İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OBJE YÜZEYLERİNİN BELİRLENMESİNDE LAZER TARAYICILARIN KULLANIM OLANAKLARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emin Erbil YAZICILAR

Anabilim Dalı : Geomatik Mühendisliği

Programı : Geomatik Mühendisliği

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OBJE YÜZEYLERİNİN BELİRLENMESİNDE LAZER TARAYICILARIN KULLANIM OLANAKLARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emin Erbil YAZICILAR
(501081605)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 6 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih: 9 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Dursun Zafer ŞEKER (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Şinasi KAYA (İTÜ)
Prof. Dr. Cem GAZİOĞLU (İÜ)

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda gerçekleştirmiş olduğum bu çalışmada, yüzeylerin pürüzlülük açılarının yersel lazer tarama tekniği kullanılarak yüksek doğrulukta ölçülmesi ve değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Yüksek lisans eğitimimde çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu yardımlardan ve değerli tavsiyelerinden dolayı tez yürütücülüğümü üstlenen Sayın Prof. Dr. Dursun Zafer ŞEKER'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca, tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Emin Özgür AVŞAR ve Araş. Gör. Umut AYDAR'a teşekkür ederim. Bu çalışmada, hayatım boyunca benden hiçbir şekilde emeğini esirgemeyen YAZICILAR ailesine teşekkür ederim.

Mayıs 2011

Emin Erbil YAZICILAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ... **iii**
İÇİNDEKİLER ... **v**
KISALTMALAR ... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ... **xi**
ÖZET ... **xiii**
SUMMARY ... **xv**
1. GİRİŞ ... **1**
2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ve ÖLÇME YÖNTEMLERİ ... **3**
2.1 Pürüzlülük Üzerine Yapılmış Tanımlamalar ... 15
2.1.1 Nitel tanımlamalar ... 15
2.1.2 Nicel tanımlamalar ... 21
2.2 Yüzey Pürüzlülüğünün Kesme Dayanımı Üzerine Yapılmış Çalışmalar ... 24
2.3 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçme Yöntemleri ... 34
2.3.1 Dokunma yöntemi ... 34
2.3.2 Yüzey dinamometresi yöntemi ... 34
2.3.3 Karşılaştırma mikroskobu yöntemi ... 34
2.3.4 Optik yansıtma yöntemi ... 35
2.3.5 İzleyici uçlu (stylus) cihazlar yöntemi ... 35
2.3.6 Işık yansıması (interferometri) yöntemi ... 36
2.3.7 Fotoğraf yöntemi ... 37
3. 3B LAZER TARAMA ... **41**
3.1 Lazer Tarama Teknolojisi ... 41
3.2. Yersel Lazer Tarayıcılar ... 43
3.2.1 Yersel lazer tarayıcı bileşenleri ... 44
3.2.1.1 Lazer telemetresi ... 45
3.2.1.2 Lazer ışını saptırma ünitesi ... 47
3.2.2 Yersel lazer tarayıcı ölçme prensipleri ... 47
3.2.3 Yersel lazer tarayıcıların çalışma ilkesi ... 50
3.2.3.1 Bir lazer ışınının geliş gidiş zamanıyla işlem yapanlar ... 50
3.2.3.2 Faz karşılaştırma metoduyla işlem yapanlar ... 50
3.2.3.3 Triangulasyon metoduyla işlem yapanlar ... 51
3.3 Lazer Tarayıcıların Doğruluğu ... 52
3.4 Lazer Tarayıcıların Kullanım Alanları ... 54
4. UYGULAMA ... **59**
4.1 Genel Bilgiler ... 59
4.2 Ölçme ve Modelleme ... 61
4.3 Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi ... 64
5. SONUÇ VE ÖNERİLER ... **73**
KAYNAKLAR ... **75**
ÖZGEÇMİŞ ... **79**

KISALTMALAR

AGC : Automatic Gain Control
CCD : Charce Coupled Device
CFD : Constant Fraction Discriminator
DOD : Description of Discontinuities
ISRM : International Society for Rock Mechanics
JCS : Joint Compressive Strenght
JMC : Joint Matching Coefficient
JRC : Joint Roughness Coefficient
SEM : Scanning Electron Microscope
TDC : Time to Digital Converter
TIN : Triangulated Irregular Network
TLS : Terrestrial Laser Scannig

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Süreksizlik yüzeyi nitel tanımlaması [11].....16
Çizelge 2.2 : Süreksizlik yüzeyi nitel tanımlaması [4].....20
Çizelge 2.3 : Standart profiller için JRC, ortalama pürüzlülük açıcı (i), fraktal boyut (D) ilişkileri [6].....23
Çizelge 2.4 : JRC değer aralıkları için hesaplanan fraktal boyutlar [7]. 23
Çizelge 2.5 : Yüzey pürüzlülük ölçme yöntemleri ve özellikleri. 39
Çizelge 3.1 : Bazı lazer tarayıcılar ve teknik özellikleri.....44
Çizelge 4.1 : Kesit 1-A ve nokta sayıları. 64
Çizelge 4.2 : Kesit 1-B ve nokta sayıları. 64
Çizelge 4.3 : Yüzey 1-A üzerinde belirlenen kırılma açıları özet tablosu. 69
Çizelge 4.4 : Yüzey 1-B üzerinde belirlenen kırılma açıları özet tablosu. 70
Çizelge 4.5 : JRC standartları. 70
Çizelge 4.6 : DOD standartları. 71

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Eş derinlik ölçüm mikroskobu [12]. 4
Şekil 2.2 : Profilograf [12]. 5
Şekil 2.3 : Süreksizlik yüzey profillerinin arazide jeolog pusulası ve farklı çaplı diskler kullanılarak ölçülmesi [12]. 6
Şekil 2.4 : Profilograf aletinin çalışma prensibi[7]. 8
Şekil 2.5 : Çatlak yüzey profilinin mekanik ölçümü [20]. 9
Şekil 2.6 : Yüzey pürüzlülük tarayıcısı [22]. 10
Şekil 2.7 : Lazer ile süreksizlik düzlemi yüzey geometrisinin ölçülmesi [23]. 11
Şekil 2.8 : Profilograf [14]. 12
Şekil 2.9 : Süreksizlik yüzeyi alansal tarama cihazı [22]. 13
Şekil 2.10 : Birinci ve ikinci dereceden yüzey düzensizlikleri [2] 15
Şekil 2.11 : Değişik boyutlu yüklemlerde yüzey geometrileri [10]. 16
Şekil 2.12 : a) Farklı çaplardaki diskler için net üzerindeki en büyük dağılımları ...18
: b) Pusula ve profilograf metotlarında örnekleme aralığına bağlı en büyük eğim değerlerindeki değişim [12] 18
Şekil 2.13 : Standart pürüzlülük profilleri ve JRC değerleri [3]. 19
Şekil 2.14 : Tipik pürüzlülük yüzey profilleri [4]. 20
Şekil 2.15 : Profilin sayısallaştırılması [5]. 21
Şekil 2.16 : Barton ve Choubey tarafından önerilen profillerin JRC değerleri ile hesaplanmış Z_2 değerleri ilişkisi [5]. 22
Şekil 2.17 : İdeal testere dişli modeller için yenileme zarfları [2] 24
: a) Farklı pürüz eğim açılarına sahip modeller 24
: b) Aynı eğim açısı, farklı pürüz sayılarına sahip modeller. 24
Şeklil 2.18 : Testere dişli modeller için deney örneğinin dilatasyonu ve pürüzlülüğünün kesilme aşamaları için kuramsal Mohr zarfı [2]. 25
Şeklil 2.19 : Testere dişli modeller için dilatasyon ve kesilme olaylarının şematik sunumu [28]. 26
Şekil 2.20 : Doğal süreksizliklerde yüzeyler arasındaki değme alanları [26]. 27
Şekil 2.21 : Platton'a ait testere dişli pürüzlülük modeli [2]. 29
Şekil 2.22 : Pürüzlülük görüntüleri ve eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) [3]. 30
Şekil 2.23 : ISRM 1978'e göre farklı ölçeklerde gözlenen pürüzlülükler [4] 31
Şekil 2.24 : ISRM 1981'e göre pürüzlülük görüntüleri ve kesme dayanımı [30]. 31
Şekil 2.25 : Pürüzlü yüzeylerde birinci ve ikinci derece düzensizliklerdeki i açısına ait yaklaşık değerler [2] 33
Şekil 2.26 : İzleyici uç prensibi. 36
Şekil 2.27 : İzleyici uçtan kaynaklanan ölçme hatası. 36
Şekil 2.28 : Işık yansıtma yöntemiyle ölçme prensibi 37
Şekil 3.1 : Trimble GS 101 yersel lazer tarama sistemi. 45
Şekil 3.2 : Tipik atımlı lazer telemetrenin blok düzeneği. 45
Şekil 3.3 : Yersel lazer tarayıcı ölçüleri, tarayıcı koordinat sistemi ve yer koordinat sistemi. 48

Sayfa

Şekil 3.4 : Lazer tarayıcıdan elde edilen 3B renkli nokta bulutu görüntüsü. 49
Şekil 3.5 : Aynı objenin iki farklı noktadan bindirmeli olarak taranmış nokta bulutları..... 49
Şekil 3.6 : Uçuş zamanı prensibi. 50
Şekil 3.7 : Triangulasyon prensibi : tek kamera çözümü 51
Şekil 3.8 : Triangulasyon prensibi : iki kamera çözümü..... 52
Şekil 3.9 : Farklı lazer türleri için mesafe ölçüm doğruluğu değerleri [43]..... 53
Şekil 3.10 : Mimari ve bina ölçme uygulama örnekleri..... 54
Şekil 3.11 : Ulaşım ve altyapı örnekleri..... 55
Şekil 3.12 : Kıyı uygulama örnekleri 56
Şekil 3.13 : Kültürel mirasın korunması ve arkeolojik uygulama örnekleri 57
Şekil 4.1 : Triangulasyon yöntemi [45]..... 60
Şekil 4.2 : Triangulasyon yöntemi tekniğinin şematik gösterimi. 60
Şekil 4.3 : Nextengine 3B masaüstü tarayıcı. 61
Şekil 4.4 : 3B model..... 62
Şekil 4.5 : Kesitlerin alınması işlemi. 63
Şekil 4.6 : Kesitlerin CAD ortamında gösterimi. 63
Şekil 4.7 : Matlab yazılımında şekil koruyan eğrilerin geçirilmesi..... 65
Şekil 4.8 : Kesitler üzerinde 0.001 mm aralıklarla türevlerin alınması 65
Şekil 4.9 : Kesit grafiği. 66
Şekil 4.10 : Kesit-eğim grafiği. 66
Şekil 4.11 : Kesit-"*i*" kırılma açısı grafiği. 66
Şekil 4.12 : Kesit ve kesit-"i" kırılma açısı grafikleri. 68
Şekil 4.13 : Yüzey 1-A'nın 12. kesiti ile yüzey 1-B'nin 12. kesitinin karşılaştırılması 68
Şekil 4.14 : Yüzey 1-A'nın 17. kesiti ile yüzey 1-B'nin 17. kesitinin karşılaştırılması 69
Şekil 4.15 : Kesit 1'in standart kesitlerle ilişkisi. 71

OBJE YÜZEYLERİNİN BELİRLENMESİNDE LAZER TARAYICILARIN KULLANIM OLANAKLARI

ÖZET

Yüzey pürüzlülüğünün, kaya kütlelerinin duyarlılığı, bozunma özellikleri ve geçirgenliği gibi mühendislik davranışları üzerinde önemli bir etkisinin olduğu bilinmektedir. Bu etkilerin derecesi ise yüzey pürüzlülüğünün geometrik özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, yüzey pürüzlülüklerinin geometrik özelliklerinin en uygun şekilde tanımlanması gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğü konusunda günümüze kadar yapılmış olan birçok çalışmada; pürüzlülüğün, makaslama dayanımı, kabarma ve sürtünme gibi parametreler üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla, teknolojideki gelişmelere paralel olarak değişik ölçüm teknikleri ve değerlendirme yöntemleri kullanılmıştır. Bilim ve teknolojideki gelişmeler, ölçme tekniklerindeki gelişmeleri de beraberinde getirmektedir. Ölçme alanında geliştirilen en son tekniklerden birisi de lazer tarama tekniğidir. Diğer ölçme yöntemleriyle kıyaslandığında, lazer tarayıcılarla, ölçülen alanın 3 boyutlu nokta verileri çok kısa sürede ve istenilen sıklıkta elde edilebilmektedir. Yersel lazer tarayıcılar 3 boyutlu obje geometrisini, doğrudan, hızlı ve detaylı elde etmeye olanak veren nitelikte ölçme donanımlarıdır. Lazer teknolojisinde nesne, yansıma yoğunluğu verisi içeren 3 boyutlu nokta verisi olarak elde edilmektedir. Nokta bulutlarının kaydedilmesi, birleştirilmesi, inceltilmesi, nokta boşluklarının doldurulması, filtrelenmesi ile nesnelerin 3 boyutlu modelleri oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu modeller üzerinden, mühendislik uygulamaları için gerekli her türlü veriye ulaşılabilmektedir. Yersel lazer tarama yönteminin sağlamış olduğu en önemli avantaj, özellikle karmaşık geometrideki objelerin ve yüzeylerin diğer ölçme yöntemlerine kıyasla çok kısa sürede ve yüksek detay zenginliğinde 3 boyutlu olarak elde edilebilmesidir. Bu çalışmada da, numune yüzeyleri lazer tarama tekniği kullanılarak modellenmiş ve yüzeylerin 3 boyutlu sayısal haritası çıkarılmıştır. Taş parçalarının kırılma deneyi sonunda yüzeylerinde oluşan pürüzlülüğün ölçülmesi ve matematiksel olarak ifade edilmesi hedeflenmiştir. Kırılma deneyi sonunda oluşan yüzeyler incelendiğinde, en uygun ölçme ve modelleme yönteminin yersel lazer tarama olduğuna karar verilmiştir. Çalışmanın amacı, yüzeylerin kesme dayanımlarını etkileyen faktörlerin en önemlilerinden biri olan pürüzlülük derecelerini belirlemek için kullanılan pürüzlülük açılarının hızlı, doğru ve güvenilir olarak belirlenmesidir.

USING OPPORTUNITIES OF LASER SCANNERS FOR OBJECT SURFACE DETERMINATION

SUMMARY

Surface roughness have an important effect on the engineering behavior of rock masses such as stability, deformability and permeability. The degree of effects depends on the features of the roughness of surface geometry that should be properly defined. Various means of surface roughness determination methods developed for the isolation of the effects of surface roughness on shear strength, dilation and friction properties of surfaces. Technological developments are bringing about new survey techniques. Laser scanners are the latest technique developed in surveying discipline. Terrestrial laser scanners, when compared to the other surveying techniques, are able to survey the 3D surface by acquiring a large amount of data in a shorter time and as often as required. Terrestrial laser scanners are measuring instruments providing the detailed 3D object geometry directly and fastly. In Laser Technology, the object is obtained as the point which has the reflective intensity data. By logging, registring and smoothing the point clouds and also filling the spaces of point and filtering, three dimensional models are formed. The models that are formed by this procedure is given the all types of data for the engineering applications. The most important advantage that laser scanners provide is the ability of getting the detailed 3D model of the complex objects very quickly with respect to other measuring methods. In this study, the laser scanning method was used for the digital three dimensional 3D modeling of joint surfaces.. It is aimed to measure and define mathematically the roughness degree of the surfaces of rock pieces that are obtained as the result of breaking experiment. After the visual inspection of the surfaces, it was decided that the most convenient measuring method is scanning the surfaces in terms of complexity.

1. GİRİŞ

Süreksizlik; "malzemenin form bütünlüğünü bozucu herhangi bir kusur" anlamına gelmektedir. Pürüzlülük ise; "süreksizlik düzleminin yüzey geometrisi" olarak tanımlanmıştır. Kaya yüzeyleri çeşitli boyut ve geometride gelişmiş süreksizliklere sahiptirler. Süreksizlikler farklı derecelerde düzenli veya düzensiz (simetrik veya asimetrik) gelişmiş pürüzlülükler içerir. Kayaçların ayrılmaz bir öğesi olan süreksizliklerin sıklığı, doğrultu ve eğimleri, açıklıkları kayaçların kesme dayanımını ve duyarlılığını etkilediği gibi basınç direnci, elastik ve fiziksel özellikler üzerinde de etkili olurlar. Günümüze kadar çeşitli araştırmacılar pürüzlülüğü nitel ve nicel tanımlamalar ile ifade etmeye çalışmışlardır. Nitel tanımlamalarda pürüzlülük; küçük veya orta ölçekli gözlemlere dayalı tanımlayıcı terimlerle ifade edilmekte iken nicel tanımlamalar ile süreksizliğin kesme dayanımının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Pürüzlülük; bir çizgi boyunca profil olarak veya bir yüzey üzerinde araştırılır. Profil araştırmalar olası kayma yönü boyunca gerçekleştirilirken, yüzey pürüzlülüğü araştırması olası kayma yönünün belirtilerini tanımlayıcı niteliktedir. 2.5 – 200 cm arasında değişen bir profil boyunca potansiyel kayma yönünde bir cetvel kullanılarak ölçülecek pürüzlülüğe ait dişlerin h yükseklikleri eksen boyunca sabit aralıklar ile okunur. [1] bu ölçüm için yaklaşık 50 nokta önermektedir. Yüzey okumaları için çeşitli yüzey pozisyonlarında pusula, klinometre ve çeşitli çaplı diskler, mekanik profilograflar, fotogrometrik yöntemler, kapalı alan fotogrometri ve stereo – dijitayzır, görüntü analiz yöntemleri, lazer okumaları gibi çeşitli yöntemlerle okumalar araştırmacılarca yapılmıştır. Tüm bu çalışmalarda amaç kaya yüzeyindeki pürüzlülüğü tanımlamak olmuştur. [2] süreksizlik yüzeylerinde gelişmiş pürüzlülüğü birinci ve ikinci derece olmak üzere iki grupta toplamıştır. [3], 10 standart çatlak yüzey profili belirlemiş ve her bir profil için artan pürüzlülük derecesine bağlı olarak 0 – 20 arasında değerler alan birer çatlak pürüzlülük katsayısı, JRC (Joint Roughness Coefficient), değer aralığı tanımlamışlardır. Süreksizlik düzlemi yüzey geometrilerinin tanımlanmasına yönelik olarak [4] tarafından 9 tipik pürüzlülük profili sınıflandırılmış ve her sınıf için nitel olarak birer pürüzlülük tanımlaması

önerilmiştir. [5], yüzey pürüzlülüğü genlik değerleri ile JRC değerleri arasında matematiksel ilişki önermiştir. [6], süreksizliklerden alınan profillerin fraktal boyutları D ile ortalama pürüzlülük açısı i arasında matematiksel ilişki önermiştir ve JRC değer aralıkları için D ve i değerlerini vermiştir. [7], düşük JRC değerine sahip profiller için düşük, yüksek JRC değerlerine sahip profiller için yüksek fraktal boyutlar elde etmiş ve fraktal boyut D ile JRC arasında matematiksel ilişki önermiştir. [5] tarafından önerilen bağıntıda kullanılan pürüzlülüğe ait dişlerin h yüksekliklerine ait Z2 değerlerinin profilin sayısallaştırılması sırasında örnekleme aralığına bağlı olarak değişeceğini, bunun da JRC değerini etkileyeceğini öne sürmüş, [5] bağıntısına alternatif bağıntı önermiştir [8]. [9], önerilmiş 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 belirtmiştir.

Bu çalışmada pürüzlülük açısının belirlenmesi amaçlanmış ve yüzey pürüzlülüğü yersel lazer tarama yöntemi ile alansal çalışılmıştır. Çalışmada pürüzlü yüzey 3.5 x 7 cm boyutlu bir kireçtaşı karot örneğin pres altında Brezilyan indirekt çekme deneyi ile kırılması sonucu elde edilmiştir. Kaya malzemesi içinde çekme çatlakları sonucu oluşan ve karotun yarıçap uzunluğundan geçen bir düzlem içersinde gelişen pürüzlü yüzeyin alansal tanımı için 2 mm aralıklarla boyuna kesitler alınmış ve toplam 23 adet yüzey profil okuması yapılmıştır. Okumalarda pürüzlülük profillerin bir yüzü pozitif, diğer yüzü negatif olarak kabul edilmiş ve her iki yön için pürüzlülük açıları yaklaşık 1 mm aralık ile okunmuştur. Okumalar negatif yönde alınan ortalama pürüzlülük açısının 9.590 ve pozitif yönde alınan ortalama pürüzlülük açısının 9.300 olduğunu göstermiştir.

Çalışma 5 ana bölümden oluşmaktadır.

