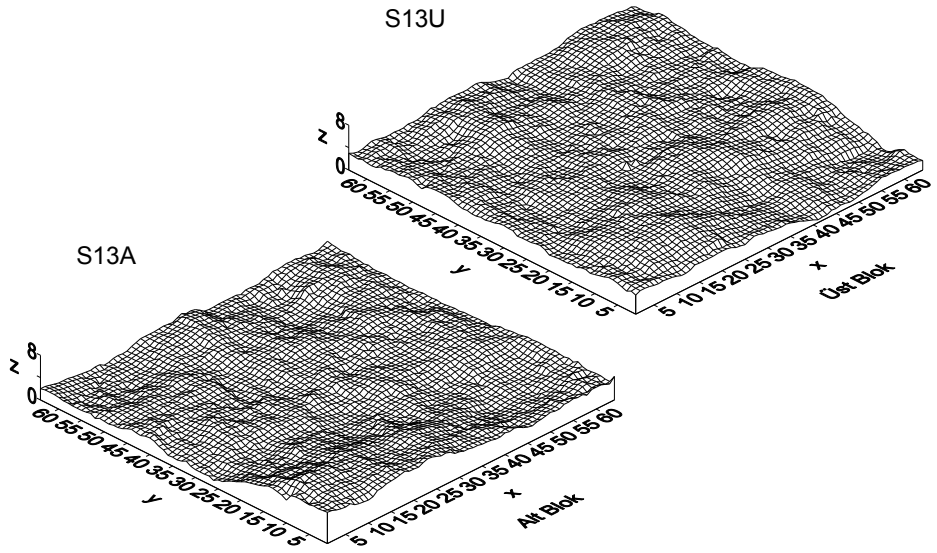
Şekil B.10 : S10 örneği alt (S10A) ve üst (S10U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



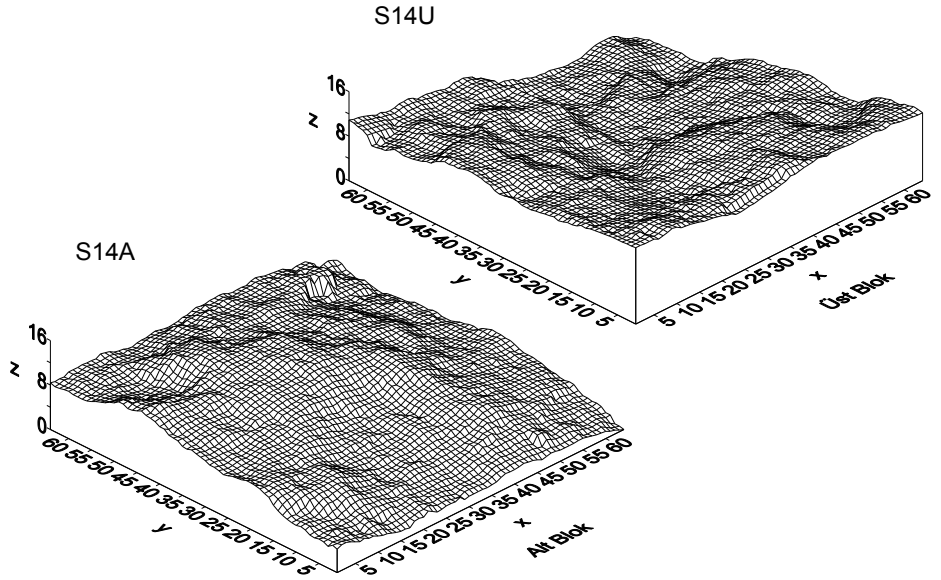
Şekil B.11 : S11 örneği alt (S11A) ve üst (S11U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



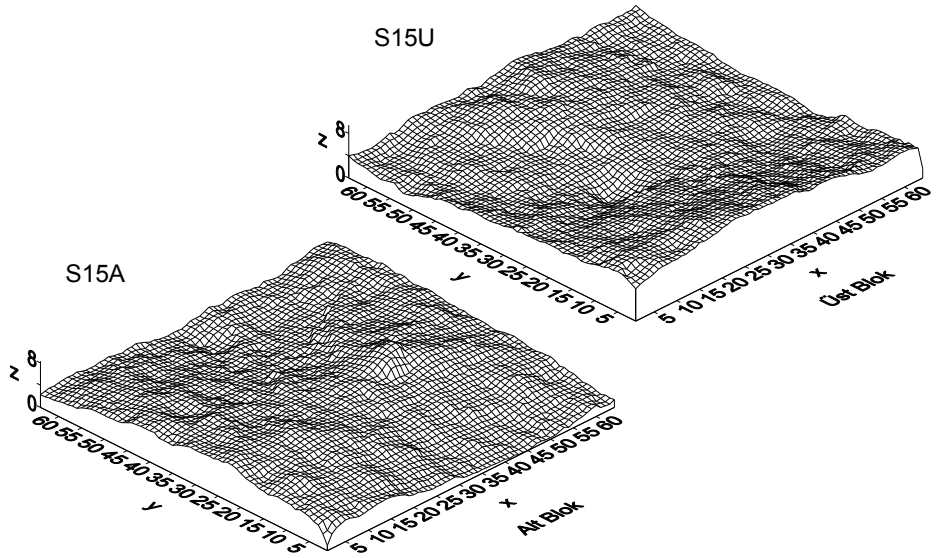
Şekil B.12 : S12 örneği alt (S12A) ve üst (S12U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



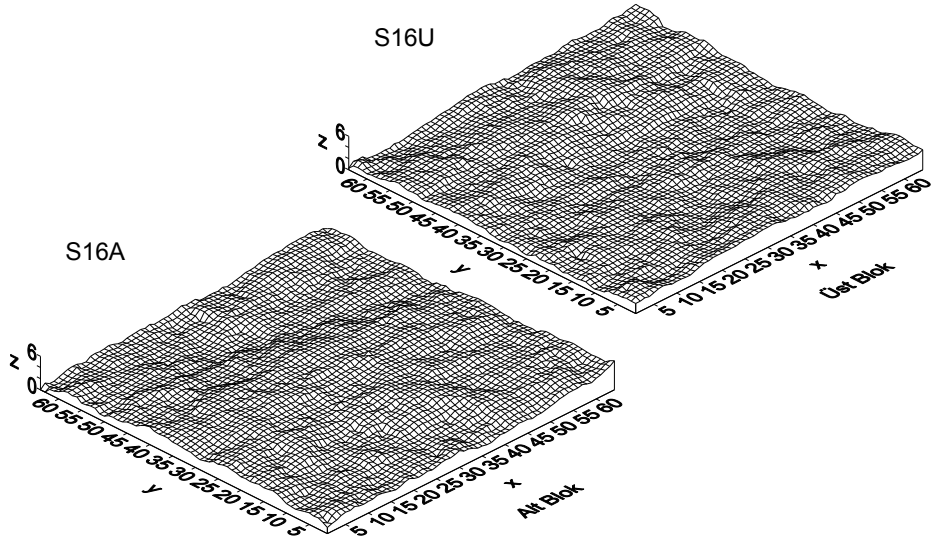
Şekil B.13 : S13 örneği alt (S13A) ve üst (S13U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



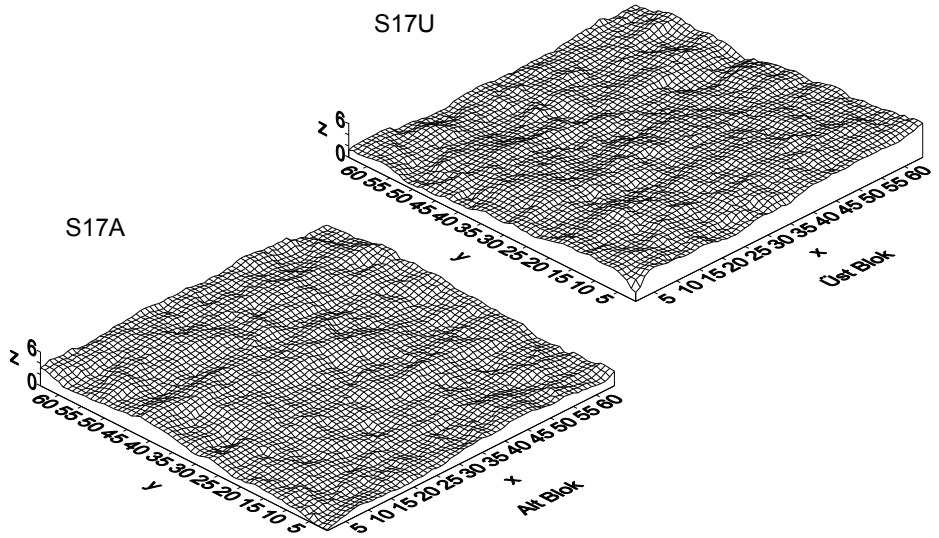
Şekil B.14 : S14 örneği alt (S14A) ve üst (S14U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



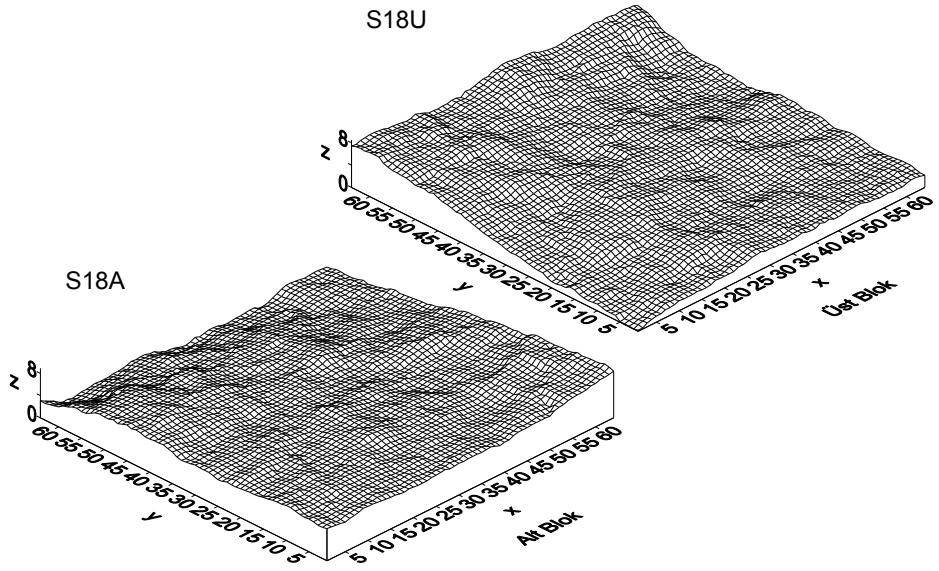
Şekil B.15 : S15 örneği alt (S15A) ve üst (S15U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



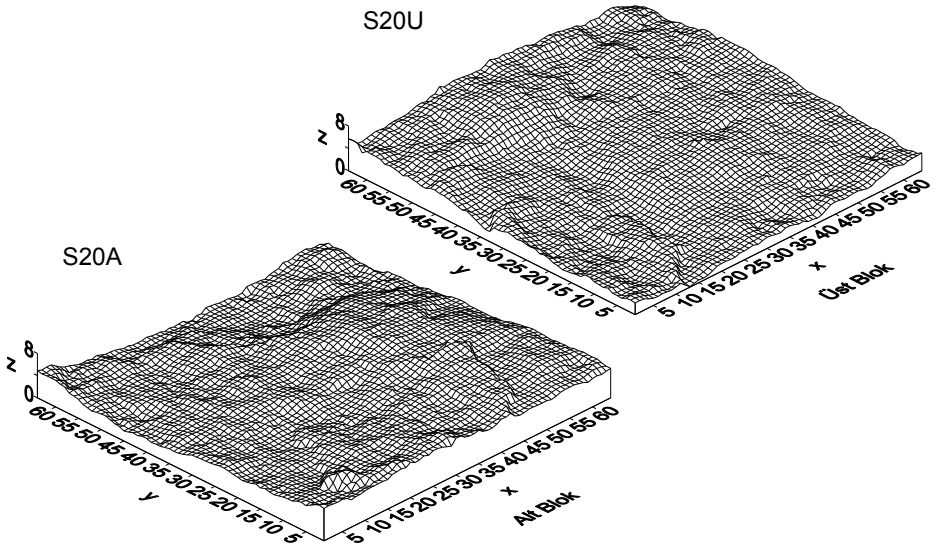
Şekil B.16 : S16 örneği alt (S16A) ve üst (S16U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



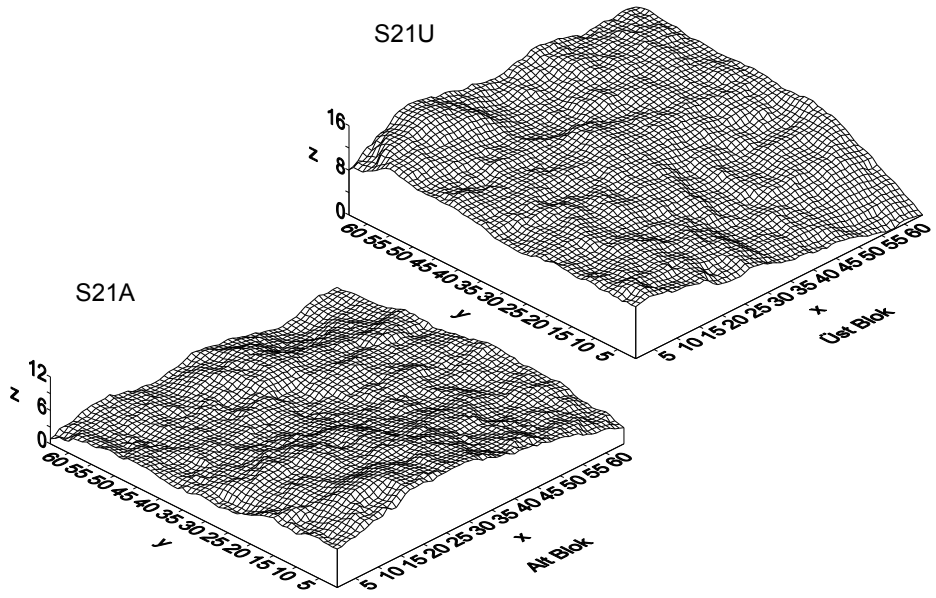
Şekil B.17 : S17 örneği alt (S17A) ve üst (S17U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



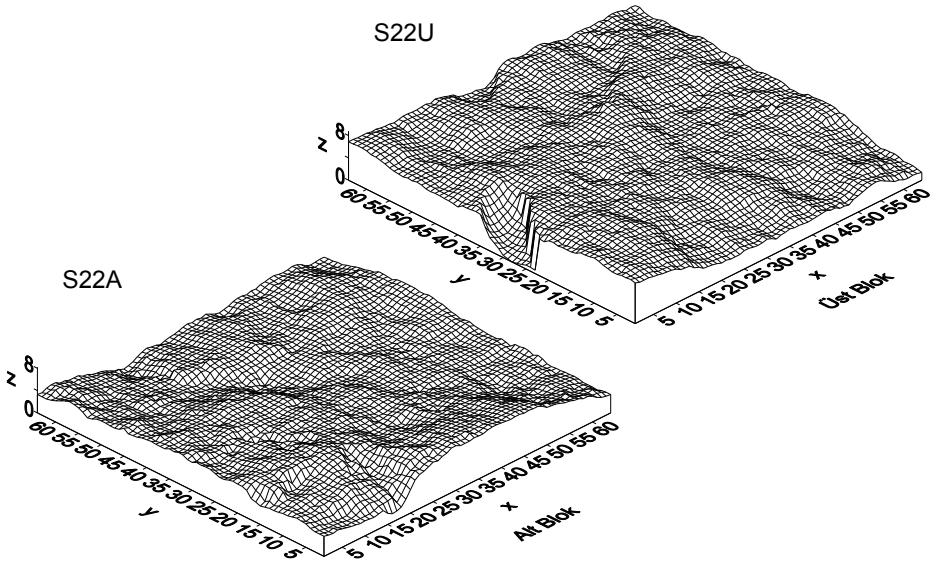
Şekil B.18 : S18 örneği alt (S18A) ve üst (S18U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



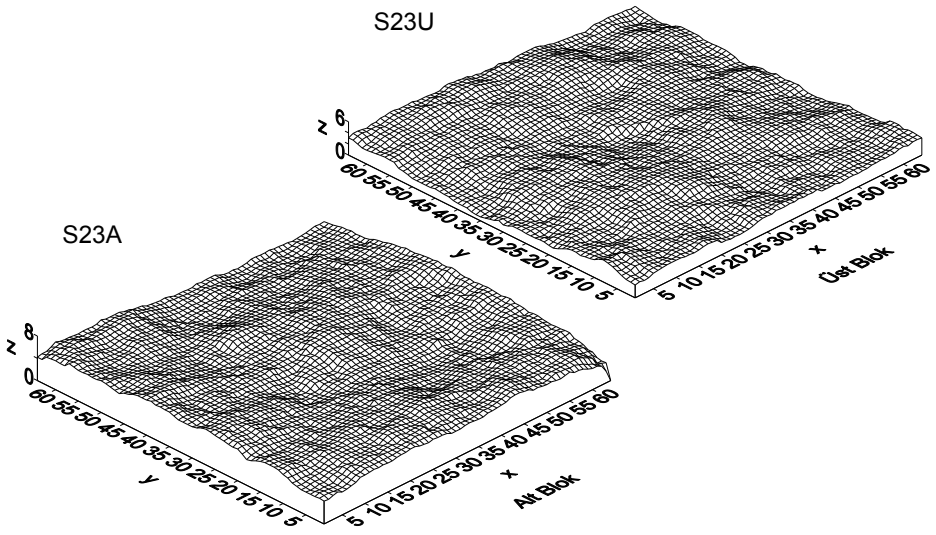
Şekil B.19 : S20 örneği alt (S20A) ve üst (S20U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



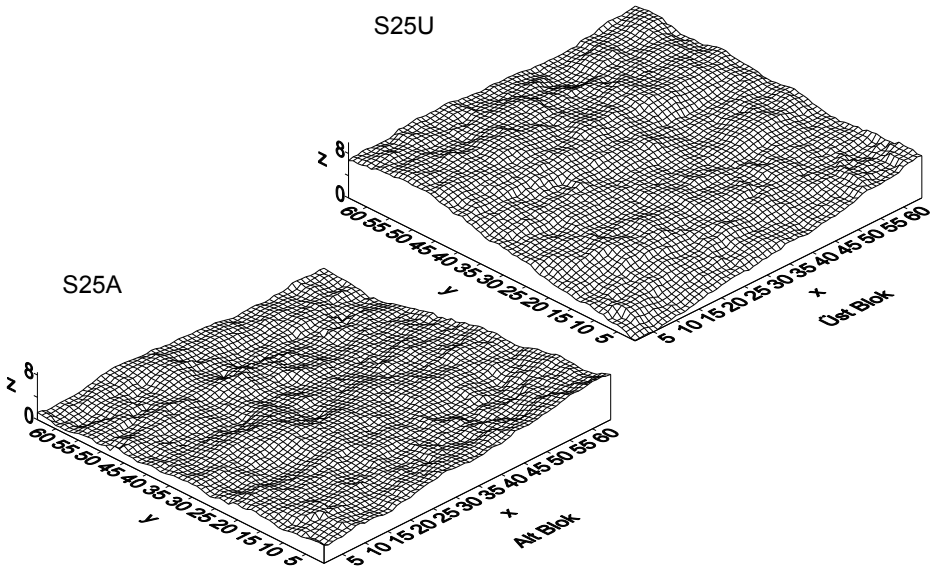
Şekil B.20 : S21 örneği alt (S21A) ve üst (S21U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



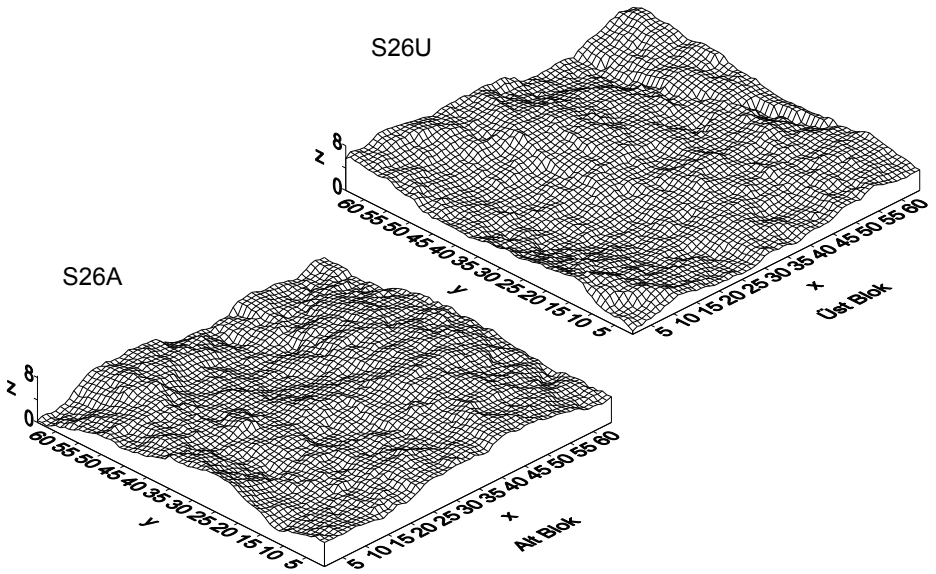
Şekil B.21 : S22 örneği alt (S22A) ve üst (S22U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



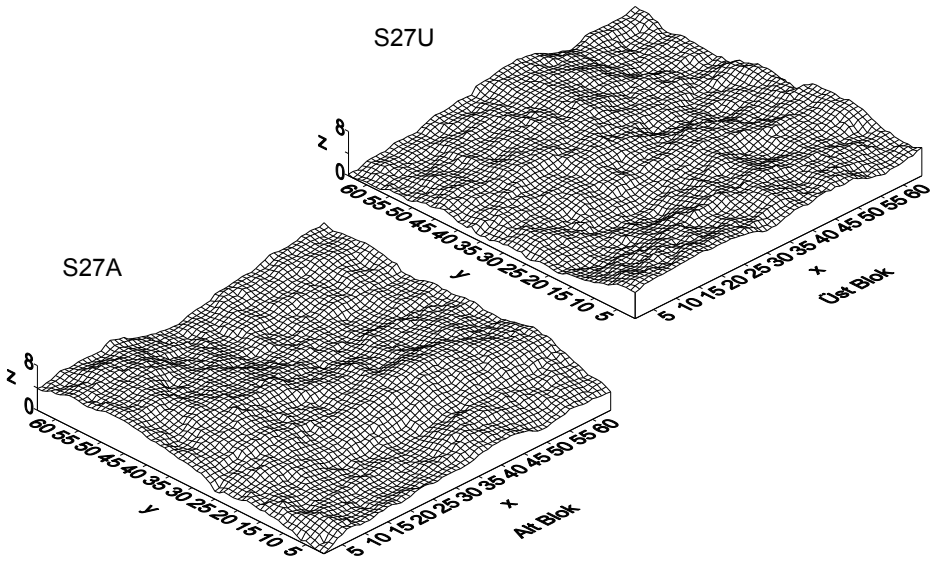
Şekil B.22 : S23 örneği alt (S23A) ve üst (S23U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



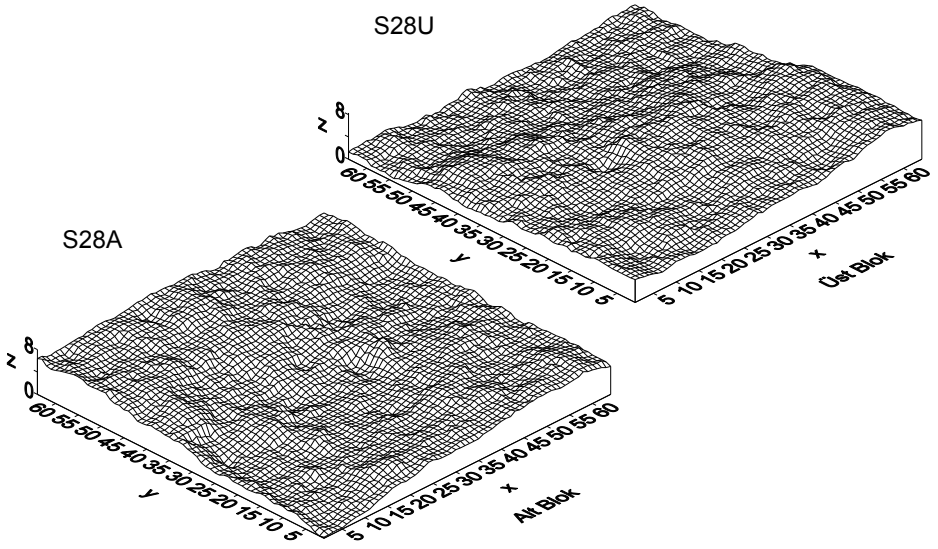
Şekil B.23 : S25 örneği alt (S25A) ve üst (S25U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



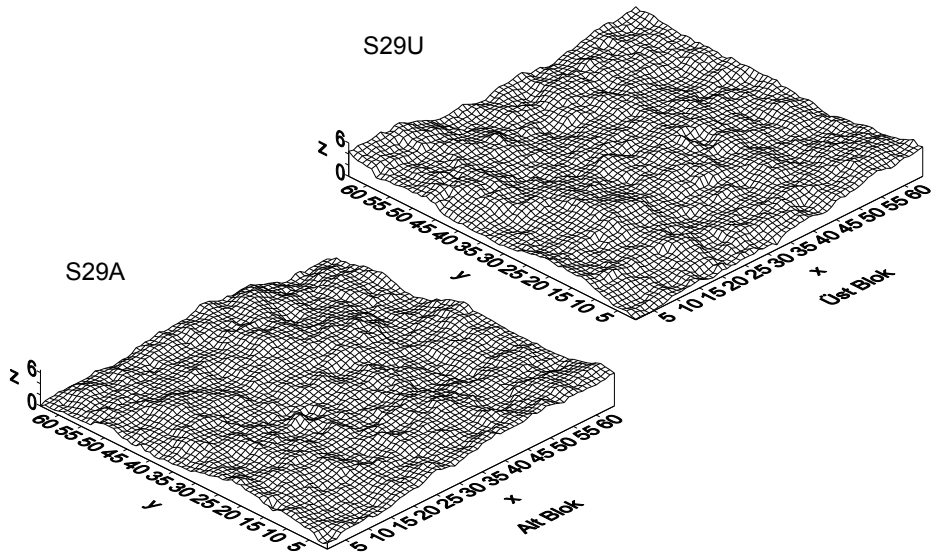
Şekil B.24 : S26 örneği alt (S26A) ve üst (S26U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



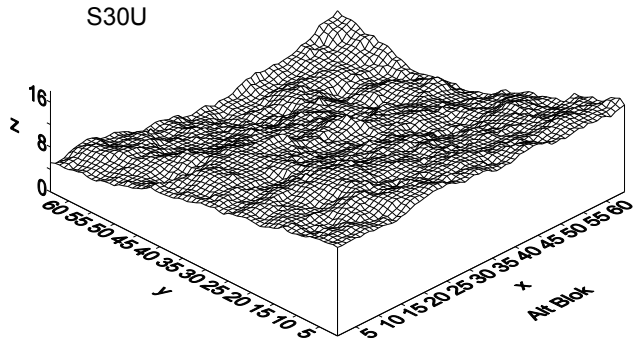
Şekil B.25 : S27 örneği alt (S27A) ve üst (S27U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



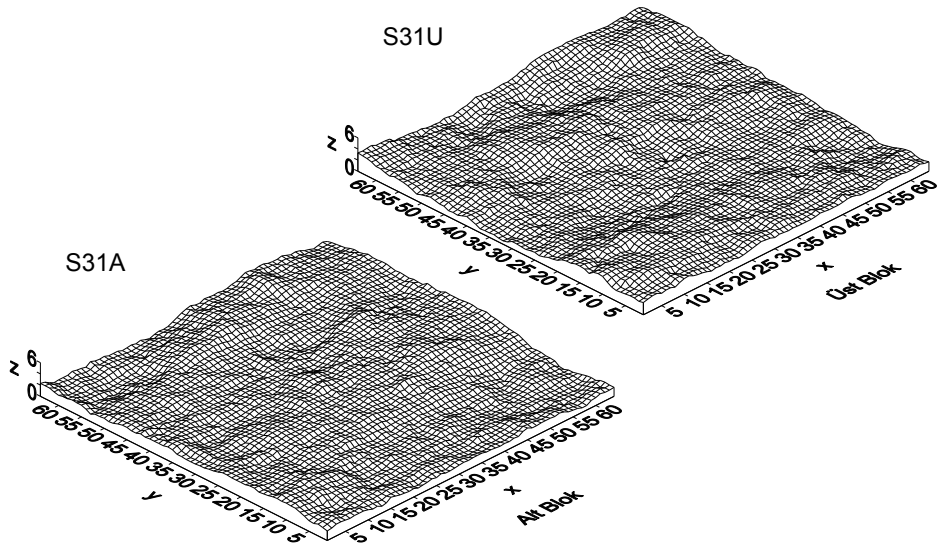
Şekil B.26 : S28 örneği alt (S28A) ve üst (S28U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



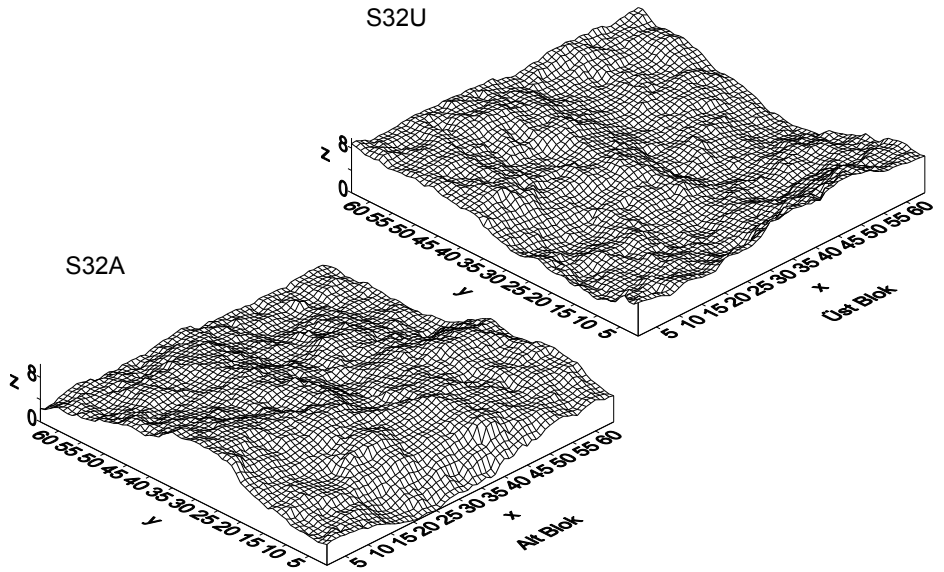
Şekil B.27 : S29 örneği alt (S29A) ve üst (S29U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



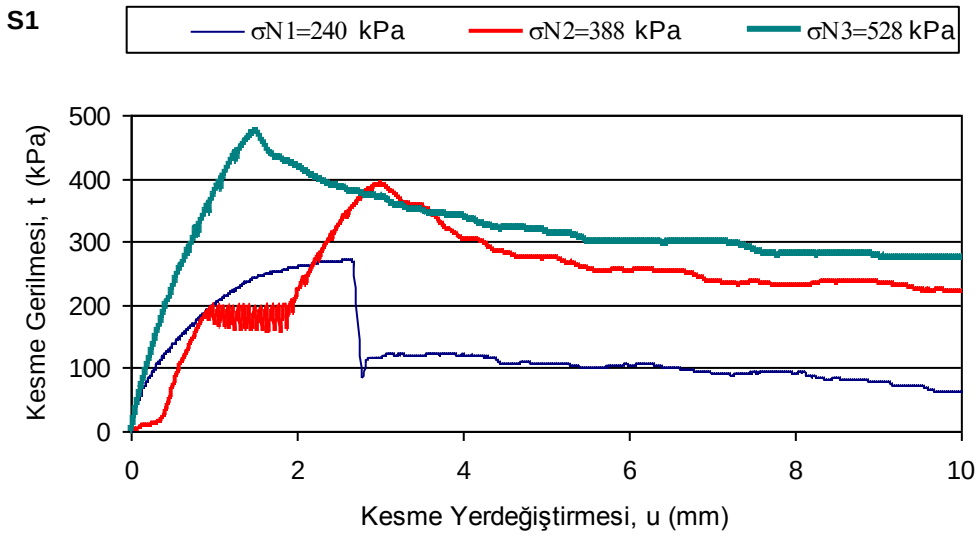
Şekil B.28 : S30 örneği üst (S30U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