2. bölümde; Yüzey pürüzlülüğü ve ölçme yöntemleri,

3. bölümde; 3-B lazer tarama,

4. bölümde; Uygulama

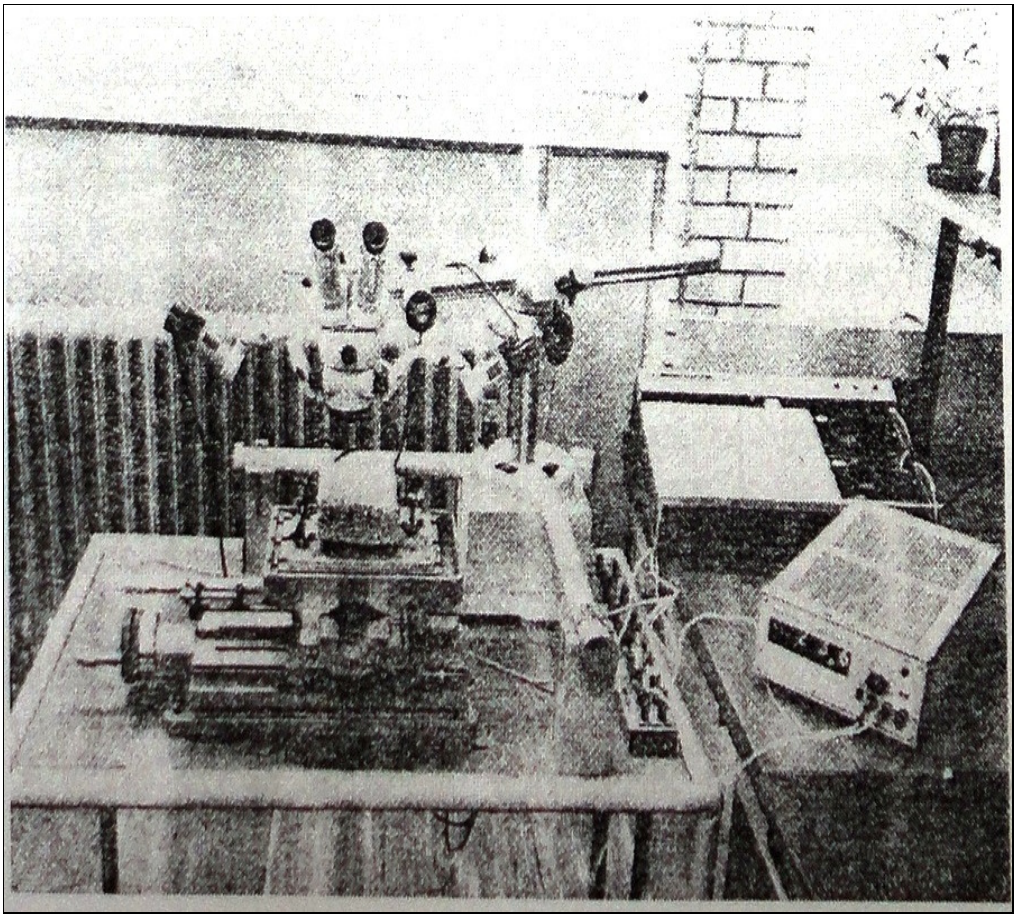
5. bölümde; Sonuç ve öneriler

ana başlıkları yer almaktadır.

2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ve ÖLÇME YÖNTEMLERİ

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, atomik kuvvet mikroskobu (AFM), interferometrik mikroskop, fringe-field kapasitif yöntemi 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

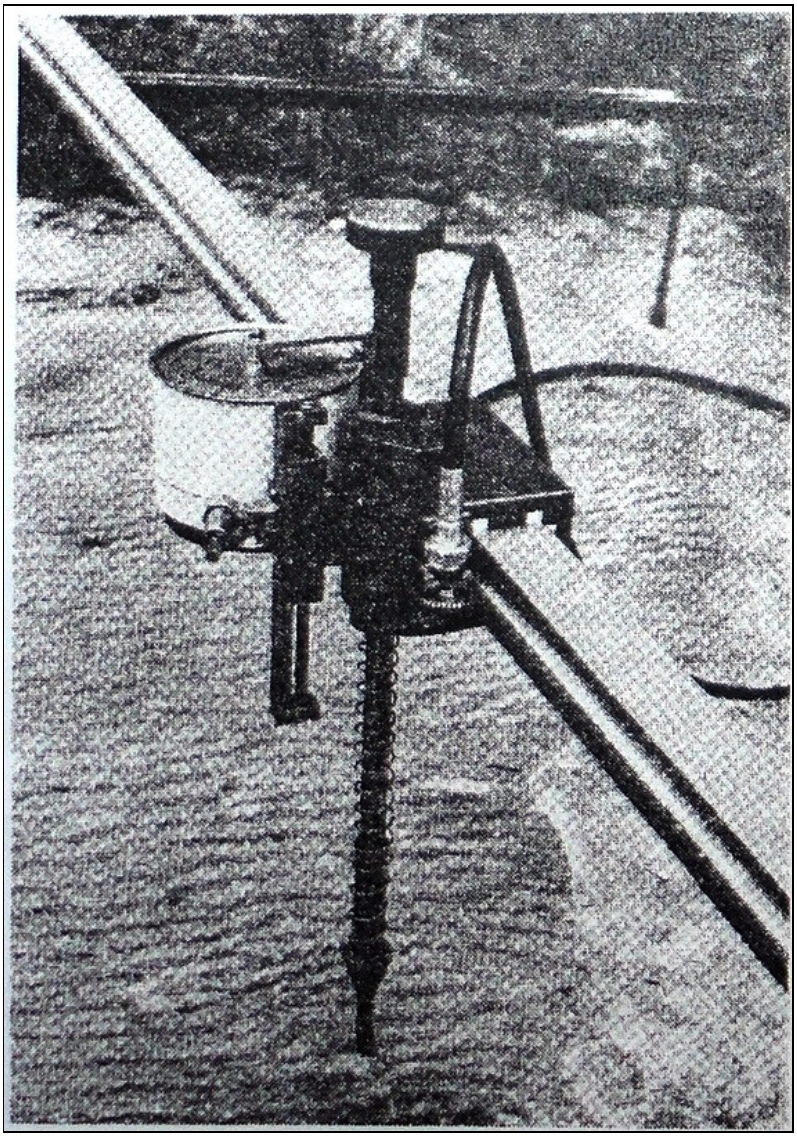
geliştirilip kullanıldığı görülmektedir. [12] tarafından süreksizlik yüzeylerinin morfolojisini belirlemek amacıyla bir stereo-derinlik ölçüm mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Eş derinlik ölçüm mikroskobu [12]

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. [12]

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 2.2).

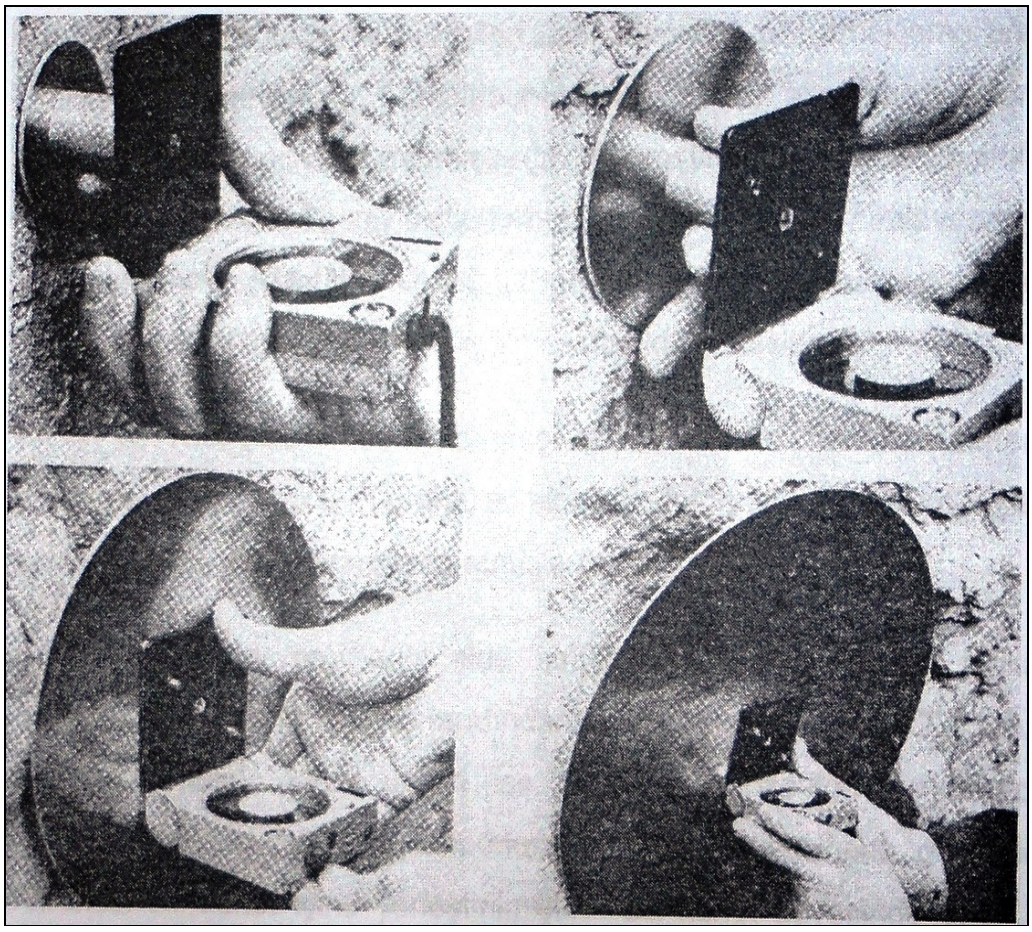


Şekil 2.2 : Profilograf [12]

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 yer değiştirmeler 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 yer değiştirmeler 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.

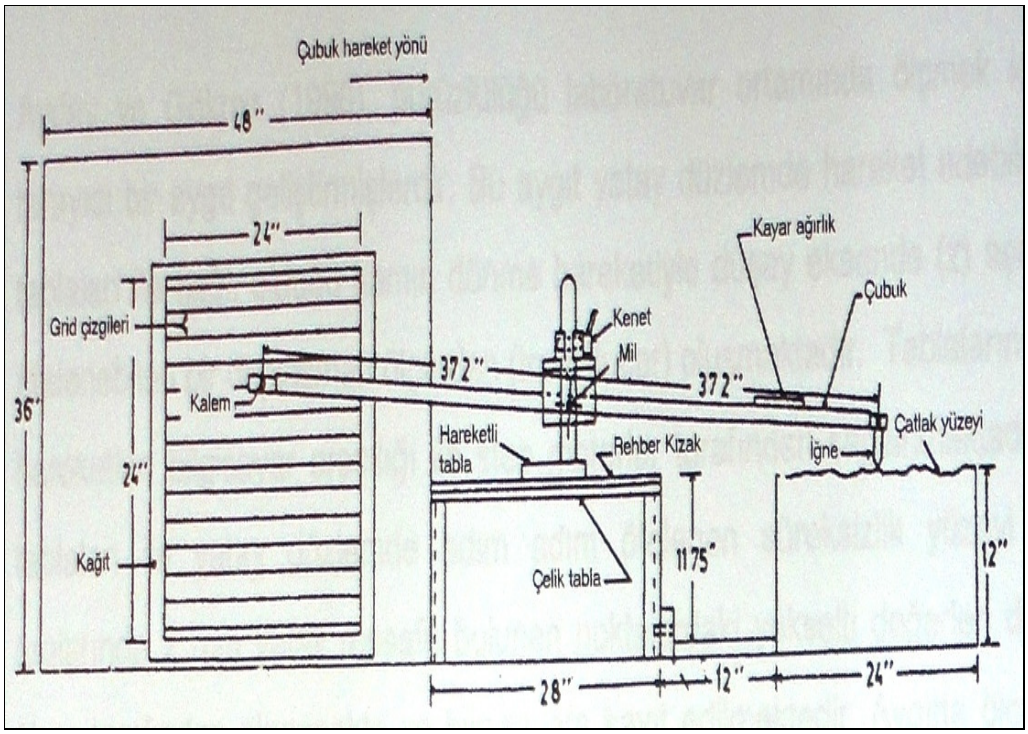
Arazide büyük ölçekteki süreksizlik düzlemlerinin yüzey morfolojisini belirlemek amacıyla [12] tarafından basit bir yöntem kullanılmıştır. Yöntem, bir jeolog pusulası ve farklı çaplardaki diskler üzerine kuruludur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Süreksizlik yüzey profillerinin arazide jeolog pusulası ve farklı çaplı diskler kullanılarak ölçülmesi [12]

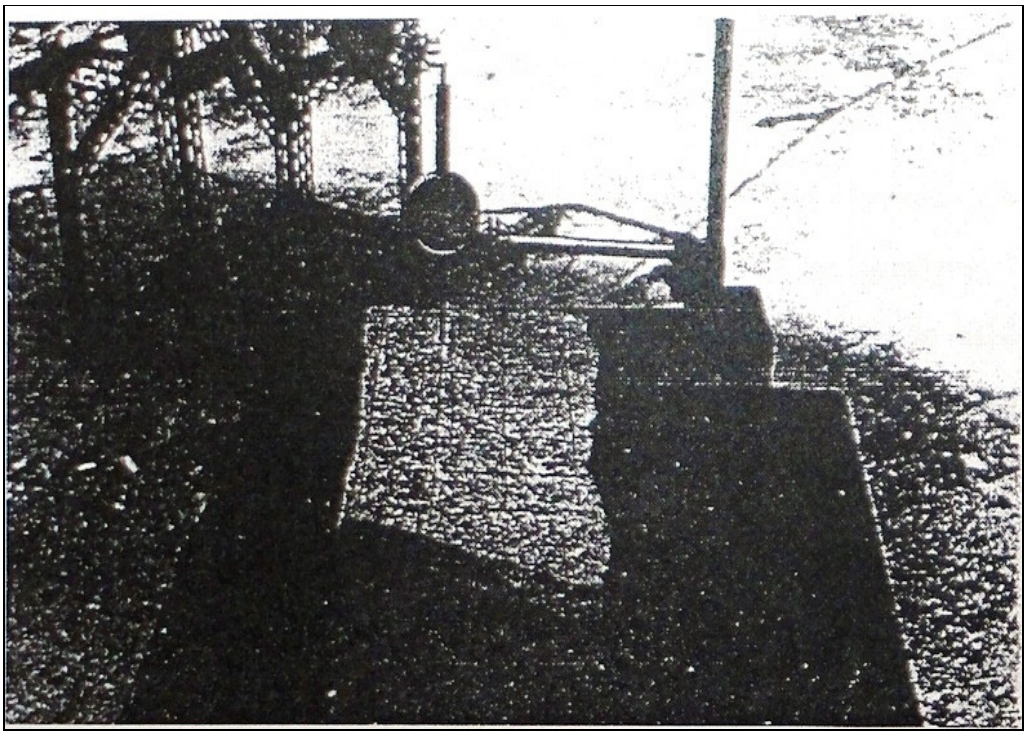
Süreksizlik yüzeyi üzerinde, belirli bir doğrultu boyunca noktalar seçilmekte ve çapı bilinen bir disk sırasıyla bu noktalara yerleştirilmektedir. Jeolog pusulası her nokta için ayrı ayrı disk üzerine konulmakta ve eğim açıları ölçülmektedir. Aynı işleme

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. 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 1 gr'dan daha az olan çelik bir iğne yüzeyle sürekli olarak temas halinde bulunmaktadır. Yüzey yükseltileri, iğnenin düşey yönde yaptığı yer değiştirmelere bağlı olarak 5-200 oranında büyültme olanağı olan bir transduser ile ölçülmektedir. Böylece yüzey topografyası bir x-y çiziciden sürekli profiller olarak elde edilmektedir, ölçüm doğrultusu boyunca profil uzunluklarına karşılık gelen yatay tablanın yer değiştirmeleri ise, 1-50 oranında büyültme ile doğrusal bir potansiyometreyle ölçülmektedir. [15], 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. Bu cihazı ile [16], süreksizlikler üzerinden 0.5 mm Aralıklarla 1m' lik profiller çıkarmışlardır. [17], 60 cm uzunluğundaki süreksizlik yüzeyleri üzerinden 0.5 mm örnekleme aralığı ile yüzey profilleri elde etmişlerdir. [17], aynı cihazı laboratuar 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. [18] bu cihazı doğal süreksizliklerden alınan 10 cm çapındaki silikon kalıpların ölçülmesinde kullanmışlardır. [19], 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 [7] tarafından kullanılmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Profilograf aletinin çalışma prensibi [7]

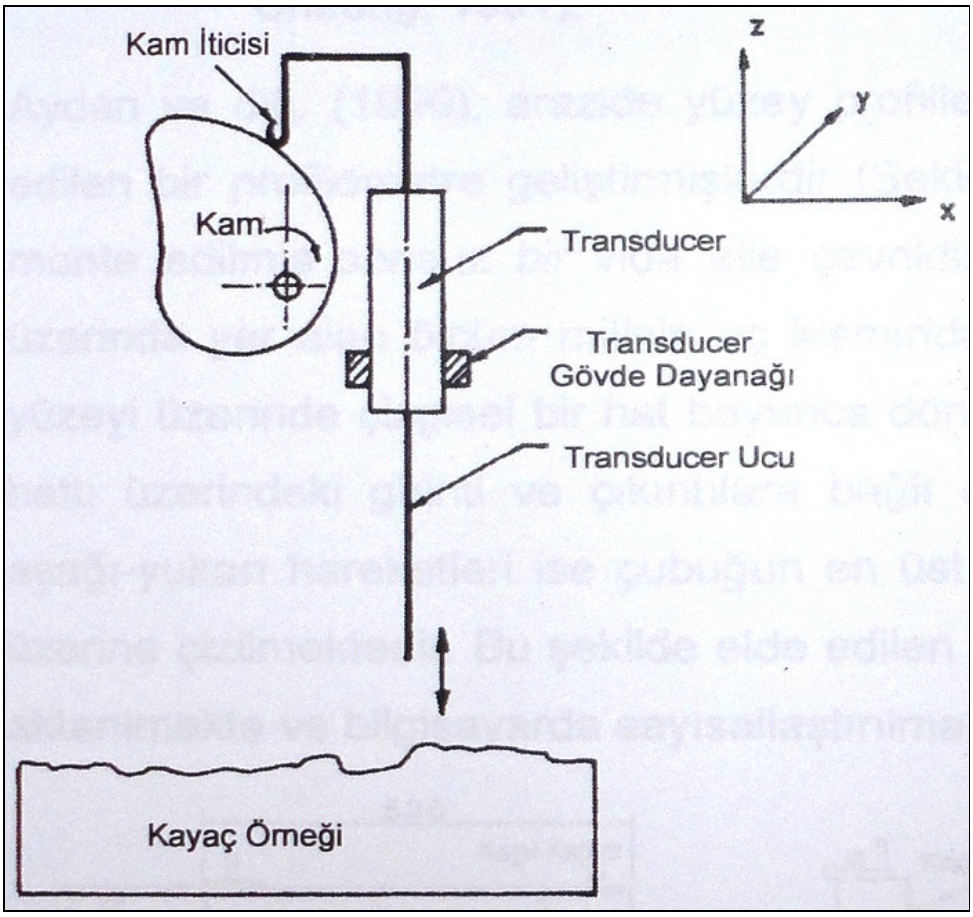
Uzunca bir milin bir ucuna kalem diğer ucuna ise süreksizlik yüzeyine temas eden bir iğne bağlanmıştır. Bu mil, ağırlık merkezinden ekseni etrafında dönebilecek şekilde hareketli bir kenet içine yerleştirilmiştir. Bu kenet sayesinde uzun mil, çelik bir tablanın üzerine monte edilmiş olan kızaklar üzerinde 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. [20], 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 2.5).



Şekil 2.5 : Çatlak yüzey profilinin mekanik ölçümü [20]

Daha sonra, elde ettikleri sayısal veriler sayesinde yüzeye ait eşyükselti eğrili haritası oluşturmuşlardır. Oldukça yoğun emek gerektiren bu yöntemde, yüzey boyutu arttırıldığında çok daha fazla emek ve zamana ihtiyaç duyulacaktır. [21], 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. [9], 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. [22], pürüzlülüğü laboratuvar ortamında ölçmek için yüzey tarayıcı bir aygıt geliştirmişlerdir. Bu aygıt yatay düzlemde hareket edebilen x ve y tablaları ile bağlı olduğu kam'ın dönme hareketiyle düşey eksende (z) aşağı-yukarı ötelenebilen bir deplasman ölçerden (transducer) oluşmaktadır. Tablaların ve kam'ın 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

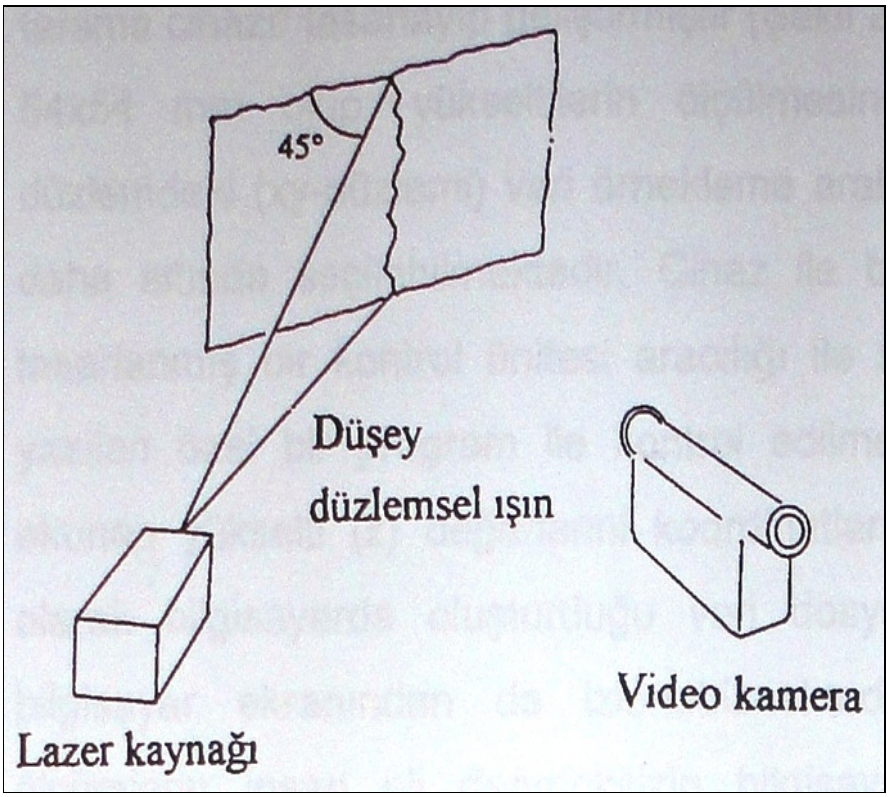
edilmektedir. Aygıtta ölçülebilir en büyük yüzey alanının 150x150 mm^2 olduğu belirtilmiştir. Aygıta ait ölçme prensibi (Şekil 2.6) de görülmektedir.



Şekil 2.6 : Yüzey pürüzlülük tarayıcısı [22]

[23], süreksizlik yüzeylerinin 3-boyutlu geometrisini elde etmek amacıyla optik bir sistem kullanmışlardır. Sistem düzlemsel ışın gönderen bir lazer kaynağı üzerine kuruludur (Şekil 2.7). 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 analız edilmekte ve yüzeyin üç boyutlu

koordinatları belirlenmektedir. [14], arazide yüzey profillerinin ölçümü için elle (manuel) kontrol edilen bir profilometre geliştirmişlerdir (Şekil 2.8).

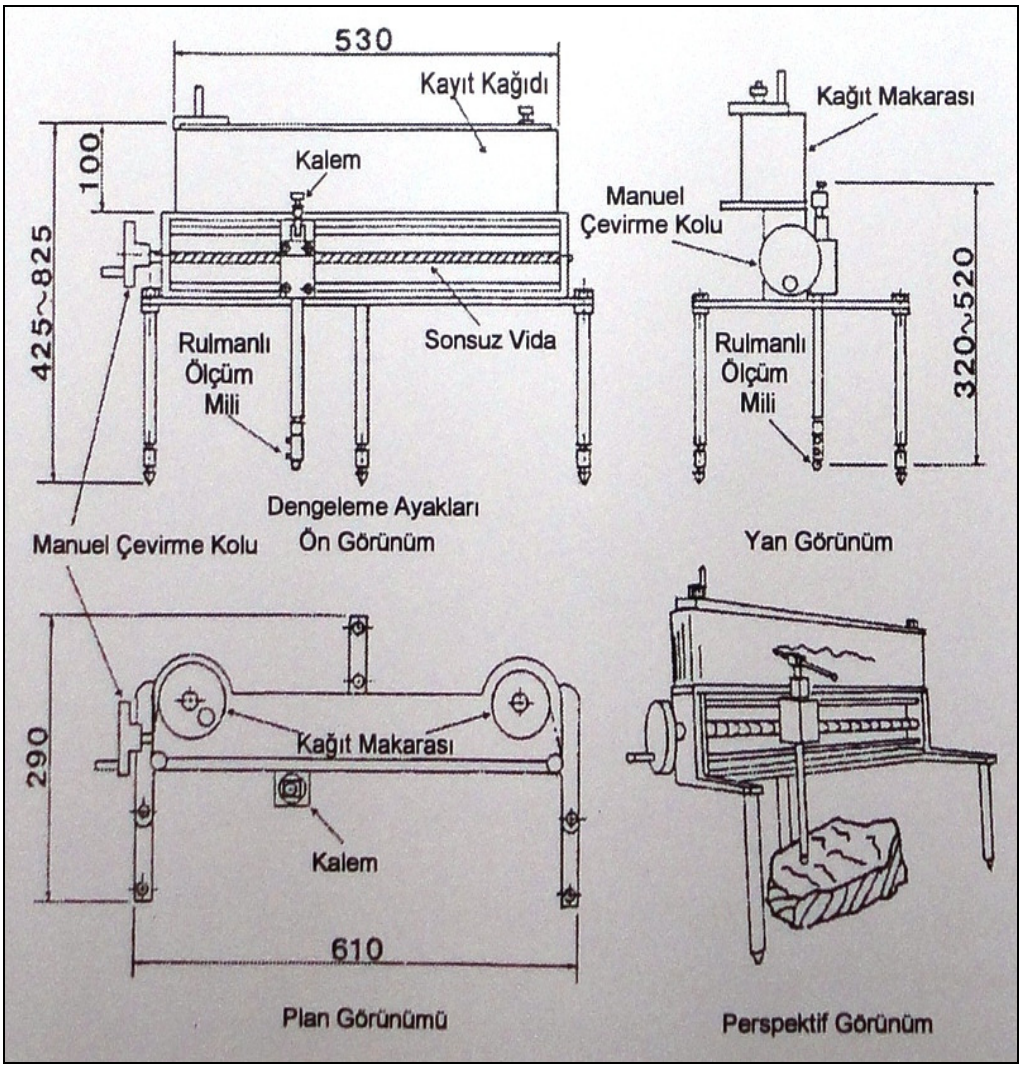


Şekil 2.7 : Lazer ile süreksizlik düzlemi yüzey geometrisinin ölçülmesi [23]

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-yukan 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.

[24], süreksizlik yüzey pürüzlülüğünün alansal ölçümü (tüm yüzeyin sayısallaştırılması) için tamamen bilgisayar kontrollü bir "yüzey tarama cihazı" geliştirmiştir (Şekil 2.9) 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

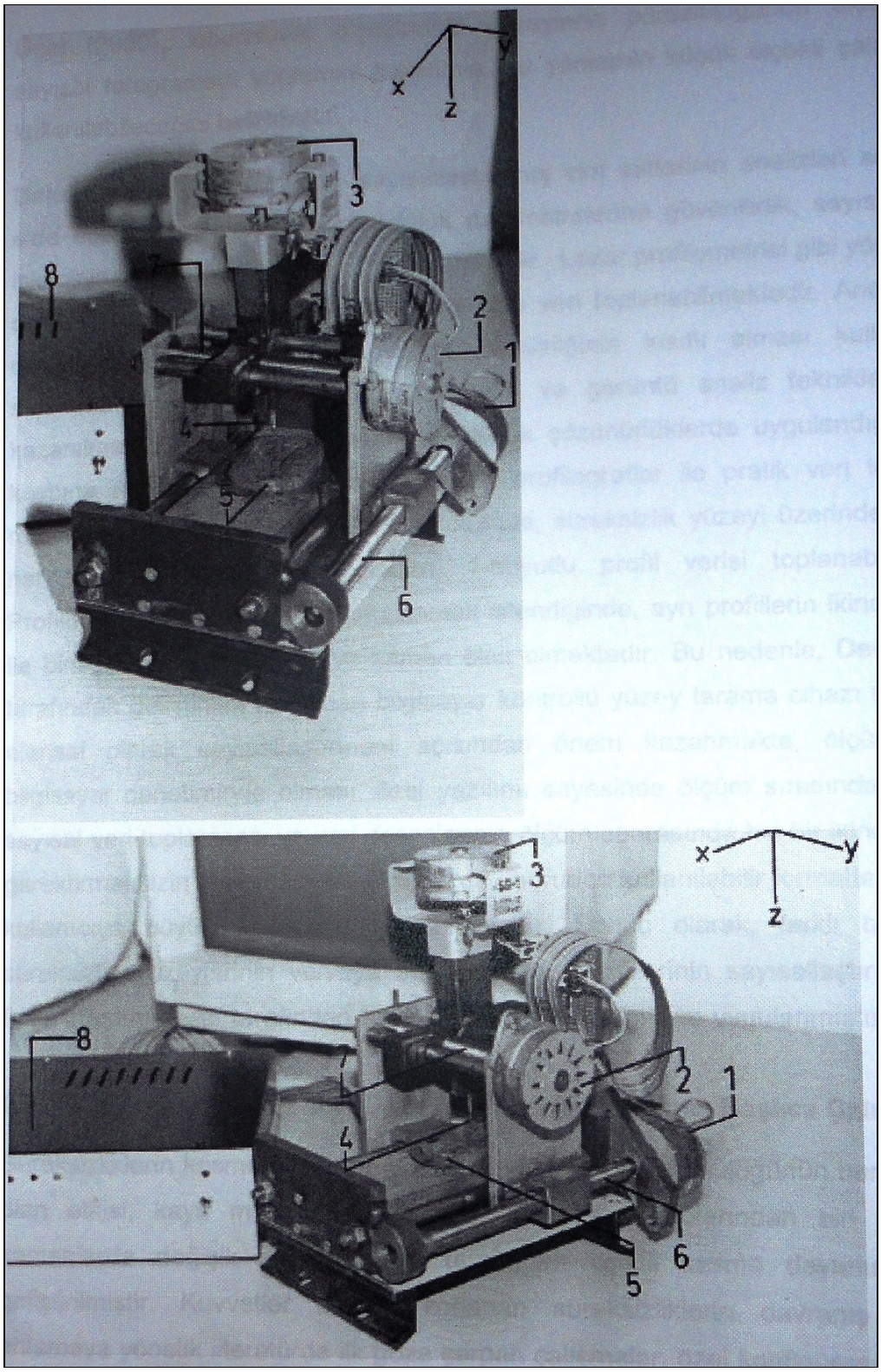
kontrol ünitesi aracılığı ile sağlanmakta ve cihaz Turbo C diliyle yazılan özel bir program ile kontrol edilmektedir.



Şekil 2.8 : Profilograf [14]

Bu program, ölçüm sırasında okunan yükselti (z) değerlerini koordinatları (x,y) ile birlikte ölçümle eş zamanlı olarak bilgisayarda oluşturduğu veri dosyasına kaydetmekte, bunlar eş zamanlı olarak bilgisayar ekranından da izlenebilmektedir. Cihazın çalıştırılması ile birlikte ölçümlerin insan eli değmeksizin bilgisayar kontrolü altında otomatik şekildi yapılması, kullanıcıya kolaylık ve pratiklik sağlamaktadır.

[25] laboratuar ölçeğinde yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için sayısal fotogrametri yöntemini kullanmış, bu yöntemin küçük ölçekli çalışmalarda kullanılabileceğini belirtmiştir.



Şekil 2.9 : Süreksizlik yüzeyi alansal tarama cihazı [22] (1: Step Motor 1, 2: Step Motor 2, 3: Step Motor 3, 4: ölçüm iğnesi, 5: süreksizlik yüzeyi, 6: X ekseni boyunca sonsuz vida, 7: Y ekseni boyunca sonsuz vida, 8: kontrol ünitesi).

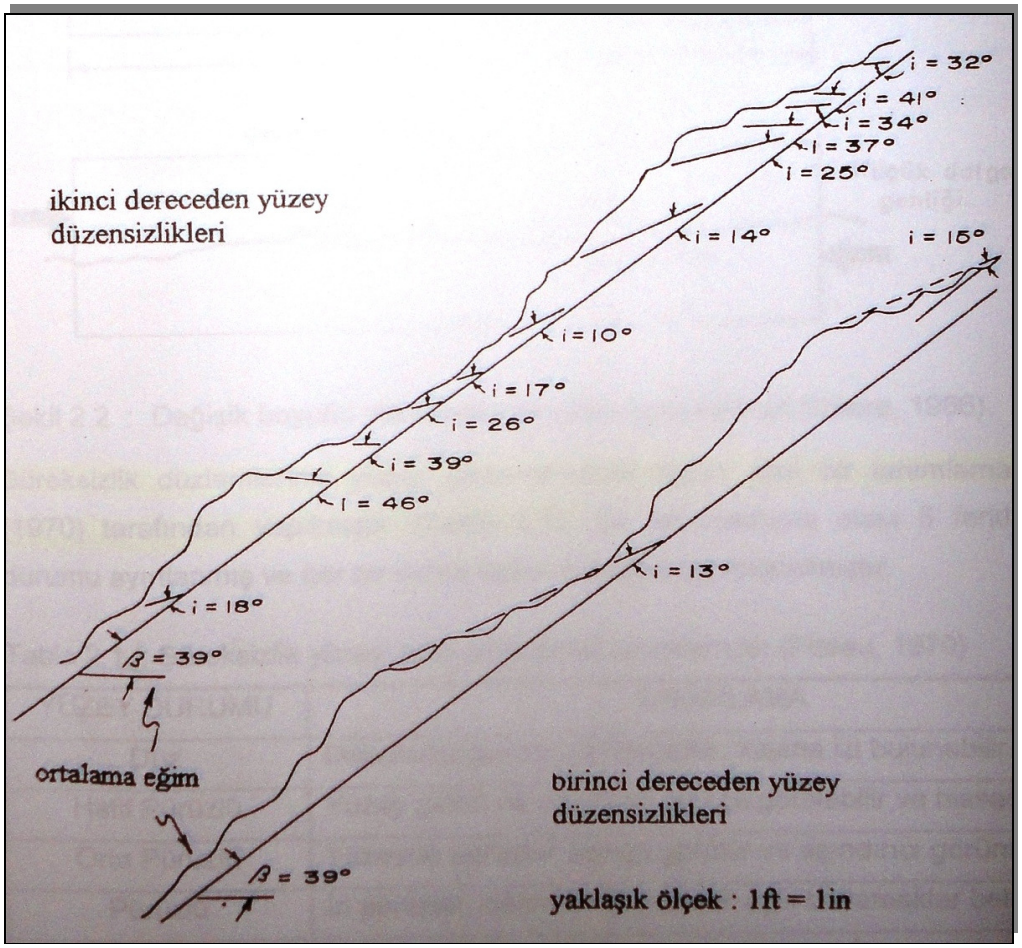
Lazer profilometrisi gibi yöntemlerde daha sık ve daha yüksek hassasiyette hızlı veri toplanabilmektedir. Ancak bu tür cihazların yüksek maliyetleri ve bulunabilirliğinin kısıtlı olması kullanımlarını sınırlamaktadır. Benzer şekilde, fotoğrafik ve görüntü analiz tekniklerinde hız kazanılmakta, ancak 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. [24] tarafından geliştirilen tamamen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı tüm yüzeyi alansal olarak sayısallaştırmakta ve ölçümlerin 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. Bozkurtoğlu (1996) kaya yüzeyi üzerinden almış olduğu pürüzlülüğe ait 2 m'lik latex kalıbın görüntülerini bilgisayara bağlı video kamera ile dijital ortama aktarmıştır. Bu işlem için pürüzlülük yüzey kalıbını 8x200x10 cm boyutunda içi alçı dolu bir kalıp içine yerleştirmiş ve bu kalıbı tekerlekli bir zemin üzerine monte etmiştir. Yüzey üzerine belli bir uzaklıktan belli bir açı ile paralel ışık demeti düşürmüş ve video kameranın görüş açısı olan 8x5 cm boyutunda birbirini izleyen 40 adet yüzey görüntüsünü kamera altından geçirerek bilgisayara siyah-beyaz olarak kaydetmiştir. Benzer işlemi ışık kaynağını kalıp içindeki yüzeyin tam simetriğine yerleştirerek tekrarlamış ve gerek görüntü gerekse karşı görüntü dosyalarının görüntü işleme programı ile histogram değerlerini 40 adet dosya için belirlemiştir. Daha sonra görüntü dosyalarını sırasıyla 2, 4, 8 ve 16 alt görüntüye bölerek 80, 160, 320 ve 640 adet görüntü dosyalarının histogram değerlerinde homojen zonlamayı elde etmiştir. 320 ve 640 adet görüntü dosyasının histogram değerlerini kullanarak yüzey pürüzlülüğünü temsil edecek olan en az ve en fazla yüzey uzunluğunun ne olduğunu merkezi limit teoremi ile belirlemiştir. Şekil 2.9 da görüldüğü gibi, süreksizlik yüzeyi alansal tarama cihazı bileşenleri ile birlikte açıklanmıştır. Ayrıca süreksizlik düzlemini ölçen cihazın çizim yönündeki eksenleri tanımlanarak, çizim sonucu kullanıcıya üç boyutlu veri sunmaktadır.

2.1 Pürüzlülük Üzerine Yapılmış Tanımlamalar

Pürüzlülük üzerine yapılmış olan tanımlamalar nitel ve nicel olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

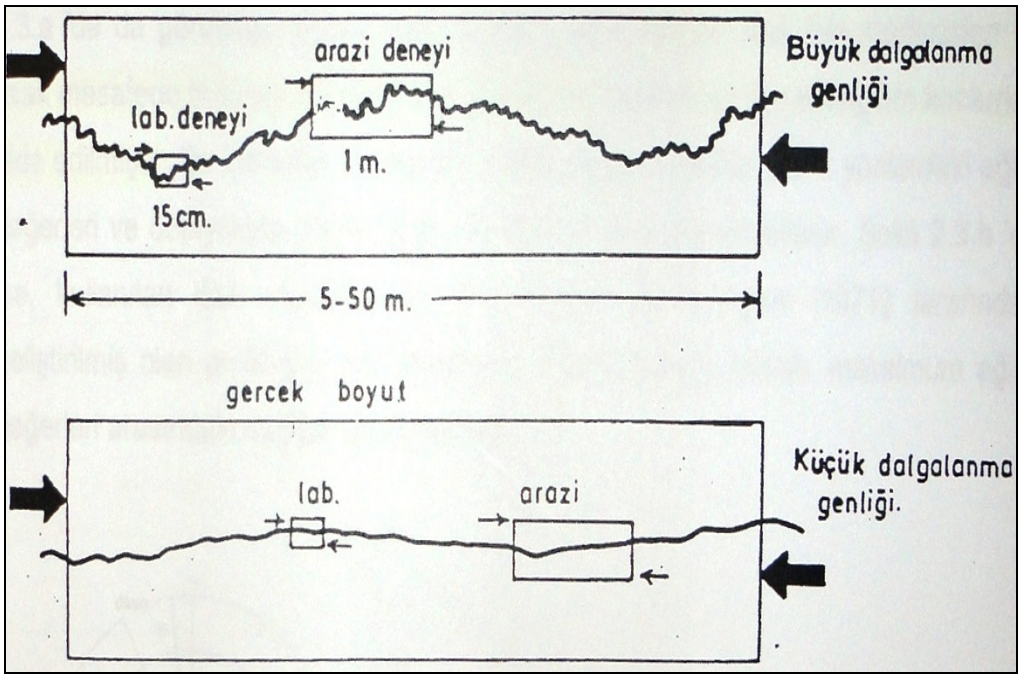
2.1.1 Nitel tanımlamalar

[2], 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 yer alan ancak ana dalgalanmalara oranla aynı gözlem uzunluğu içinde daha düşük dalga boyuna, dolayısıyla daha yüksek frekanslara sahip olan çizgisel geometri ise yüzey pürüzlülüğüdür. Birinci dereceden yüzey düzensizlikleri ve ikinci dereceden yüzey düzensizlikleri, ortalama eğim ve kırılma açılarıyla olan ilişkileri Şekil 2.10 da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Birinci ve ikinci dereceden yüzey düzensizlikleri [2]

Pürüzlülüğün referans düzleminden ortalama sapma açıları ($i_{pürüzlüük}$), dalgalanma açılarına ($i_{dalgalılık}$) nazaran genellikle daha yüksek değerlere sahip olmaktadır. Değişik boyutlu yüklemelerde, süreksizlik yüzey geometrisinin süreksizliğin kesme dayanımı üzerine olan etkisi [10] tarafından incelenmiştir (Şekil 2.11). Araştırmacı, dalgalılık genliğinin yüksek olduğu durumlarda, arazi ve laboratuar deney sonuçları arasında önemli farkların beklenebileceğini, dalgalılık genliğinin düşük olduğu durumlarda ise laboratuar ve arazi deney sonuçlarının yakın olabileceğini, ancak süreksizlik yüzeyinin tamamının değerlendirmeye alınması durumunda laboratuar ve arazi deney sonuçlarının yine de birbirinden farklı olabileceğini öne sürmüştür.



Şekil 2.11 : Değişik boyutlu yüklemelerde yüzey geometrileri [10]

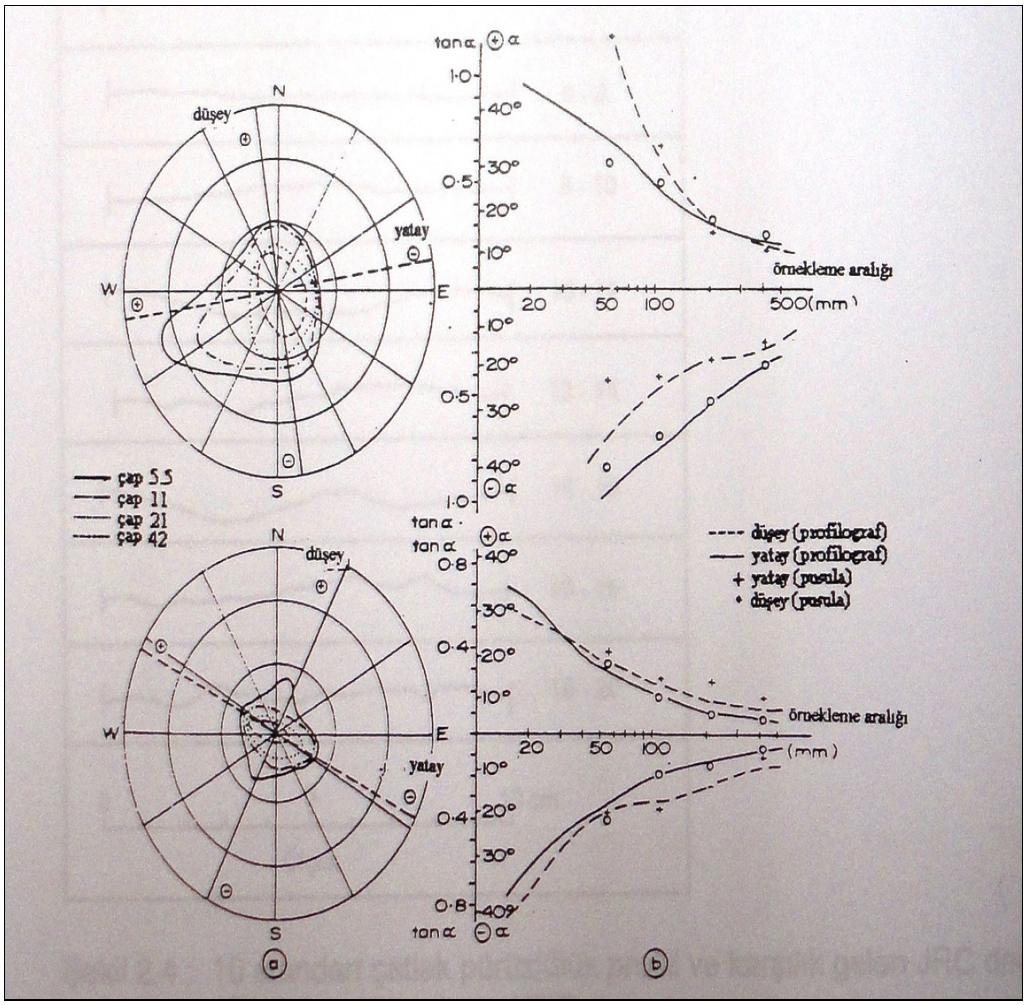
Şekil 2.11'de, büyük dalgalanma genliği ve küçük dalgalanma genliği şematik olarak ifade edilmeye çalışılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere laboratuar deneyi ile arazi deneyi belli ölçeklerde karşılaştırılmıştır. Düzensizliğin fazla olduğu durumda büyük dalgalanma genliği, düzensizliğin az olduğu durumda ise küçük dalgalanma genliği ortaya çıkmıştır.