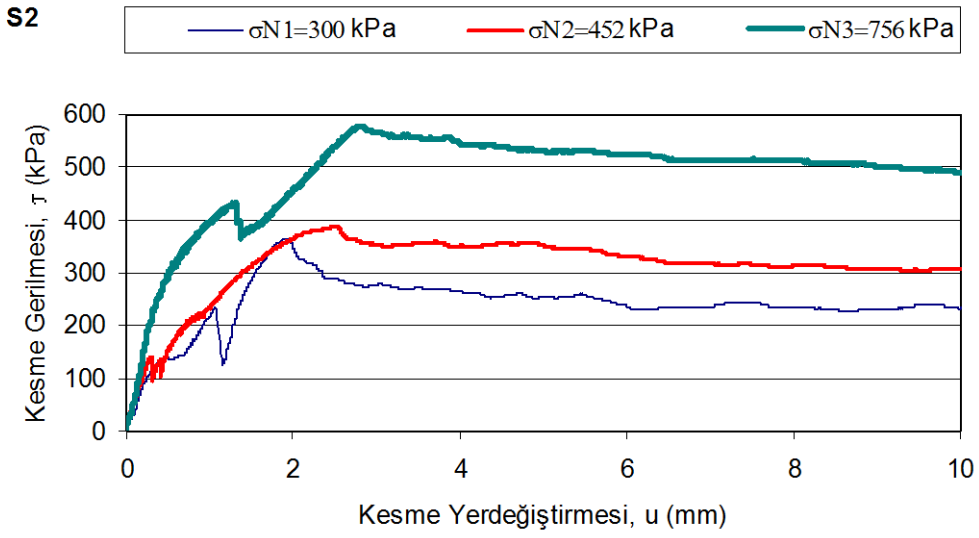
Şekil B.29 : S31 örneği alt (S31A) ve üst (S31U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



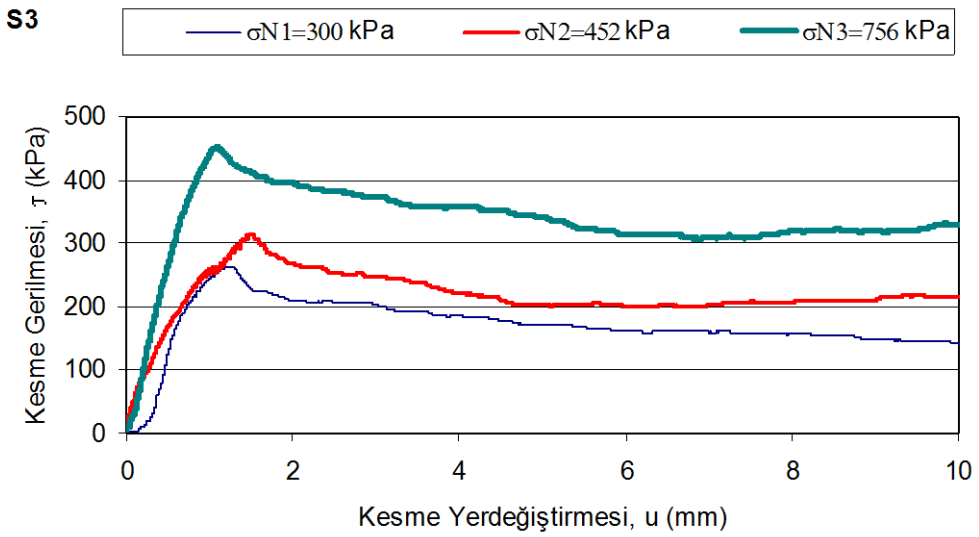
Şekil B.30 : S32 örneği alt (S32A) ve üst (S32U) blokları için 3-boyutlu yüzey modeli



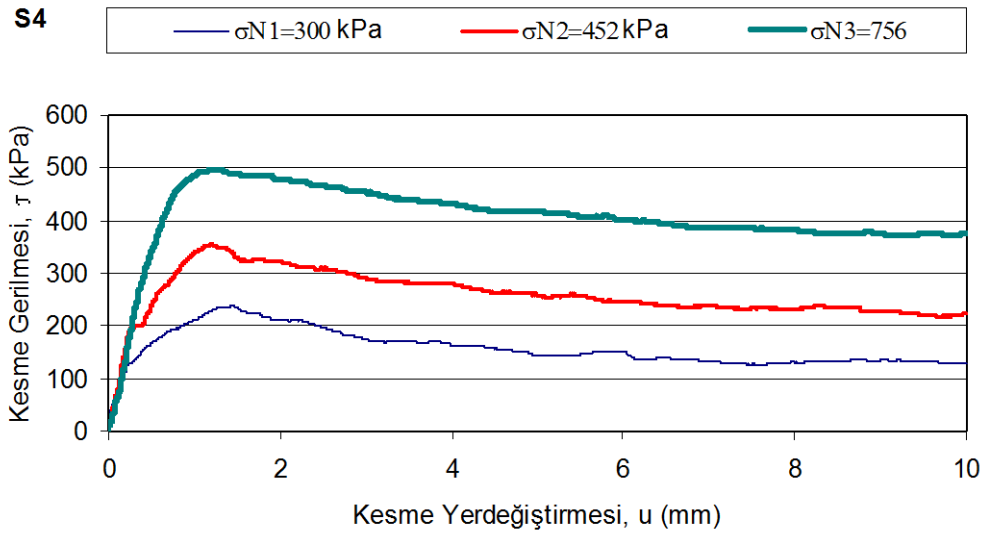
Şekil B.31 : S1 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



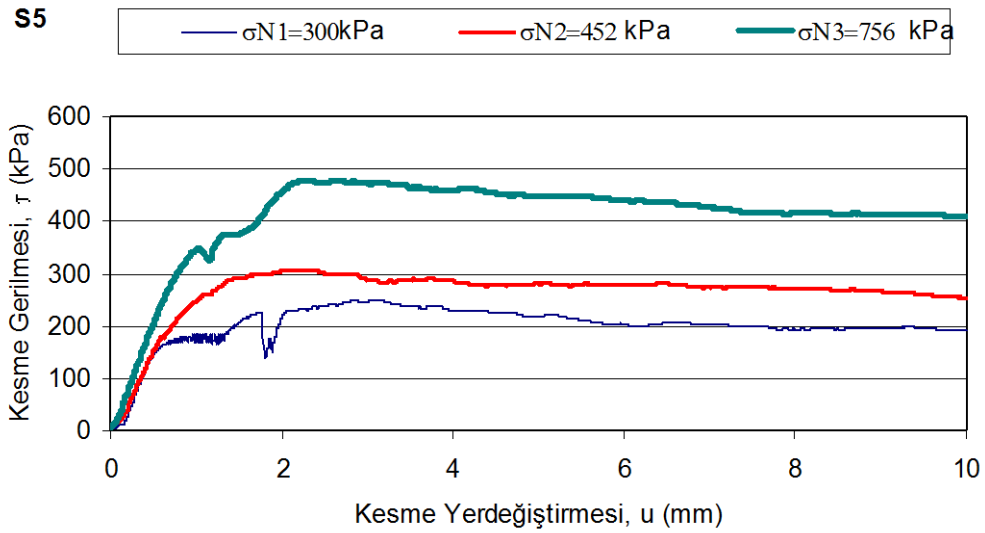
Şekil B.32 : S2 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



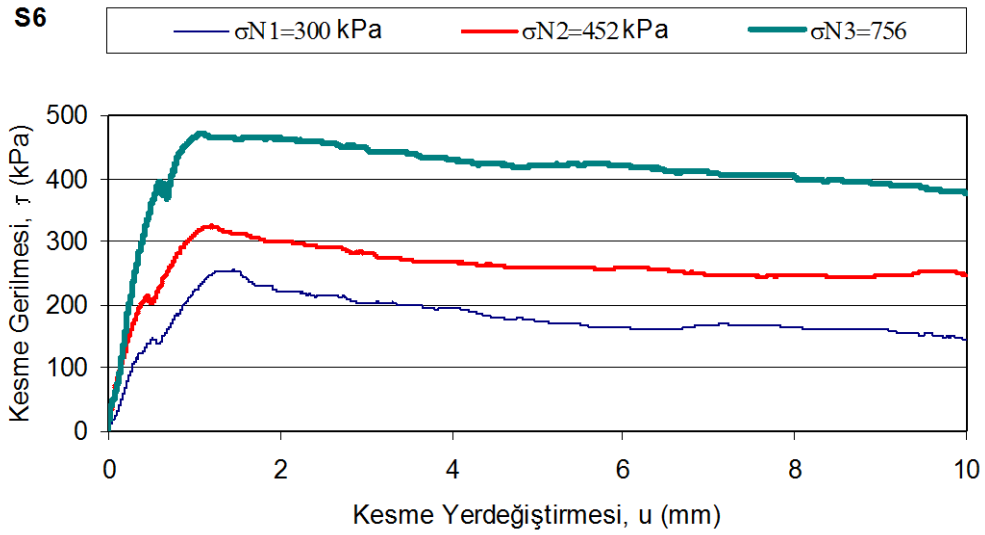
Şekil B.33 : S3 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



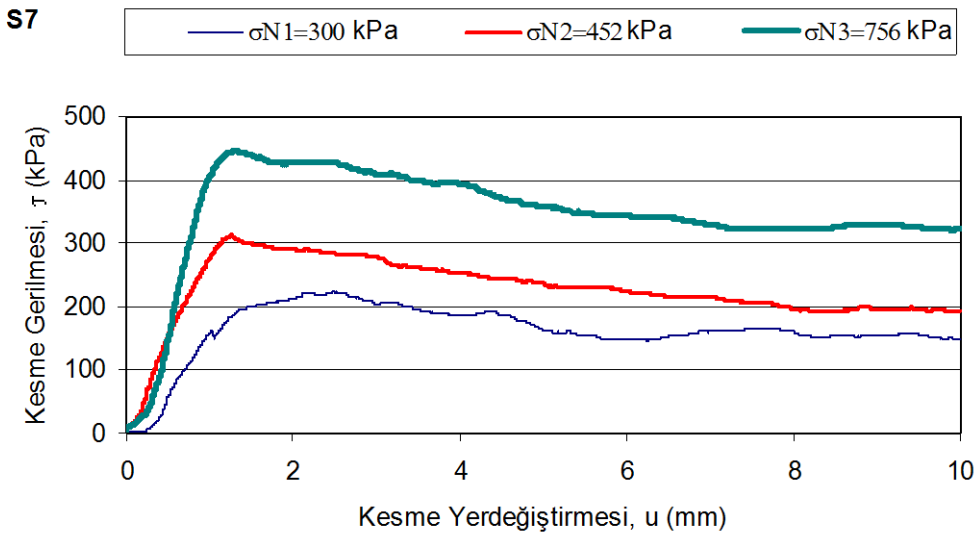
Şekil B.34 : S4 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



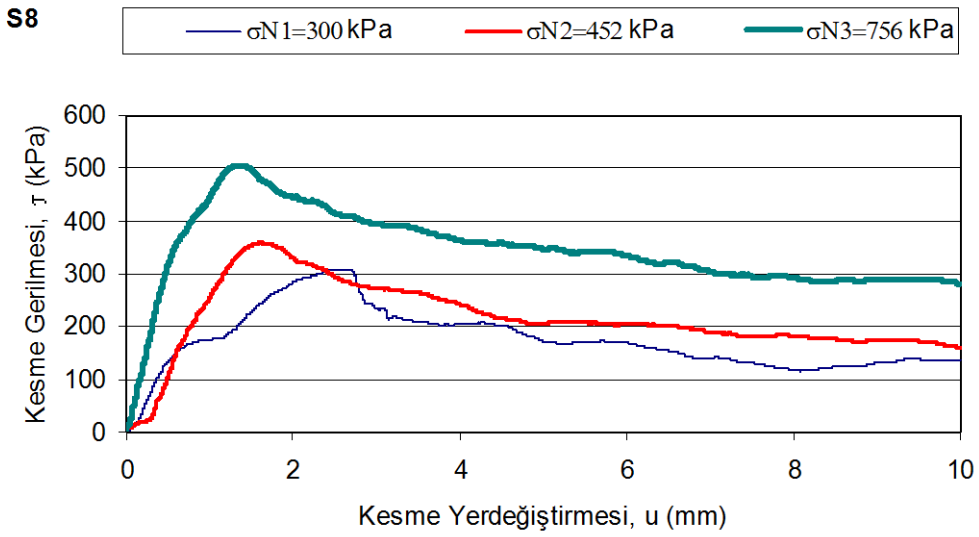
Şekil B.35 : S5 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



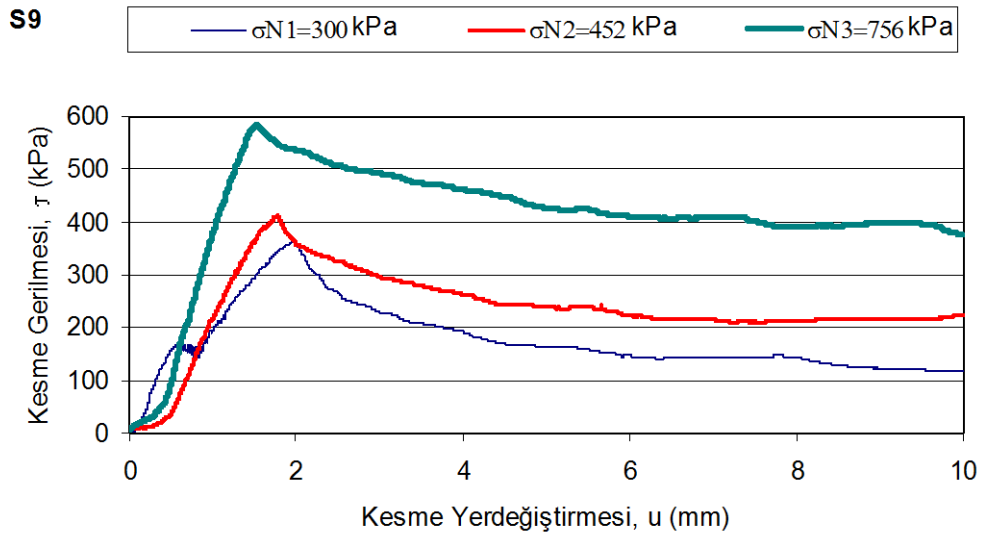
Şekil B.36 : S6 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



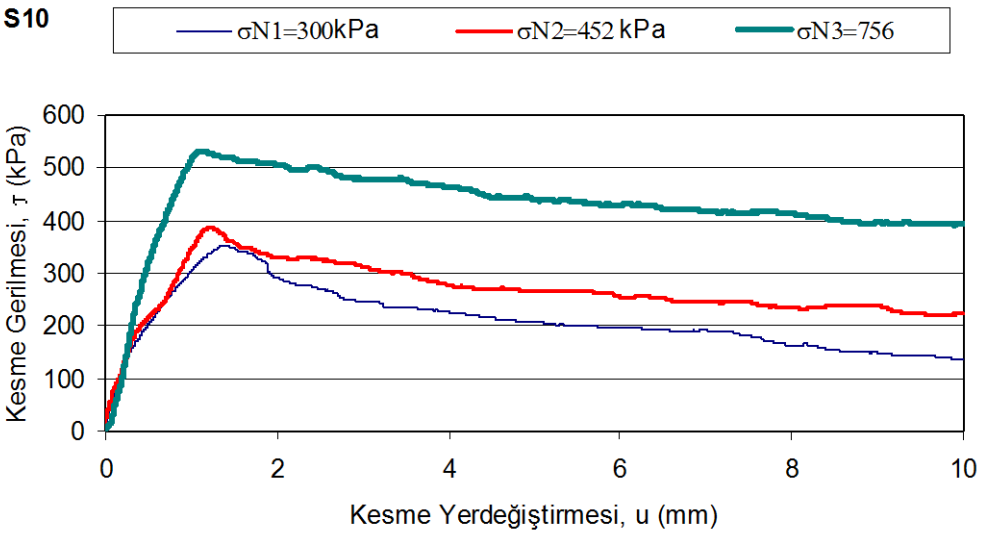
Şekil B.37 : S7 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



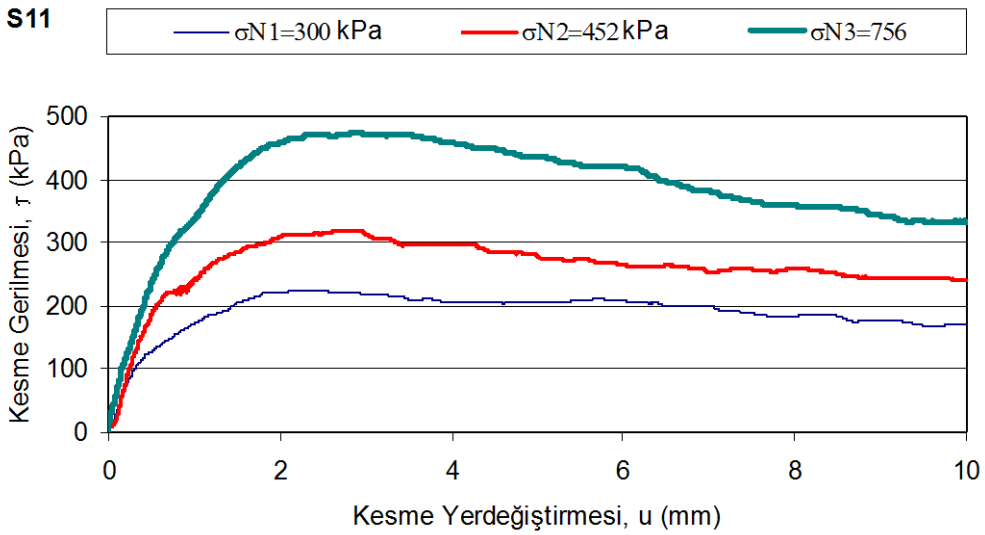
Şekil B.38 : S8 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



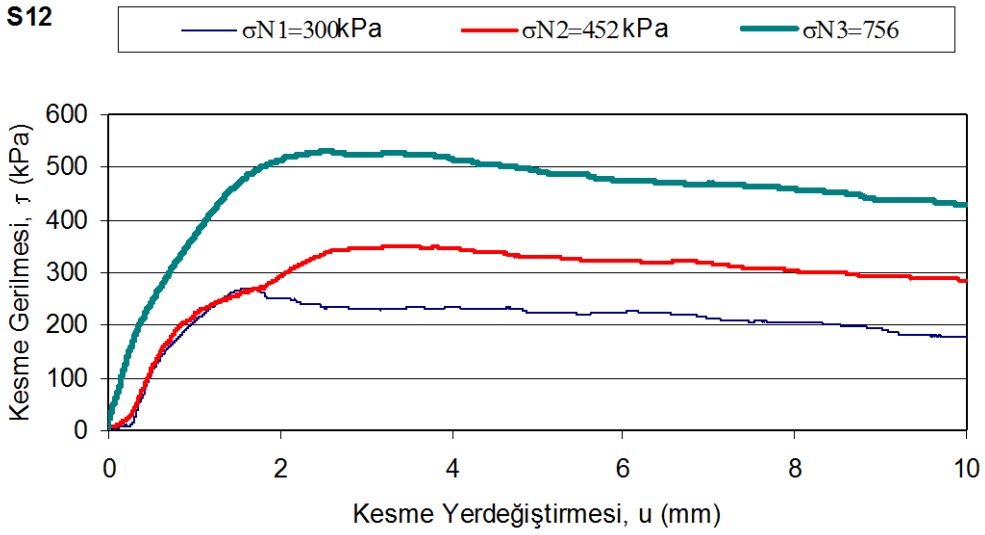
Şekil B.39 : S9 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



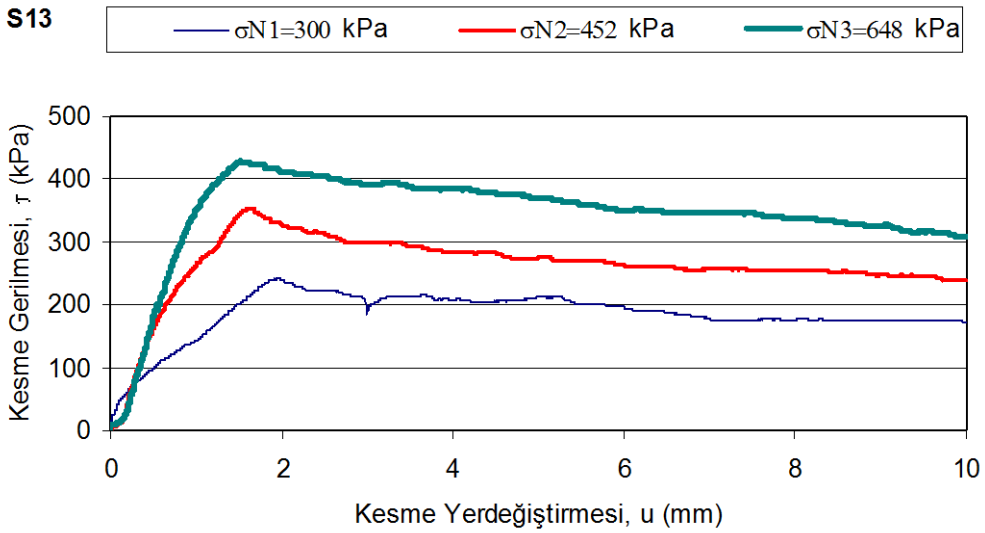
Şekil B.40 : S10 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



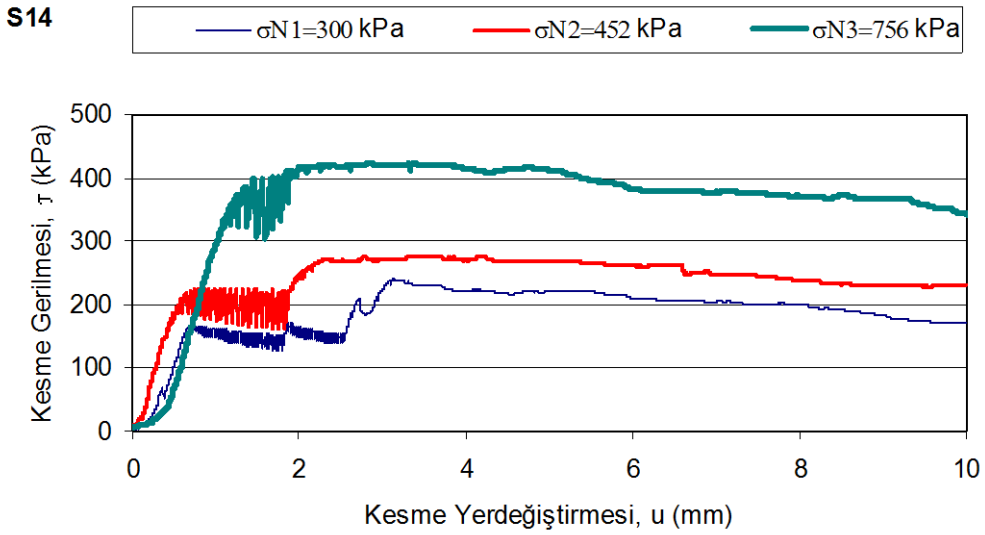
Şekil B.41 : S11 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



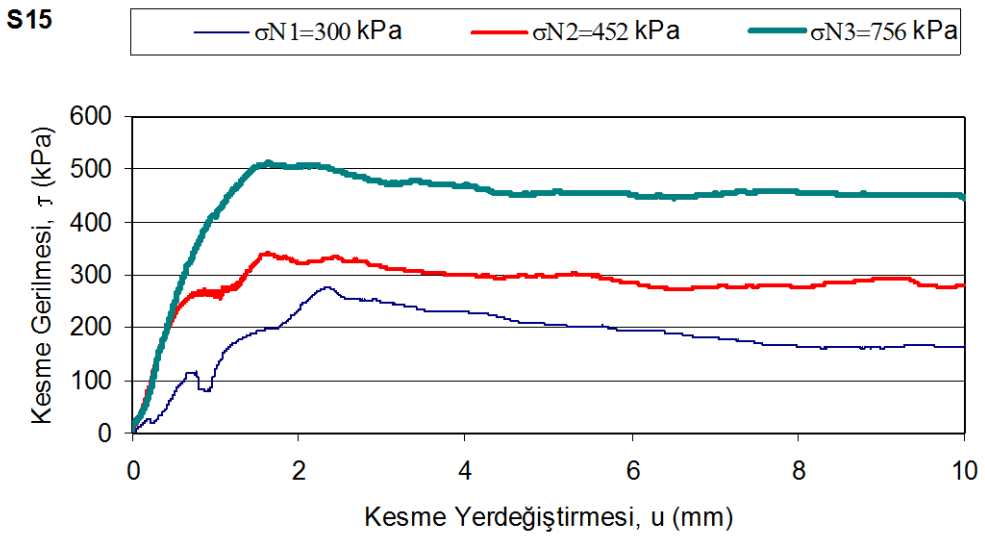
Şekil B.42 : S12 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



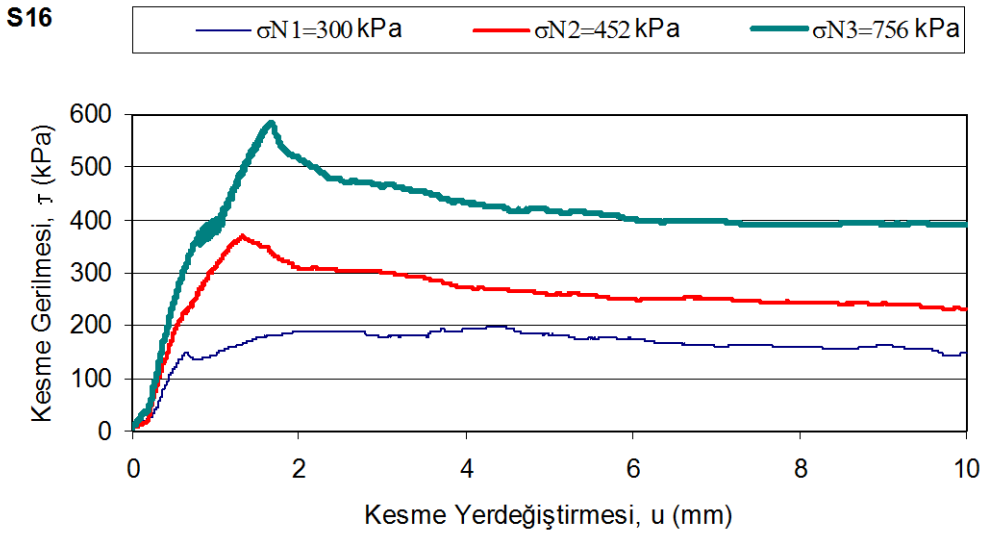
Şekil B.43 : S13 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



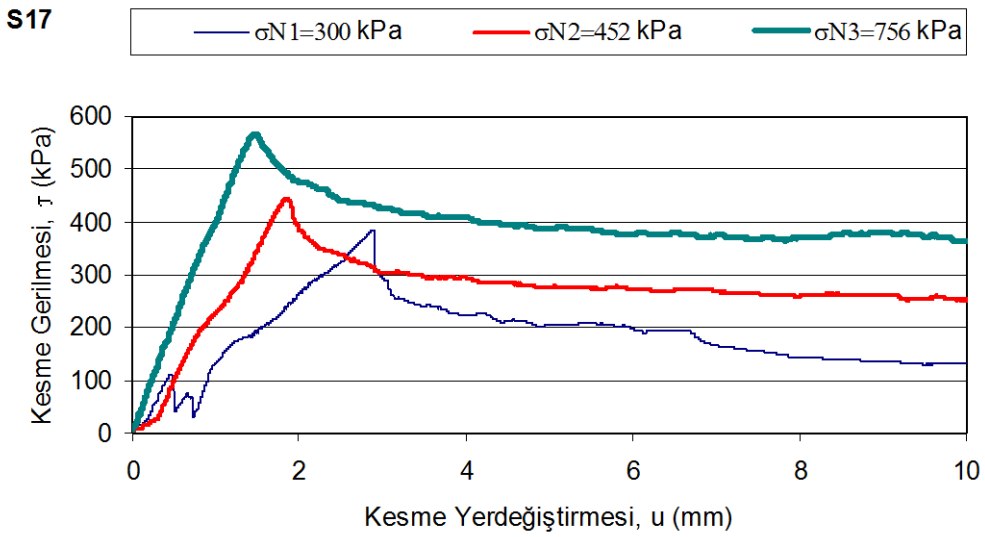
Şekil B.44 : S14 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



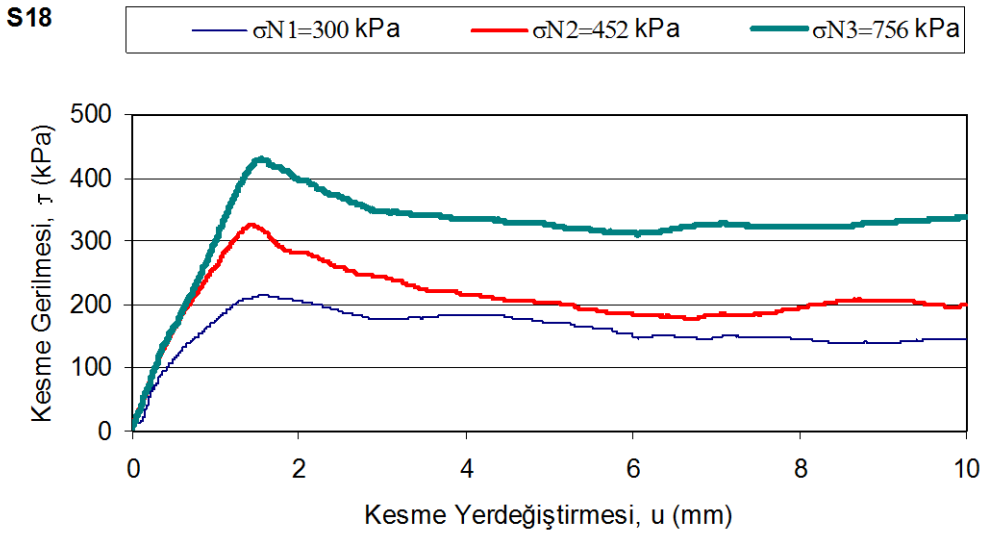
Şekil B.45 : S15 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



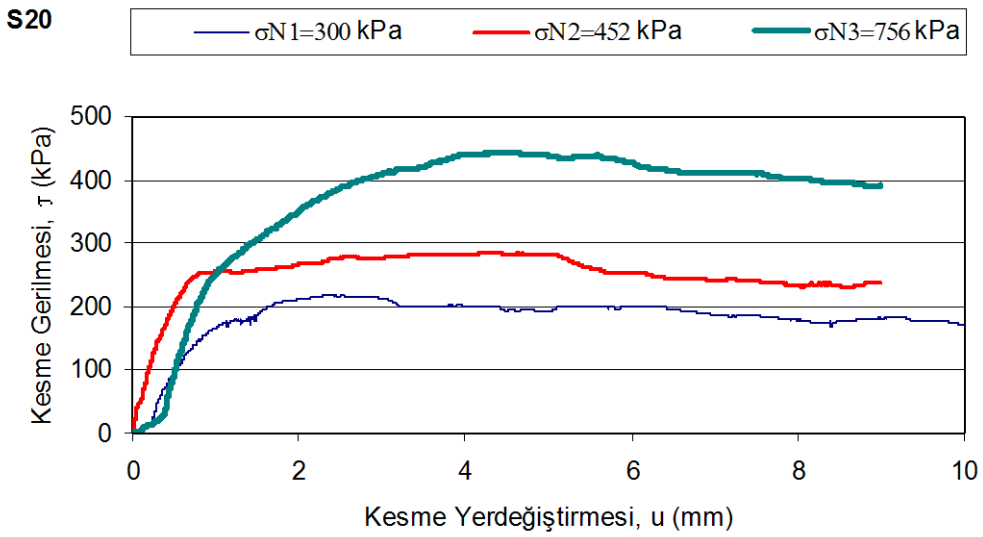
Şekil B.46 : S16 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