Süreksizlik düzlemlerinin yüzey geometrilerine ilişkin nitel bir tanımlama [11] tarafından yapılmıştır (Çizelge 2.1). Bu tanımlamada olası 5 farklı yüzey durumu belirlenmiş ve her bir sınıfa ilişkin özellikler tanımlanmıştır.

Çizelge 2.1 : Süreksizlik yüzeyi nitel tanımlaması [11]

	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.

[12] 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 2.12 a). Netin merkeziden en uzak mesafe bulunan noktalar, pusula ile ölçülen en büyük eğim değerlerine karşılık gelmektedir. Şekil 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 2.12 b)' de ise, kullanılan disk çaplarına ve yine [12] tarafından geliştirilmiş olan profilograf için örnekleme aralığına bağlı olarak, maksimum eğim değerleri arasındaki değişim görülmektedir.



Şekil 2.12 : a) Farklı çaplardaki diskler için net üzerindeki en büyük dağılımları
b) Pusula ve profilograf metodlarında örnekleme aralığına bağlı en büyük eğim değerlerindeki değişim [12]

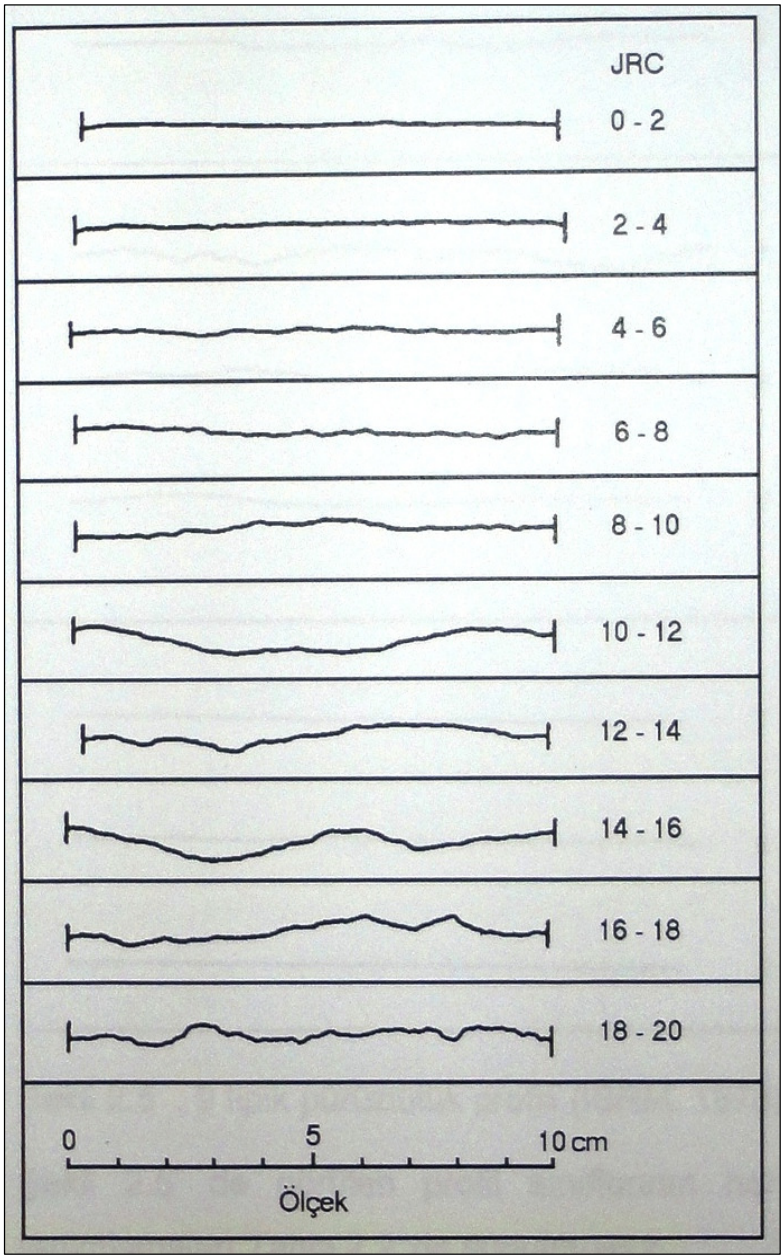
Aynı ölçüm noktaları için artan disk çapları ile yinelenen ölçümler her defasında daha düşük eğim değerlerinin okunmasına neden olmaktadır. Aynı şekilde profilograf yönteminde örnekleme aralığındaki artış;

Δx; iki nokta arasındaki yatay mesafe,

Δy; iki noktanın yükseklikleri farkı olmak üzere,

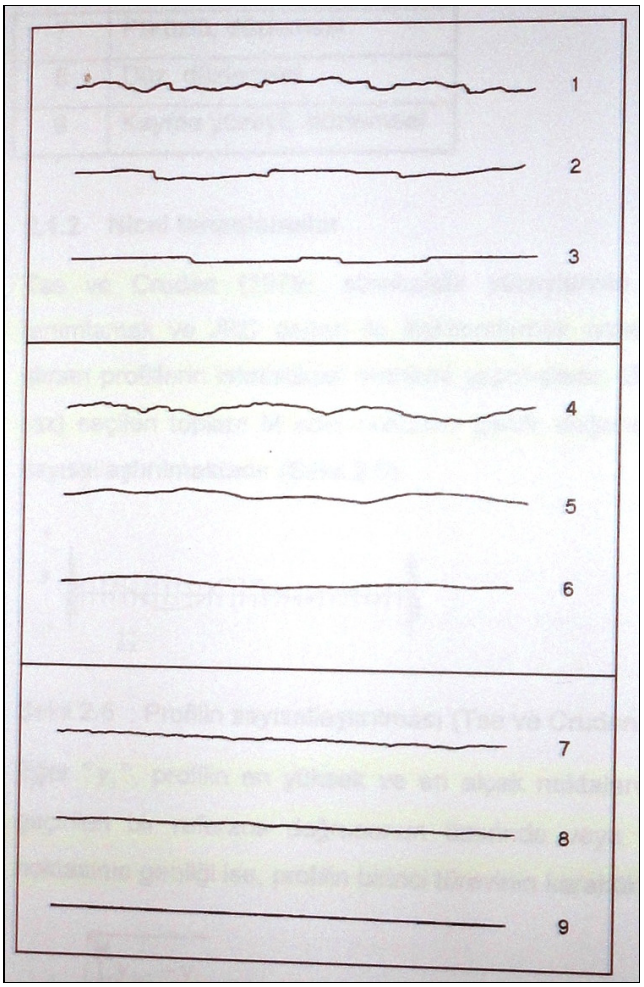
$\Delta y/\Delta x$ oranı değerinin azalması ve olduğundan daha düşük eğim değerlerinin okunulmasına neden olur.

[3], 10 standart çatlak yüzey profili belirlemiş ve her bir profil için artan pürüzlülük derecesine bağlı olarak 0-20 arasında değerler alan birer çatlak pürüzlülük katsayısı, JRC (Joint Roughness Coefficient), değer aralığı tanımlamışlardır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 : Standart pürüzlülük profilleri ve JRC değerleri [3]

Çatlak pürüzlülük katsayısı (JRC), belirlenmek istenilen bir profil (Şekil 1.4) '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 [4] tarafından 9 tipik pürüzlülük profili sınıflandırılmış (Şekil 2.14) ve her sınıf için nitel olarak birer pürüzlülük tanımlaması önerilmiştir.



Şekil 2.14 : Tipik pürüzlülük yüzey profilleri [4]

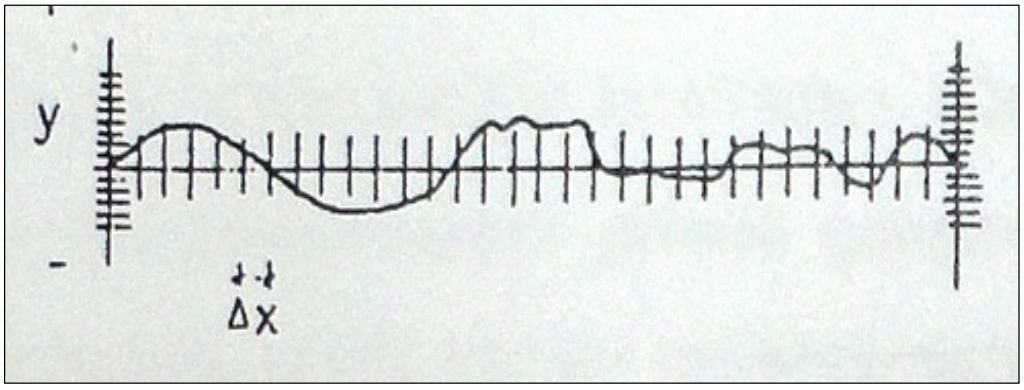
Şekil 2.14 ile verilen pürüzlülük profillerinin tanımı Çizelge 2.2 ile verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Süreksizlik yüzeyi nitel tanımlaması [4]

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

[5], süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğünü sayısal olarak tanımlamak ve JRC değeri ile ilişkilendirmek amacıyla, süreksizlik yüzeylerinden alınan profillerin istatistiksel analizini yapmışladır. Bu istatistiksel analizler birçok deneysel veriler sonucunda oluşturulmaktadır. İstatistiksel analizler, profil üzerinde sabit bir eksen tanımlanarak yapılmaktadır. Sabit eksenin yanı sıra, farklı iki eksen daha tanımlanarak profil üzerinde iki boyutlu veriler elde edilmektedir. Bir profil üzerinde eşit aralıklarla (Ax) seçilen toplam M adet noktanın genlik değerleri ölçülmekte ve böylece profil sayısallaştırılmaktadır (Şekil 2.15).

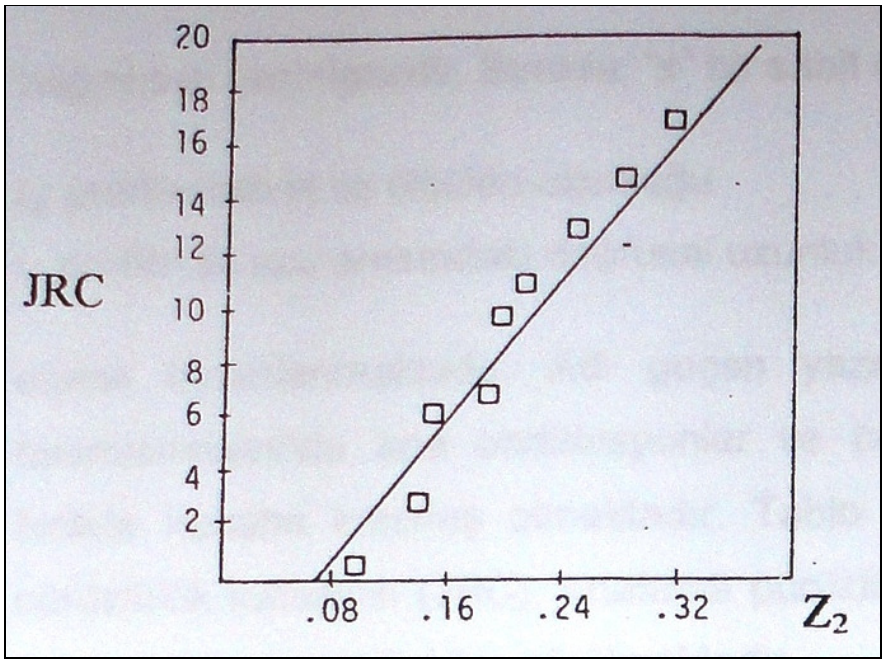


Şekil 2.15 : Profilin sayılaştırılması [5]

Eğer "y;", 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 karekök ortalaması (Z_2)

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

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu araştırmacılar [3] 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 2.16) de görülen ilişki ortaya konulmuştur.



Şekil 2.16 : Barton ve Choubey tarafından önerilen profillerin JRC değerleri ile hesaplanmış Z_2 değerlerinin ilişkisi [5]

Bu ilişki sayesinde Z_2 ve JRC değerleri arasında ;

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

bağıntısı elde edilmiştir. Bağıntı sayesinde, istatistiksel olarak, Z_2 değeri hesaplanan bir profilin JRC değeri belirlenebilmektedir. [13], yaptıkları çalışmalar sonucunda bir profilin JRC değeri ile fraktal boyutu (D) arasında;

$$JRC = 1000(D-1) \qquad \textbf{(2.3)}$$

doğrusal ilişkisini tanımlamışlardır.

[6], 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 ;

$$i = \cos^{-1}\left(xI_d\right)^{(1-D)} \qquad \textbf{(2.4)}$$

Bağıntısını önermişlerdir. Bu bağıntıda x; $x = 1/I_t$ eşitliği ile tanımlıdır.

I_d : pürüzlülük profilinin cetvel ile ölçülen uzunluğu,

I_t : profilin iki ucu arasındaki doğrusal uzunluktur. [6]' ne göre, bu ilişki ile "i" açısının tanımlanmasında ana ondülasyonlar ve bunların üzerindeki ikincil pürüzlülükler birlikte hesaba katılmış olmaktadır. (Çizelge 2.3) de 10 standart profil

için; çatlak pürüzlülük katsayısı (JRC), ortalama pürüzlülük açısı (i) ve profil fraktal boyutu (D) arasındaki sayısal ilişkiler görülmektedir.

Çizelge 2.3 : Standart profiller için JRC, ortalama pürüzlülük açısı (i), fraktal boyut (D) ilişkileri [6]

JRC	Fraktal Boyut (D)	$i = \cos^{1} I_d^{(1-D)} (^0)$
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

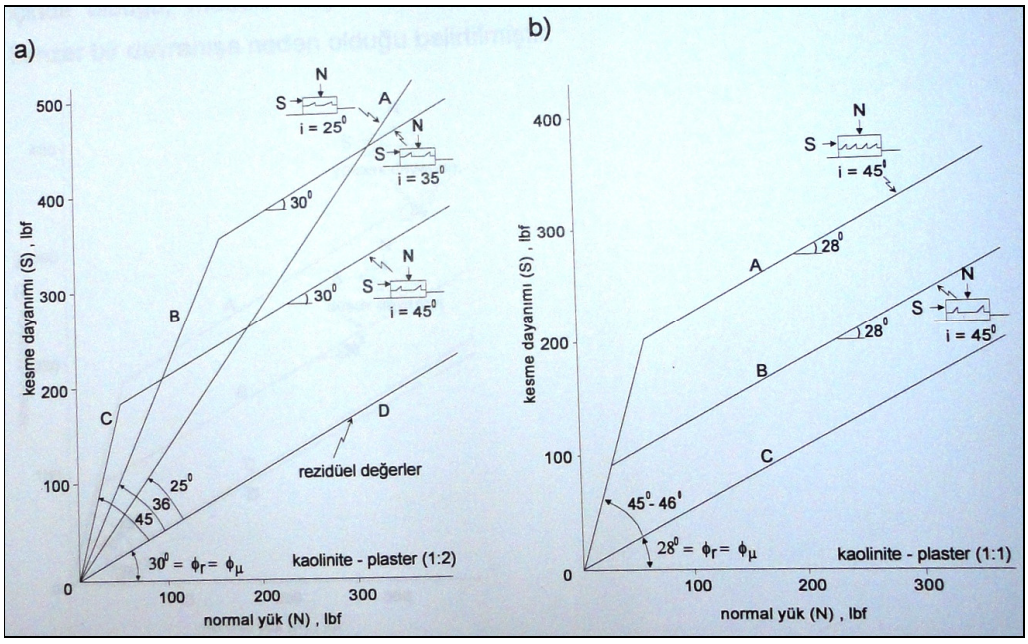
[7], cetvel yöntemini kullanarak, 10 standart pürüzlülük profilinin her birinin fraktal boyut değerini (D) hesaplamışlardır (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4 : JRC değer aralıkları için hesaplanan fraktal boyutlar [7]

JRC Değer Aralığı	**Cetvel Tekrar Sayısı (N)**					**Fraktal Boyut (D)**
	r = 2	r = 4	r = 6	r = 8	r = 10	
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

2.2 Süreksizliklerin Kesme Dayanımı Üzerine Yapılmış Çalışmalar

[2], pürüz açıları, pürüz sayıları ve malzeme (kaolen-alçı) karışım oranlan birbirinden farklı olan, testere dişli modeller üzerinde yapmış olduğu kesme deneyleri ile, pürüzlülüğün yenilenme zarfları üzerine olan etkisini araştırmıştır. Pürüz sayısı iki, pürüz açıları (i); 25, 35, 45° 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 2.17 a: A zarfı). Pürüz eğim açıları i = 30° ve 45° olan modeller içinse doğrusal olmayan yenilme zarfları sunmuştur (Şekil 2.17 a: B ve C zarfları). Bu modeller için rezidüel (artık) dayanım zarfına (Şekil 2.17 a: D zarfı) ait rezidüel içsel sürtünme açısı (ϕ_r), aynı karışım ile hazırlanan pürüzsüz (düz) modellerin içsel sürtünme açısına (ϕ_μ) neredeyse eşittir. B ve C zarfının ikincil kısımlarının eğim açıları rezidüel 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 2.17 b).



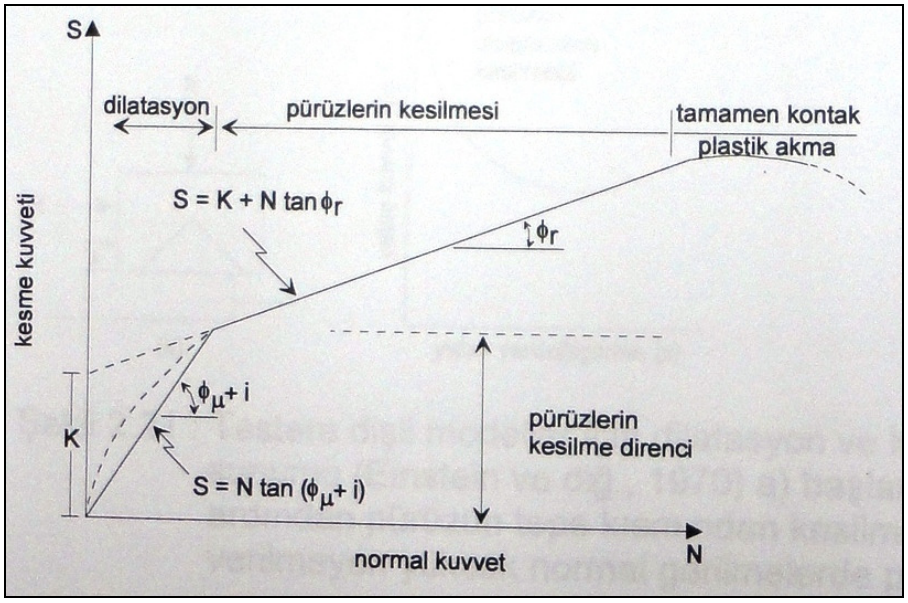
Şekil 2.17 : İdeal testere dişli modeller için yenilme zarfları [2]
a) Farklı pürüz eğim açılarına sahip modeller
b) Aynı eğim açısı, farklı pürüz sayılarına sahip modeller.

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 2.17 b: A zarfı) ait yenilme modundaki değişimin, daha zayıf modellerinkine (Şekil 2.17 b: B zarfı) nazaran, daha yüksek normal yük değerlerinde ortaya çıktığını göstermiştir.

[2] doğrusal olmayan yenilme zarfını artan normal gerilmeler altında yenilme modellerinin farklılık gösterdiğini savunan kuramı ile açıklamıştır. Patton (1966)' un doğrusal olmayan kesme dayanımı kuramına göre zarfın birincil kısmındaki en büyük kesme dayanımları, düşük normal gerilmeler altında "i" açısı ile eğimli yüzeyler boyunca ortaya çıkan kayma hareketlerinin sonucudur ve bu durum için en büyük kesme dayanımı;

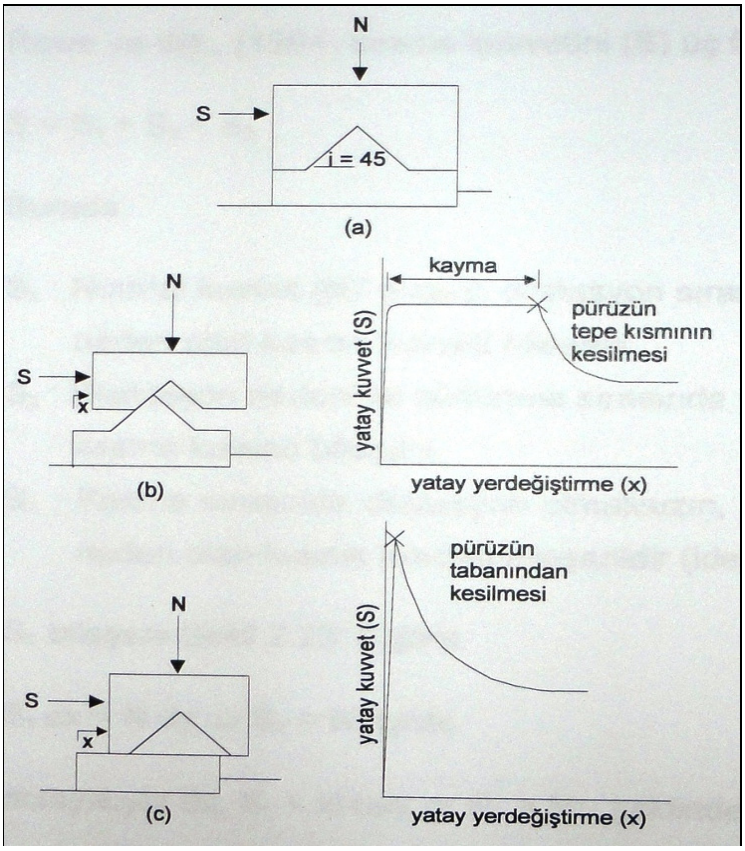
$$\tau_p = c_a + \sigma_n tg\phi_r \qquad \textbf{(2.5)}$$

ifadesi ile tanımlanmıştır. Burada, ϕ_r malzemenin artık kesme direnci açısı, c_a görünür kohezyonu, τ_p en büyük kesme dayanımı, σ_n sabit normal gerilmedir. (Şekil 2.18)



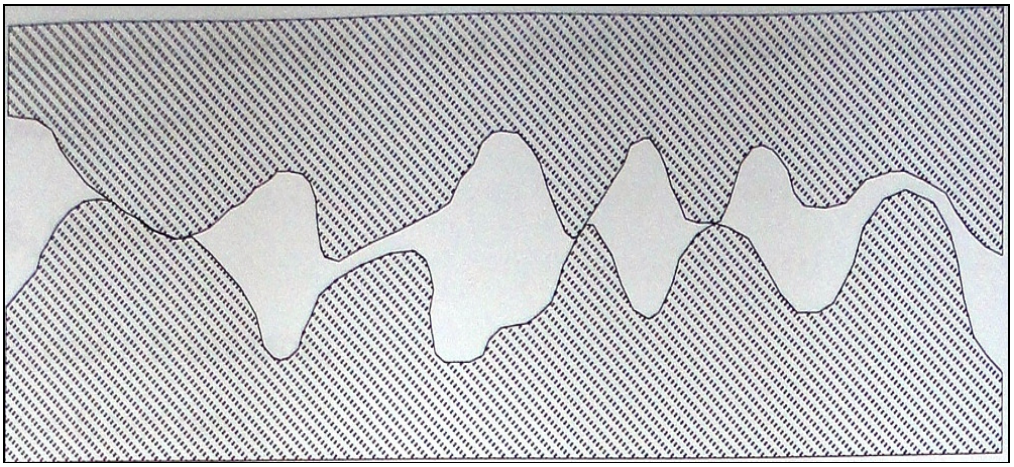
Şekil 2.18 : Testere dişli modeller için deney örneğinin dilatasyonu ve pürüzlülüğünün kesilme aşamaları için kuramsal Mohr zarfı [2]

[26]' 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 2.19 a). (2.5) 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 uygulanan kesme kuvvetinin doğrultusuna dik yönde dilatasyon gerçekleşecektir. Dilatasyon 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 2.19 b). Dilatasyon ve kesilme olayları ile bunlara karşılık gelen kesme yükü - yatay yer değiştirme eğrilerinin şematik sunumu kuramsal olarak (Şekil 2.19 c) de verilmiştir.



Şekil 2.19 : Testere dişli modeller için dilatasyon ve kesilme olaylarının şematik sunumu [28] a) başlangıç durumu, b) dilatasyon ve sonrası pürüzün tepe kısmından kesilmesi, c) dilatasyona izin verilmeyen yüksek normal gerilmelerde pürüzün tabanından kesilmesi.

Ancak [2]' 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 2.20).



Şekil 2.20 : Doğal süreksizliklerde yüzeyler arasındaki değme alanları [26]

[27], modellerden yapay oluşturulmuş 200' den fazla çekme çatlağı üzerinde yaptığı laboratuvar kesme deneyleri sonucunda, bu modellerin en büyük kesme dayanımını,

$$\tau = \sigma_N tg\left[JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_N} \right) + \phi_b \right] \qquad \textbf{(2.6)}$$

şeklinde genelleştirilmiştir. 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.

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. [28], 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 dayanım, 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,

$$\tau = \sigma_N tg\left[JRC.JMC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_N} \right) + \phi_r \right] \qquad \textbf{(2.7)}$$

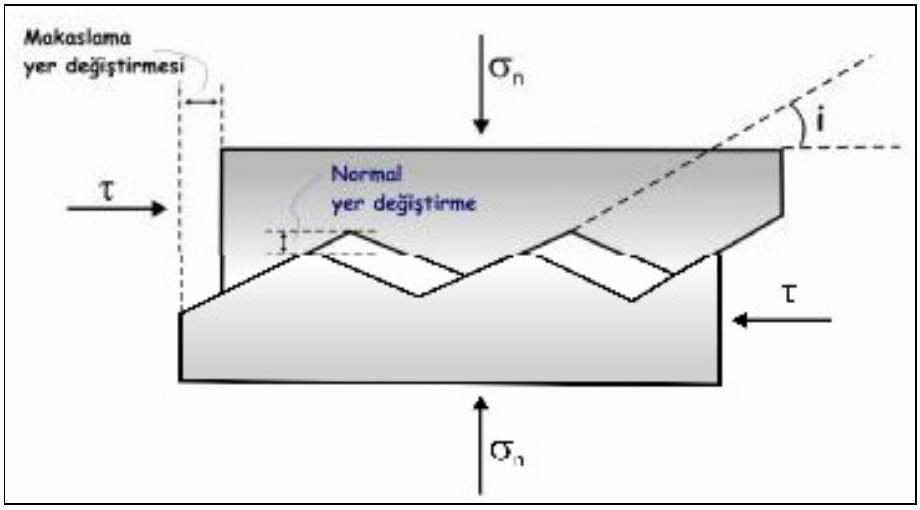
eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada; JMC çatlak uyumluluk katsayısı (joint matching coefficient) olup, JMC ≥ 0.3 koşulu tanımlanmıştır. JMC < 3 olduğu durumlarda ise, JMC = 3 olarak kabul edilmesi önerilmiştir. Bu ölçütlerin tümünde, süreksizlik düzlemlerinin yüzey geometrisi, bir başka deyişle pürüzlülük, 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.

Literatürde süreksizlik düzlemlerinin tanımlanmaları ve dayanım özellikleriyle ilgili birçok yayın bulunmaktadır. Bu bölümde tez konusuna yakın olan ve temel konuları içeren yayınlar özetlenmiştir.

Patton (1966) [2], pürüzlülük görüntülerini sayısal olarak tanımlayabilmek amacıyla görüntüleri formüle edebilen geometrik şekiller kullanmıştır. Patton, modelinde eklem yüzeylerini birbiri ile ötüşen testere dişlisi olarak tanımlamıştır. Böylece, süreksizlik davranışlarının kestirilmesine yönelik adımlar atmıştır (Şekil 2.21). Patton kesme düzlemi ile süreksizlik düzlemi arasındaki açıyı *i* ile göstermiştir ve örneğe etki eden kesme (makaslama) ve normal gerilmeyi *i* açısına bağlı olarak

aşağıdaki eşitliğe göre ifade etmiştir. Burada süreksizlik düzleminin sürtünme açısı ϕ_b ve pürüzlülük açısı ise *i* olarak tanımlanmıştır.

$$\tau = \sigma_n (\phi_b + i) \qquad \textbf{(2.8)}$$



Şekil 2.21 : Patton'a ait testere dişli pürüzlülük modeli [2]

[27], süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğünü sayısal olarak ilk kez tanımlamış ve deneye dayalı olarak ifade etmiştir. Yapmış olduğu deneyler sonucunda pürüzlü yüzeyleri 0 ile 20 arasında değişen değerlerle tanımlamıştır.

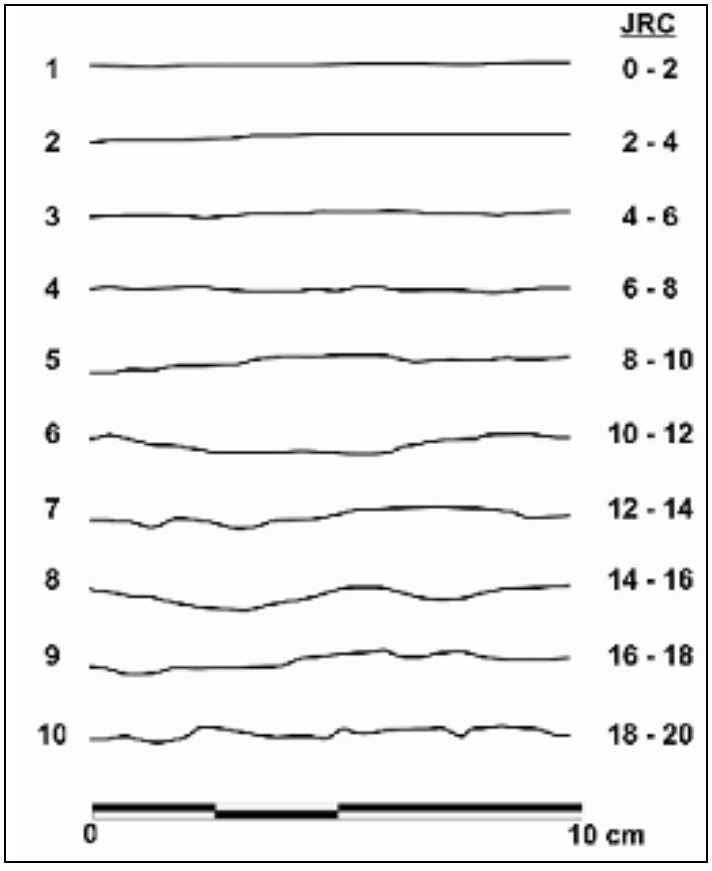
[29], Barton'un bir önceki çalışması deneysel çalışmalarla desteklenerek ve deneyler arasındaki sonuçlar birleştirilerek tekrar yorumlanmıştır. Barton 1976 yılında yapmış olduğu çalışmada düşük normal gerilmelerde kabarmaların olacağını ve normal gerilme değerinin tek eksenli basma dayanımı değerine eşit olduğu durumlarda ise kabarmaların tamamen önleneceğini belirtmiştir.

[3], pürüzlülük görüntülerini ölçek bazında sayısal bir şekilde ifade etmişlerdir (Şekil 2.22). Eklem görüntülerini pürüzlülük açısından tanımlamak amacıyla pürüzlülük derecesini belirtmede kullanılan Eklem Pürüzlülük Katsayısı (JRC) değerlerini önermişlerdir. Böylece eklem pürüzlülüğünün sayısal olarak tanımlanmasına olanak sağlanmış ve kesme dayanımı değerlerinin belirlenmesinde önemli sonuçlar ortaya konmuştur. Süreksizlik düzlemleri üzerindeki pürüzlülüğün kesme dayanımı üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla da bir çok çalışma yapılmıştır. Böylece 1976'de Barton tarafından yapılan çalışmanın sonuçları aşağıdaki eşitliğe indirgenmiştir.

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(\phi_b) \qquad \textbf{(2.9)}$$

Barton'un 1976'da önermiş olduğu ilk eşitlikteki çekme sonucu oluşan pürüzlü eklemlerin üst sınırı olan 20 sabiti eklem pürüzlülük katsayısı ile yer değiştirmiş ve eşitlik aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir. Böylece JRC değerinin eklem kesme dayanımı ile basma dayanımı arasındaki ilişki olduğu ortaya konulmuştur.

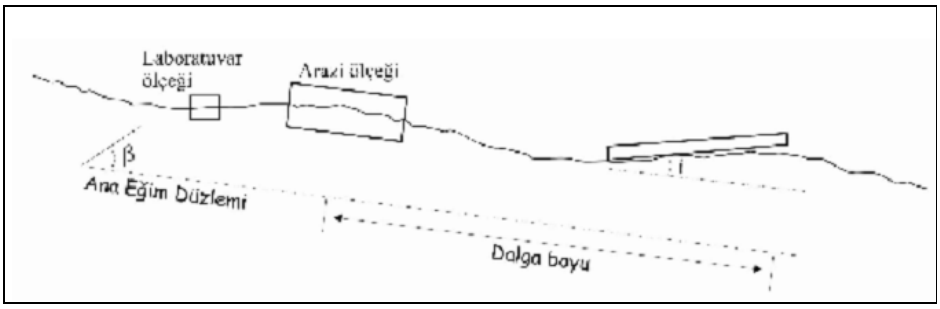
$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan\left[(JRC)\log\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_n}\right) + \phi_b\right] \qquad \textbf{(2.10)}$$



Şekil 2.22 : Pürüzlülük görüntüleri ve eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) [3]

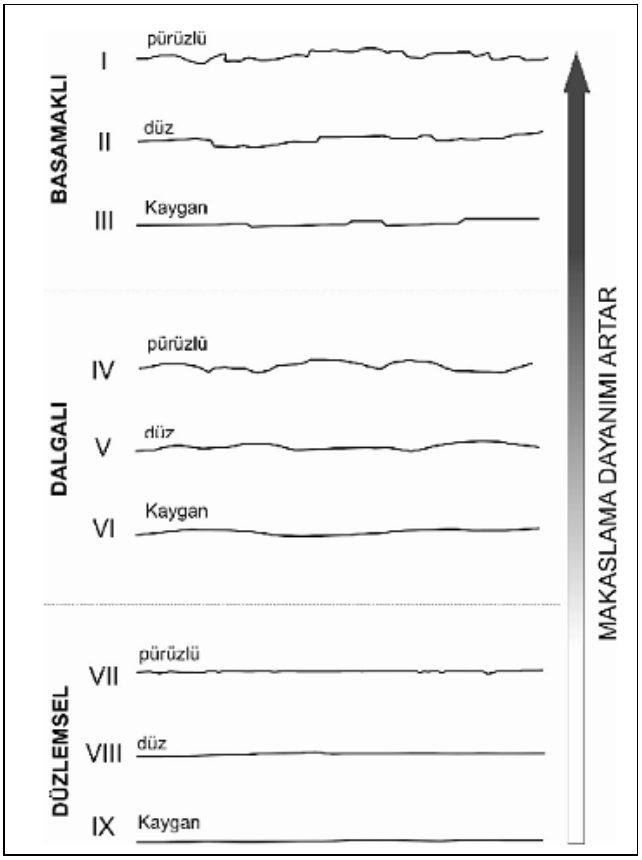
[4], pürüzlülük ölçümlerini laboratuar (küçük ölçekli) ve arazi ölçümleri (orta ölçekli) olarak santimetrelik ölçümlerden birkaç metreye karşılık gelen ölçümler şeklinde tanımlamışlardır. Ayrıca, büyük ölçekli dalgalanmaların ise küçük ve orta

ölçekli pürüzlülükleri içerdiğini ve bunlar üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 : ISRM 1978'e göre farklı ölçeklerde gözlenen pürüzlülükler [4]

[30], pürüzlülüğü, basamaklı, dalgalı ve düzlemsel olarak üçe ayırmış ve pürüzlülük görüntüleri ile kesme dayanımı arasındaki ilişkiyi ifade ederek pürüzlülük kesme ilişkisini ortaya koymuşlardır (Şekil 2.24).



Şekil 2.24 : ISRM, 1981'e göre pürüzlülük görüntüleri ve kesme dayanımı [30]

[31], 124 profil üzerinde yaptıkları bir çalışmada JRC değerlerini standart profillerle karşılaştırmış ve elde ettikleri sonuçlardaki ortalama hatanın %20 olduğunu belirtmişlerdir. Böylece pürüzlü yüzeylerin görüntüsünün JRC ile karşılaştırılmasının

sorgulanması gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca, süreksizlik yüzeyleri üzerinde gelişen kesme dayanımını değiştiren fonksiyonları açıklamıştır. Buna göre kesme dayanımının; normal gerilmelere, dolgu malzemesinin özelliklerine ve kalınlığına, süreksizlik yan duvarlarının pürüzlülüğüne ve dayanımına, kesme kuvvetinin yönü gibi özelliklere bağlı olduğunu açıklamıştır. [28], süreksizlik düzlemlerindeki bozuşmalar nedeniyle her bir süreksizlik düzleminin farklı pürüzlülük değerine sahip olduğu belirterek eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) modeline eklem örtüşme katsayısı (JMC) değerini eklemiştir. Bu çalışmada 0 ile 1 arasında değişen sayısal değerler ifade edilmiştir. Sıfır değeri eklem yüzeylerinde örtüşmenin olmadığı, 1 değeri ise eklem yüzeylerinin tam olarak örtüştüğünü göstermektedir.

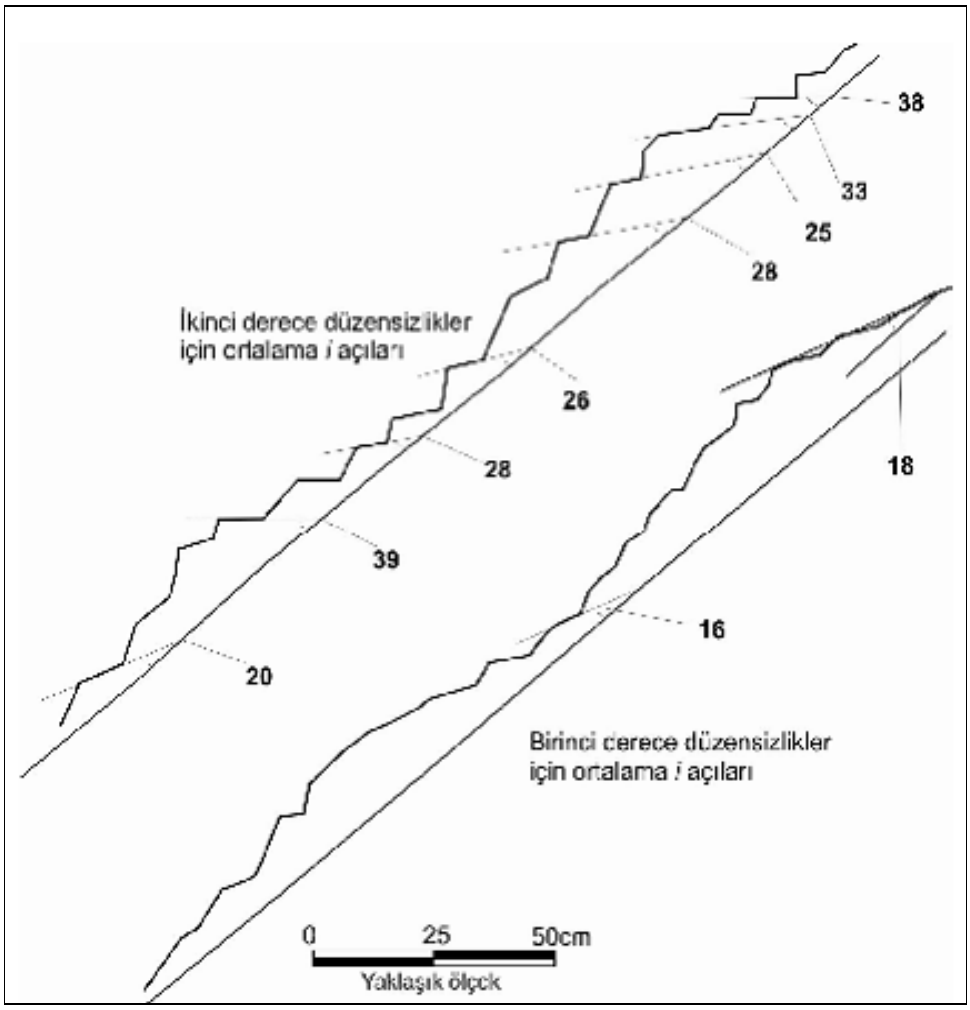
Süreksizlik düzlemlerinde stabilite açısından pürüzlü bir yüzeyin en önemli bileşeni sürtünme açısıdır. Pürüzlü bir düzlemin sürtünme açısı iki bileşen içerir. Bunlar kaya malzemesinin sürtünme açısı (f) ve yüzeyin düzensizliklerinin ortaya çıkardığı kenetlenmedir (*i*) [32]. Tasarım çalışmalarında pürüzlülük toplam sürtünme açısının önemli bir bileşeni olduğundan pürüzlülüğün tanımlanması gerekmektedir. Bu konuda Barton (1973) tarafından önerilen Eklem Pürüzlülük Katsayısı (JRC) değeri pürüzlülük tanımında en yaygın olarak kullanılan yaklaşımdır. JRC değeri için pürüzlü ve dalgalı yüzeylerde 20 değeri kullanılırken dalgalanma ve pürüzlülüğün azaldığı düz bir yüzey için sıfır değeri kullanılmaktadır. JRC değeri ile yüzey pürüzlülüğü (*i*) arasındaki doğrusal ilişki ise,

$$i = JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma^{'}}\right) \qquad \textbf{(2.11)}$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Bu bağıntıda, JCS (Eklem Basınç Dayanımı) süreksizlik yüzeylerine komşu kayanın basınç dayanımı v s^1 süreksizlik yüzeyindeki efektif normal gerilmedir. Patton (1966)'ya göre bir düzlem üzerindeki düzensizlikler birinci derece ve ikinci derece şeklinde iki sınıfa ayrılır. Birinci derece düzensizlikleri Patton (1966), tabakalanma yüzeyindeki ana dalgalanmalara karşılık gelenler olarak tanımlamıştır. İkinci derece düzensizlikleri ise, süreksizlik düzlemindeki küçük tümsek ve ripıllar olarak tanımlamıştır.