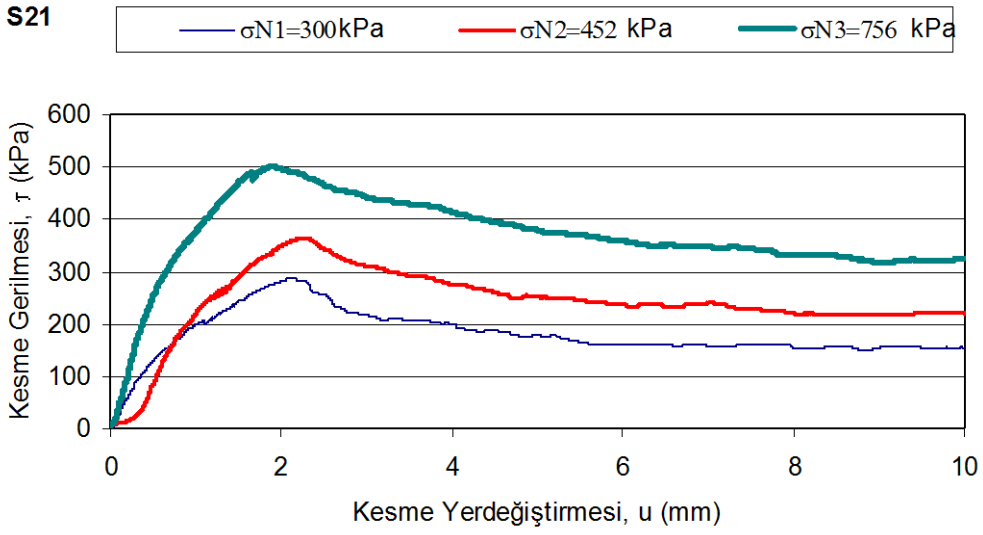
Şekil B.47 : S17 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



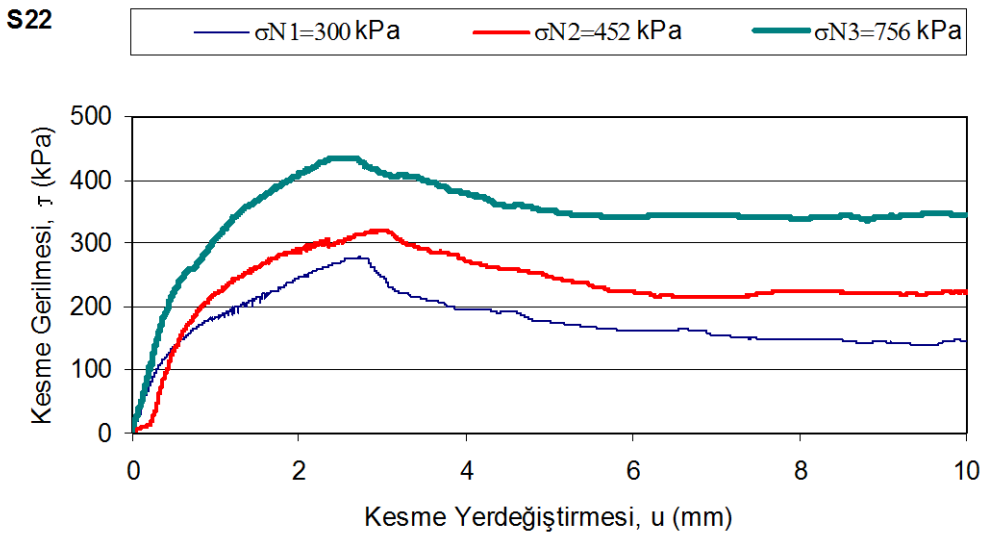
Şekil B.48 : S18 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



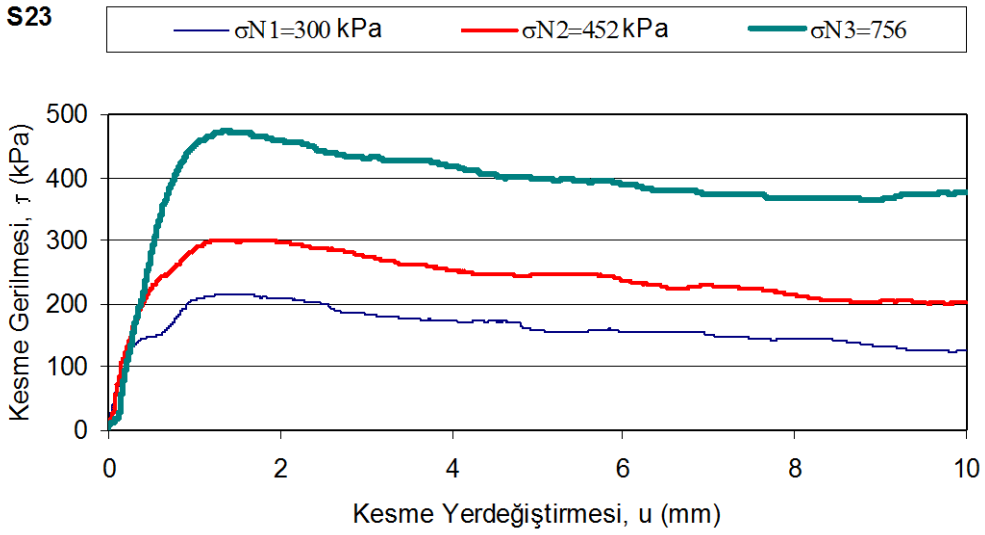
Şekil B.49 : S20 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



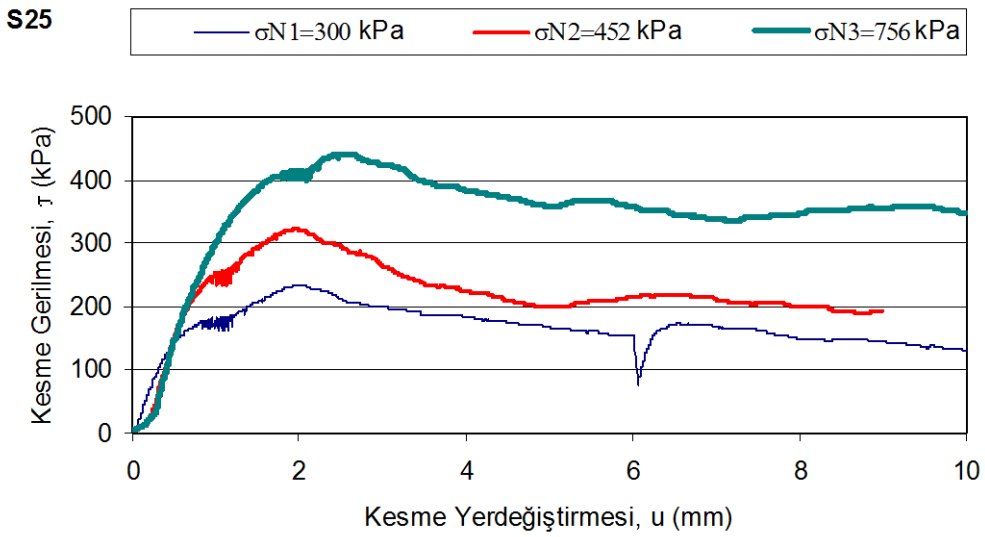
Şekil B.50 : S21 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



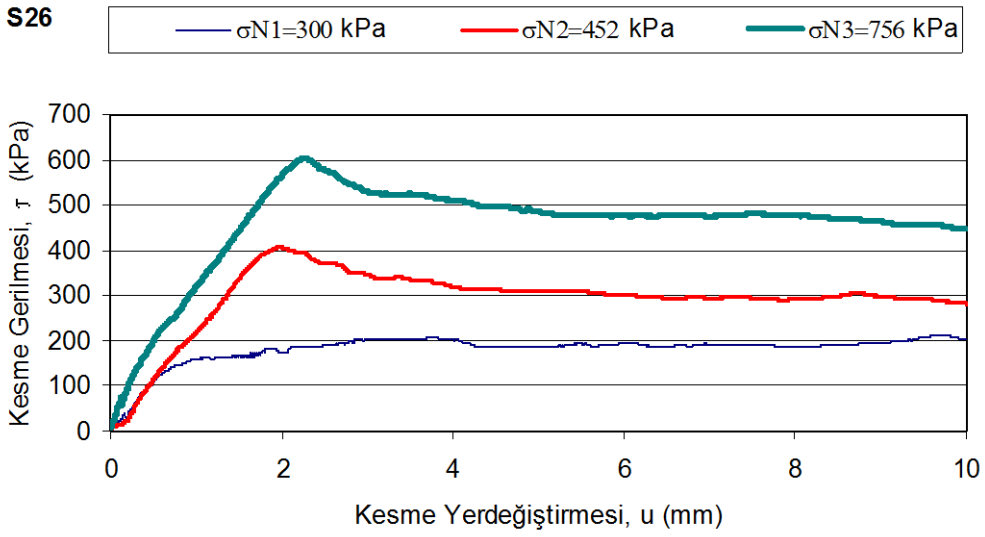
Şekil B.51 : S22 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



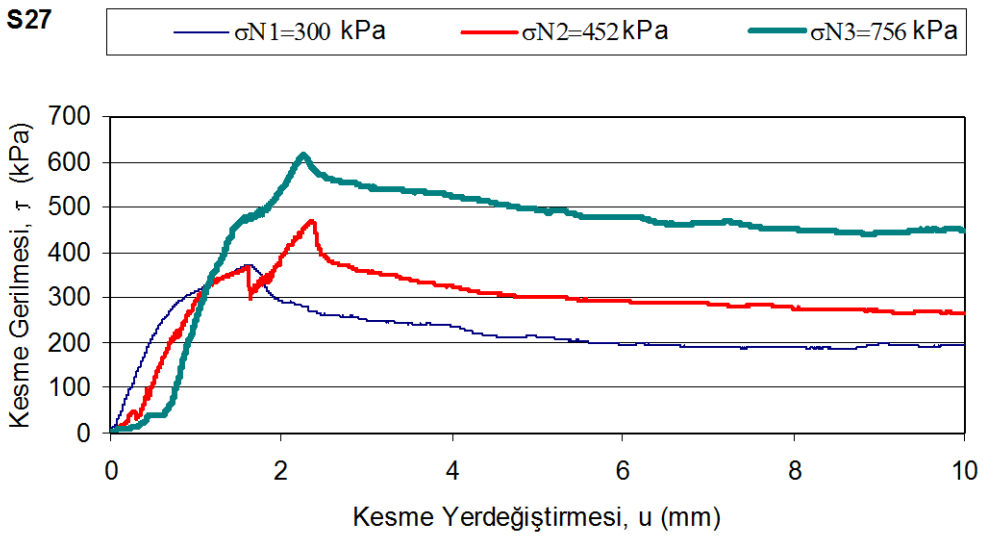
Şekil B.52 : S23 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



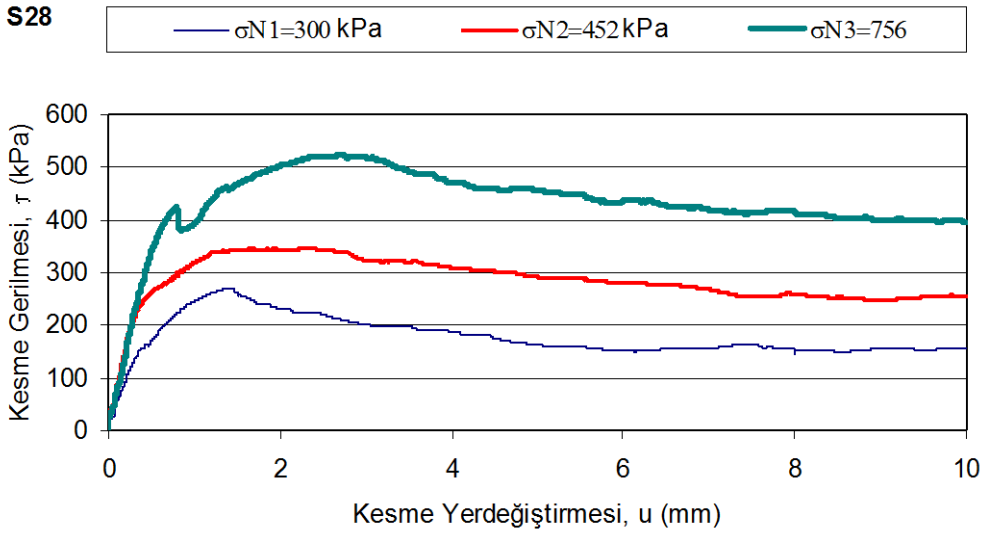
Şekil B.53 : S25 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



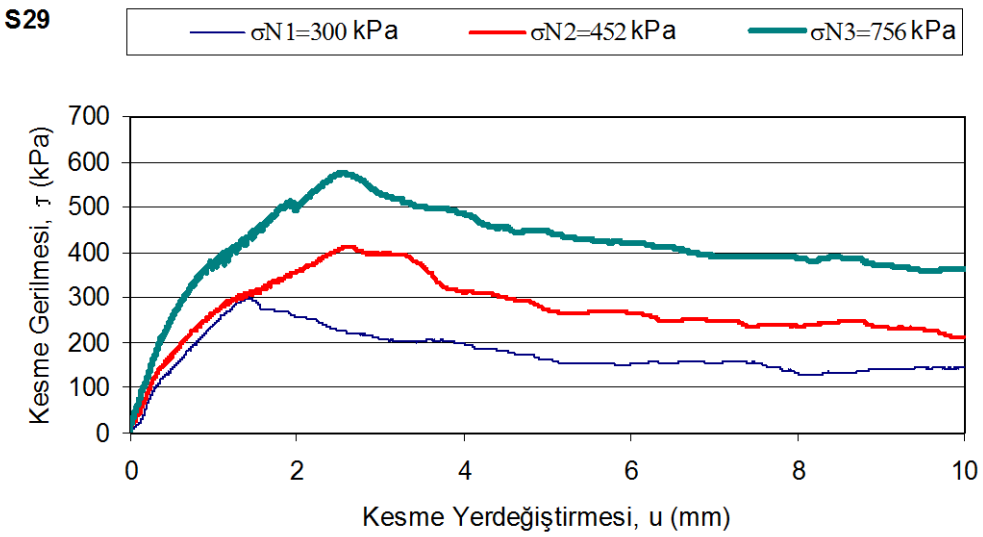
Şekil B.54 : S26 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



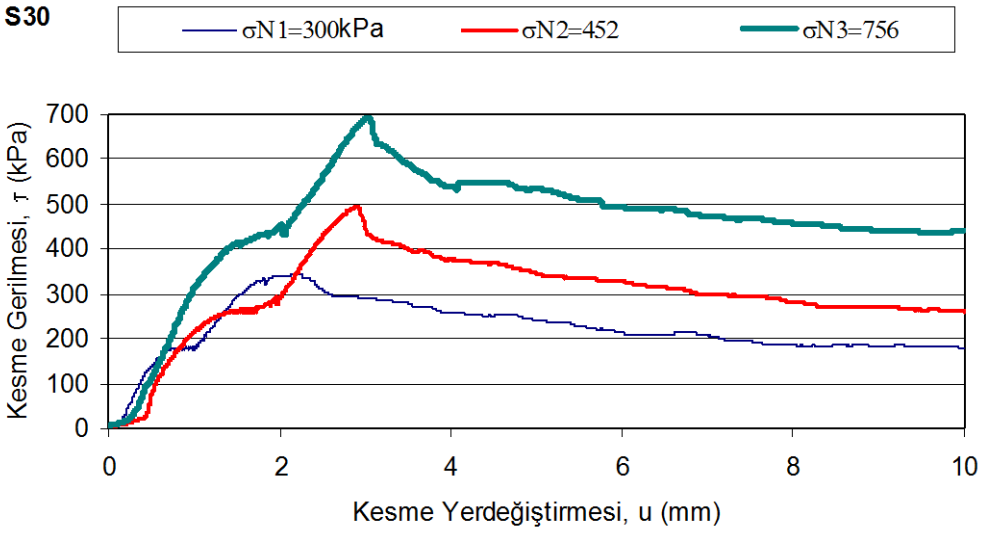
Şekil B.55 : S27 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



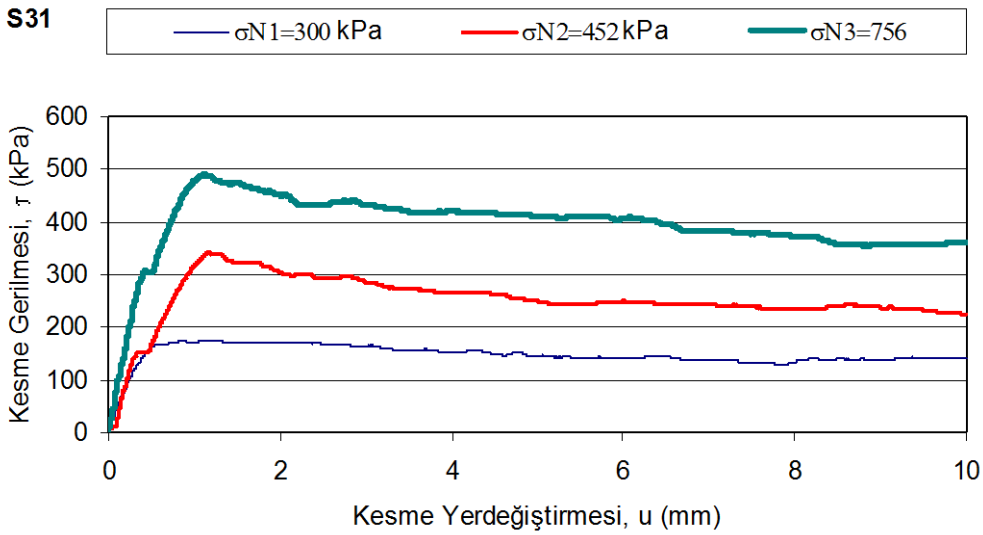
Şekil B.56 : S28 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



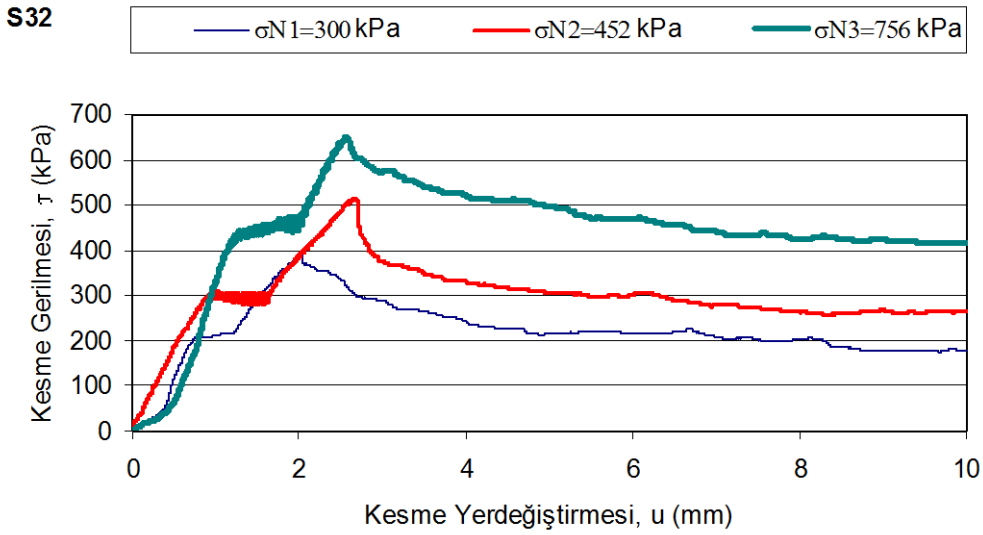
Şekil B.57 : S29 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



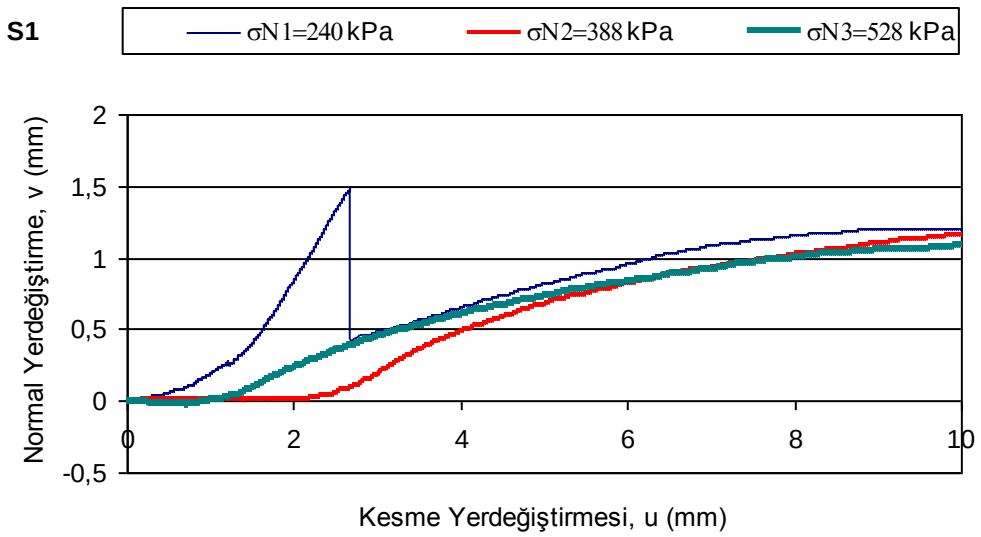
Şekil B.58 : S30 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



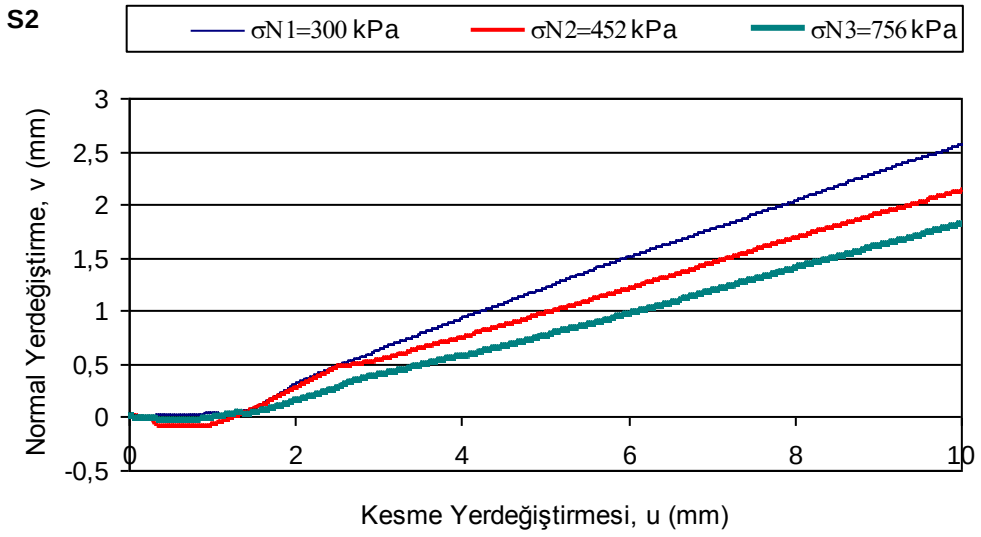
Şekil B.59 : S31 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



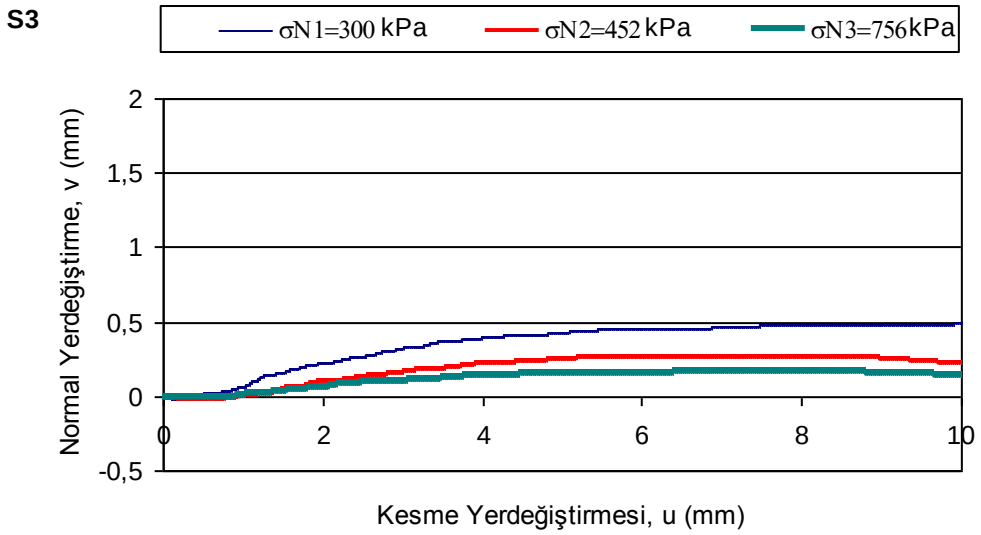
Şekil B.60 : S32 örneği için kesme gerilmesi (τ) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



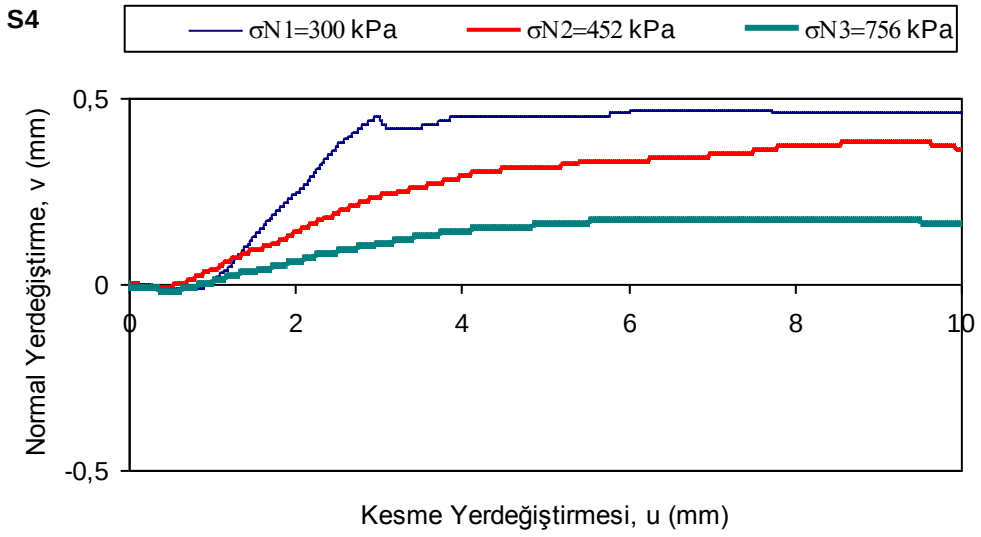
Şekil B.61 : S1 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



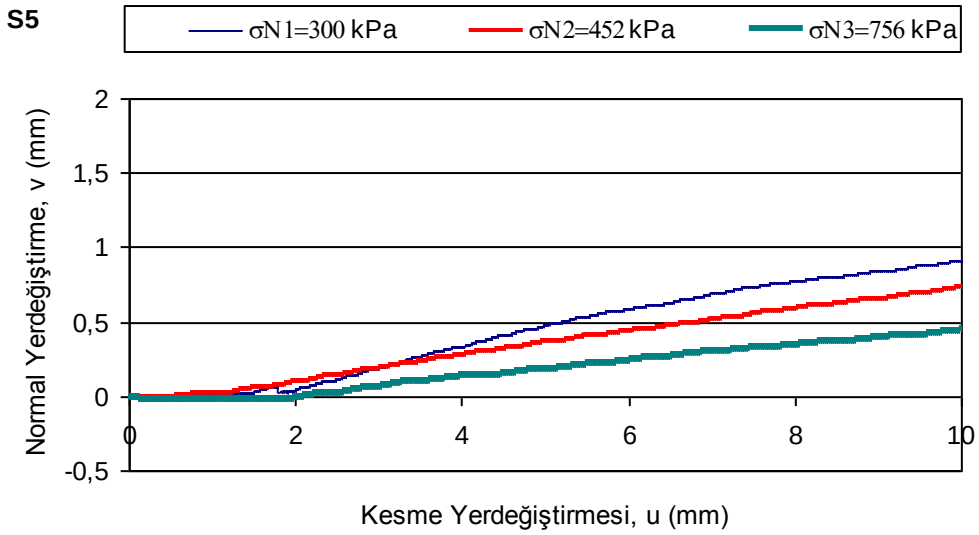
Şekil B.62 : S2 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



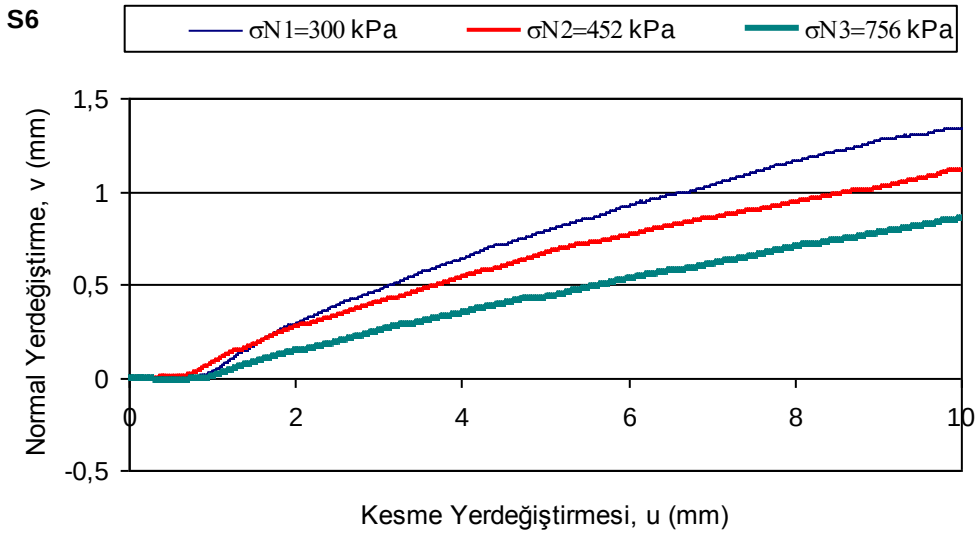
Şekil B.63 : S3 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