İkinci derece düzensizliklerin *i* açısı her zaman için birinci derece düzensizliklerin açısından daha büyüktür (Şekil 2.25).



Şekil 2.25 : Pürüzlü yüzeylerde birinci ve ikinci derece düzensizliklerdeki *i* açısına ait yaklaşık değerler [2]

Kaya şevlerde süreksizlik düzlemlerinin kesme dayanımı, yüzey pürüzlülüğü dışında, kayanın yüzey dayanımına, uygulanan normal gerilmeye ve kesme yer değiştirmesine bağlıdır. Yüzey düzensizliklerinin kırılma açılarının fazla olması, o yüzeyin sert pürüzlülüklerinin olmasına bağlıdır. Yüzey düzensizliklerinin kırılma açılarının az olması, o yüzeyin yumuşak pürüzlülüklerinin olması anlamına gelmektedir. Kırılma açıları arttıkça düzensizlikler ikinci derece düzensizliklere yaklaşmaktadır. İkinci derece düzensizliklerde sürtünme kuvveti, birinci derece düzensizliklerdeki sürtünme kuvvetinden daha fazladır. Bu durum, sürtünme katsayısı ile doğru orantı göstermektedir.

2.3 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçe Yöntemleri

Ölçme işlemine genel olarak bakıldığında, ölçülen kriter ve ölçme yöntemi ne olursa olsun, ölçme işleminden beklenen en önemli sonuçlar, ölçme yönteminin ve sonuçlarının doğruluğu, gerçekliği ve kesinliği olmuştur. Seçilen ölçme yönteminden elde dilen sonuçların tekrarlanabilir ve yeniden elde edilebilir olması, ölçme sonuçlarının doğruluğunu etkilemektedir.

Ölçme yönteminin gerçekliliğinin ve kesinliğinin, uluslararası bir kritere dayalı, pratikte uygulanabilir ve bütün ölçme yöntemlerini ve sonuçlarını kapsayan yöntemlerin ortak özelliği olması gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğünü ölçmeyi esas alan yöntemlerin incelenmesinde ve tanıtılmasında uluslararası benimsenen kriterlere uygunluk dikkate alınmıştır.

2.3.1 Dokunma yöntemi

En eski ve hala kullanılabilen bir metottur. Bir iğne, kalem ve hatta tırnak ucunun bir yüzey üzerine işleme yönüne dik olarak sürülmesiyle, yüzeyin pürüzlülüğü hakkında bilgi edinilebilmektedir.

2.3.2 Yüzey dinamometresi yöntemi

İki yüzey arasındaki sürtünme katsayısının, sürtünen parçaların yüzey pürüzlülüğüne bağlı olmasından hareketle, sürtünme katsayısının dinamometre ile ölçülmesi sırasında, elde edilen F kuvveti yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılı olarak elde edilmektedir.

2.3.3 Karşılaştırma mikroskobu yöntemi

Cihazın çıplak gözle bakılan ekranında; hem kontrolü yapılacak yüzeyin büyütülmüş kesitini, hem de arka planda kıyaslamaya esas alınan referans yüzeyin büyütülmüş kesitini birlikte görmek esasına dayalı bir metottur. Bu kıyaslamada; aynı malzemeden yapılan, aynı işleme yöntemiyle en iyi sonucu veren iş parçasının görünüşü referans alındığında, aynı grubu oluşturan diğer iş parçalarının uygunluk kontrolü kolayca yapılabilmektedir.

Karşılaştırma hassasiyeti, özel mikroskoplar yardımıyla 15x-200x kat arasında yükseltilebilmektedir. Kontrol edilecek parça yüzeyi ile standard örnek yüzeyi karşılaştırma mikroskobu altında aynı ışık konumu ve aynı oranda büyütme ile aynı

zamanda yan yana getirilerek mukayese edilmektedir. Lambalardan gelen ışık demeti kondansatörden geçerek, demetleri ikiye bölen tüp aracılığıyla standard örnek yüzeye sevk edilmekte, demetin diğer yarısı ise objektif ve diyaframdan geçerek kontrol edilecek yüzeye sevk edilmektedir. Diyafram, görüş sahasının biri solda, diğeri de sağda olmak üzere yan yana oluşacak şekilde yerleştirilmiştir.

2.3.4 Optik yansıtma yöntemi

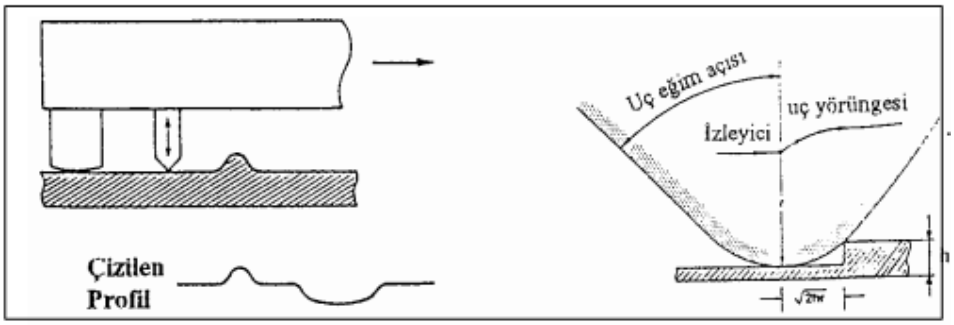
Bir yüzeyin ışığı yansıtma gücü, pürüzlülüğün bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Eğer ışığın dalga (λ) boyu Rq değerinden çok büyükse yansıtma gücü sadece yüzey pürüzlülüğüne bağlı olmamakta, düzensizliklerin eğimi dikkate alınmamaktadır. Bu şartlarda ρ0'ın (pürüzsüz yüzeyin yansıtma katsayısı) ρ'ya (pürüzlü yüzeyin yansıtma katsayısı) oranı aşağıdaki eşitlikle bulunmaktadır.

$$\log_{10}\frac{\rho_0}{\rho} = (4\pi Rq)^2 / (2{,}303)\lambda^2 \qquad \textbf{(2.12)}$$

Yüzeyin iki ayrı dalga boyunda ölçülmesi, yüzey pürüzlülüğünün ve pürüzlülük eğimlerinin Rq değerlerinin hesaplanmasına imkan vermektedir.

2.3.5 İzleyici uçlu (stylus) cihazlar yöntemi

İzleyici uçlu cihazlar, çok sivri bir izleme ucu kullanılarak ölçüm yapılan yüzey üzerinde, yüzey düzensizliklerine çapraz yönde ve değerlendirme uzunluğu boyunca hareket ettirilirken meydana gelen titreşimlerin büyütülerek, hareketli bir şerit üzerine kaydedilmesi veya göstergeden okunması esasına dayanmaktadır. İzleyici uçlar yöntemindeki hata miktarları, diğer yöntemlere göre daha fazladır. Bunun sebebi ise, kullanılan ucun yüzey üzerinde deformasyonlara uğraması ve sağlıklı okumalar yapamamasından kaynaklanmasıdır. Mekanik, panömatik, elektronik veya optik destekli imal edilen cihazlarda izleyici ucun yüzey üzerindeki baskısı çok az, pürüzlülük büyütme oranı 100.000 kata kadar olabilmektedir. İzleyici ucun mekanik yer değiştirmelerini kolayca elektrik sinyallerine dönüştürebilen elektrik donanımlarda kullanılan iki çeşit transdüser tercih edilmektedirler. Mekanik olarak kullanılan aletlerin doğruluğu optik olarak kullanılan aletlerin doğruluğundan daha fazladır. Optik olan aletler yüzey üzerine temas etmemesinden dolayı yüzeye zarar vermemektedir.



Şekil 2.26 : İzleyici Uç Prensibi

Pikap iğnesi gibi yüzeyde doğrusal bir hat boyunca kayıt yapan araçlar (Stylus tipi araçlar) işlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde basit bir yöntem olarak yaygınlık göstermiştir (Şekil 2.26). İğnenin uç yarıçapı, yüzeyin pürüzlülüğünü değerlendirmeye imkan verecek ölçüde küçük olarak seçilmelidir.

Ucun geometrisinin mükemmel olmayacağı ve elmas ucun dahi zamanla aşınacağı dikkate alınırsa, uç yarıçapına bağlı olarak sonuçların okunmasına ilişkin hataların çıkacağı belirtilmiştir. İşlenmiş yüzeylerde oluşan pürüzün şekli ve uç yarıçapından kaynaklanan hataya örnek olarak, 60º açılı konik izleyici bir ucun, hipotetik bir yüzeyde enine hareketi ile elde edilen temsili izinin şekli, (Şekil 2.27) de gösterilmiştir.



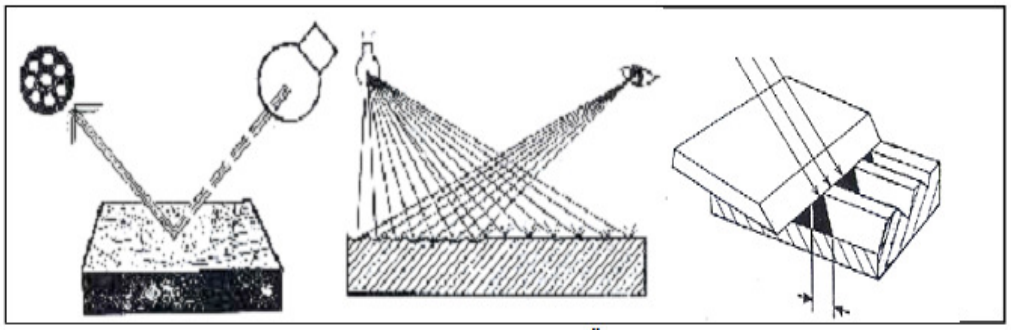
Şekil 2.27 : İzleyici Uçtan Kaynaklanan Ölçme Hatası

2.3.6 Işık yansıması (interferometri) yöntemi

Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde ışık yansıması yöntemi, yüzeye açılı olarak yansıtılan ışınkların bağıl miktarının gözlenmesi esnasına dayanmaktadır. Yüzey pürüzlülüklerinin büyüklüğünden ziyade malzemenin şekli, yansıyan ışın miktarını belirlemektedir.

Bu metotda, ışın huzmesi bölünüp iki ayrı uzunluktaki yoldan gönderildikten sonra birleştirilmekte ve bu ışığın yoğunluğu, en büyük veya en küçük değerde elde edilmektedir. Bu durum; ışınların aynı fazda ya da 180 derece faz farkında bulunmalarına bağlı olmaktadır. Demetlerden birinin küçük bir alana yansıtılmasıyla

elde edilen büyütülmüş ışın kırılma modeli yoluyla yüzey pürüzlülüğü incelenebilmektedir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 : Işık Yansıtma Yöntemiyle Ölçme Prensibi

Işık yansıması yönteminin bir çeşidi mikro interferometre yöntemi ile yüzey pürüzlülüklerinin veya düzgünlüklerinin ölçülmesidir. Mikro interferometre yöntemi, üst üste gelen ışınlarda birbirine göre yarım dalga boyu büyüklükte olanların yok olacağı prensibine dayanmaktadır. İşlenmiş yüzeylerde işleme esnasındaki eğrilerin hassas bir şekilde derinliğini hesaplamak mümkün olabilmektedir.

Düz olduğu varsayılan kenarın açılı olarak yüzeye izdüşümünü sağlamak veya düz bir kenarın yüzeye çaprazlama yerleştirilmesi esasına dayanan bir diğer ışın yansıması yöntemi, optik kesme yöntemidir. Bu metot, ışın demetlerinin boylarındaki sapmaların ölçümlerinin mikroskop ile alınması esasına dayandırılmıştır. Bu metot kaba işlemeden sonraki yüzeylerin hatta hiç işlenmemiş yüzeylerin pürüzlülük ölçümünde çok daha kullanışlı olmaktadır.

2.3.7 Fotoğraf yöntemi

Yüzey pürüzlülüklerinin kıyaslanarak yorumlanabileceği bu yöntem, yüzey fotoğraflarının büyütülmesiyle yapılmaktadır. Yüzeylerde çalışma ve mukayese yapıldığında elde edilen bilgilerin dosyalanması, gruplar arasında tartışılması ve spesifik mukayesenin yapılması açısından önemli ve tercih edilen bir yöntem olduğu görülmektedir. Net görüntülü fotoğraflarda, yüzeyler arasındaki küçük sapmaları ayırt etmek mümkündür. Yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ortalaması için gerekli olan sayısal değer bu yöntemle elde edilememektedir. Derinliği yansıtan gölgelerin görünümü pürüzlülüğün yorumlanmasında önemli bir rol üstlenmektedir.

Litaretür taramasından elde edilen yüzey pürüzlülük ölçme yöntemleri, ölçme hızı dikkate alınarak, (a) uygulama şekli bakımından tahribatlı veya tahribatsız, temaslı

veya temassız (b) ölçme hassasiyeti bakımından ise kaba, orta veya hassas olarak gruplandırılmıştır. Uygulamalara bakıldığında derlenmiş olan bu 30 metottan bazıları genel kullanım açısından tatmin edici netice vermemekle birlikte kabul edilebilir durumlarda olumlu sonuçlar vermektedir. Bu metotlar genellikle "kaba" olarak gruplanan bölümde yer almaktadır. Bu yöntemler parçanın fonksiyonuna bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Üretimde kullanıldığı, şartlardan doğan problemler için tatmin edici sonuçlar vermişler ve parçanın kabul işlemleri için kullanılmışlardır. Bu metotlar, ortalama bir yüzey pürüzlülük değeri ölçmemekte ve son kararı kullanıcının vermesi bu gruba giren pürüzlülük ölçme alet ve cihazlarının güvenilirliğini azaltmaktadır.

Ulaşılması zor olan yerlerdeki yüzey pürüzlülüğü, incelenen yüzeyin bir kopyasının hazırlanması ve kopya yüzeyin üzerindeki mikro düzensizliklerin, daha önce anlatılan yöntemlerden uygun olan biri kullanılarak ölçülmesiyle elde edilebilmektedir. Kopya çıkarılırken incelenen yüzeyin profilinin % 2-3'ten fazla bozulmaması gerektiği ayrıca vurgulanmıştır. Pürüzlülüğü 0.05 µm ve daha küçük olan değerlerin elde edildiği yöntemler "hassas" olarak değerlendirilmiştir. Diğer yöntemlerin ise, "orta" grubu teşkil ettiği kabul edilmiştir.

Temaslı grubu oluşturan yöntemlerin çoğunun ölçme hassasiyeti bakımından kaba veya orta grupta olduğuna dikkat edilmelidir (Çizelge 2.5). Temastan kaynaklanan ölçme hatalarının yöntemin tabii yapısından kaynaklandığı ve ölçme sonuçlarında oluşan toplam sistematik hatanın büyük olduğu unutulmamalıdır.

Temassız gurubu oluşturan yöntemlerin çoğunun ise hassas olarak değerlendirilen kısımda yer aldığı görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde, pürüzlülük aralığı, pürüz tepelerinin ve yanaklarının yaptığı açılar, pürüzlülük dağılım eğrisi gibi önemli kriterler etkili olmaktadır. Bu kriterlerin gözle tespitine ve değerlendirilmesine imkan veren pürüzlülük grafiklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Grafik alma özelliği olan cihazlar pürüzlerin kaydedilmesi yönüyle daha somut ve kapsamlı bilgilenme ve karar vermeye yardımcı olması bakımından tercih edilmektedir.

Çizelge 2.5 : Yüzey pürüzlülük ölçme yöntemleri ve özellikleri

	ÖLÇME YÖNTEMİ	UYGULAMA ŞEKLİ				ÖLÇME HASSASİYETİ		
		Tahribatlı	Tahribatsız	Temaslı	Temassız	Kaba	Orta	Hassas
1.	Dokunma Yöntemi		•	•		•		
2.	Mekanik Çalışma Yöntemi	•		•		•		
3.	Hidrolik Metot		•	•		•		
4.	Pnömatik Metot		•		•			•
5.	Yüzey Dinamometresi	•		•		•		
6.	Kapasitans Yöntemi		•		•		•	
7.	X Işını Yöntemi		•		•			•
8.	Elektron Mikroskobu Yöntemi		•		•			•
9.	Optik Mikroskop Yöntemi		•		•	•		
10.	Kesit Alma Yöntemi	•		•		•		
11.	Karşılaştırma Mikroskobu Yöntemi		•		•	•		
12.	Optik Yansıtma Yöntemi		•		•			•
13.	Optik Parazit Aletleri Yöntemi		•	•			•	
14.	Işık Yansıması (İnterferometri) Yöntemi		•		•			•
15.	Replika (Mask) Yöntemi		•	•		•		
16.	Standart Örnek Yüzeyler Yöntemi		•		•	•		
17.	Işık Bantlı Mikroskop Yöntemi		•		•			•
18.	Elektro-Fiber Optik Sistem Yöntemi		•		•			•
19.	İnterferans Mikroskop Yöntemi		•		•			•
20.	Kisilev Profilometresi Yöntemi		•	•				•
21.	Yaylı Tip Profilometreler Yöntemi		•	•				•
22.	Elektrikle Çalışan Profilometreler Yöntemi		•	•				•
23.	Levin Profilografi Yöntemi		•		•		•	
24.	Linnik İkili Mikroskobu Yöntemi		•		•	•		
25.	Hava Mastarı Yöntemi		•		•	•		

3. 3B LAZER TARAMA

3.1 Lazer Tarama Teknolojisi

Yersel lazer tarama, geleneksel ölçme teknikleri ile kıyaslandığında 3B nokta bilgilerinin çok yüksek hızla elde edilebildiği bir ölçme tekniğidir. Ölçme alanının 3B nokta bilgileri, nokta dizileri şeklinde yüksek doğrulukla ölçülebilmektedir. Yersel lazer tarayıcılar pek çok ölçme uygulamasında, özellikle tarihi yapıların röleve çalışmalarında giderek artan bir oranda kullanılmaktadır.

Yersel lazer ölçmelerinde temel büyüklük, alet ve ölçülen nokta arasındaki mesafedir. Lazer mesafe ölçümü için farklı teknikler kullanılmaktadır. Bunlar; üçgenleme, faz farkı ölçümü, ışığın gidiş/dönüş zamanı ölçümü ya da puls metodudur. Yersel lazer tarayıcılarda, kısa zaman aralıklarıyla lazer pulslarının gönderilmesi ve ölçülmesi esasına dayanan puls metodu kullanılmaktadır [33].
Sensör teknolojisi ve bununla ilgili yazılım araçlarındaki hızlı gelişme; mühendislik çalışmaları, tarihi ve kültürel eserlerin dokümantasyonu ve kent alanlarının 3B modellenmesi, madencilik çalışmaları, deformasyon analizi ve orman alanları ölçümü gibi pek çok alanda geometrik verilerin elde edilmesinde yersel lazer taramayı önemli bir yöntem haline getirmiştir. Yersel lazer tarama tekniklerinin ortaya çıkmasıyla birlikte; sensör modelleme, detay çıkarma, nokta bulutu (point cloud) oluşturma, veri birleştirme ve diğer pek çok alanda yeni araştırma alanları ortaya çıkmıştır.

Yakın resim fotogrametrisi ve yeni bir teknoloji olan yersel lazer tarama tekniğinin birlikte kullanılması 3B model oluşturmada, obje sınıflandırmada ve sanal gerçeklik uygulamalarında yeni fırsatlar ortaya çıkarmıştır. Lazer tarama teknolojisi ve yakın resim fotogrametrisi, birbirini tamamlayıcı yöntemler olarak görülebilir. Örneğin, yersel lazer tarayıcılarla bir objenin 3B bilgileri çok yüksek çözünürlükte ve hızlı bir şekilde elde edilebilir. Aynı bilgiler yakın resim fotogrametrisi kullanılarak da elde edilebilir ancak, yakın resim fotogrametrisinde aynı bilgilerin elde edilmesi bir operatörün çok yoğun çalışmasını gerektirir. Yersel lazer tarayıcılar çok yüksek

çözünürlükte değildir, oysa yakın resim fotogrametrisinde yüksek çözünürlüklü digital kameralar kullanılır. Yersel lazer tarayıcılar aletin kurulabildiği zemin noktasından belli yatay ve düşey açılar altında objeyi görüntüleyebilirken, kamera obje etrafında hareket ettirilerek objenin tamamı görüntülenebilir [34].

Lazer tarama işlemiyle elde edilen nokta bulutundan; temel ölçme verileri, ortofoto görüntüler, 2 veya 3 boyutlu çizimler, 3B animasyon, katı yüzey modelleri yada doku giydirilmiş 3B modeller elde edilebilir. Etkin bir veri toplama tekniği olan lazer tarayıcılar hem ölçmecilere hem de bu ölçüleri kullananlara büyük kolaylıklar sağlar. Lazer tarama yönteminin avantajları;

· Hızlı ve obje ile temas kurmadan ölçme,
· Aynı ölçme alanı için daha fazla veri toplama,
· Lazer ölçülerinin var olan başka tür ölçülerle kolayca entegrasyonu,
· Daha güvenli veri toplama imkanı,
· Yüksek doğruluklu DTM üretebilme,
· Gerçek renkli görüntü üretebilme,
· Ölçme alanının belirli periyotlarla tamamen ölçülebilmesi

olarak sıralanabilir [35].