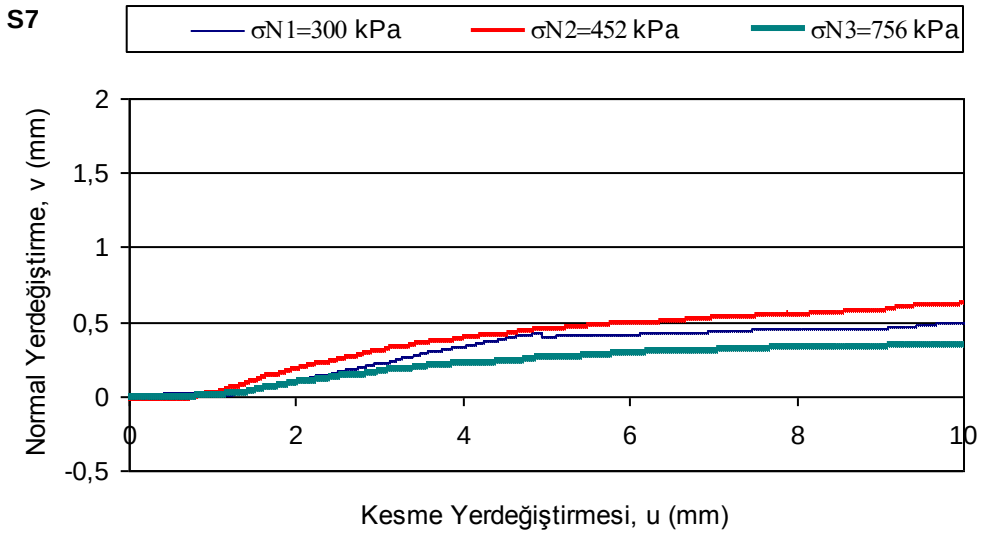
Şekil B.64 : S4 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



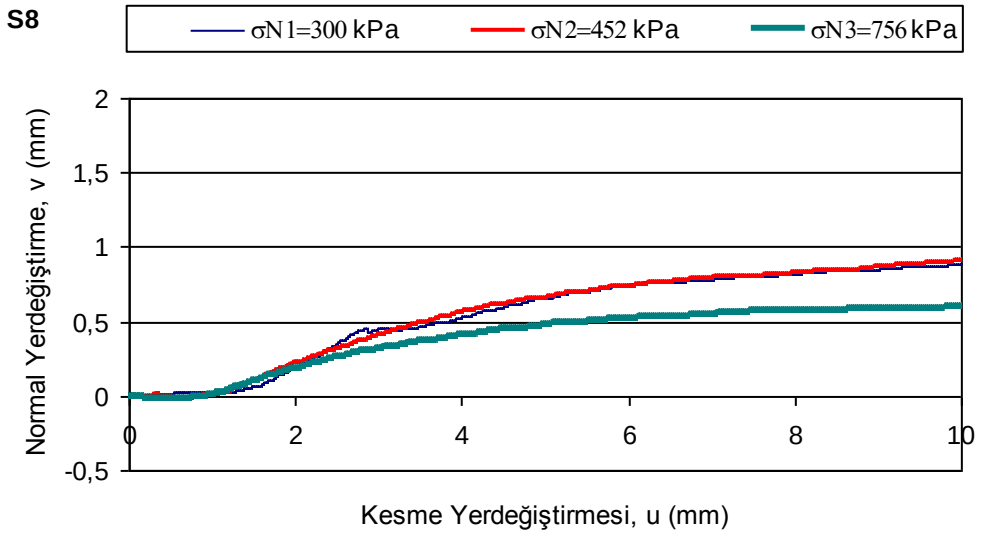
Şekil B.65 : S5 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



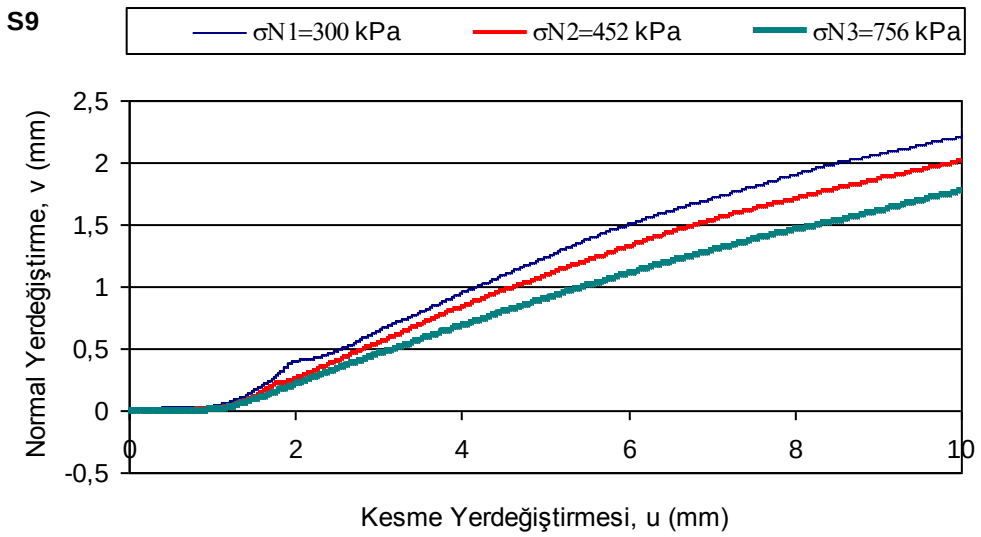
Şekil B.66 : S6 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



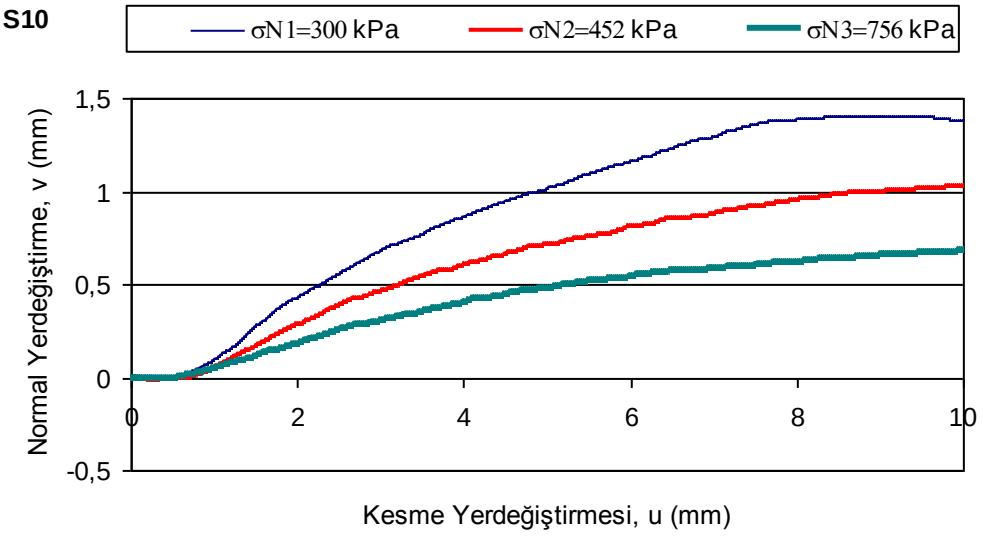
Şekil B.67 : S7 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



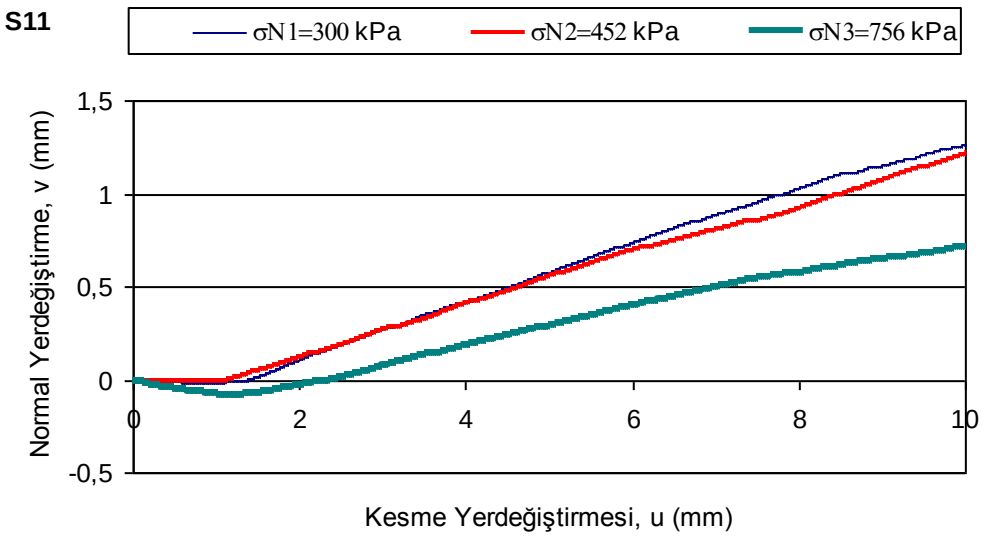
Şekil B.68 : S8 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



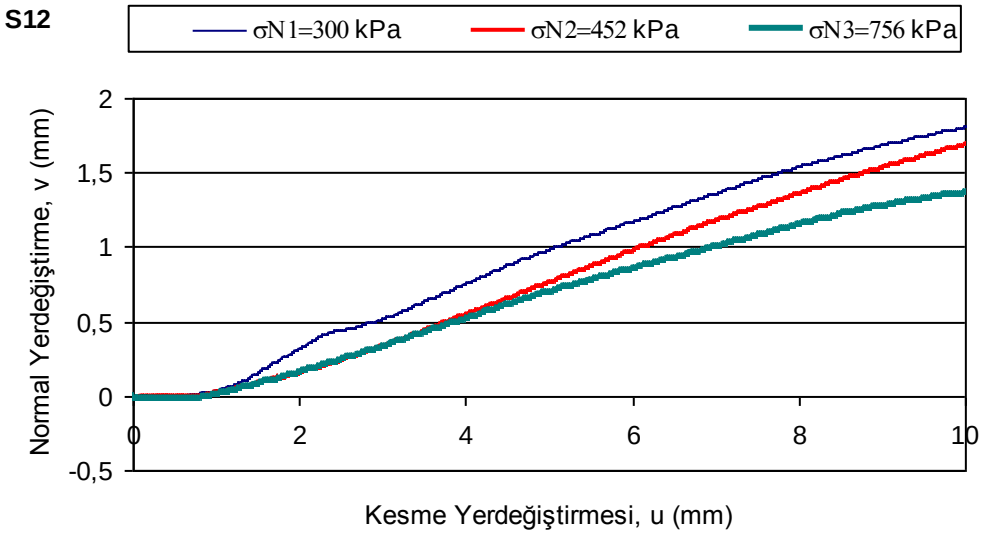
Şekil B.69 : S9 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



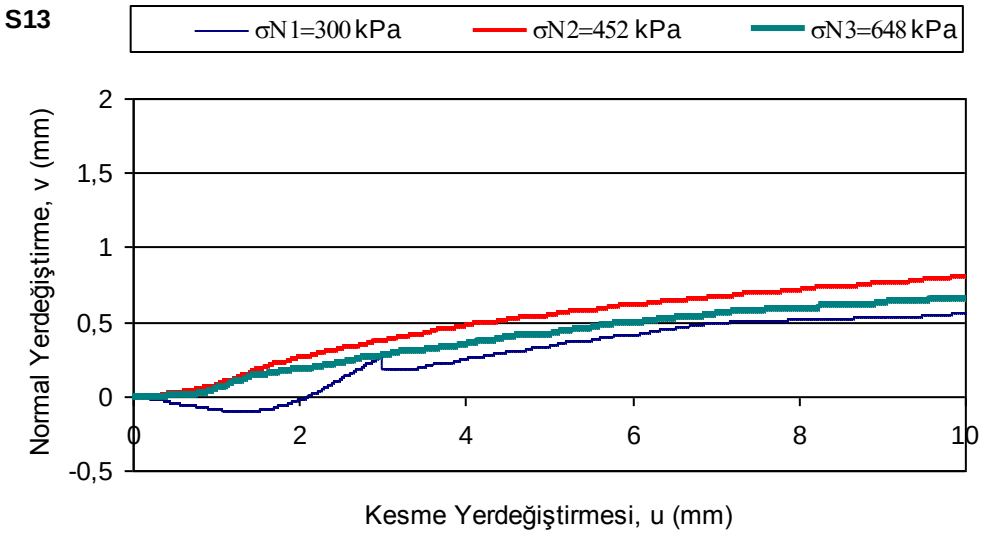
Şekil B.70 : S10 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



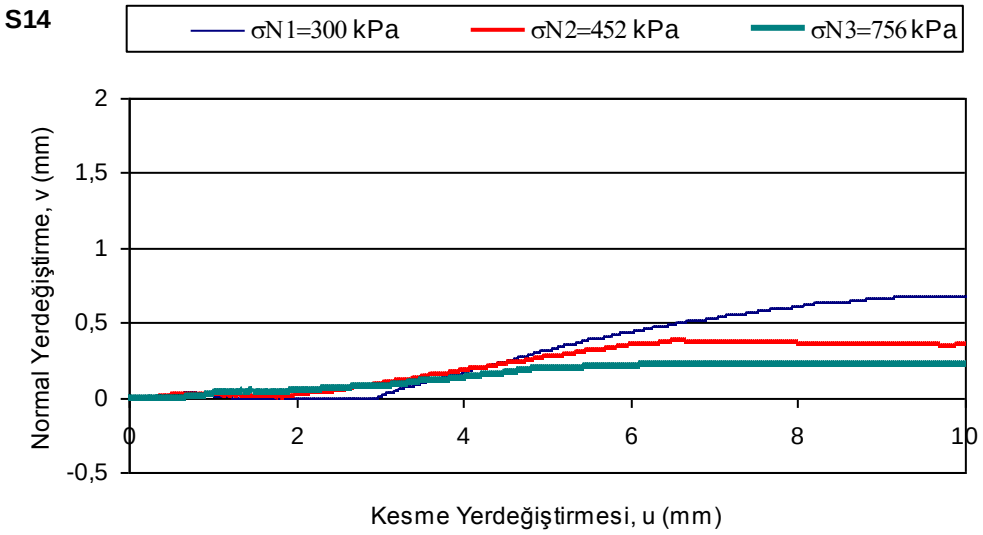
Şekil B.71 : S11 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



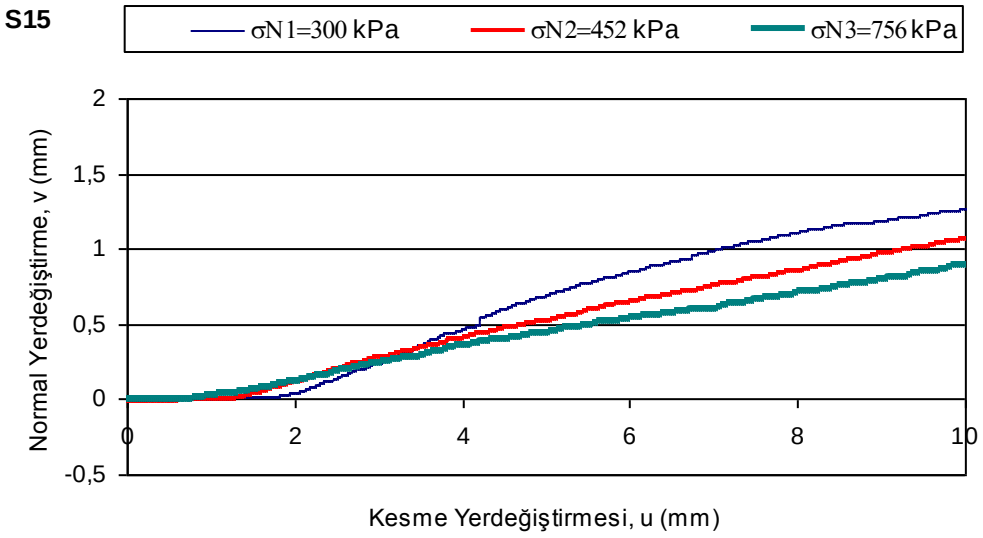
Şekil B.72 : S12 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



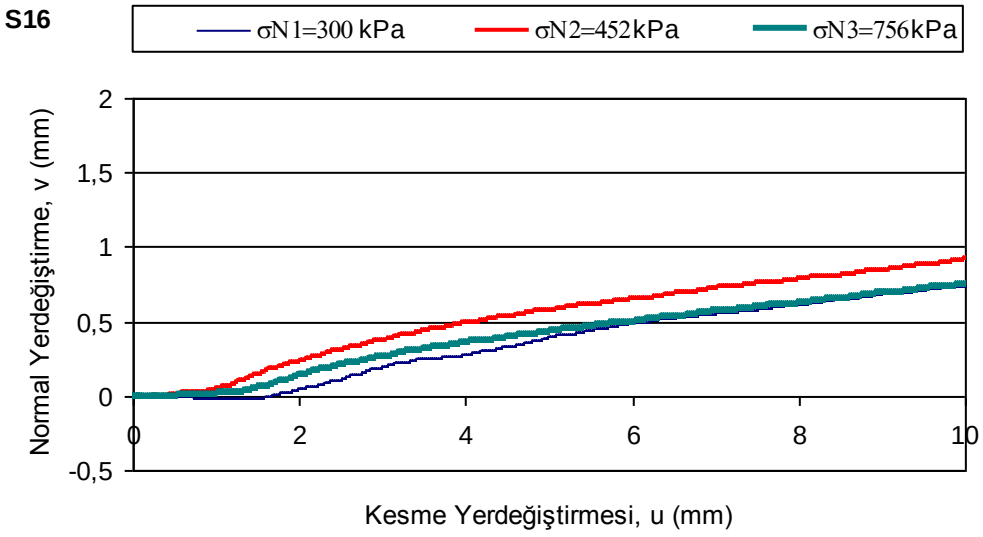
Şekil B.73 : S13 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



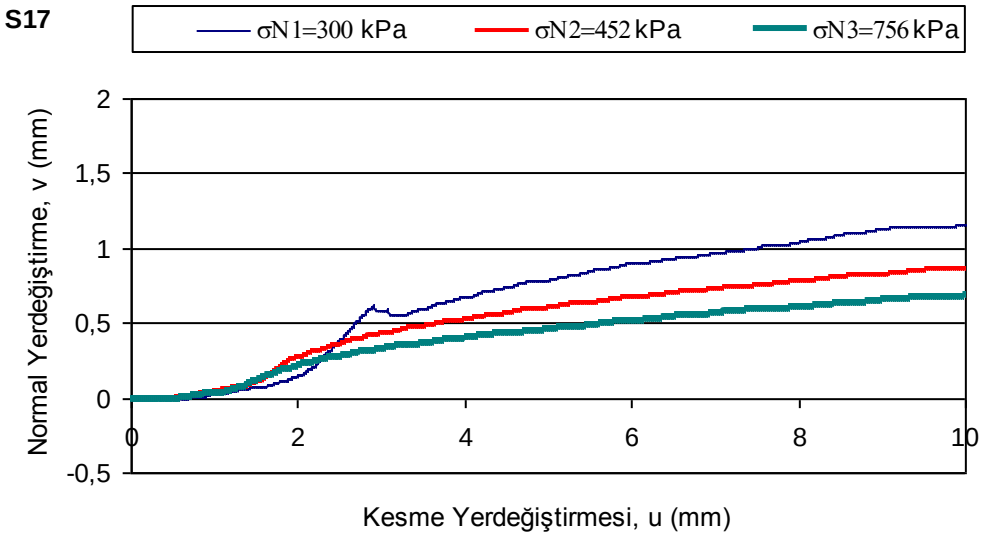
Şekil B.74 : S14 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



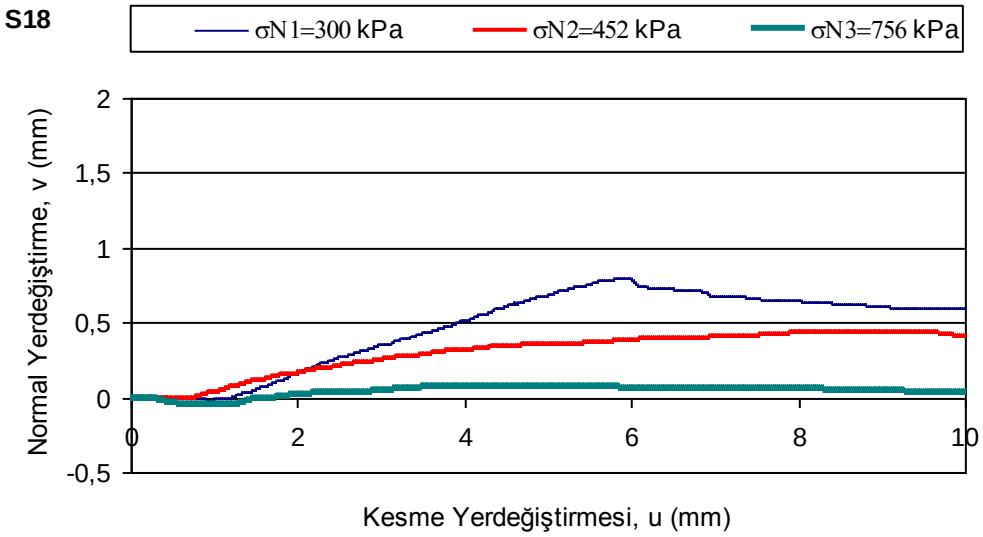
Şekil B.75 : S15 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



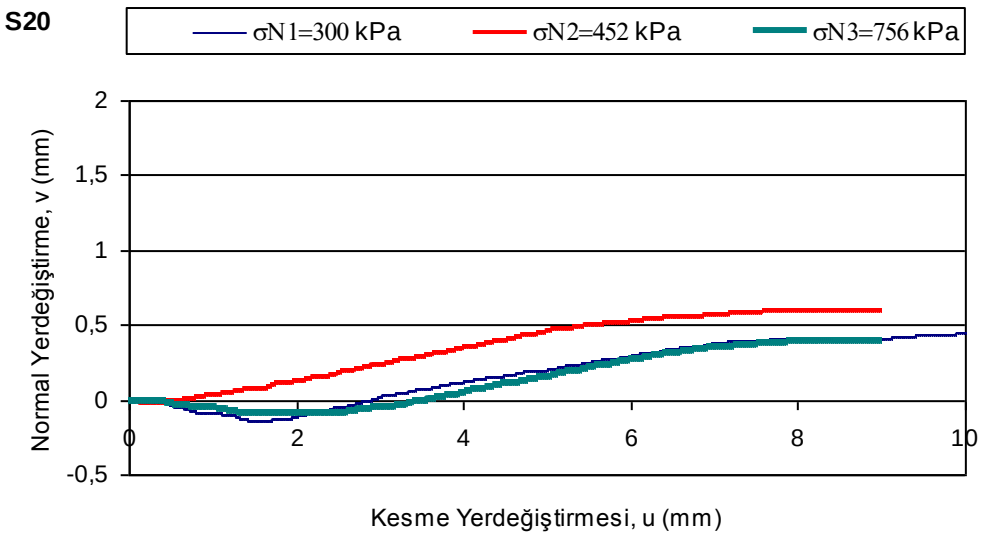
Şekil B.76 : S16 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



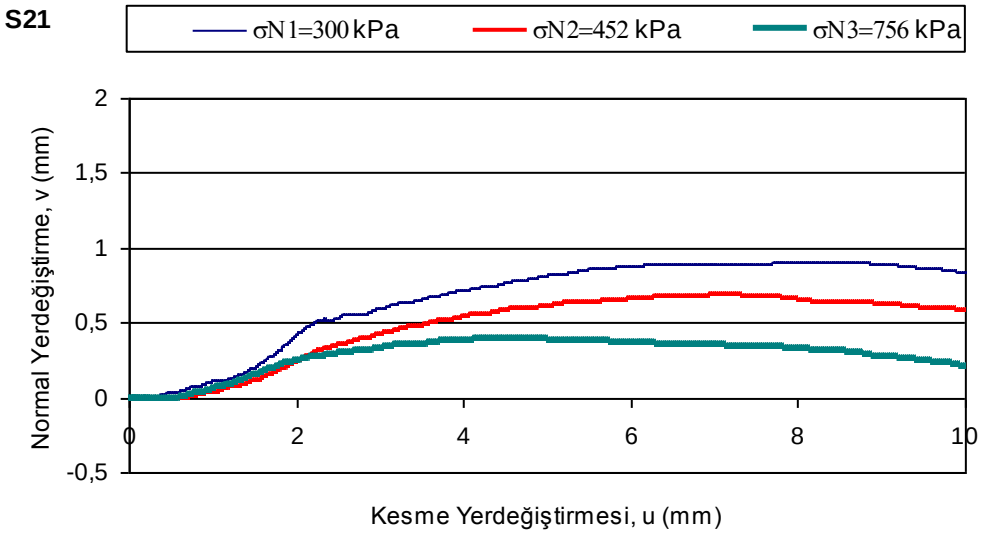
Şekil B.77 : S17 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



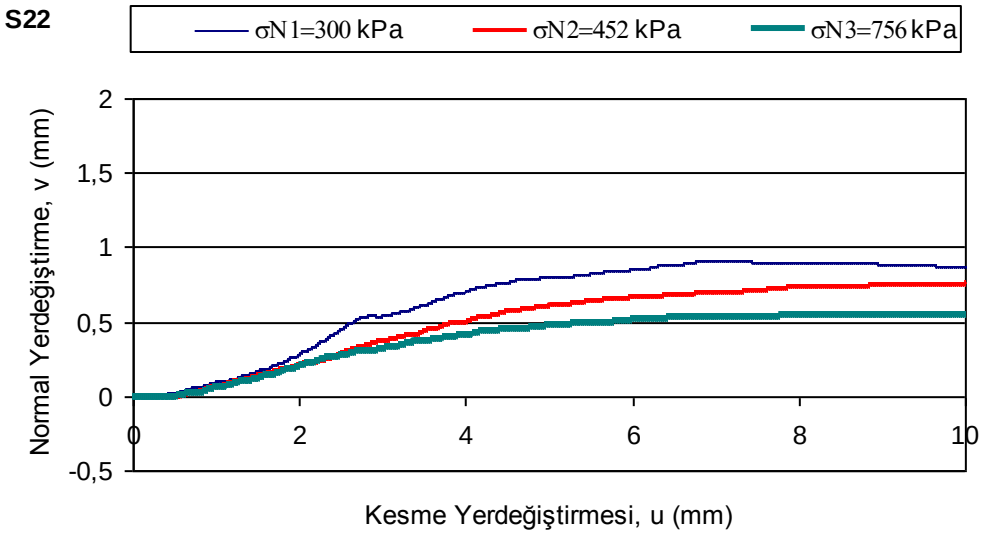
Şekil B.78 : S18 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



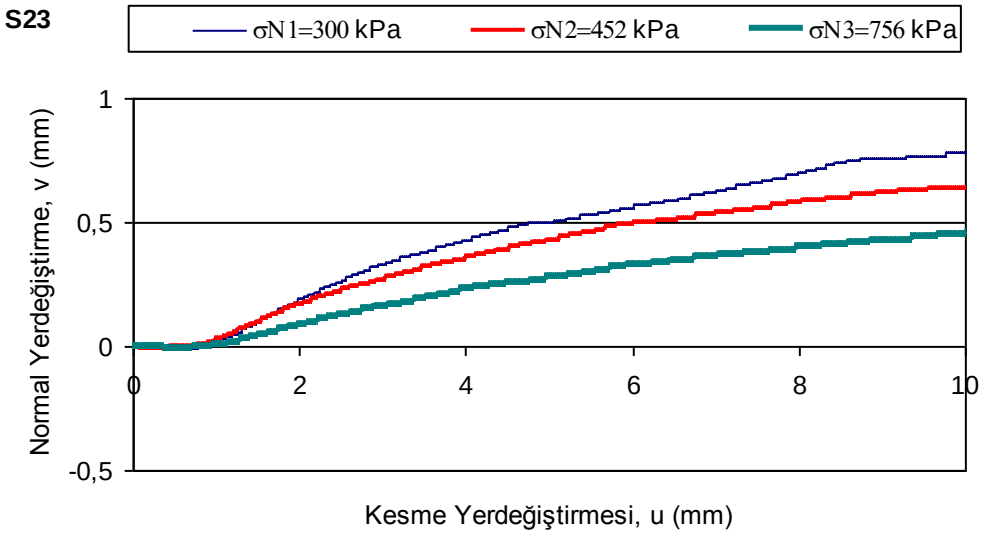
Şekil B.79 : S20 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



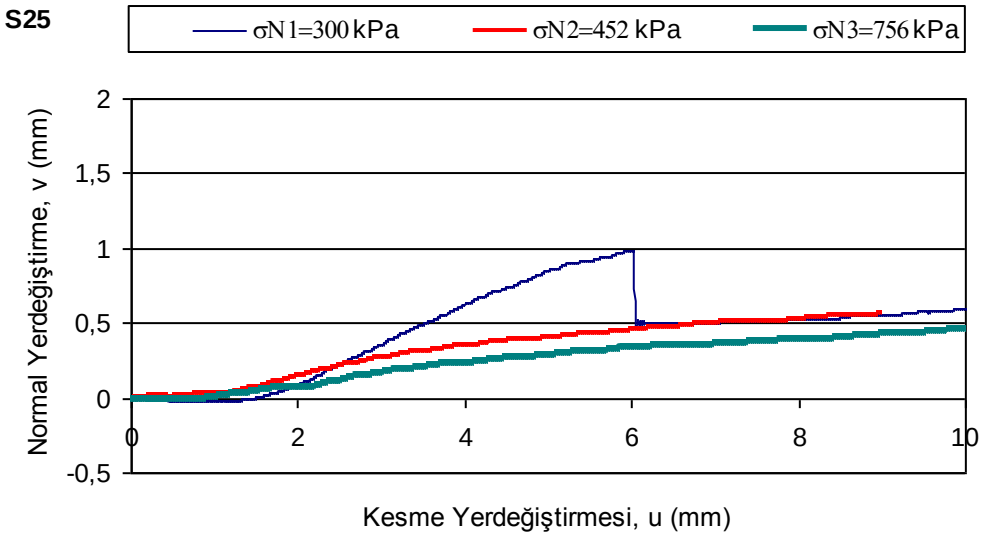
Şekil B.80 : S21 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



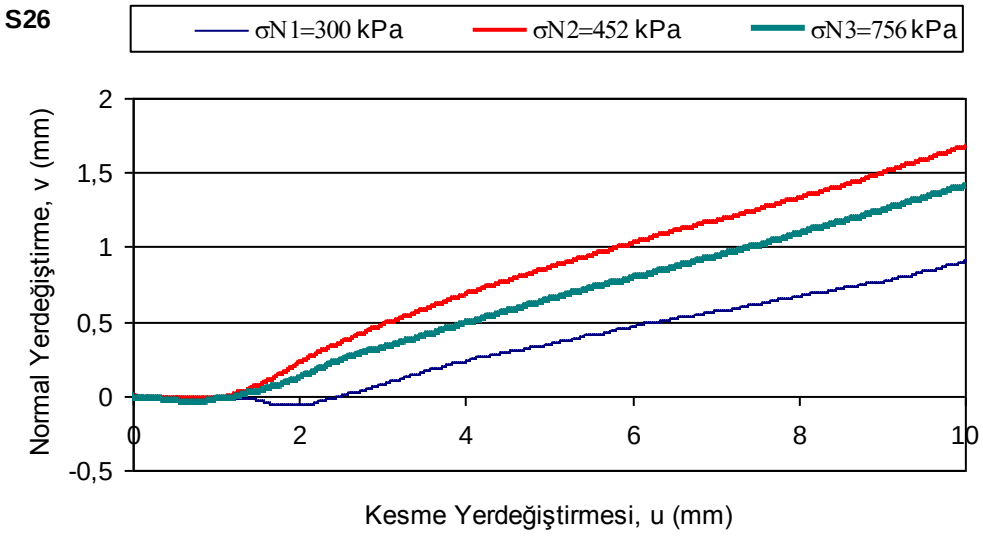
Şekil B.81 : S22 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



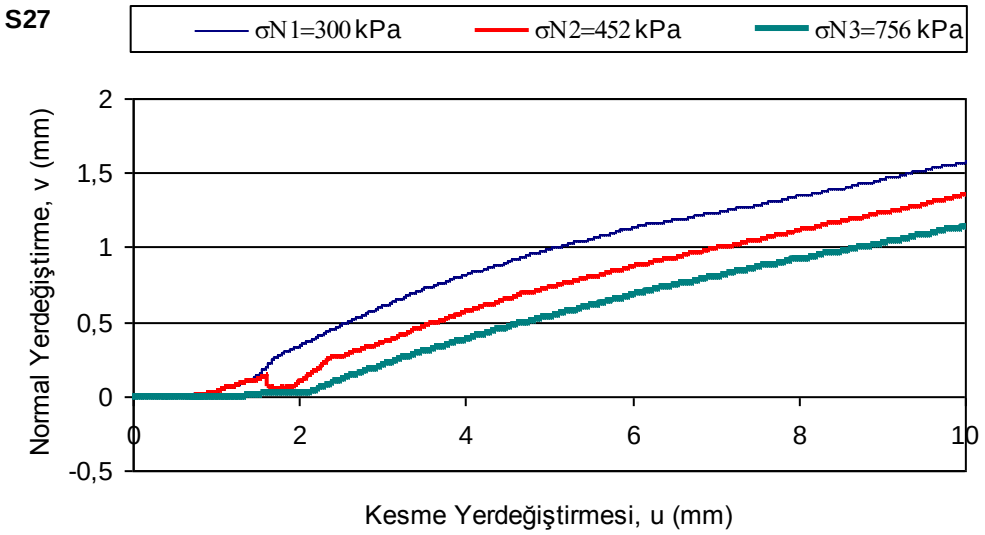
Şekil B.82 : S23 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



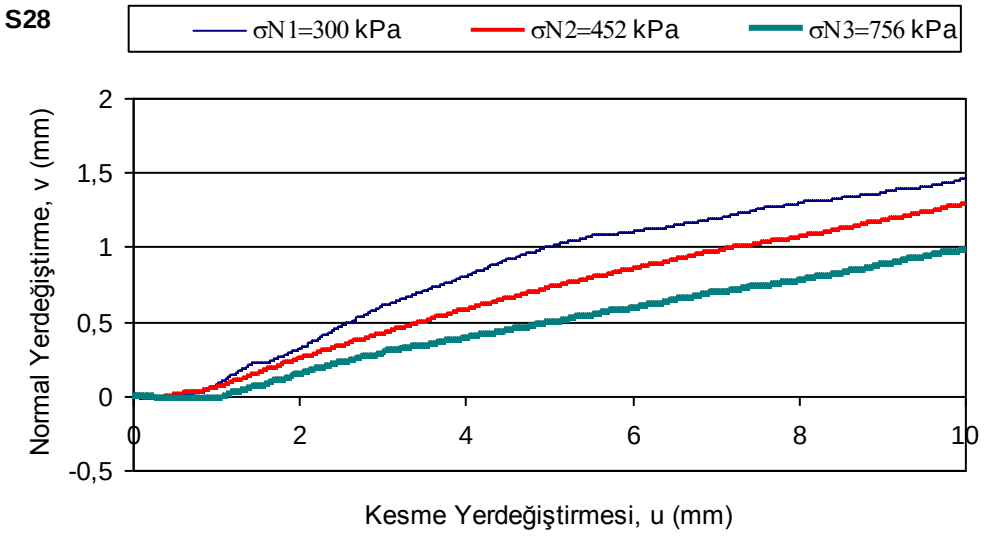
Şekil B.83 : S25 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



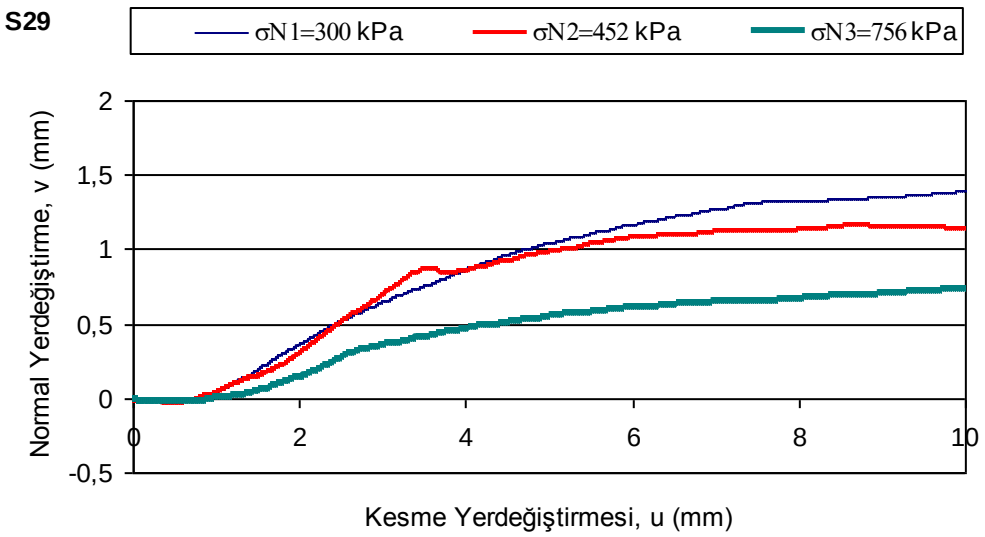
Şekil B.84 : S26 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



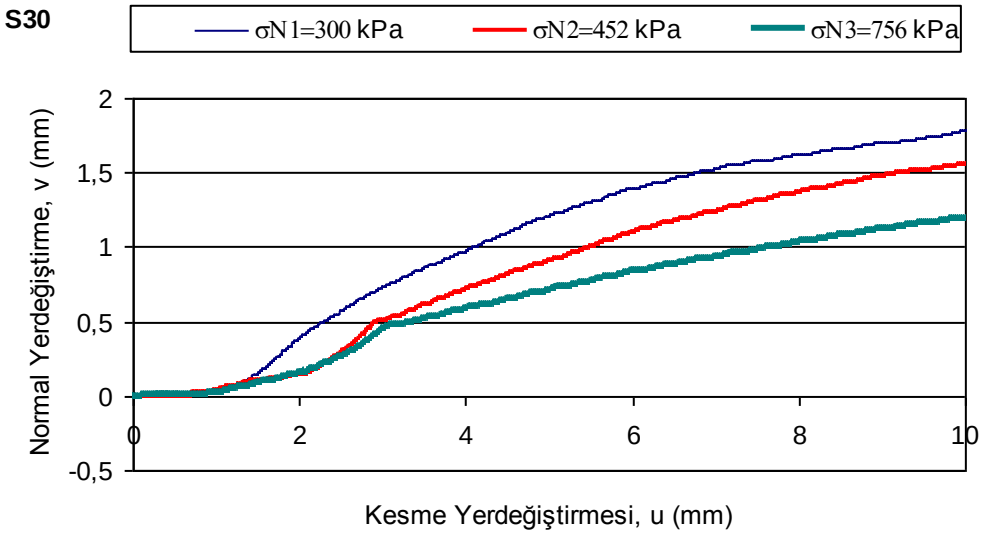
Şekil B.85 : S27 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



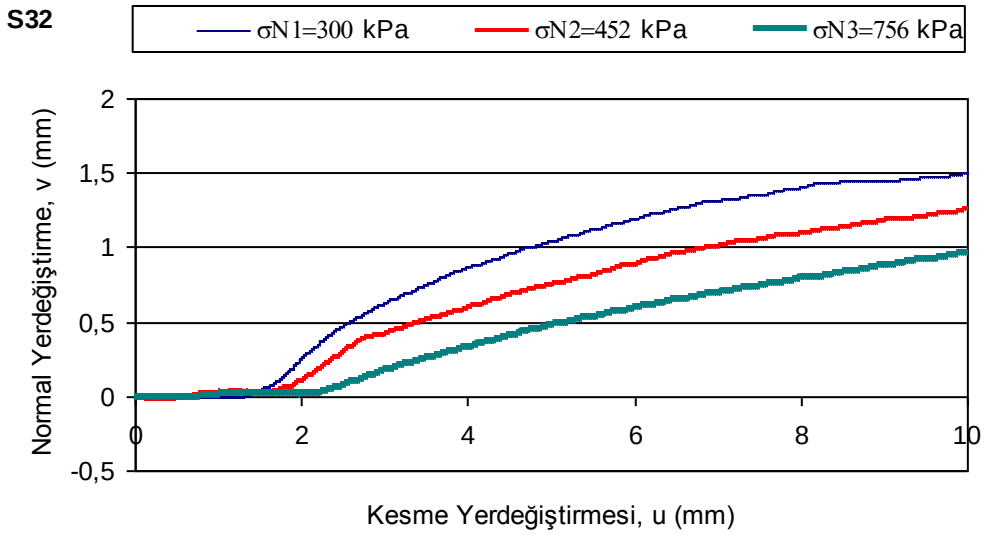
Şekil B.86 : S28 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



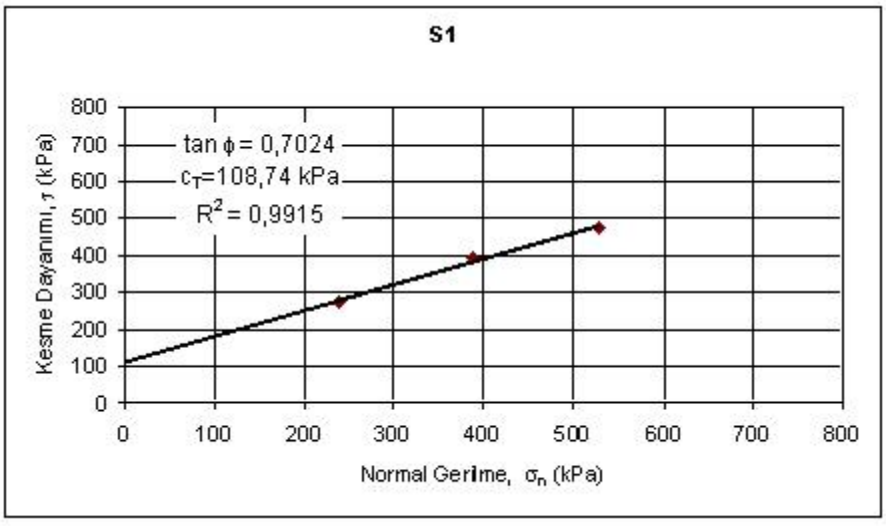
Şekil B.87 : S29 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



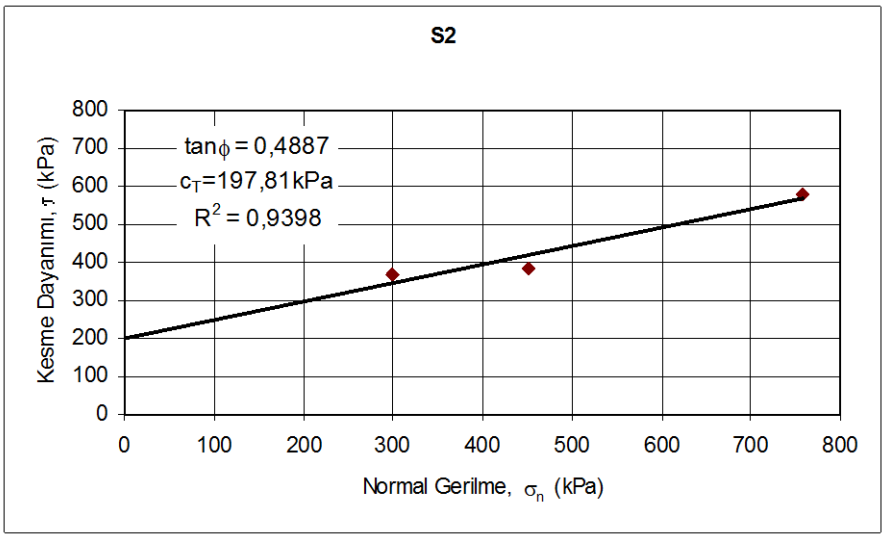
Şekil B.88 : S30 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



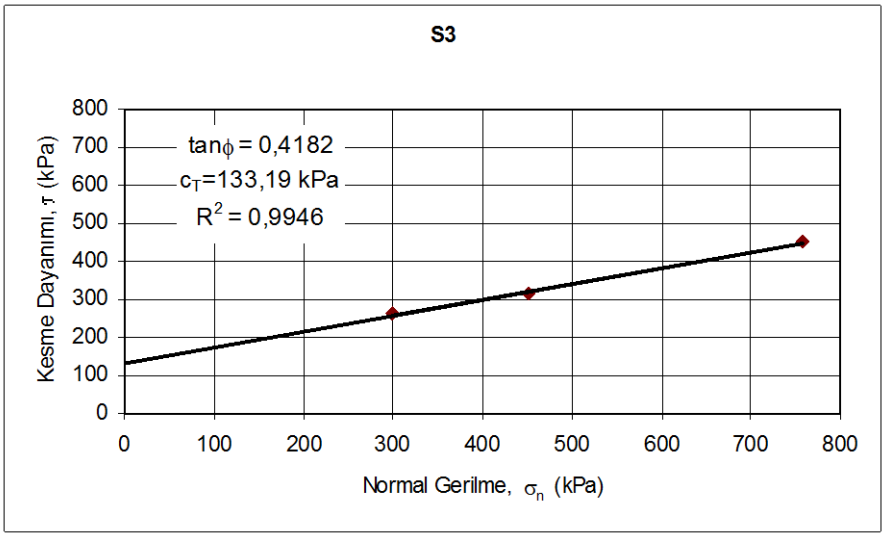
Şekil B.89 : S32 örneği için normal yerdeğiştirme (v) - kesme yerdeğiştirmesi (u) diyagramı



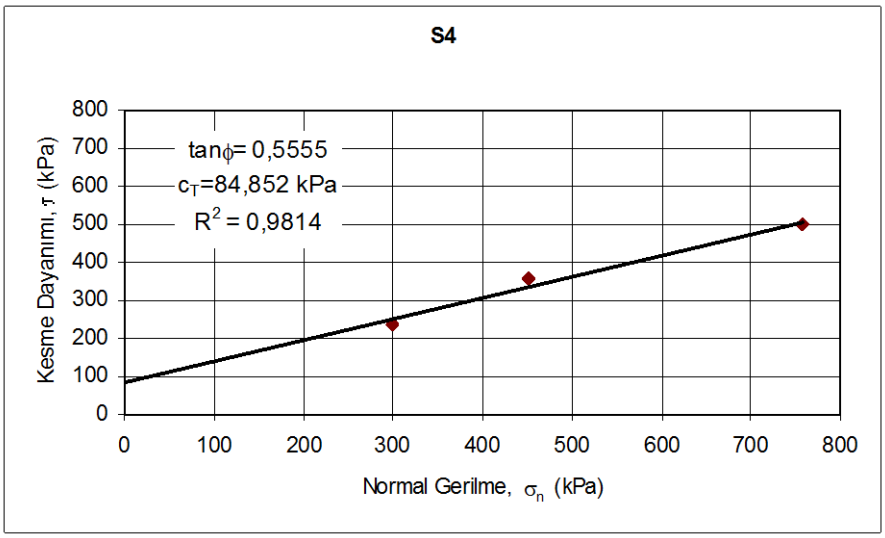
Şekil B.90 : S1 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



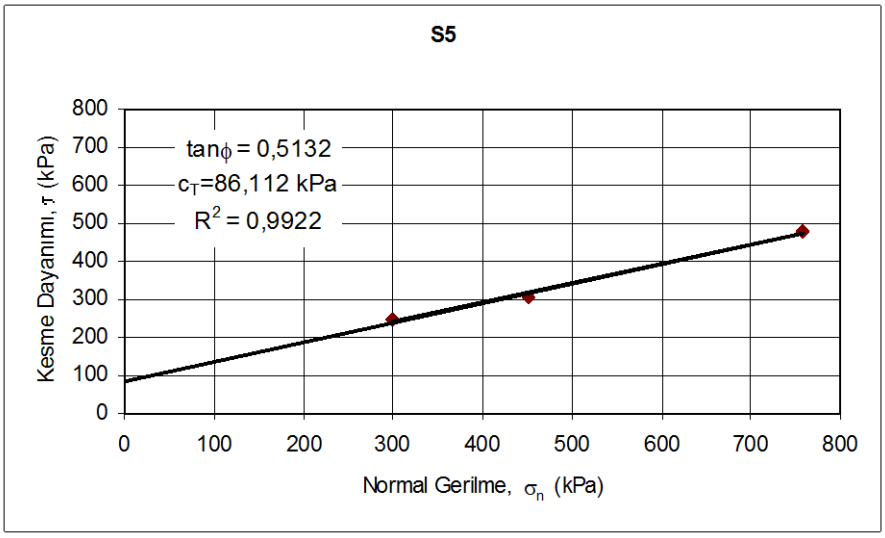
Şekil B.91 : S2 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



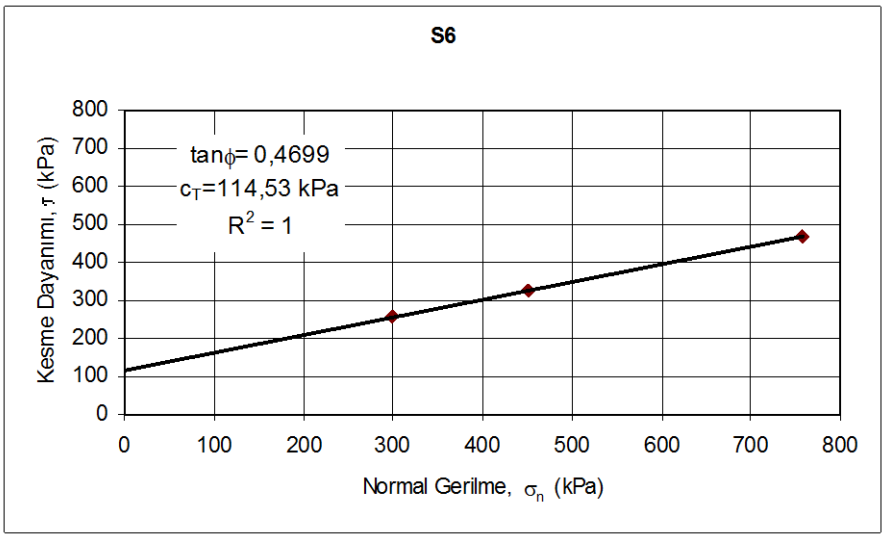
Şekil B.92 : S3 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



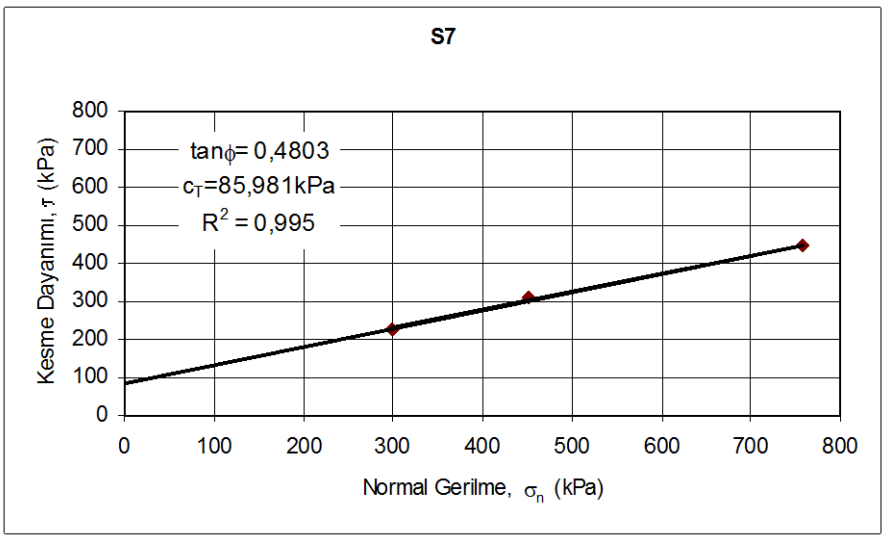
Şekil B.93 : S4 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



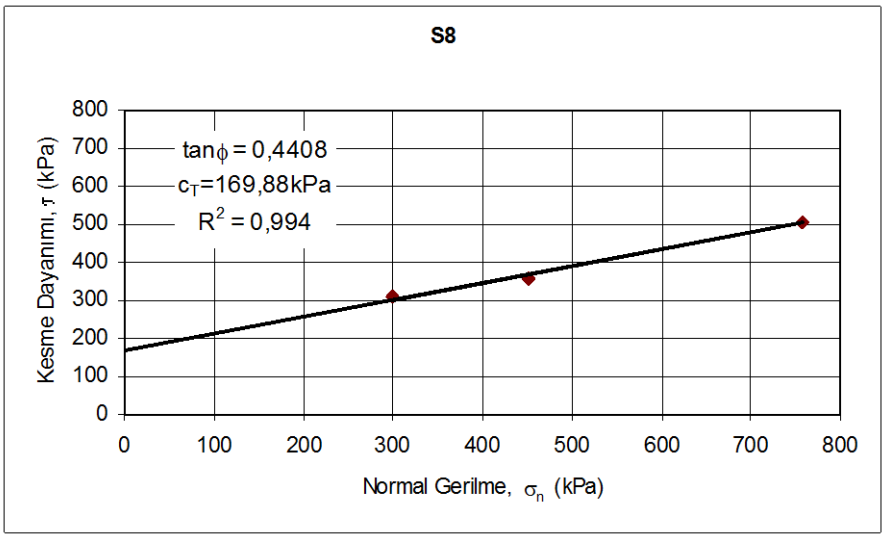
Şekil B.94 : S5 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



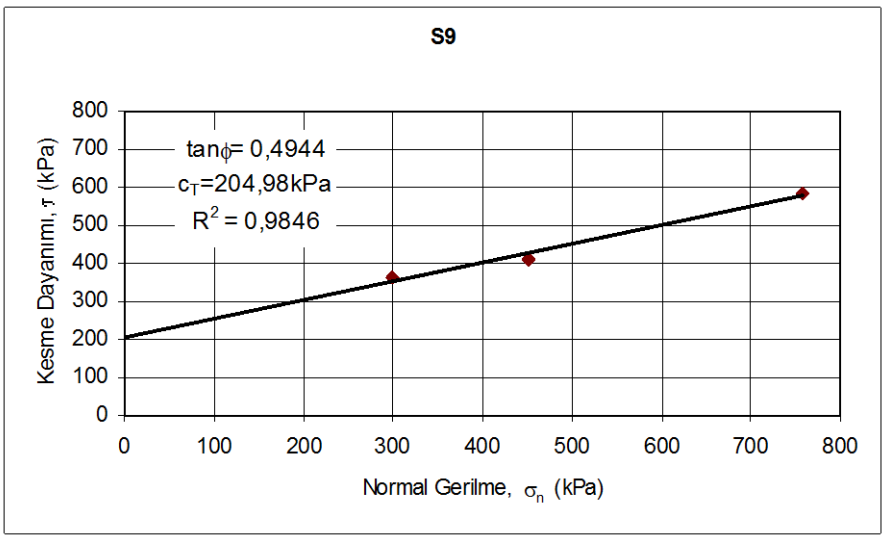
Şekil B.95 : S6 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



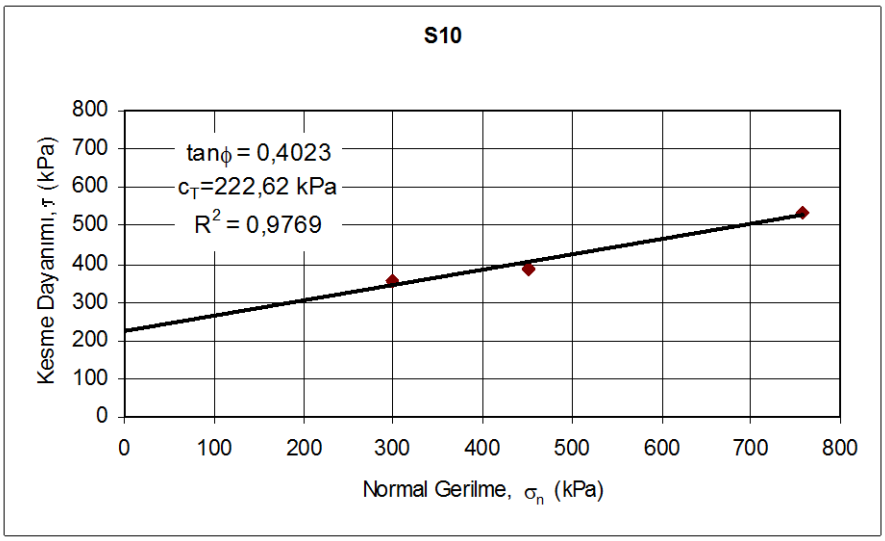
Şekil B.96 : S7 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



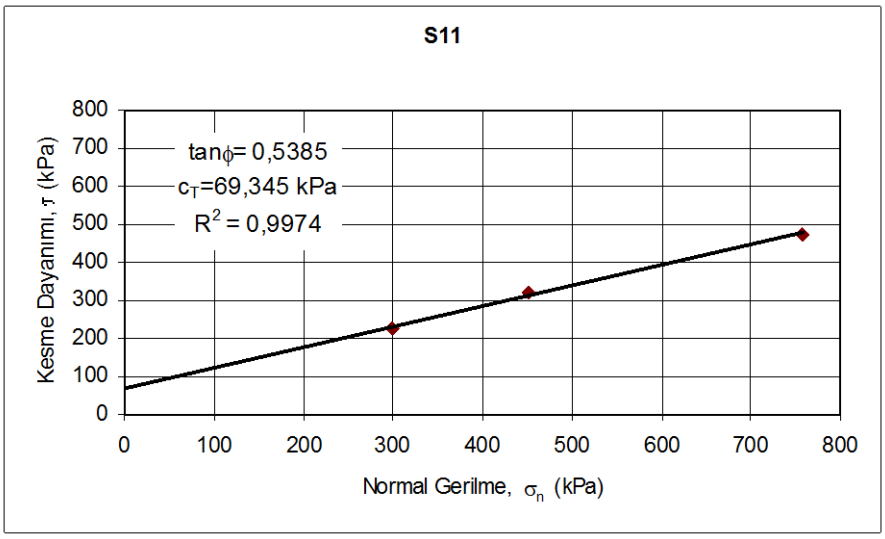
Şekil B.97 : S8 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



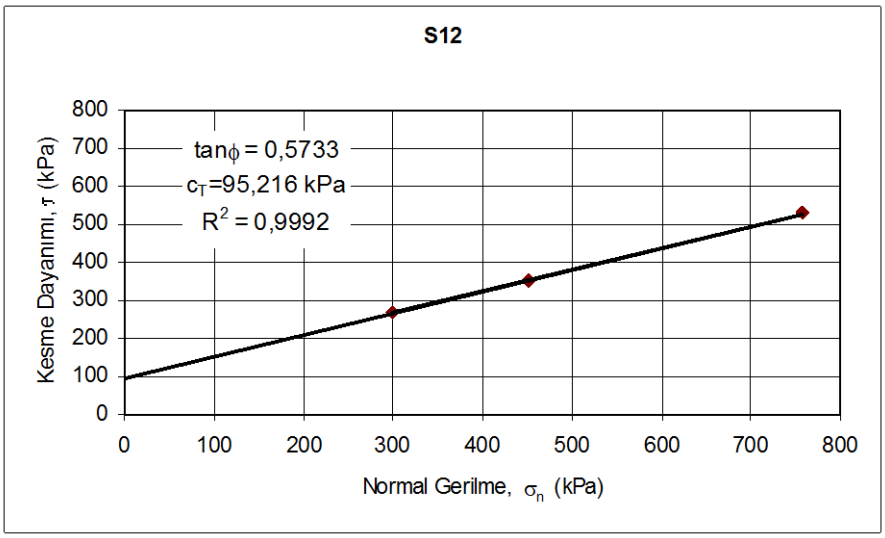
Şekil B.98 : S9 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



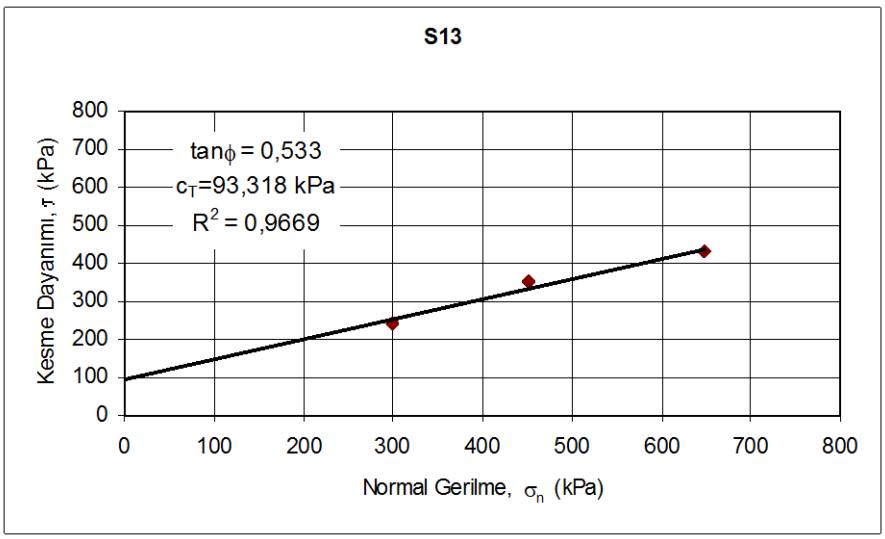
Şekil B.99 : S10 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



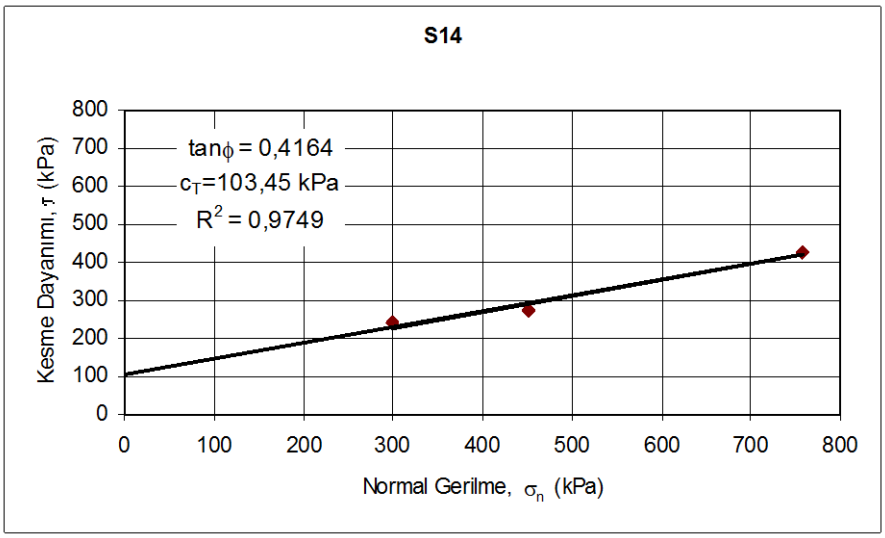
Şekil B.100 : S11 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



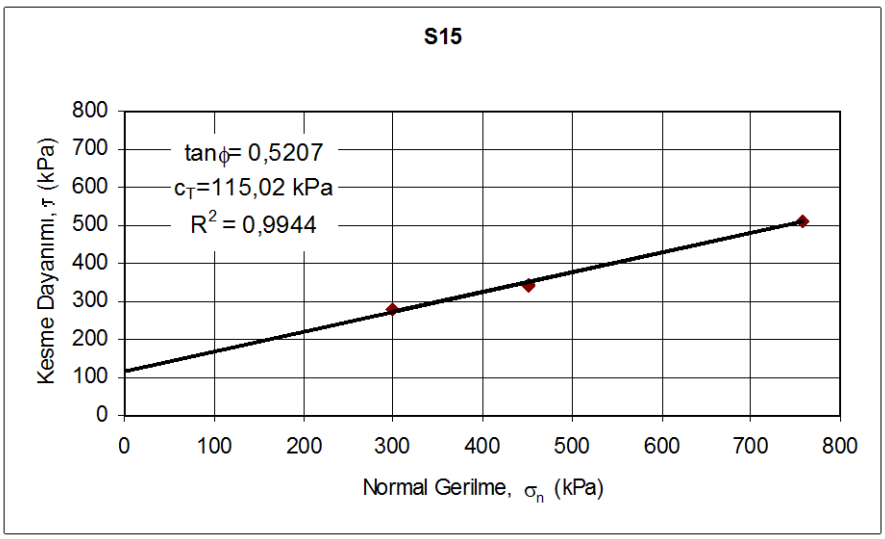
Şekil B.101 : S12 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