Lazer teknolojisi alanındaki araştırmalar, 1960 yılından bu yana 40 yılı geçkin bir tarihe sahiptir. Yersel lazer tarama teknolojisinin bir ölçüm aracı olarak gerçekten bir araştırma alanı haline gelmesi sadece, bu son 10 yılda olmuştur. Tek renklilik, iyi kolimasyon, yüksek güç, kısa atımlar veya lazer ışığının ayarlanmasının muhtemelliği gibi lazer radyasyonunun belirli niteliklerinden dolayı ölçümler için kullanılan bu teknolojinin avantajı, daha yeni fark edildi. Hızlı ve minimum giderle, acilen bütün obje (3B model) hakkında eksiksiz 3 boyutlu geometrik ve görsel bilgiye ulaşmak lazer tarama teknolojileri ile olmaktadır.

Örneğin geleneksel jeodezik ölçüm metotları, tüm yer ölçümü veya gerçek zamanlı (RTK) GPS ölçümleri, objenin hızlı bir şekilde geometrik ve görsel bilgilerine ulaşmak için çok uygun değildir. Bunlar sadece tek tek nokta ölçümüne izin verir. Bu nedenle bu metotlar genellikle yavaştır. Modern reflektörsüz total stationlar ve diğer gelişen teknolojilerde de nokta bazlı tarama fonksiyonları vardır. Fakat tarama süresinin fazlalığı, elde edilen nokta sayısının azlığı, taranan objenin gerçek modeline uygun nokta kümelerinin elde edilemeyişi, yersel lazer tarama teknolojisini ön plana çıkarmıştır.

Dijital fotoğraflama metotları, özellikle kültürel miras kaydında ve mimari ölçümlerde etkili, ama hala bazı eksiklikleri vardır. İlk olarak modelin analiz edilebilmesinden önce, resim işleme ve yöneltme gereklidir. Buda bize gösteriyor ki datadan verimli bilgi alma yolu, tarama teknolojisine göre daha uzundur. İkincisi, çok elverişsiz dış koşullu ortamlar (yetersiz aydınlatma, toz vs.) için uygun değildirler. Bu nedenle, obje geometrisinin yüksek doğrulukla 3 boyutlu ölçümüne direkt izin veren başka bir tekniğin uygulanması gereğini getirmektedir. Böyle bir teknik 90'lı yılların sonu ve 2000'li yılların başında ortaya çıkmış ve buna Yersel Lazer Taraması (TLS - Terrestrial Laser Scanning) tekniği denilmiştir. Jeodezik ölçüm tekniği olarak TLS üzerine kapsamlı araştırma 2000'den sonra başlamıştır. Bugüne kadar son yedi yılda TLS alanında gerçek bir canlılık görülmüştür.

3B lazer tarayıcı teknolojisi, yeni teknoloji alanında yeni bir gelişim yönünün önünü açmıştır. Bu yüzden, birçok bilim adamı ve üretici firma, bu teknolojinin öneminin farkına varıp daha fazla ilgi duymaya başlamışlardır. Son yıllarda, bu konuyla ilişkili pek çok teknoloji ve ürünler piyasaya çıkmıştır. Bugünlerde, birçok şirket ve araştırma enstitüsü, bu teknoloji için araştırma yapmak ve sistemi geliştirmek ve 3B sisteminin yerini alabilecek kendi ürünlerini yaratabilmek için çok fazla para ve insan gücü sarf etmektedir [36].

3.2 Yersel Lazer Tarayıcılar

Lazer tarayıcılarla, ölçülecek alanın 3B nokta verileri istenilen aralıklarla çok yüksek hızla ölçülür. Tarayıcıların tarama teknikleri satır tarama yada sütun tarama şeklinde olabilir.

Tarayıcıların çoğu ölçülecek alanın tamamı için satır yada sütunlar oluşturacak şekilde hareket ederek tarama yapar. Bunlardan farklı olarak Optech Ilris 3B lazer tarayıcı aleti ölçülecek alanı fotoğraf karelerine böler ve her fotoğraf karesini bir sonraki fotoğraf karesi ile bindirmeli olarak yatay satırlar halinde tarar. Tarayıcının veri aktarma yazılımı (Parser), görüntü eşleme tekniği ile her bir fotoğraf karesine düşen taramaları bir sonraki tarama ile birleştirerek o noktadan yapılan taramanın bütününü oluşturur. Tarama tekniği aletlerin doğrulukları ile ilgili olmayıp daha çok fonksiyonel olmalarıyla ilgilidir.

Pek çok marka ve modelde lazer tarayıcı bulunmaktadır (Optech, Riegl, Leica, Zoller+Fröhlich, Faro, Mensi, I-Site, vb.). Bunlardan bazılarına ait teknik özellikler (Çizelge 3.1) de verilmiştir. Tabloda verilen ışınsal açıklık aynı zamanda taranabilecek en küçük tarama aralığını da ifade etmektedir. Bu tarayıcıların ölçme prensipleri aynı olmakla birlikte ölçme uzunlukları, fonksiyonları ve kullanılışlarında farklılıklar bulunmaktadır. Tarayıcıların çoğunda bulunan digital kameralar sayesinde ölçülen noktalara renk değeri atanarak renkli nokta bulutu elde edilebilmektedir.

Çizelge 3.1 : Bazı lazer tarayıcılar ve teknik özellikleri

Marka	Model	Ölçme Mesafesi(m)	Ölçme hızı	Tarama Açısı	Mesafe doğruluğu	Konumsal doğruluk	Işınsal açıklık
Optech	Ilris 3D	3m-1500m (%80 yansıtıcı yüzey)	2500 nokta/san	310° (V) 360° (H)	7 mm @ 100 m	8 mm @ 100 m	0.00974°
Riegl	LMS-Z420	2m-1000m (%80 yansıtıcı yüzey)	12000nok/san	0-80°(V) 0-360°(H)	8mm@50m	10mm@50m	0.25mrad
	LMS-Z390	1m-300m (%80 yansıtıcı yüzey)	11000nok/san	0-80°(V) 0-360°(H)	4mm@50m	6mm@50m	0.25mrad
	LMS-Z210	4m-650m (%80 yansıtıcı yüzey)	12000nok/san	0-80°(V) 0-360°(H)	10mm@50m	15mm@50m	2.7mrad
Leica	Scan Station	300m (%90 yansıtıcı yüzey)	4000 nokta/san	270° (V) 360° (H)	4mm@ 50m	6mm@ 50m	4mm@50m
	HDS3000	300m (%90 yansıtıcı yüzey)	4000nok/san	270° (V) 360° (H)	4mm@ 50m	6mm@ 50m	4mm@50m
	HDS4500 (53m)	53.5m	500000nok/san	310° (V) 360° (H)	5mm+120ppm (%100 yan.y)	13.7m@25m (%100 yan.y)	8.5mm@25m
	HDS6000	79m (%80 yansıtıcı yüzey)	500000nok/san	310° (V) 360° (H)	5mm@ 50m	10mm@ 50m	3mm+0.22mrad
Z-F	Imager5006	1m-79m	500000nok/san	310° (V) 360° (H)	0.1mm@50m	1mm@50m	0.22mrad
Faro	LS 880	1m-80m	120000nok/san	320° (V) 360° (H)	3mm	5mm	0.01°

3.2.1 Yersel lazer tarayıcı bileşenleri

Bir yersel lazer tarayıcı sistemi (TLS) şu bileşenlerden oluşur [37] :

- Tarama ünitesi (tarayıcı)
- Kontrol ünitesi
- Güç kaynağı
- Tripod ve Sehba



Şekil 3.1 : Trimble GS 101 yersel lazer tarama sistemi

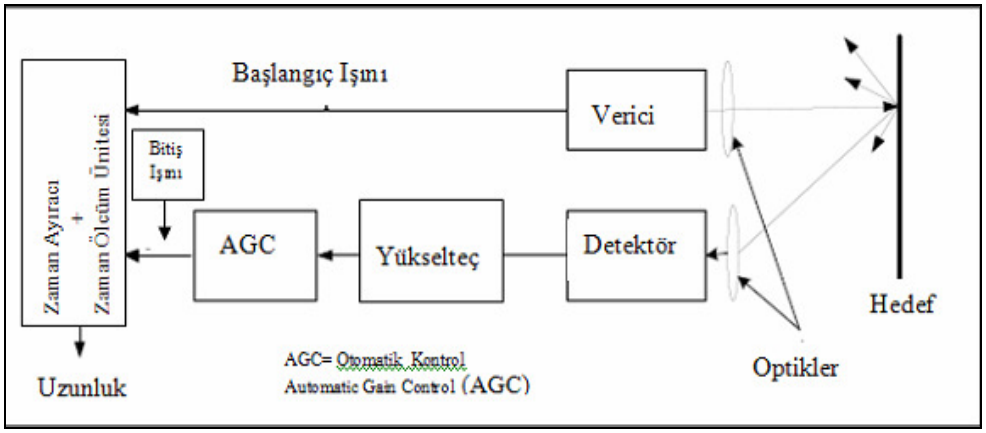
Tarayıcı ünitesi, boyut olarak bildiğimiz ölçü aletlerinden daha büyük bir yapıdadır. Bir Yersel Lazer Tarayıcının öz bileşeni tarama ünitesidir. Bu bileşen basitçe direkt 3 boyutlu veri yakalamak için kullanılan sistemdir. Bir lazer tarama ünitesi iki bileşenden meydana gelir. [38]:

- Lazer telemetresi (Lazer uzunluk ölçme sistemi)
- Lazer ışın saptırma ünitesi (Optik mekaniksel tarayıcı)

3.2.1.1 Lazer telemetresi

Bir lazer telemetresi şunlardan oluşur:

- Bir verici (Transistorlü lazer veya yarı geçirken lazer diyot)
- Alıcı kanal (Otomatik Algılama (AGC), detektör, yükselteç)
- Zaman ayırıcısı ve zaman ölçümü ünitesi (Dijital çevirici (TDC))
- Verici ve alıcı optikleri



Şekil 3.2 : Tipik atımlı lazer telemetrenin blok düzeneği

Lazer vericisi, biri alıcıya gönderilen ve zaman ölçüm ünitesini başlatan, diğeri objeye gönderilen iki parçaya ayrılmış başlangıç lazer atımı yayar. Detektör, obje yüzeyinden geri saçılmış lazer sinyallerinin algılanmasında kullanılır. Taranmış objenin yüzeyine erişildiğinde lazer atımı geri saçılır ve bir kısmı detektöre geri döner. Lazer atımının parlak gücü, elektrik akımında dönüştürülür. Alınan güç miktarı ses sinyali oranını ve mesafe duyarlığını etkilediğindin dolayı bu ilişkiyi analiz etmek önemlidir. Bahsedildiği gibi yayılmış lazer gücünün bir bölümü tarayıcıya dönecektir. Alınmış lazer gücü, verilmiş gücün çok küçük bir parçasıdır ve hedef yansımasındaki değişiklilere bağlıdır. Otomatik algılama kontrolü (AGC) vasıtasıyla zaman ölçümü ayarlanarak, alınmış atımın dinamikleri, optik veya elektriksel azaltıcı tarafından fark edile bilebilir. Lazer atımının geri saçılmış parçası, tespit edildikten sonra, zamanlamayı çalıştıran ve zaman ölçümü ünitesini durduran zaman ayırımcısına yollanır. [36]

Lazer telemetrelerde kullanılan değişmez parça ayrımı (CFD) tekniği kullanılarak, dönüş atımı iki parçaya bölünür bir parça geciktirilir. Daha sonra geciktirilmiş ve geciktirilmemiş atımların ana ve diğer kenarları, atımın yarı genişlik noktasından geçerken zamanlama çalıştırılır. CFD kullanımı dönüş atımının şekli ve genişlik değişimi tarafından kaynaklanan zamanlama hatalarını siler ve mesafe duyarlığını arttırır. Atımın yayılımı ve yüksek frekans osilatörü ile sayılan saat atımları numarası tarafından TDC ile ölçülen atımın geri saçılmış parçasının alınması arasındaki zaman aralığının (t) belirlenmesinde, analog iç değerleme metotu ile dijital sayım tekniği kullanılır [39]. Hedefin tarayıcıya olan uzaklığı şu şekilde hesaplanır:

$$R = c\frac{t}{2} \tag{3.1}$$

Atımlı lazer telemetreleri için belirli maksimum duyarlılıklı mesafe (Rmax) şunlara dayanır :

- TDC nin maksimum erimi (bit sayısı)
- Obje yüzeyi yansırlığı
- Lazer gücü
- Atmosferik iletim
- Işın sapması
- Dedektör duyarlılığı

3.2.1.2 Lazer ışını saptırma ünitesi

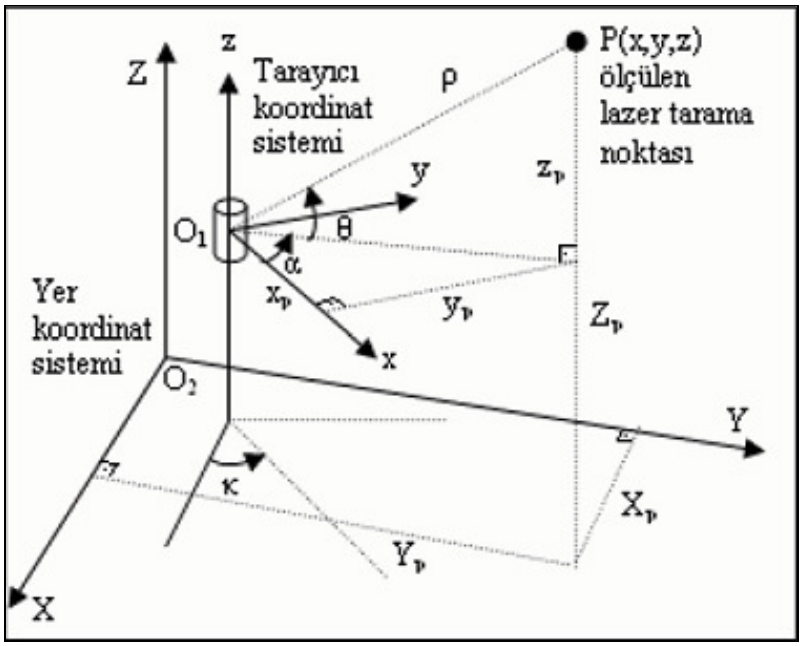
Obje veya alanın mekânsal (3B) ölçümlerini sağlamak için lazer ışın saptırma ünitesi kullanılır. Bu ünitedeki temel öğe dikey yönde ve bazen yatay yönde ışının sapmasını sağlayan tarama aynasıdır. Normalde 3 çeşit ayna kullanılır [40] :

- Dönen düz aynalar
- Dönen çokgen aynalar
- Dalgalı (Galvanometrik) aynalar

Tüm tarama işlemi ve veri kaydetmeyi kontrol etmek için, tarama yazılımı yüklü bir dizüstü (dizüstü) bilgisayar kontrol ünitesi olarak kullanılır. Bu kontrol ünitesi, tarama işlemi süresince toplanan veri miktarının büyüklüğü yüzünden yeterli veri işleme ve depolama kapasitesine sahip olmalıdır. Parlak gün ışığında ekranı gösterirken yaşanan bazı problemleri önlemek için bazı gölgelendirmeler sağlanmalıdır . Tarayıcı için güç kaynağı bir veya birkaç pildir. (Uygun 12V araba pili veya uygun bir pil) Bu genellikle tarayıcı için güç sağlar, bu nedenle ekstra piller ve bir şarj aleti kontrol ünitesi için gereklidir. Tarayıcılar, genellikle yer üzerinde toprak veya diğer uygun yüzeylere bir sehpa ya da tripot vasıtasıyla kurulabilir. Bazı tarayıcılar bilinen bir nokta üzerine yerleştirilebilir ve düzeçlenebilir. Bazı sistemler örneğin Callidus 1.1 tarayıcısı gibi, iç tarama için uygun olan tekerlekli tripot kullanabilir. [36]

3.2.2 Yersel lazer tarayıcı ölçme prensipleri

Lazer tarayıcılar, ölçülecek objeyi yatay ve düşey yönde belirli bir açı altında nokta dizileri şeklinde tarayarak nokta bulutu halinde görüntülenmesini sağlar . Her lazer noktası için tarayıcı alet merkezli kutupsal koordinatlar ölçülür. Bunlar; ölçülen noktaya olan eğik uzaklık ñ, ölçüm doğrusunun x ekseni ile yatay düzlemde yaptığı açı a ve ölçüm doğrusunun yatay düzlemle yaptığı eğim açısı q' dır. Aynı zamanda ölçülen yüzeyin yapısına ve ölçme uzaklığına bağlı olarak dönen sinyalin yoğunluğu da ölçülerek kaydedilir. Yersel lazer tarayıcılarla ölçülen büyüklükler ve tarayıcı koordinat sistemi (Şekil 3.3) de görülmektedir.

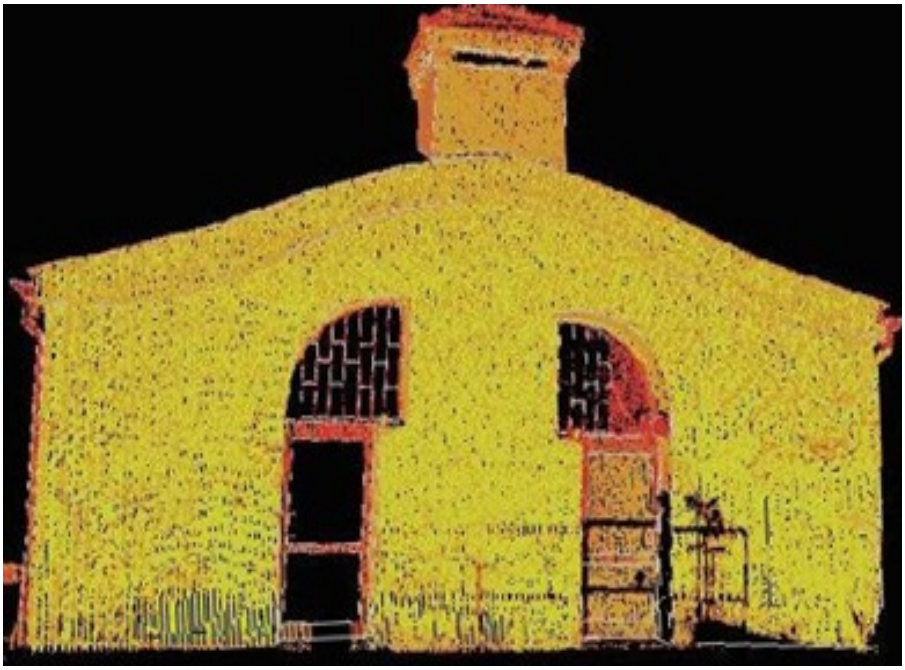


Şekil 3.3 : Yersel lazer tarayıcı ölçüleri, tarayıcı koordinat sistemi ve yer koordinat sistemi

Bu ölçüler arasındaki geometrik ilişki ve taranan noktaların tarayıcı alet orijinli 3B koordinatları (x,y,z), aşağıdaki gibi ifade edilebilir [41].

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\alpha \\ \cos\theta\sin\alpha \\ \sin\theta \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.2)}$$

Yersel lazer tarayıcıların total stationlar gibi belirli bir noktaya kurulup yönlendirilmeleri mümkün olmadığı için tarayıcı merkezli x,y,z eksenleri her defasında farklı bir doğrultuyu gösterecektir (Bazı aletlerde sadece nokta üzerine kurulabilme özelliği vardır). Bu nedenle bir alan için yapılan bütün taramalar ortak bir koordinat sisteminde birleştirilmelidir. Tarayıcı ile bütünleşik yapıda digital kamera kullanılıyorsa bu durumda ölçülen her nokta için RGB kaydı da yapılabilir (Şekil 3.4). Mimari röleve için bir binanın dış yüzeyleri taranacaksa, alet herhangi bir noktaya kurularak bina yüzeyinde görülen alan taranır. Daha sonra alet ilk taramanın bitişik alanını tarayacak şekilde uygun bir yere kurularak tarama yapılır. Her tarama bir önceki tarama ile belirli oranda ortak taranmış alanlar oluşturacak şekilde yapılır (Şekil 3.5).



Şekil 3.4 : Lazer tarayıcıdan elde edilen 3B renkli nokta bulutu görüntüsü

Bazı ölçme ve hesaplama tekniği hariç, bu ortak taranmış alanlar nokta kümelerinin birleştirilmesi için gereklidir. Tarama işlemleri esnasında çoğu tarayıcının koordinatı bilinen nokta üzerine kurulması ve düzeçlenmesi donanım olarak mümkün değildir ve buna gerek de yoktur. Tarayıcı alet orijinli x,y,z nokta bulutu koordinatları, ek ölçüler ve hesaplamalarla jeodezik koordinat sistemine yada başka bir referans koordinat sistemine dönüştürülür. [49]



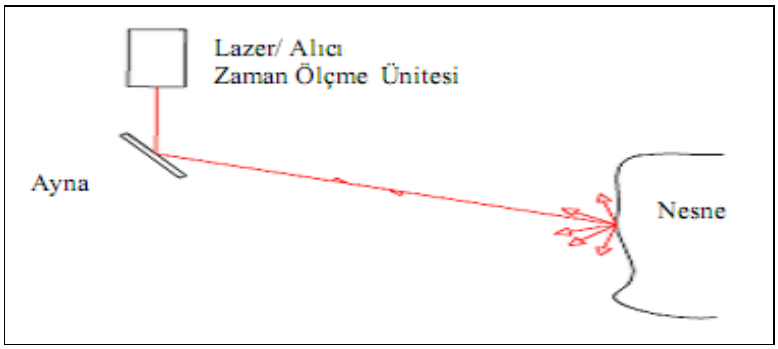
Şekil 3.5 : Aynı objenin iki farklı noktadan bindirmeli olarak taranmış nokta bulutları

3.2.3 Yersel lazer tarayıcıların çalışma ilkesi

Yersel lazer tarayıcıların çalışma ilkeleri üç gruba ayrılır.

3.2.3.1 Bir lazer ışınının geliş-gidiş zamanıyla işlem yapanlar

Bir lazer ışını nesneye gönderilir ve gönderici ile yüzey arasındaki mesafe, sinyal iletimi ile alımı arasındaki seyahat zamanı ile ölçülür (Şekil 3.6). Bu prensip, total stationların çalışma prensibinden dolayı da iyi bilinir. Aslında, motor eksenli total station, tarama aleti olarak çalışmaya programlanabilir. Ölçüm oranları çok düşük olabilir, bununla birlikte aletin kütlesi nedeniyle eksen etrafındaki artan rotasyon basamakları yeterince hızlı değildir, sinyal süreci çok vakit alır ve açısal değerler kodlanmış çemberlerden zahmetli bir şekilde okunmalıdır. [49] Tarayıcılar, lazer ışının açısal sapması için küçük dönüş aletleri kullanırlar ve uzunluk hesaplaması için basit algoritmalar kullanır. Uzaklık ölçümlerinin tipik standart sapmaları, birkaç milimetre olmaktadır. Uzaklıkların göreceli olarak kısa olmasından dolayı, bu doğruluk, tüm nesne alanı için hemen hemen aynıdır. 3B doğruluğu aynı zamanda, ışının açısal noktalama doğruluğundan etkilenir [42].



Şekil 3.6 : Uçuş zamanı prensibi.

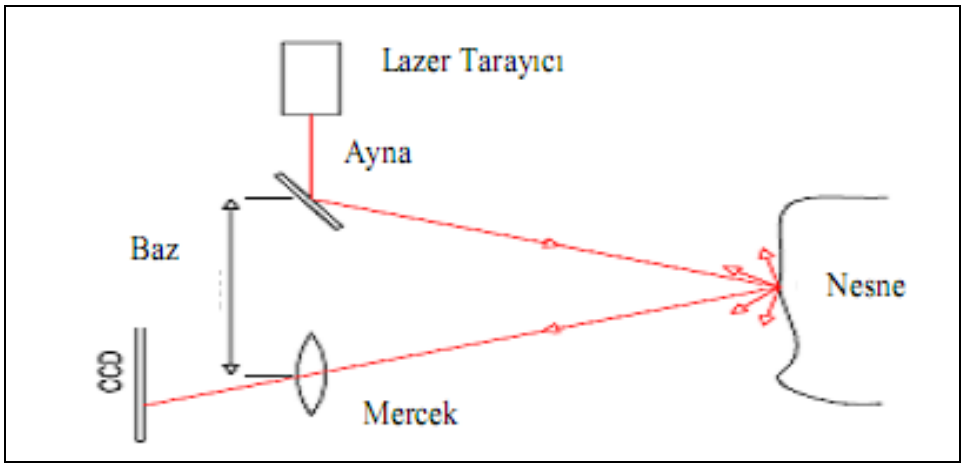
3.2.3.2 Faz karşılaştırma metoduyla işlem yapanlar

Bu metot aynı zamanda yine total stationlar da bilindiği gibidir. Bu durumda, iletilmiş lazer, uyumlu bir dalgayla ayarlanmıştır ve mesafe iletilen ve alınan dalgalar arasındaki faz farkından hesaplanmıştır. Kullanıcıların bakış açısından bu metot, uçuş zamanı metodundan farkı yoktur. Daha karışık sinyal analizinden dolayı sonuçlar daha doğru olabilir. İyi tanımlanmış bir dönüş sinyaline ihtiyaç olduğu için, faz kıyaslama metodunu kullanan tarayıcılar, kısa uzunluklarda daha etkilidir.

3.2.3.3 Triangulasyon metoduyla işlem yapanlar

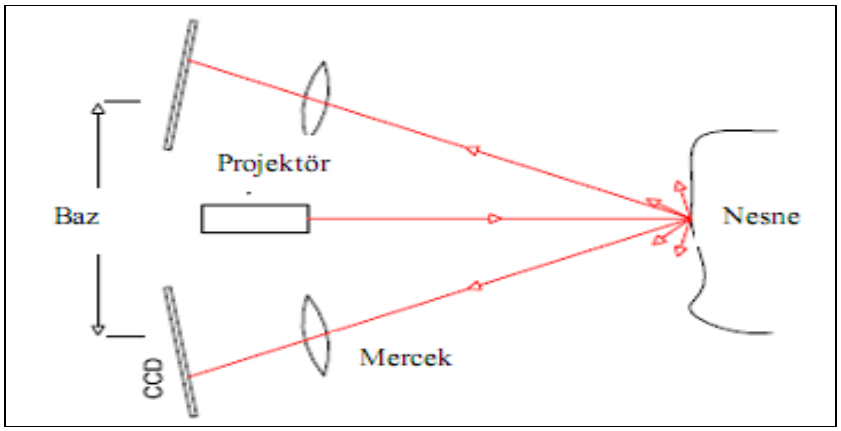
Triangulasyon metoduyla işlem yapanlar ikiye ayrılmaktadır.

Tek kamera çözümü ; Bu tarayıcı basit bir ışın yayma düzeneğinden oluşur. Bu alet, mekanik aletin bir ucundan nesneye olan artan değişen açılarla ve lazer noktalarını sezen bir CCD kamerasıyla lazer ışınını gönderir. Yansıtıcı yüzey elementlerinin 3B pozisyonları, sonuç üçgeninden elde edilir. [48] Bu prensip, menzil bulucuların kullanıldığı araştırmada önceliklere sahiptir. Bu açıdan, alet ve nesne arasındaki menzilinin doğruluğu mesafe alanıyla birlikte iyi bilinir. Açıkça, uygulamayla ilgili sebeplerden dolayı, temel uzunluk isteğe bağlı olarak arttırılamaz. Bu tarayıcılar, uzaklık tarayıcılarından daha doğru olan durumlarda, kısa mesafeleri ve küçük nesneler için önemli bir rol oynar.



Şekil 3.7 : Triangulasyon prensibi : tek kamera çözümü

İki kamera çözümü ; Triangulasyon prensibinin bir değişkeni, iki CCD kamerası kullanımıdır. İncelenecek nokta ya da bölge, hiçbir ölçme fonksiyonu olmayan ayrı bir ışık projektörüyle üretilir. [48] Çözümlerin geniş bir değişikliği görülebilir. Projeksiyon, hareket eden şerit bölümlerinin bir ışık çizgisinden oluşur. Geometrik çözüm, tek kamera prensibiyle aynıdır, aynı doğruluk sonuçlarını oluşturur. İki kamera kullanan aletlerin tümü yüksek oranlar sağlamaz ve gerçek zamanlı 3B koordinatları üretmezler. Bununla birlikte, eğer yüksek nokta oranları ve gerçek zaman süreci sağlanırsa, bu aletler, yukarıda belirtilen tarama aletlerine bir alternatif olarak görülebilir. [42].



Şekil 3.8 : Triangulasyon prensibi : iki kamera çözümü

3.3 Lazer Tarayıcıların Doğruluğu

Lazer tarayıcılarla ölçülen her nokta bulutu çok sayıda rastlantısal hata içerir. Bu hatalar; ışın yansıması ve ışın kalınlığından kaynaklanan ölçme sistemi hatalarıdır. Ölçüler jeodezik koordinat sistemine dönüştürülecekse bu hatalara dönüşümde kullanılan noktaların hataları da eklenmektedir [33]. Taranan noktaların doğruluğunu tarayıcının açısal doğruluğu, mesafe doğruluğu, çözünürlüğü, kenar etkisi yani ışın kalınlığı, yansıyan sinyal gücü ile sıcaklık, atmosferik koşullar ve radyasyon gibi çevresel koşullar etkiler.

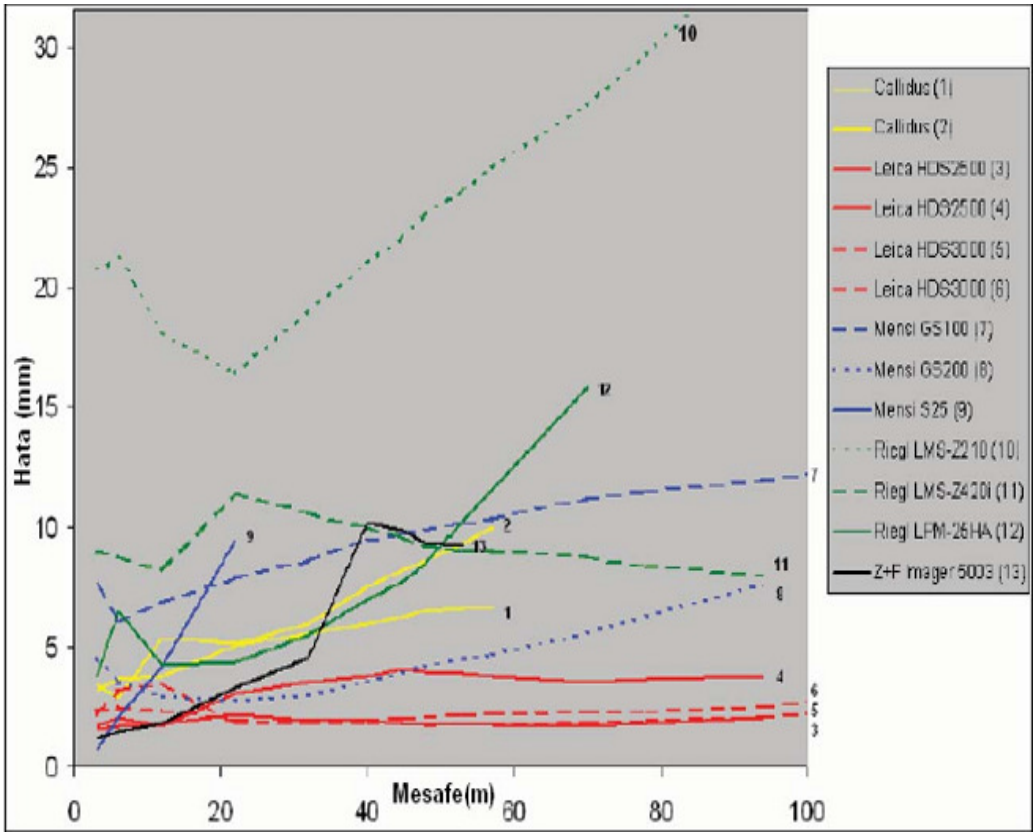
Lazer ışın kalınlığından dolayı obje kenarına çarpan ışının bir kısmı geri dönerken bir kısmı da diğer yüzeyden geri yansıyacaktır. Bu durumda aynı lazer ışını için iki farklı ölçü noktası elde edilecektir. Bu hata, lazer ışın kalınlığının azaltılması ile en aza indirilebilir. [49]

Tarayıcılardan gönderilen ve obje yüzeyinden dönen sinyaller kaydedilerek objenin gri tonlu yansıma görüntüleri oluşturulmaktadır. Yansıyan sinyalin gücü, yüzeyin parlaklığı, mesafe, atmosferik koşullar ve ışığın geliş açısına göre değişir. Beyaz yüzeylerden yansıma çok fazla olurken, siyah yüzeylerden yansıma çok az olmaktadır. Renkli yüzeylerde yansıma etkisi, lazer tarayıcının spektral özelliğine (yeşil, kırmızı, kızılötesi) bağlı olarak değişir.

Atmosferik koşulların kısa mesafelerde etkisi çok azdır. Toz ve su buharı lazer ışın kalınlığından dolayı ölçüleri etkileyecektir. Bu hata obje kenarlarında lazer ışın kalınlığından dolayı kaçınılmaz olarak oluşan ölçü hatalarıyla aynı büyüklüktedir. Bu hatanın giderilmesi, ancak lazer nokta büyüklüğünün minimuma indirilmesiyle mümkündür.

Bir lazer tarayıcı, ancak kendi çalışma sıcaklığında optimum olarak çalışır. Sıcaklık, kendi çalışma aralığında olsa bile mesafe ölçümünde etkili olabilir. Tarayıcının iç sıcaklığı, çalışma ve radyasyon nedeniyle dış sıcaklıktan bir miktar fazla olacaktır. Lazer tarayıcı aletlerin çoğu, çalışma sıcaklığı belirlenen aralığı aştığında otomatik olarak kapanmaktadır. [49]

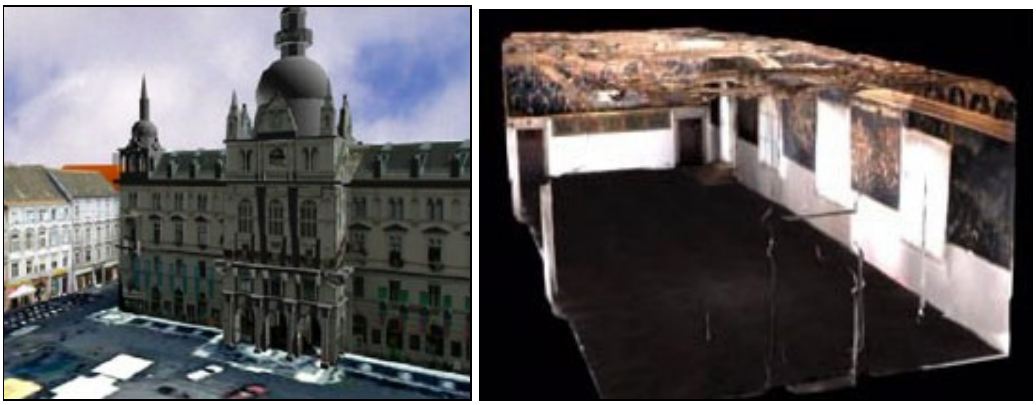
Lazer tarayıcıların doğruluk araştırmasıyla ilgili pek çok metot geliştirilmiş ve sonuçları yayınlanmıştır. Doğruluk araştırması için en iyi test alanı ve programı Almanya'da Mainz Universty of Applied Sciences'da geliştirilen test alanıdır [43]. Bu test alanında değişik lazer tarayıcıların mesafe ve yansıma ölçümlerine ilişkin test sonuçları (Şekil 3.9) da verilmiştir. Sonuç olarak, lazer tarayıcıların ölçü doğruluğu uzun mesafelerde (>1000m) 10cm, ışın yapısına bağlı olarak azalsa da kısa mesafelerde (<300m) ölçü hassasiyeti 1cm civarındadır. Genel olarak, Şekil 4den de görüldüğü gibi mesafe ölçme ve konum hatası 100m de 1cm nin altında kalmaktadır.



Şekil 3.9 : Farklı lazer türleri için mesafe ölçüm doğruluğu (tek bir lazer noktası için) değerleri [43]

3.4 Lazer Tarayıcıların Kullanım Alanları

Mimari ve Bina Ölçme Uygulamaları : Mimarlar tarafından, lazer taramalar sonucu elde edilen 3 boyutlu veriler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yersel lazer tarayıcılar geniş görüş alanı, yüksek doğruluklu lazer verisi ile yüksek çözünürlüklü sayısal renkli fotoğrafların birleştirilmesi imkânının olması sayesinde mimari ve bina ölçme uygulamaları için ideal yöntemlerden biridir. Elde edilen veri, gerçeğe yakın, 3 boyutlu bir veridir. Lazer verilerin nokta bulutlarından CAD ortamına transferi, sanal modeller, düzeltilmiş ortofotolar, yakın geçmişe göre, hızlı gelişme göstermektedir. Taramalar sonucu elde edilen gerçeğe yakın 3 boyutlu veri ve geliştirilen yazılımların kullanıcılara sunduğu çeşitli çözümler, mimari uygulamalar için yeni verilerin üretilmesi imkânını sağlar. Devamlı gelişen yazılımlar, taranan obje veya alanın, yatay ve düşey kesit bilgileri, alan ve hacim hesapları, konum bilgileri (x,y,z) sorgulama vb. gibi bilgiye ulaşmamıza imkân verir. Bu bilgilerden yararlanılarak, mevcut durumun çıkartılması, projeye uygunluğunun kontrol edilmesi gibi pek çok olanak sağlar. [48]



Şekil 3.10 : Mimari ve bina ölçme uygulama örnekleri

Ulaşım ve Altyapı Uygulamaları : Ulaşım ve altyapı sektöründe yersel lazer tarayıcıların kullanılması ve ölçme verilerinin toplanması, sağlık, güvenlik ve zaman kısıtlamaları konuları ile ilgilidir. Ulaşım ağında yaygın olarak karşılaşılan sorunları çözmek için ihtiyaç duyulmaktadır. Yersel haritalama ve onun uygulamalarında, ilgili veriler direkt olarak toplanamamakta ve çalışmalar uzun zaman gerektirmektedir. Lazer tarama sistemleri demiryolu ve karayolu yapılarının nitelikli yönetiminde ve ölçme işlemlerinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Lazer tarama da kullanılan aletler, hava lazer ölçmeleri ile birleştirilerek taranacak bölgenin tüm detayları elde edilmektedir. Kullanılan özel yazılımlar, taramalar sonucu elde

edilen çeşitli verilerin çeşitli şekilde gösterimi, görselleştirme, modelleme, nokta bulutu verisinden direkt ölçme işlemi ya da kesit çıkarılmasına izin verir. [48]



Şekil 3.11 : Ulaşım ve altyapı örnekleri

Afet İzleme Uygulamaları : Lazer tarama sonucu elde edilen verilerin hızlı ve doğru bir şekilde elde edilmesi, kullanılan tarayıcıların diğer ölçme aletlerine göre teknik açıdan üstün özelliklerinin olması, kullanılan yazılımlardan elde edilen veri çözümlerinin doğruluğu ve kullanabilirliği, bu teknolojinin jeolojik, coğrafi vb. özellikler açısından afet izleme uygulamalarında kullanabilirliğini göstermektedir. Tarama sonucu elde edilen verilerin yazılımlarla işlenmesi ve yapılan analizler neticesinde tehlike yaratabilecek doğal afet, çığ, toprak kayması, taş ocağı ve maden işletmelerinde karşılaşılacak problemler çözülebilmektedir. En önemli özelliği gerçeğe yakın 3 boyutlu verinin, hızlı ve ekonomik bir şekilde elde edilmesidir. Ayrıca olay anı ve sonrasındaki mevcut durumun değerlendirilmesi, karşılaştırılması, gereken en doğru bilgiye ulaşılması, lazer tarama teknolojisi ile kısa zamanda olabilmektedir. Sürekli tehlike yaratan alan veya bölgelerin kontrolü ve güvenliği, otomatik olarak gözlem yapan yersel lazer tarayıcılar ile sağlanabilmektedir. Bu bölgelere, konumu bilinen yansıtıcı hedefler konularak, devamlı bu hedef noktaları tarayıcılar ile taranarak, bölgede herhangi bir deformasyonun olup olmadığı, geliştirilen yazılımlar ile belirlenebilmektedir [48].

Kıyı Uygulamaları : Son birkaç yıldır kıyı bölgelerin izlenmesi, yeni bir ölçme teknolojisi olan, yersel lazer tarama teknolojisi kullanılarak yapılmaktadır. Bu teknolojide kullanılan yersel lazer tarayıcılar, çeşitli özelliklere sahiptir. Doğruluk ve duyarlılığı tarayıcıdan tarayıcıya değişmektedir. Elde edilen tarama verilerin doğruluğu ve yapılan işler için, kullanılan tarayıcıların özellikleri önemlidir. Kıyı uygulamalarında özellikle, erozyon, sahil yüzeyi izlenmesi, sel tahminleri, detaylı

sel bölgesi haritalama, geo-teknik çalışmalar, erişilemeyen bölgelerin ölçme işlemleri, yüksek riskli heyelan bölgelerinde sürekli şev izlenmesi, kıyı planlanması, 3 boyutlu görselleştirme, kazı ve dolgu uygulamalarında hacim hesaplamaları gibi birçok alanda yersel lazer tarama teknolojisinden yararlanılmaktadır. Bu uygulamalarda, elde edilen verinin kontrolü, yerel ve ulusal koordinat sistemine göre olmaktadır. Ayrıca, bu teknolojiden elde edilen veriler, GPS ve diğer ölçme yöntemlerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılarak, verilerin doğruluk ve duyarlılığı hakkında fikir edinmemizi de sağlamaktadır [48].



Şekil 3.12 : Kıyı uygulama örnekleri

Endüstriyel Uygulamalar : Lazer tarayıcılar, günümüzde endüstriyel uygulamalarda kullanılan en önemli ölçme aletleri arasında yerini almıştır. Diğer klasik ölçme ve fotogrametrik yöntemlerle kıyaslandığında, veri elde edilmesi ve değerlendirilmesinde hız ve maliyet açısından üstünlükleri vardır. Lazer taramalar sonucu elde edilen, taranan objeye ait gerçeğe yakın gösterimini sunan 3 boyutlu nokta bulutlarından CAD yazılımlarında, 3 boyutlu modeller elde edilmektedir. Bu modeller üzerinden istenen bilgilere anında ulaşılabilmekte, böylece üretim sırasında ortaya çıkacak hatalara müdahale edilerek hatalar yok edilebilmektedir. Geliştirilen yazılımlarla çeşitli analizler ve değerlendirmeler yapılabilmektedir. Gemi inşaatı, otomotiv sanayi, fabrikasyon üretim uygulamaları, giyim sektörü, proje kontrol ve üretimi vb. alanlarda lazer tarama teknolojisinden yararlanılmaktadır [48].

Kültürel Mirasın Korunması ve Arkeolojik Uygulamaları : Lazer tarama, tarihi ve kültürel mirasın korunması, gerçeğe uygun yaşatılması, 3 boyutlu modelleme çalışmalarında, dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Lazer tarama teknolojisinin kullanım amacı tarihi ve kültürel bilgilerin arşivlenmesi, 3 boyutlu gösteriminin sağlanması, yıllara göre deformasyonlarının belirlenmesi, elde edilen

verilerden yeni bilgilere ulaşılması, tahrip olan ya da yıkılan eserlerin aslına uygun olarak tekrar yapılmasıdır. Özellikle, restorasyon ve