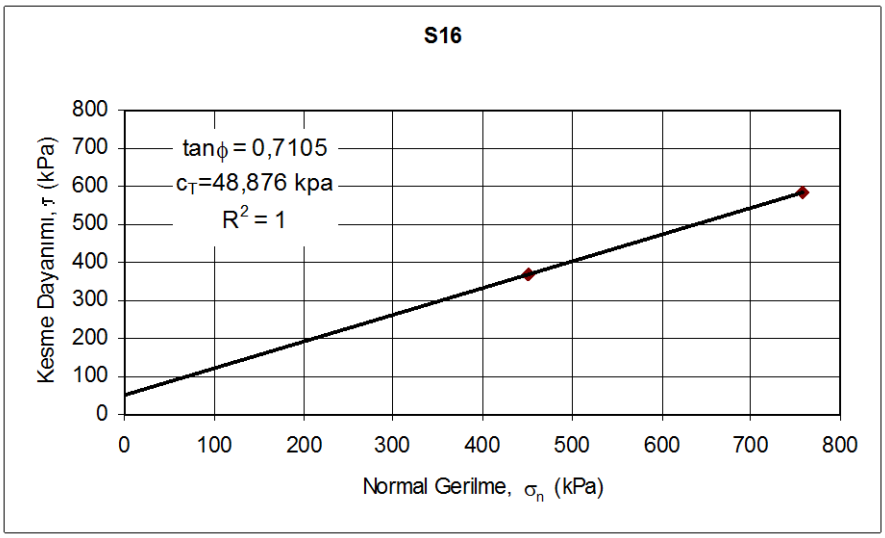
Şekil B.102 : S13 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



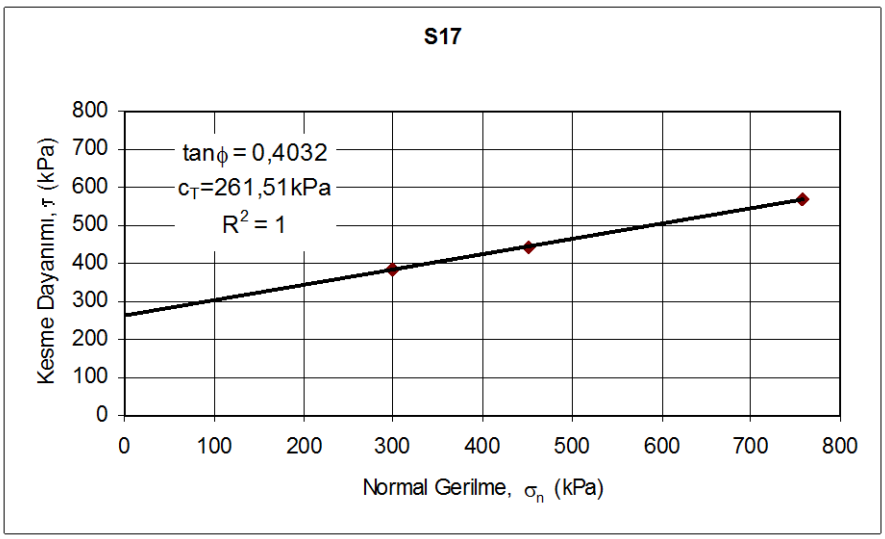
Şekil B.103 : S14 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



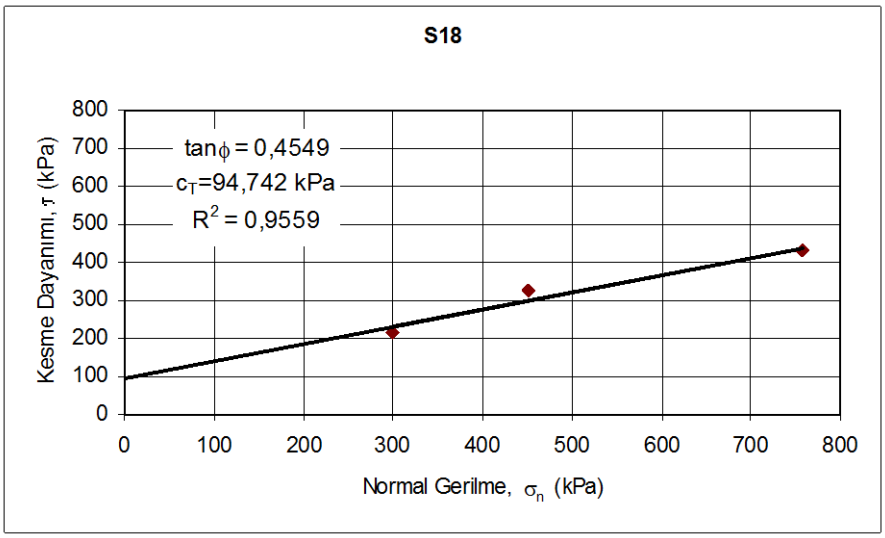
Şekil B.104 : S15 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



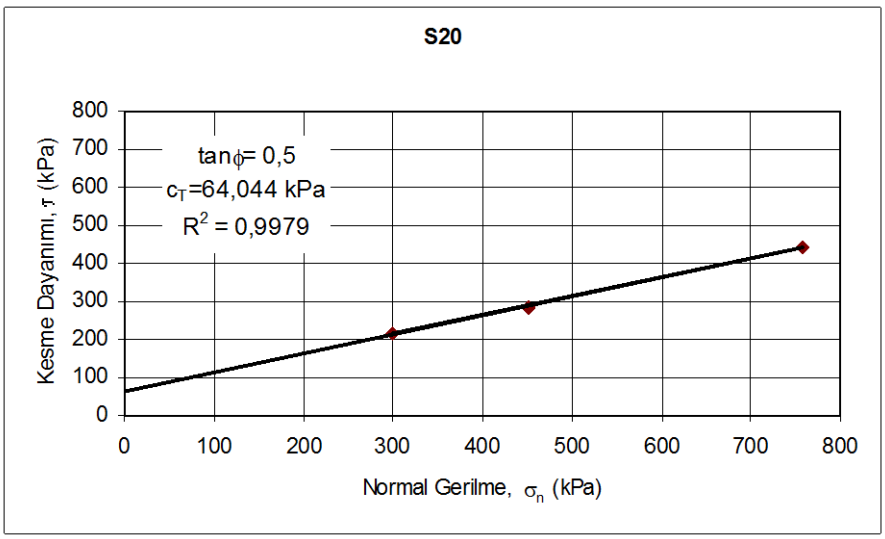
Şekil B.105 : S16 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



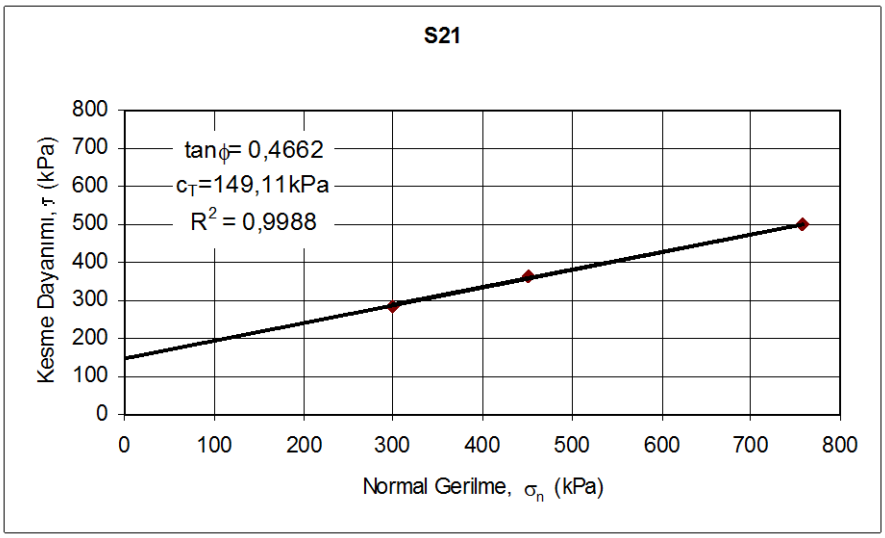
Şekil B.106 : S17 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



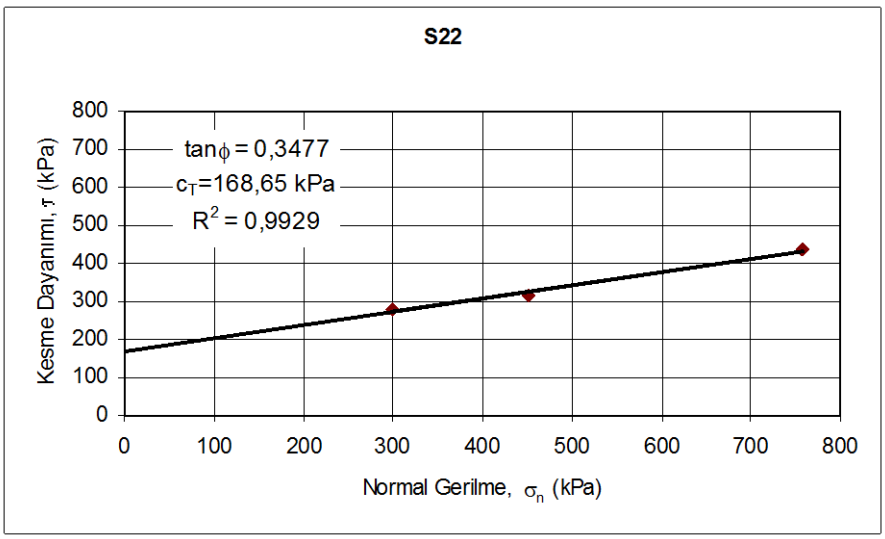
Şekil B.107 : S18 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



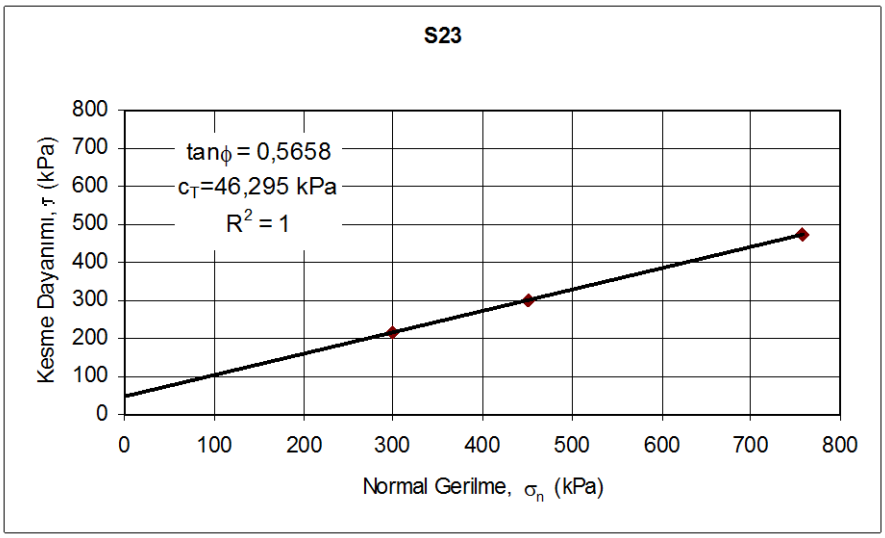
Şekil B.108 : S20 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



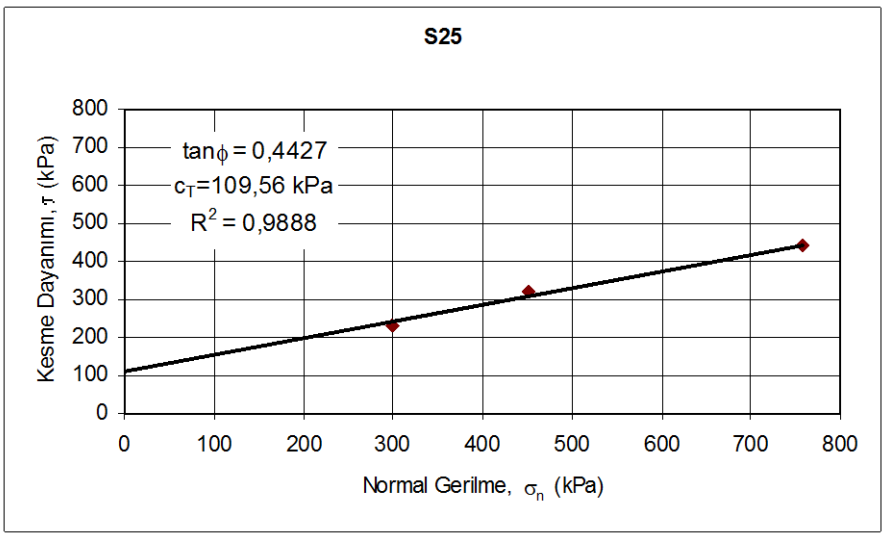
Şekil B.109 : S21 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



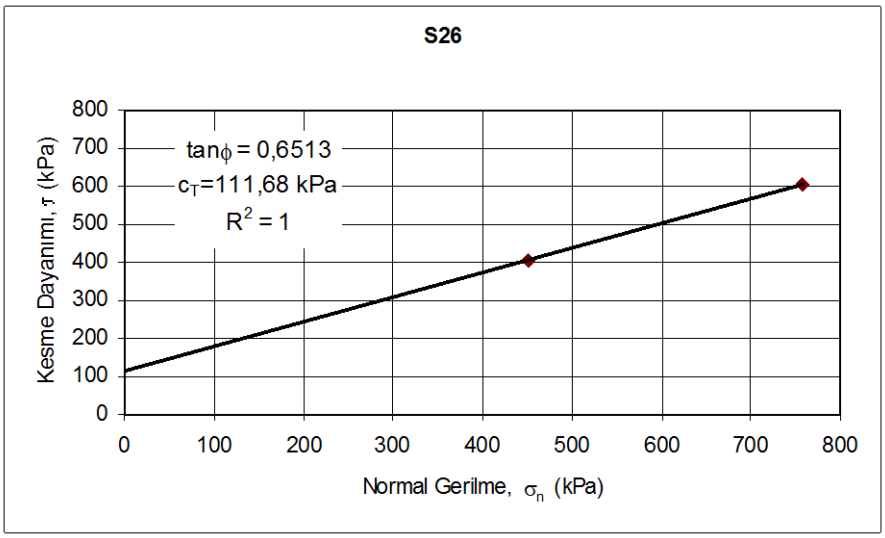
Şekil B.110 : S22 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



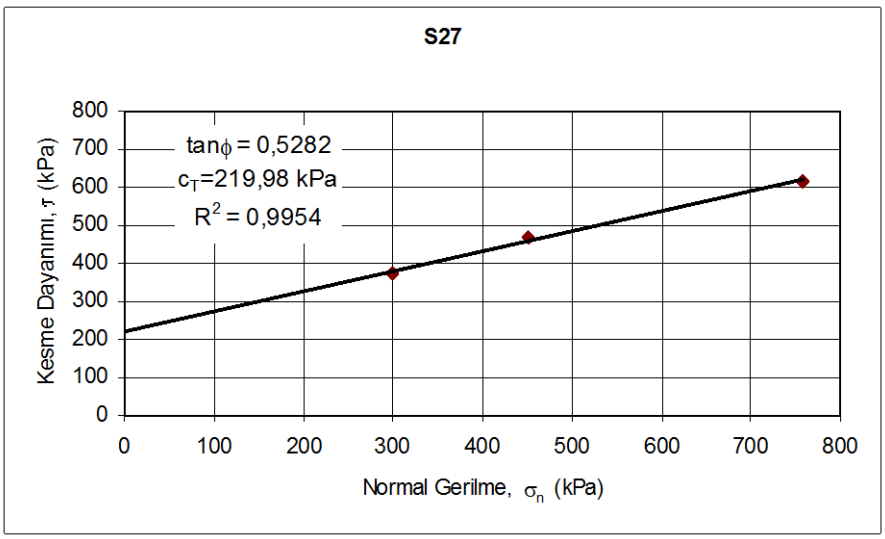
Şekil B.111 : S23 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



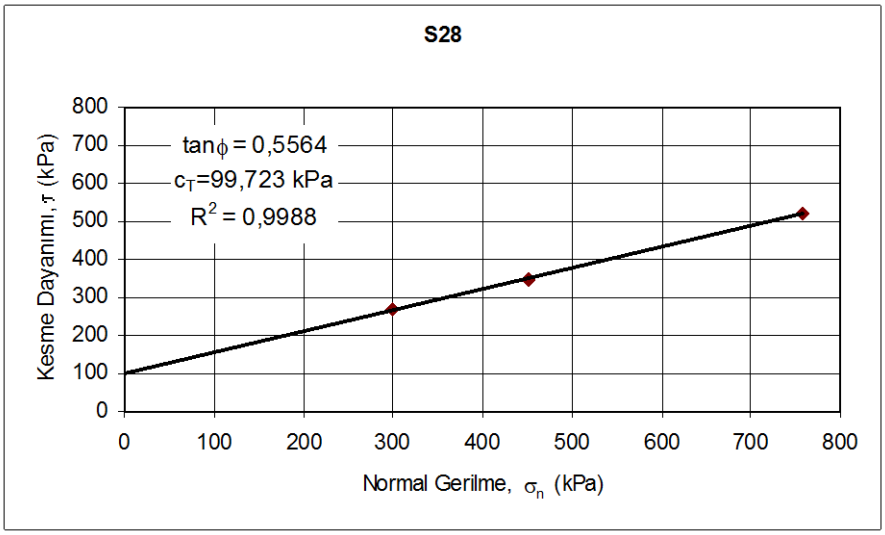
Şekil B.112 : S25 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



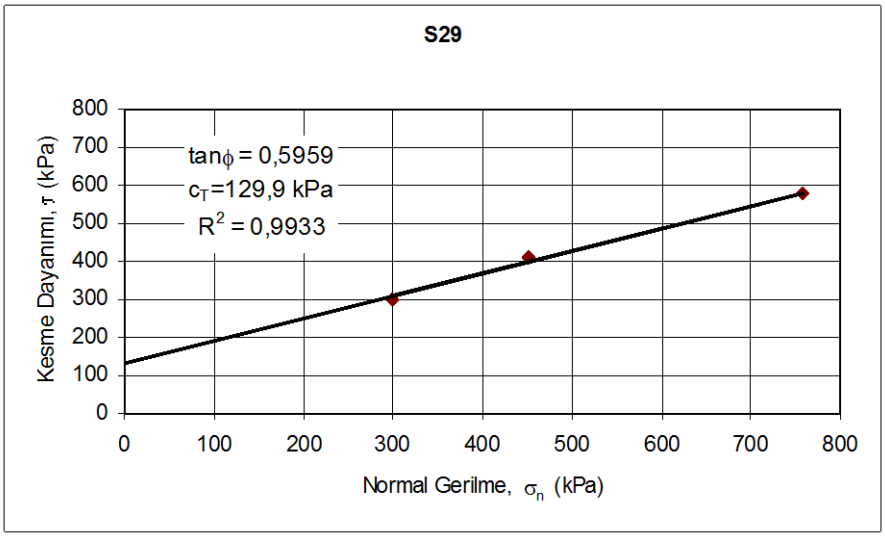
Şekil B.113 : S26 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



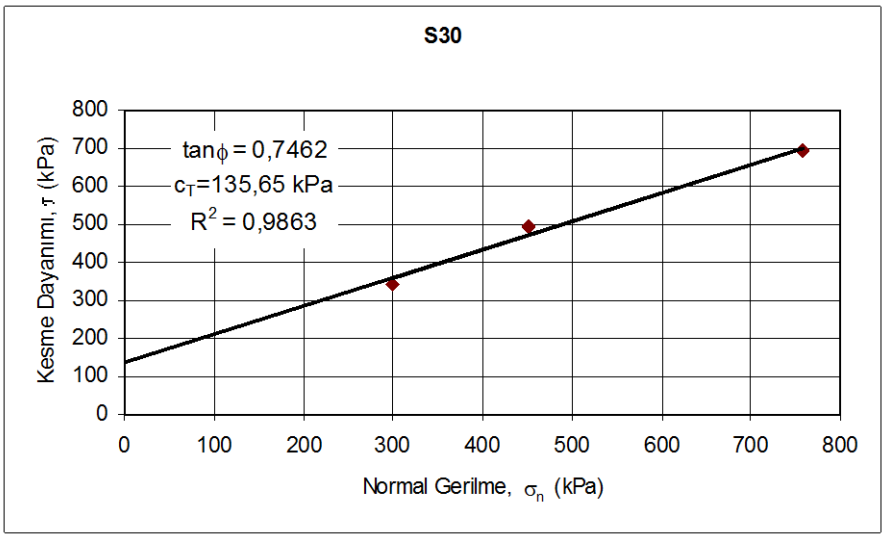
Şekil B.114 : S27 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



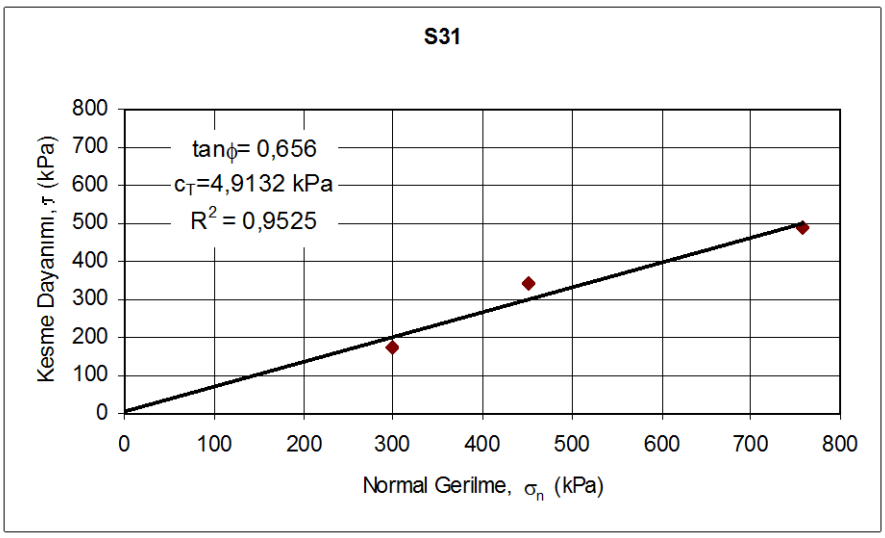
Şekil B.115 : S28 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



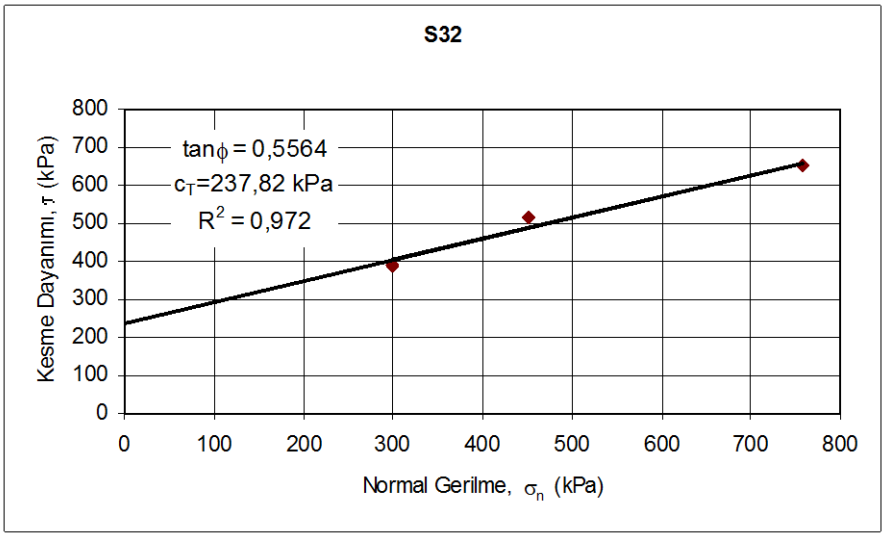
Şekil B.116 : S29 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



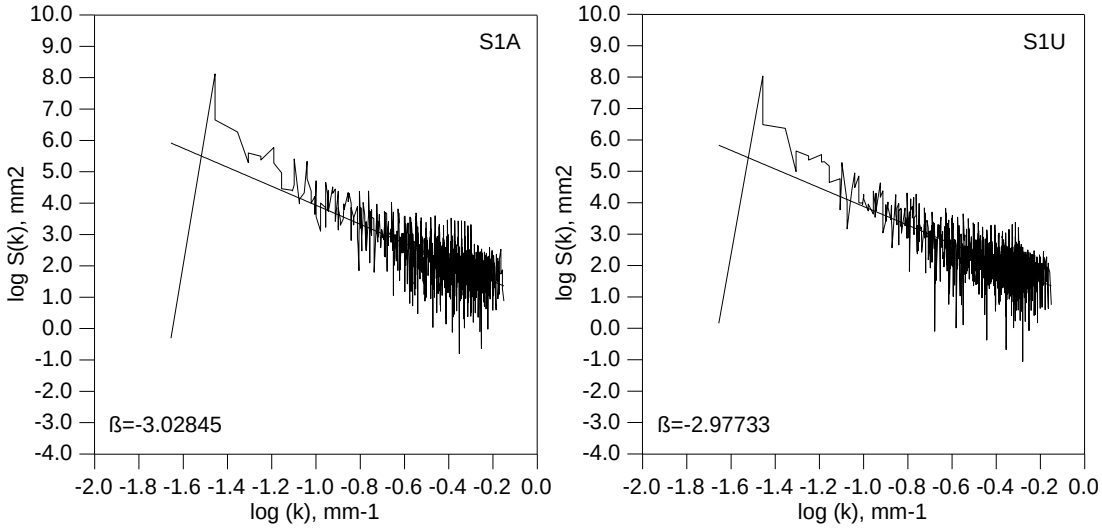
Şekil B.117 : S30 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



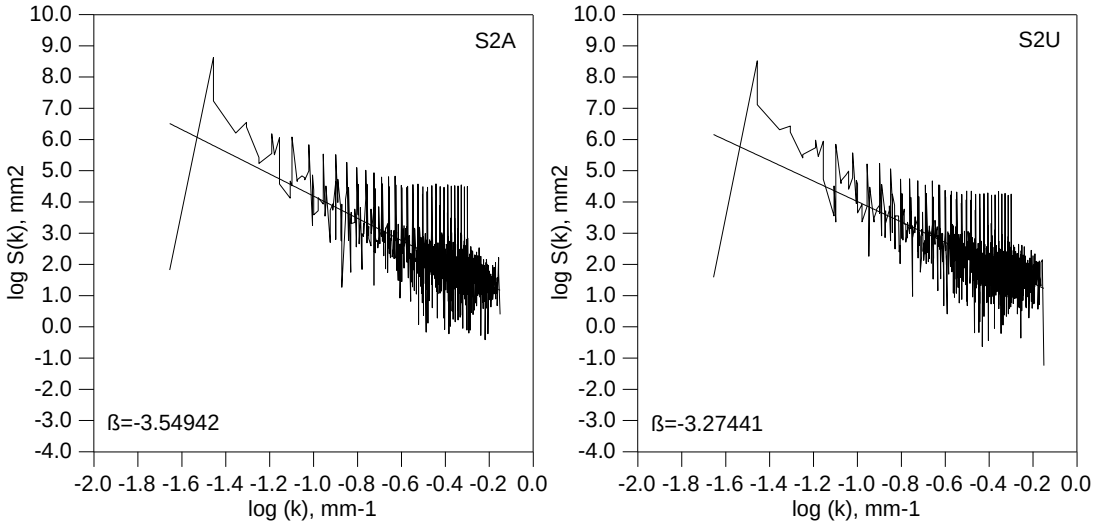
Şekil B.118 : S31 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



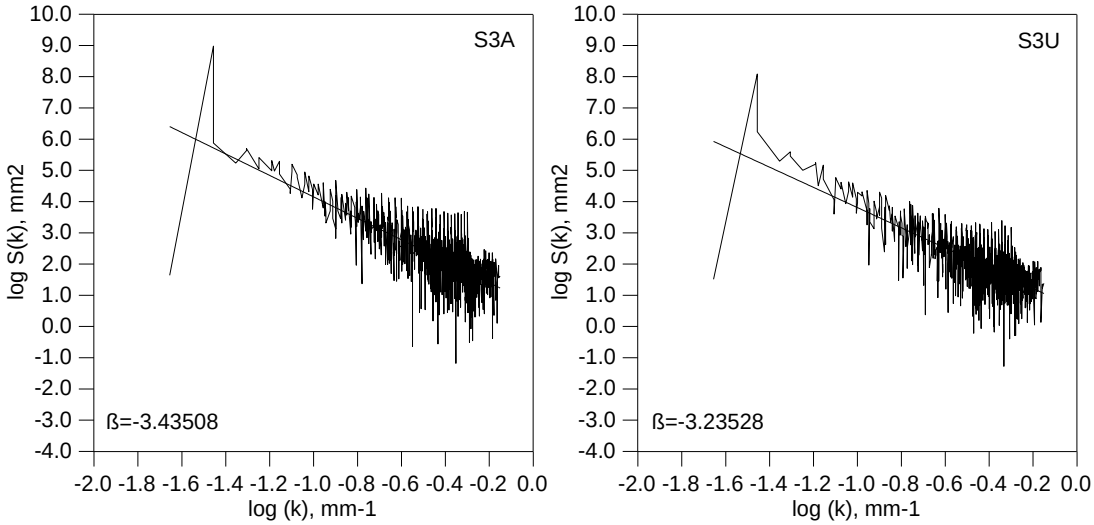
Şekil B. 119: S32 örneği için Mohr-Coulomb yenilme zarfı



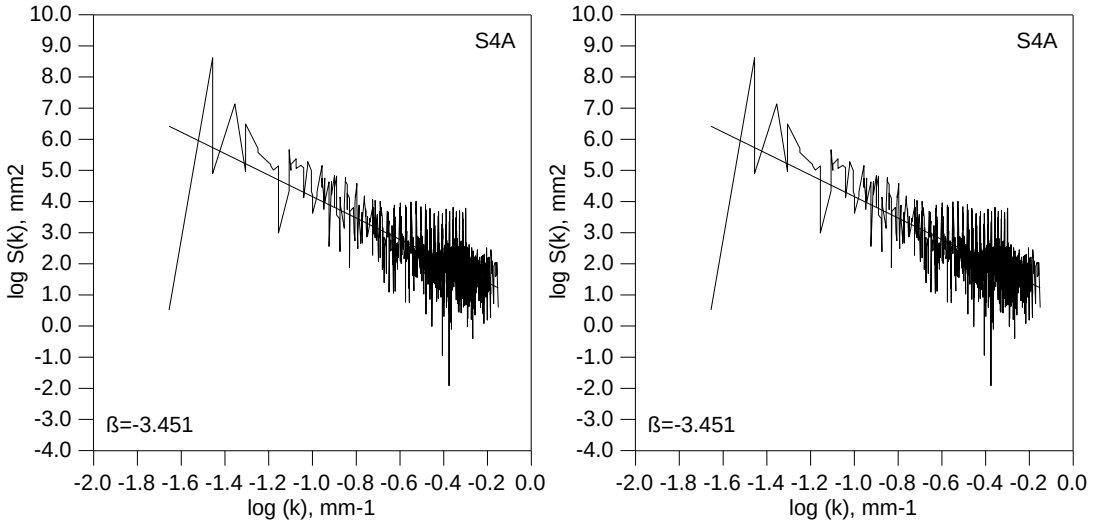
Şekil B.120 : S1 örneği alt (S1A) ve üst (S1U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



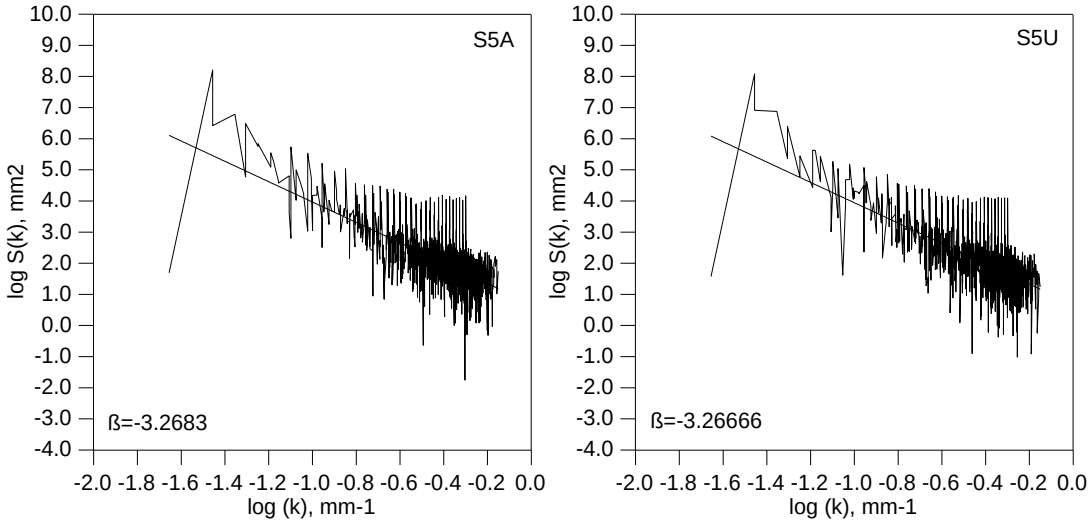
Şekil B.121 : S2 örneği alt (S2A) ve üst (S2U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



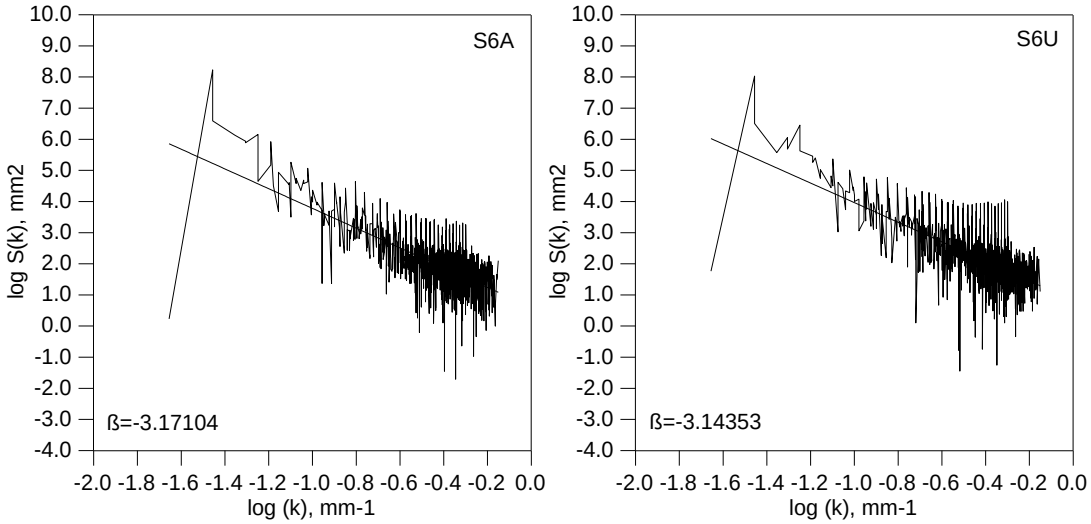
Şekil B.122 : S3 örneği alt (S3A) ve üst (S3U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



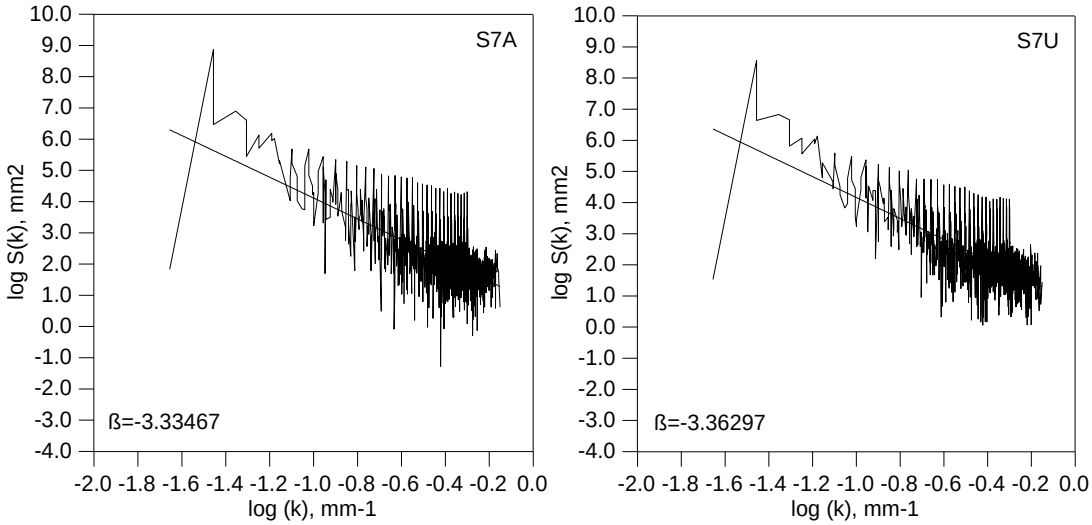
Şekil B.123 : S4 örneği alt (S4A) ve üst (S4U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



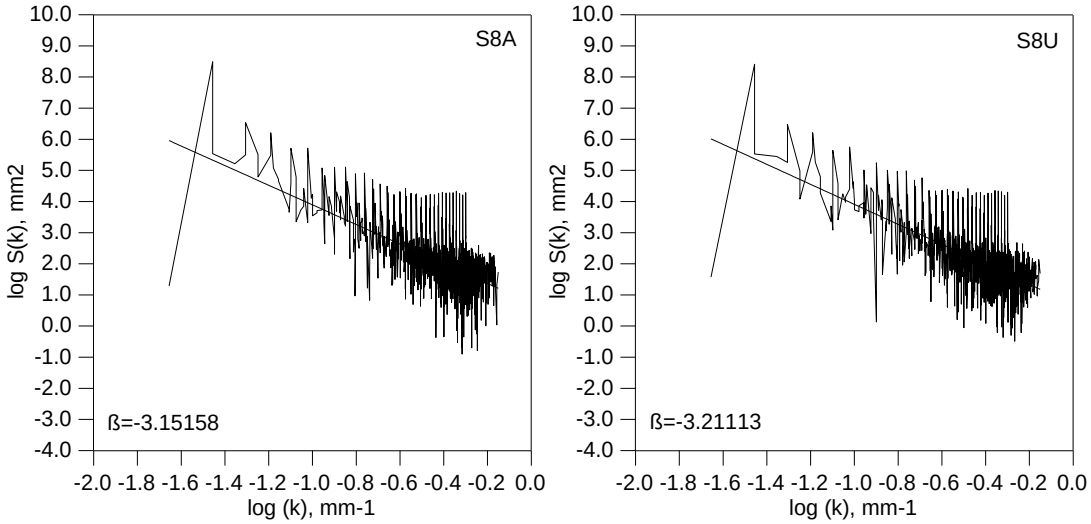
Şekil B.124 : S5 örneği alt (S5A) ve üst (S5U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



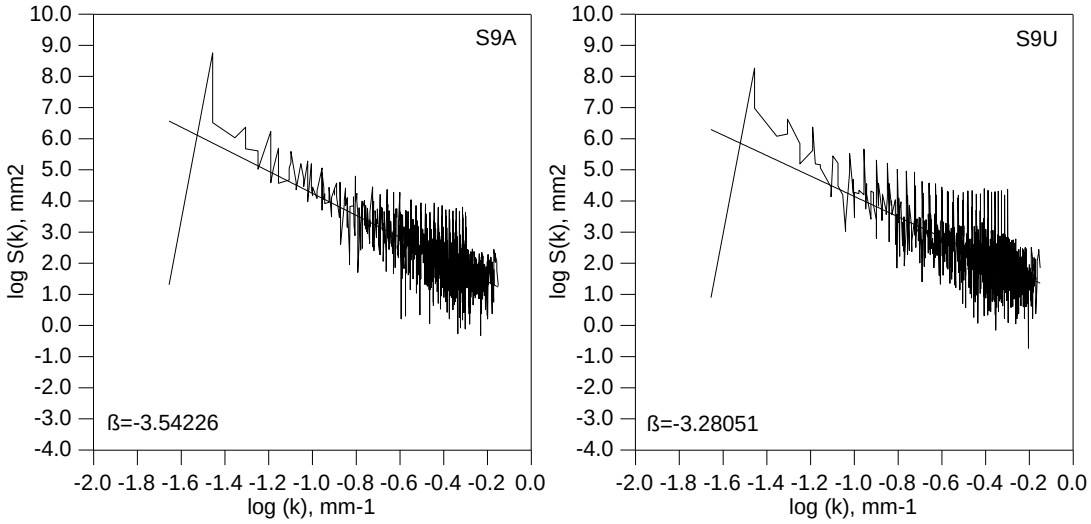
Şekil B.125 : S6 örneği alt (S6A) ve üst (S6U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



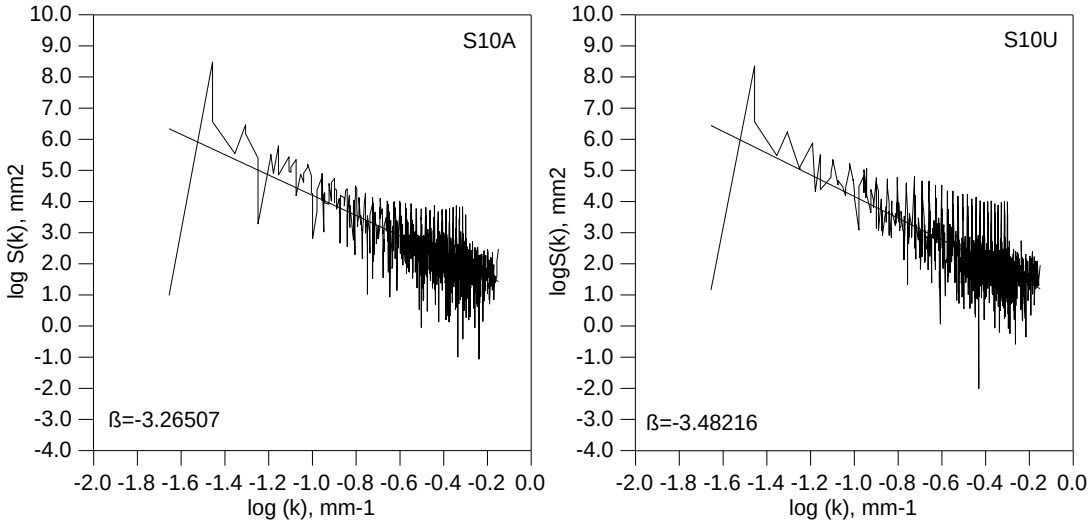
Şekil B.126 : S7 örneği alt (S7A) ve üst (S7U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



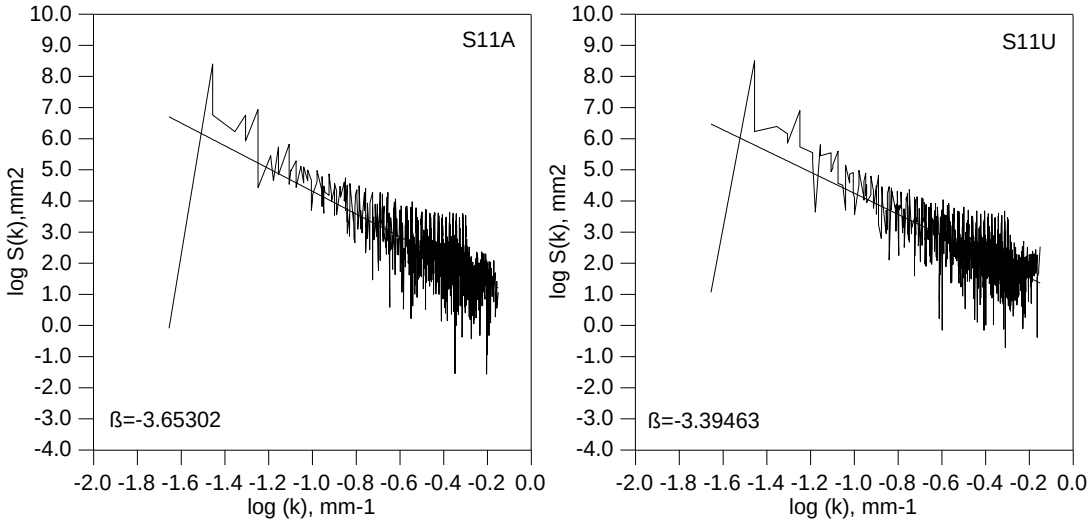
Şekil B.127 : S8 örneği alt (S8A) ve üst (S8U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



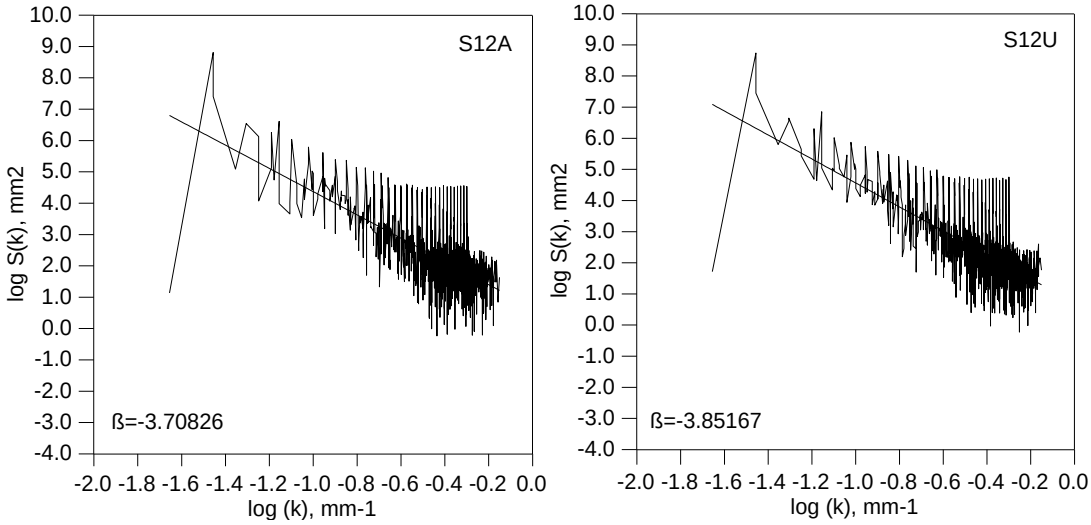
Şekil B.128 : S9 örneği alt (S9A) ve üst (S9U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



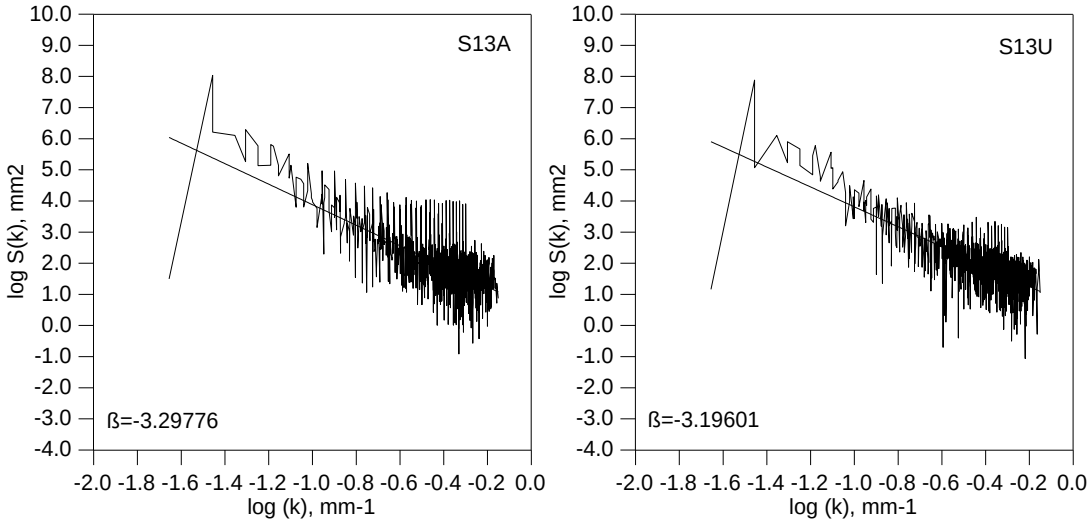
Şekil B.129 : S10 örneği alt (S10A) ve üst (S10U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



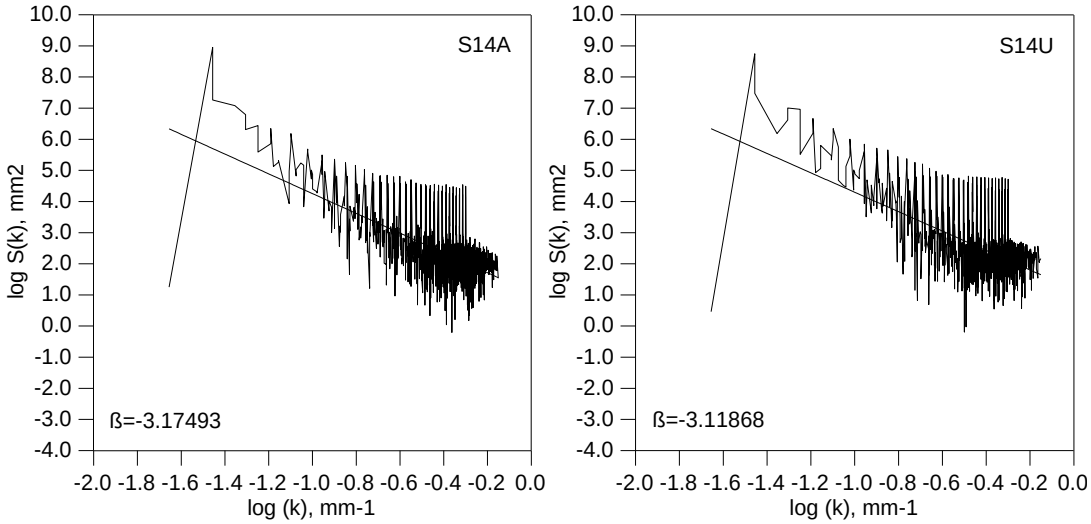
Şekil B.130 : S11 örneği alt (S11A) ve üst (S11U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



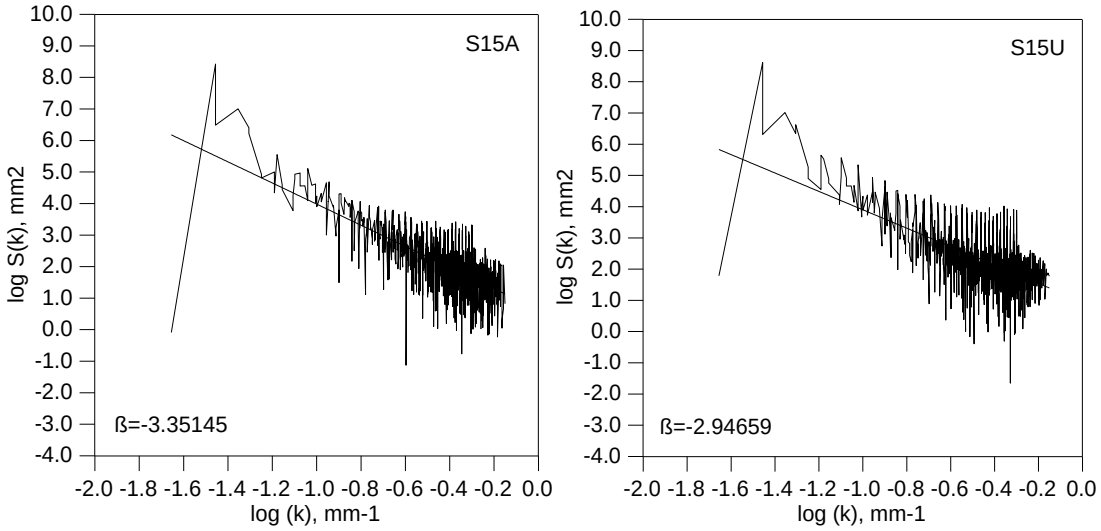
Şekil B.131 : S12 örneği alt (S12A) ve üst (S12U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



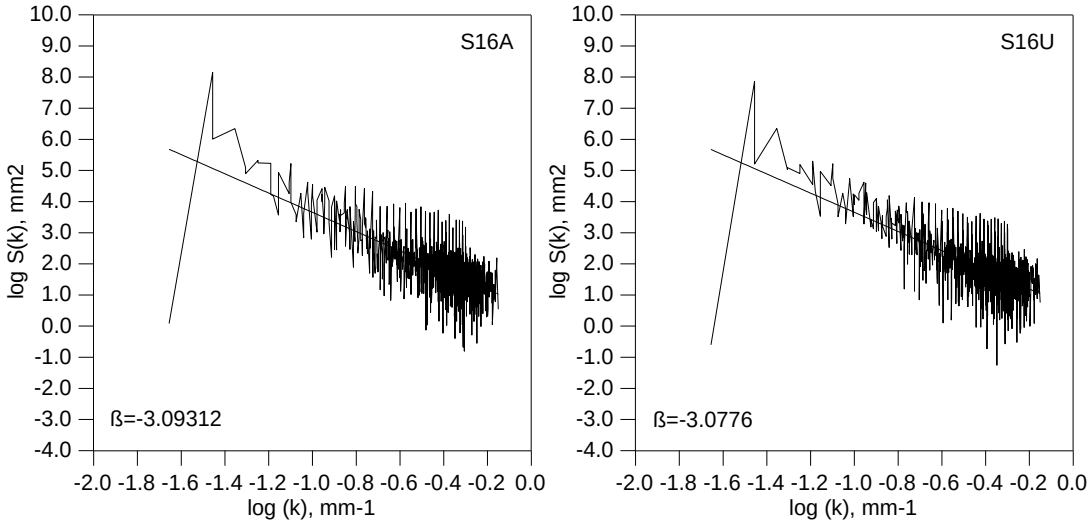
Şekil B.132 : S13 örneği alt (S13A) ve üst (S13U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



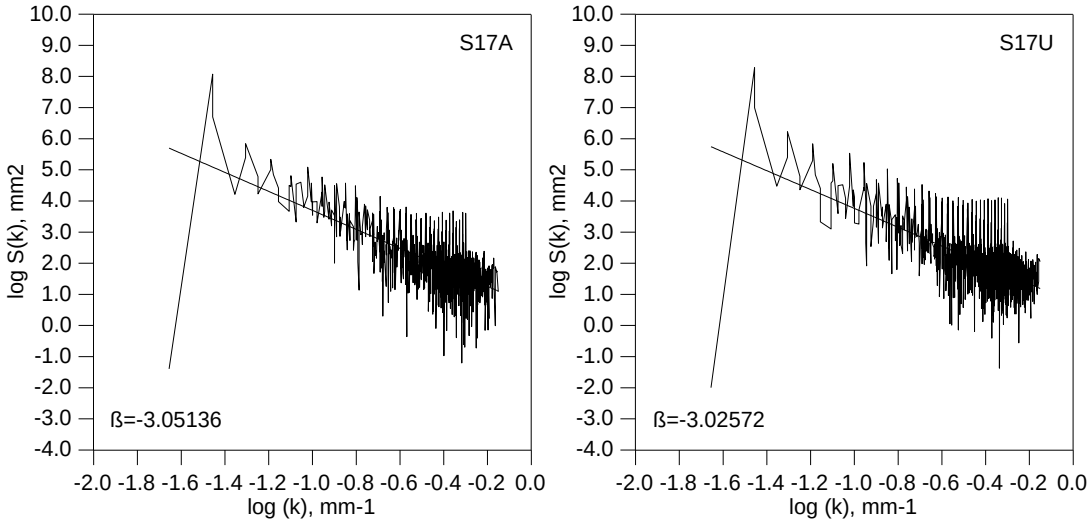
Şekil B.133 : S14 örneği alt (S14A) ve üst (S14U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



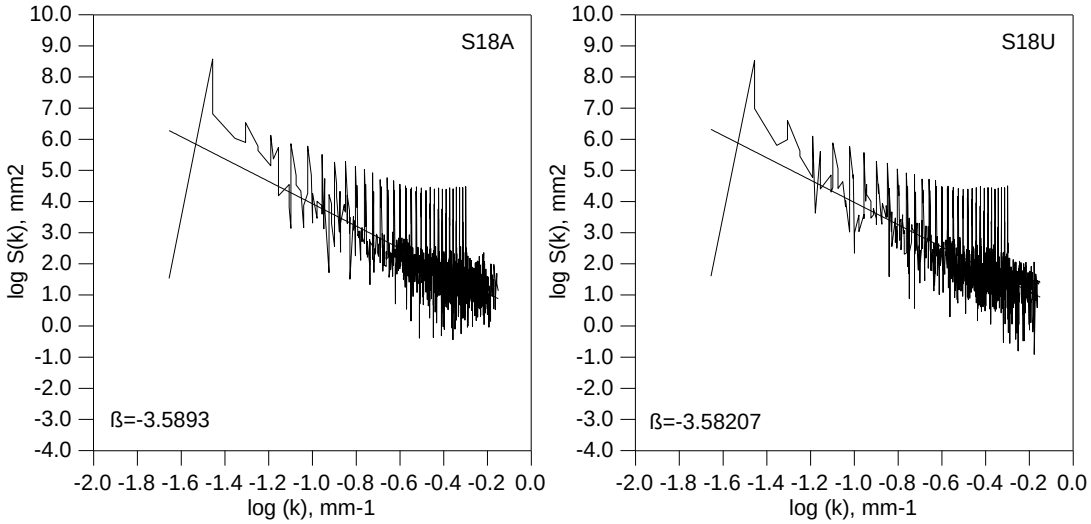
Şekil B.134 : S15 örneği alt (S15A) ve üst (S15U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



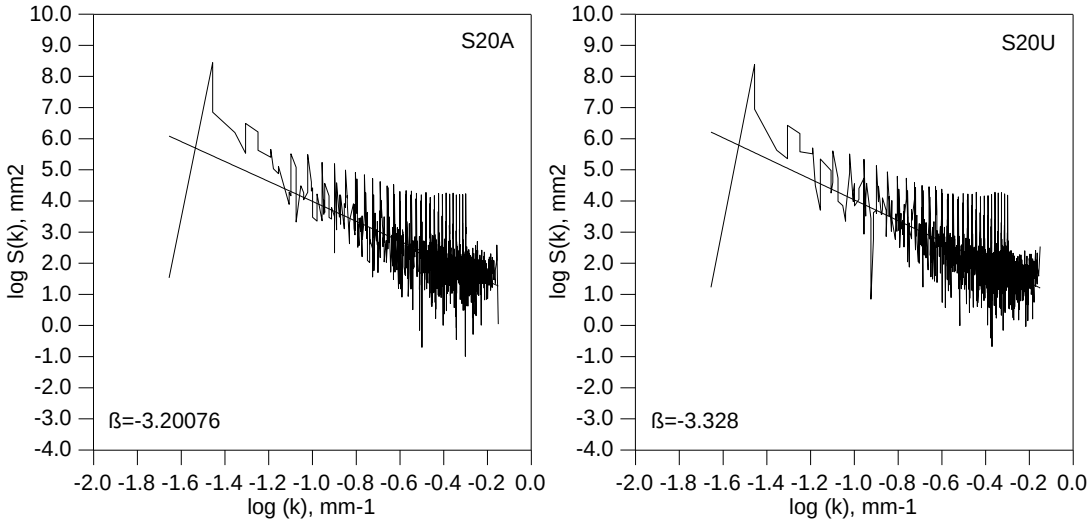
Şekil B.135 : S16 örneği alt (S16A) ve üst (S16U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



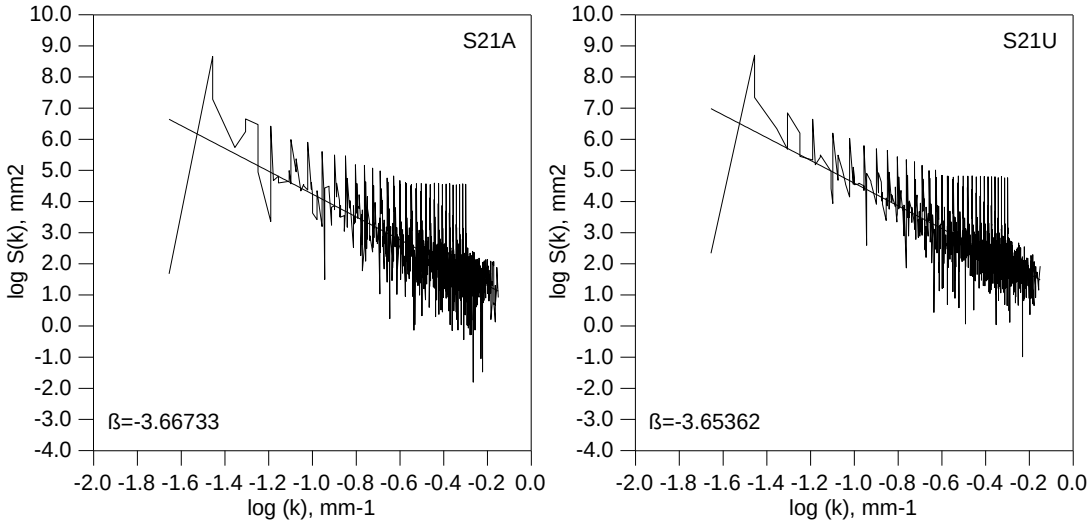
Şekil B.136 : S17 örneği alt (S17A) ve üst (S17U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



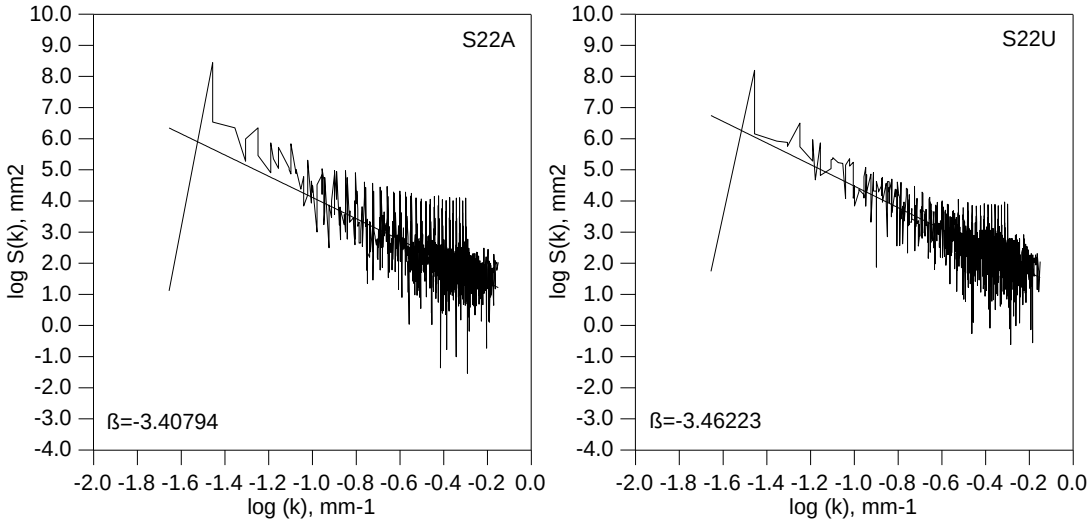
Şekil B.137 : S18 örneği alt (S18A) ve üst (S18U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



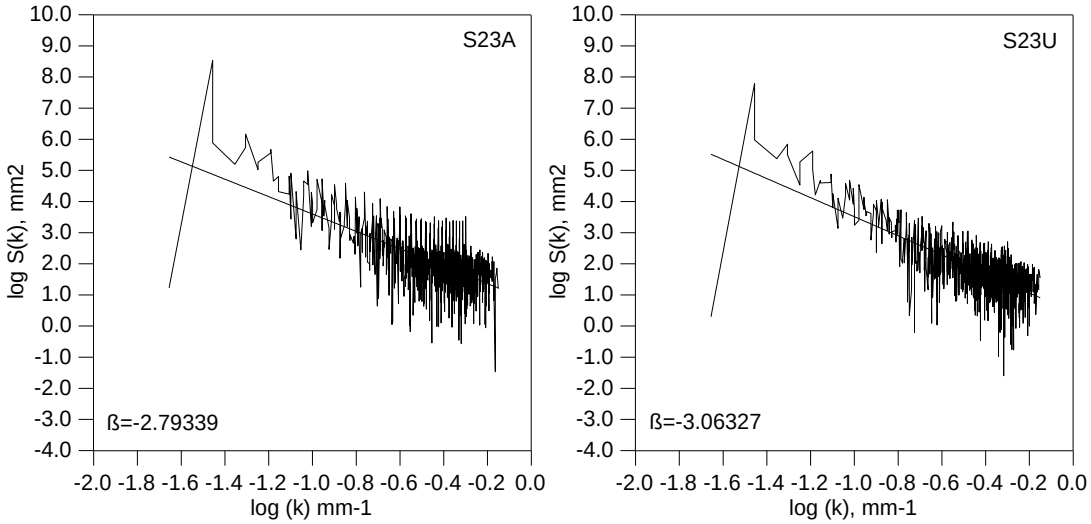
Şekil B. 138 : S20 örneği alt (S20A) ve üst (S20U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



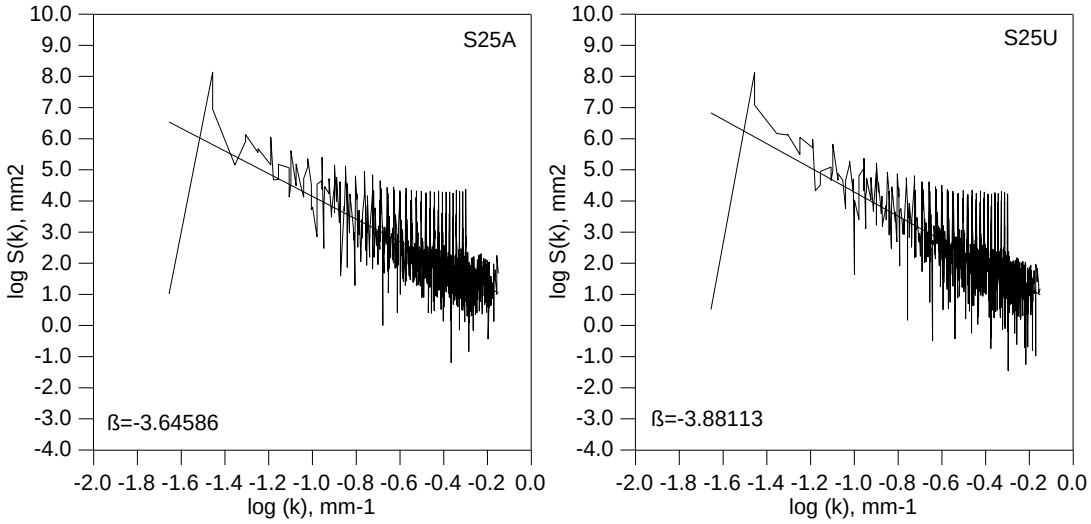
Şekil B. 139 : S21 örneği alt (S21A) ve üst (S21U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



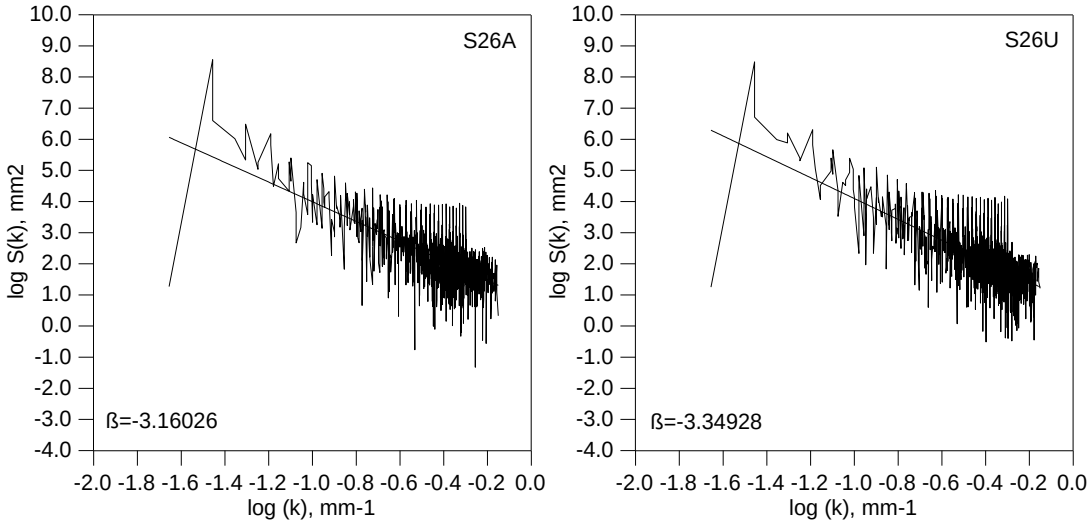
Şekil B.140 : S22 örneği alt (S22A) ve üst (S22U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



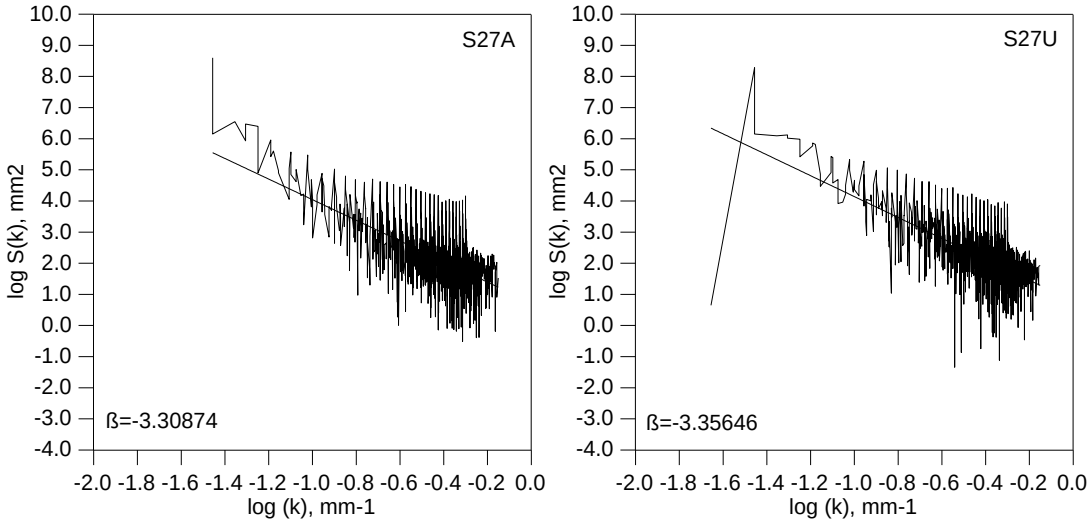
Şekil B.141 : S23 örneği alt (S23A) ve üst (S23U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



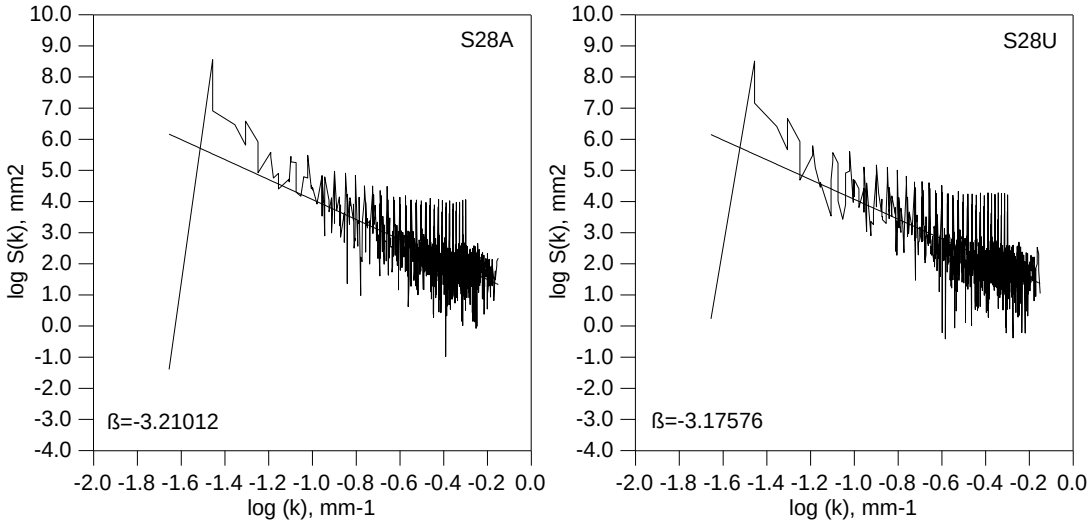
Şekil B.142 : S25 örneği alt (S25A) ve üst (S25U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



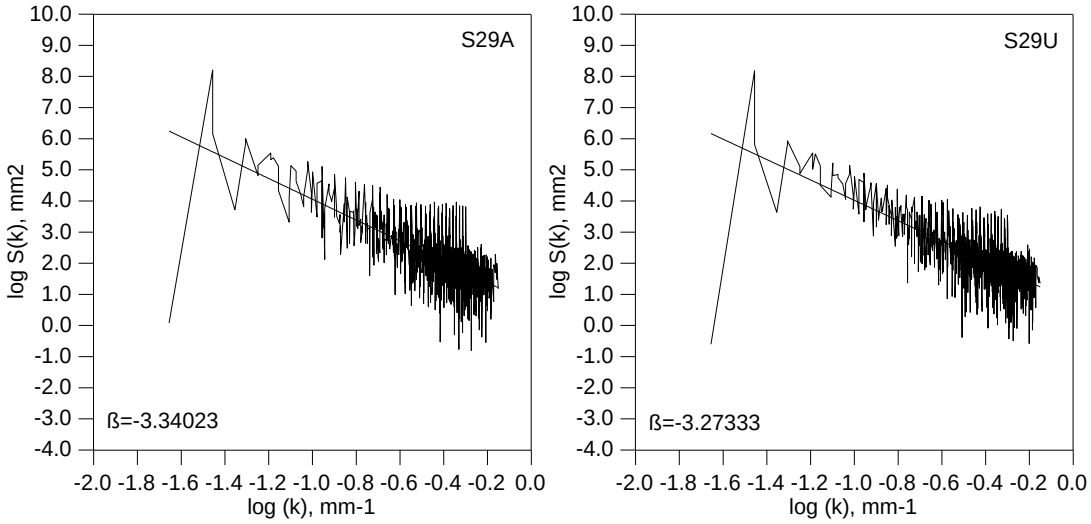
Şekil B.143 : S26 örneği alt (S26A) ve üst (S26U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



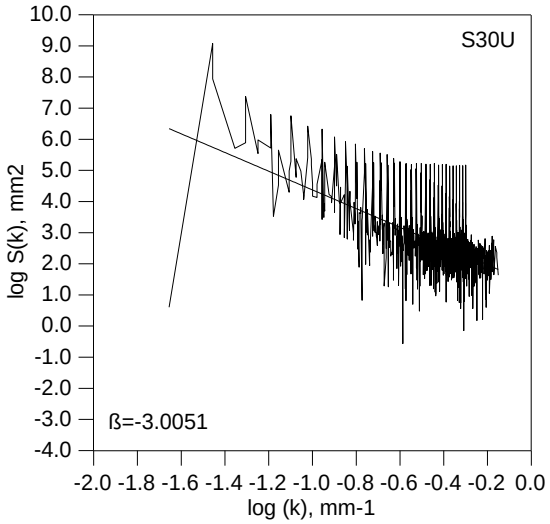
Şekil B.144 : S27 örneği alt (S27A) ve üst (S27U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



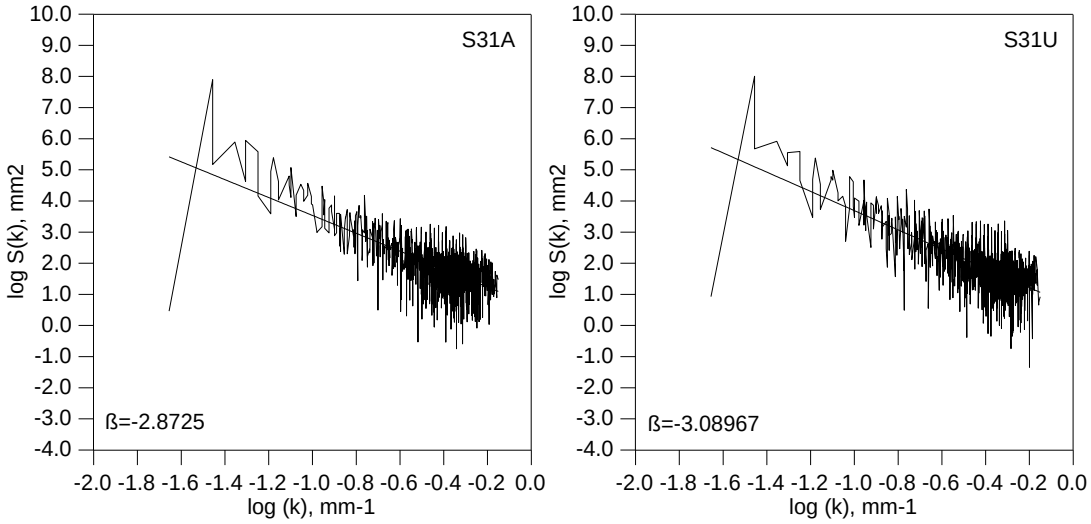
Şekil B.145 : S28 örneği alt (S28A) ve üst (S28U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



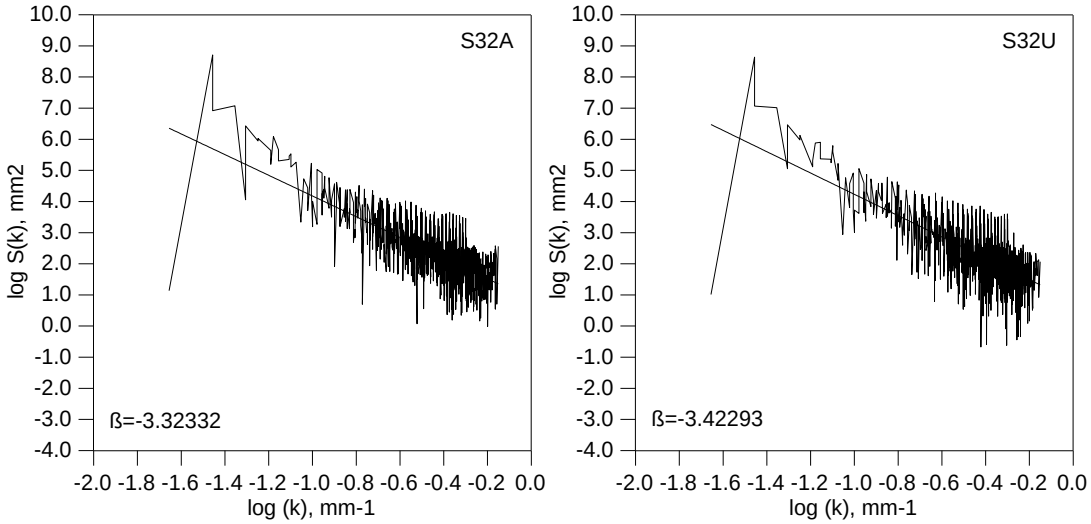
Şekil B.146 : S29 örneği alt (S29A) ve üst (S29U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları



Şekil B.147 : S30 örneği üst (S30U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları

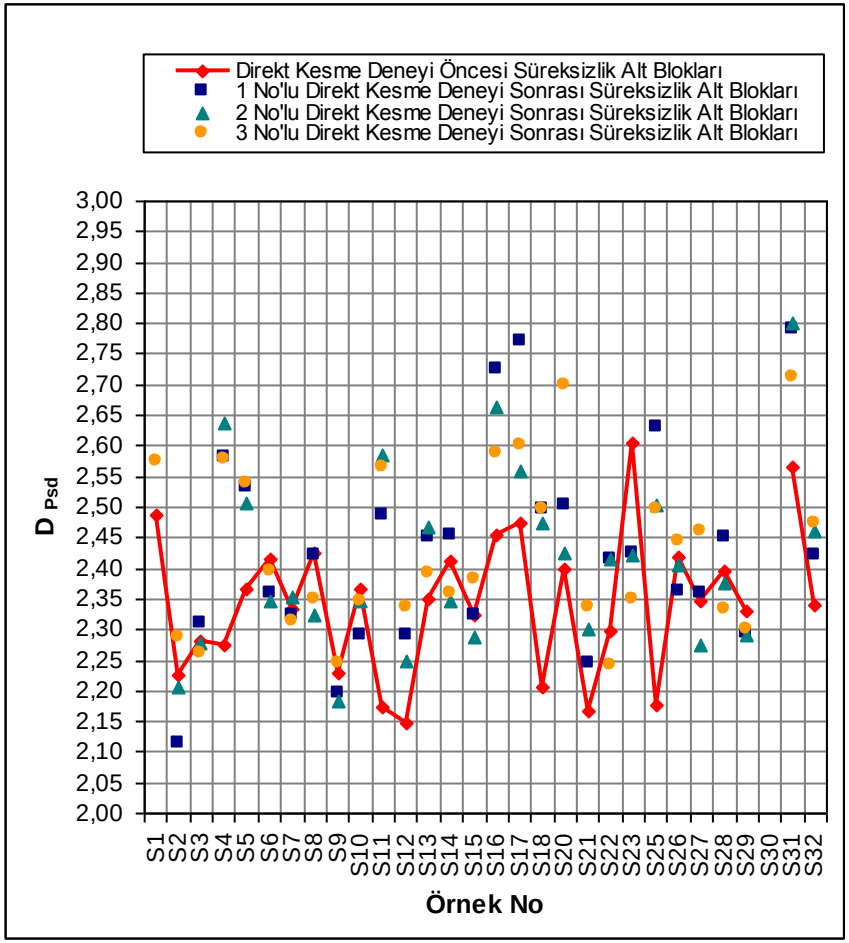


Şekil B.148 : S31 örneği alt (S31A) ve üst (S31U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları

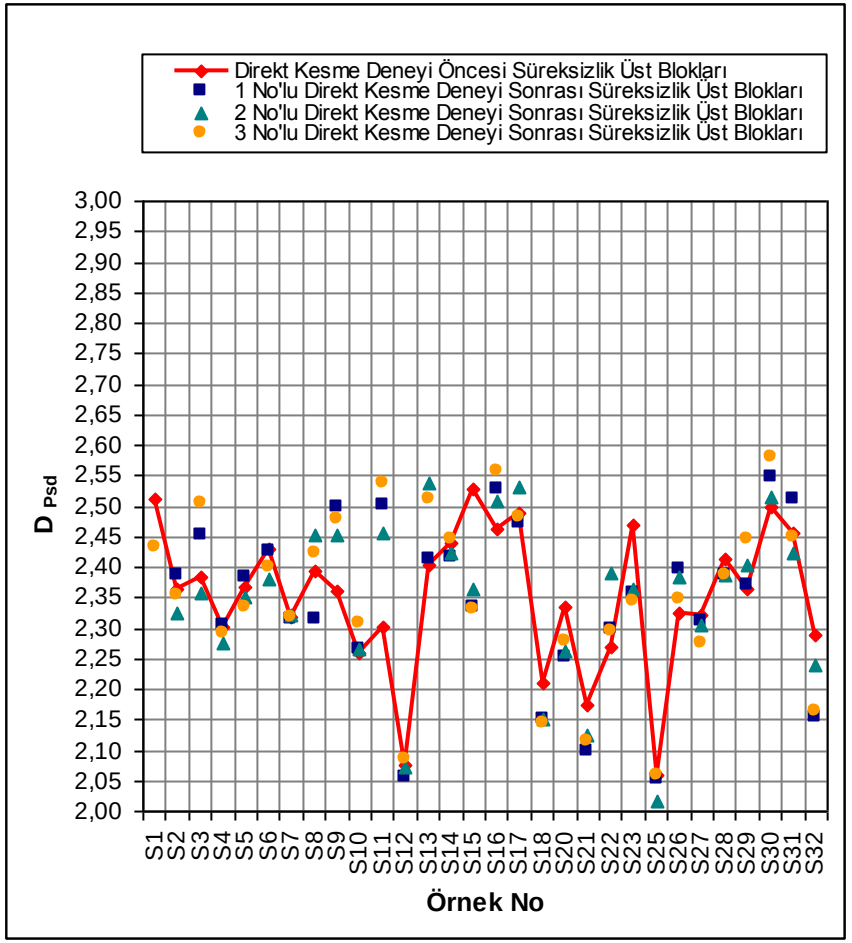


Şekil B.149 : S32 örneği alt (S32A) ve üst (S32U) blokları için güç spektrumu [log S(k) – log (k)] diyagramları

a)

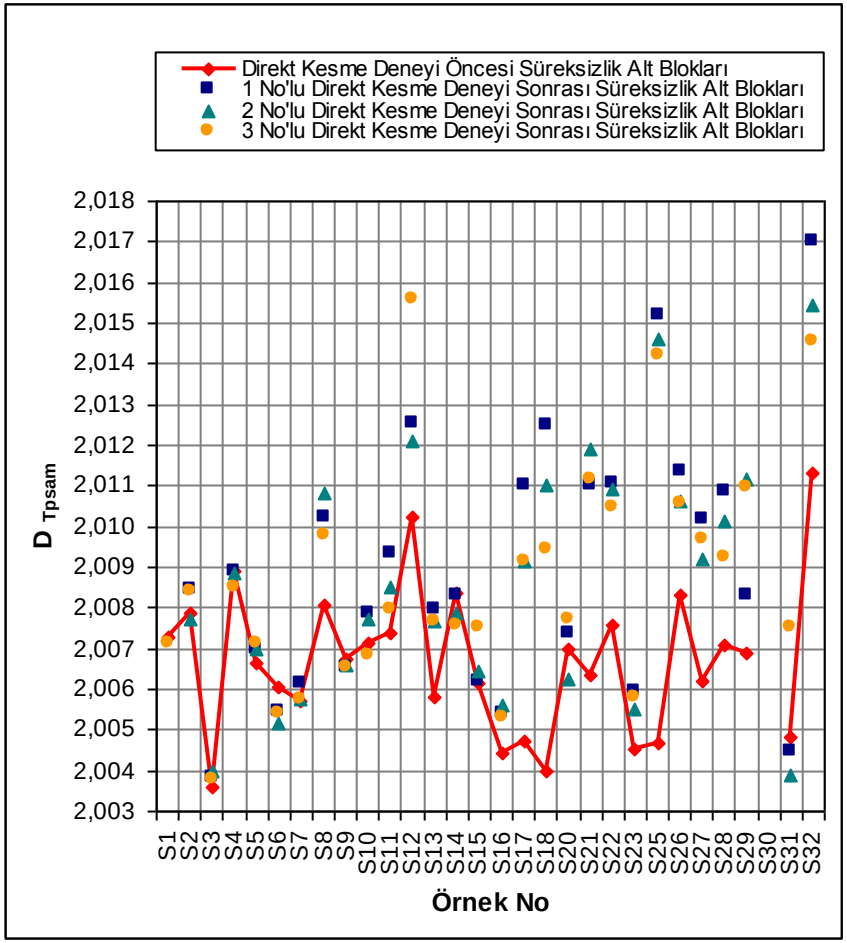


b)

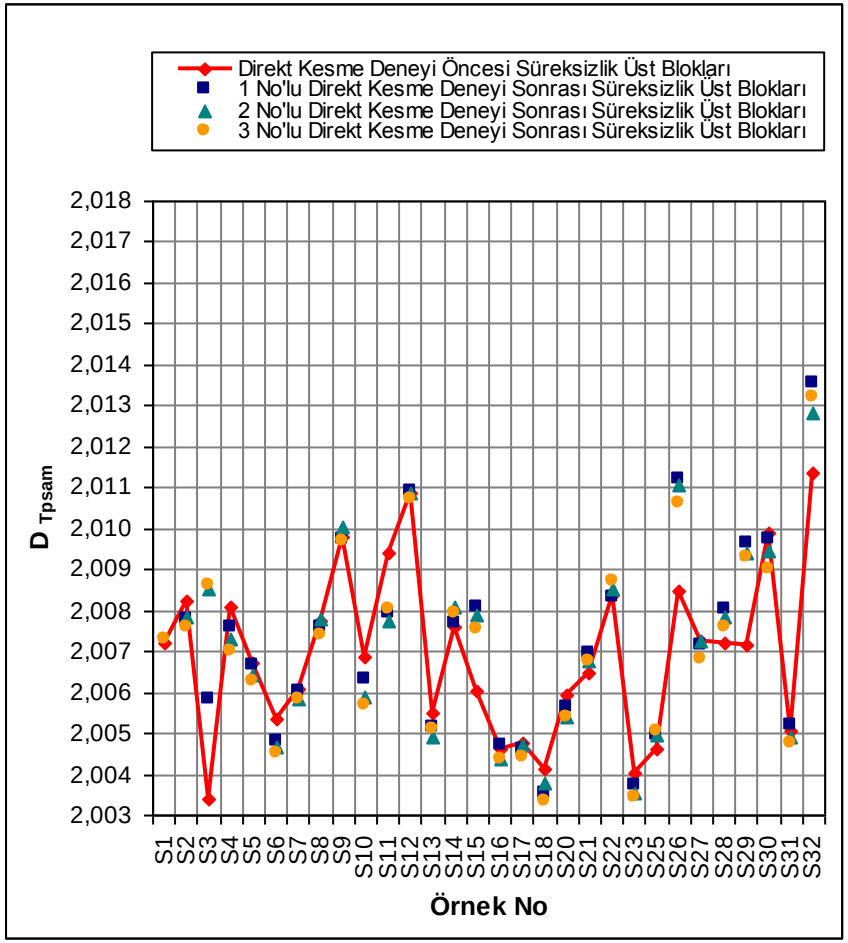


Şekil B.150 : Güç spektrum yoğunluğu analizi yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut değerlerinin (D_{psd}) kesilme ile değişimi
a) süreksizlik alt blokları için b) süreksizlik üst blokları için

a)

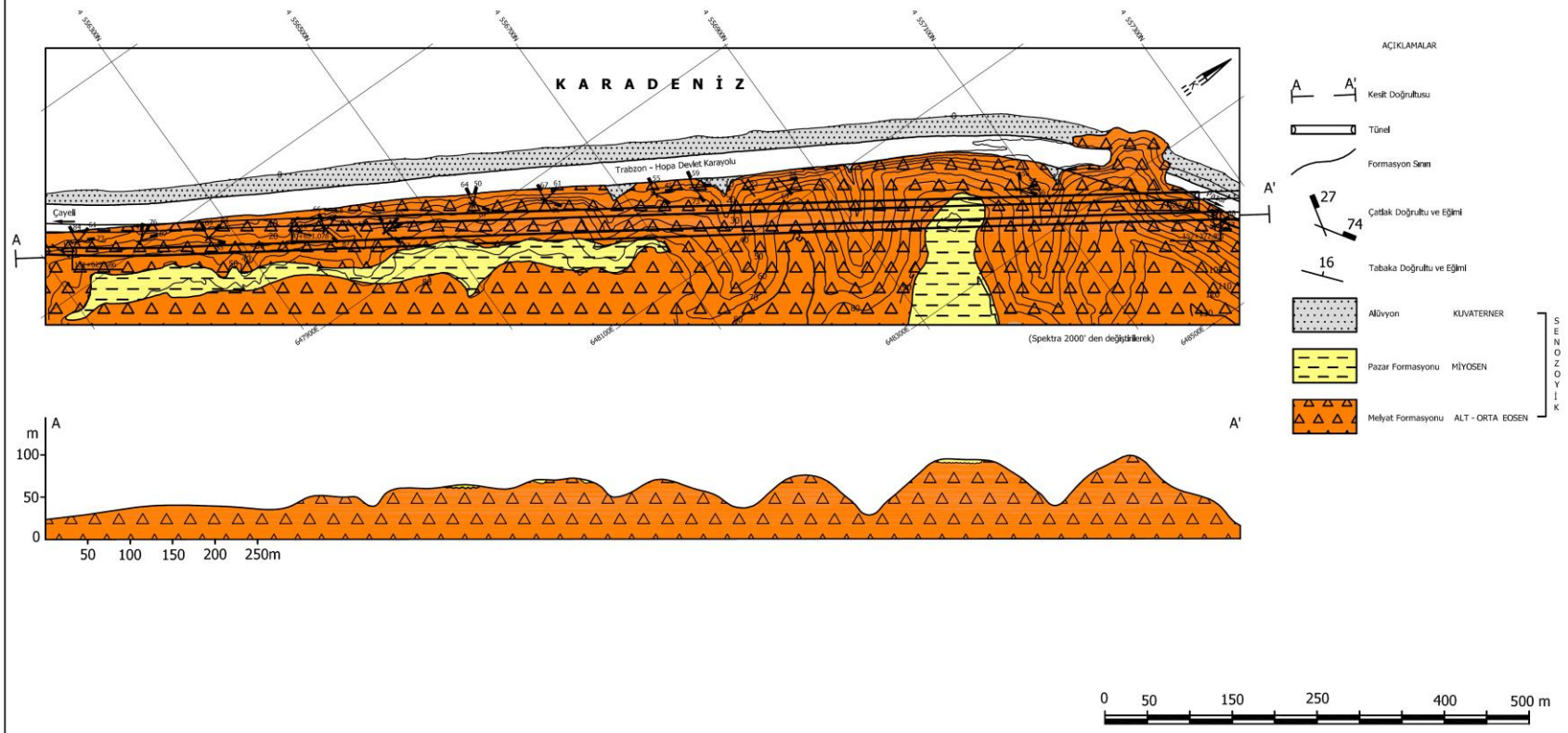


b)



Şekil B. 151 : Üçgen prizma yüzey alanı yöntemiyle hesaplanan fraktal boyut değerlerinin (D_{tpsam}) kesilme ile değişimi

a) süreksizlik alt blokları için b) süreksizlik üst blokları için



ÇAYELİ TÜNELİ KAZI SAHASI JEOLOJİK HARİTASI ve KESİTİ

YAPAN	Kayhan DEVELİ	Şekil B.152
TARİH	2005	
ÖLÇEK	1 / 5000	

İ.T.Ü Maden Fakültesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı

ÖZGEÇMİŞ

Kayhan DEVELİ, 1970 yılında Gaziantep'de doğdu. Lise öğrenimini Gaziantep Lisesinde tamamladıktan sonra 1988 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başlayıp, Haziran 1992'de buradan dereceye girerek mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans öğrenimini yapmaya hak kazanarak bir yıl süreyle ingilizce hazırlık okudu ve Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Mühendislik Jeolojisi Programında Ekim 1993' de yüksek lisans öğrenimine başladı. Şubat 1996 tarihinde, Sayın Prof. Dr. Mahir VARDAR tarafından yönetilen "Harşit Vadisi Kürtün Barajı Aks Yeri Kayaçlarında Çatlak Yüzeylerindeki Pürüzlülüğün Sayısal Tanımı" konulu tez çalışması ile yüksek lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Mühendislik Jeolojisi Programında Sayın Prof. Dr Mahir VARDAR' ın danışmanlığında doktora öğrenimine başladı. Ekim 1994 - Ocak 1996 tarihleri arasında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak 1 yıl görev yapan Kayhan DEVELİ, Ocak 1996 – Kasım 1999 tarihleri arasında İ.T.Ü. Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır.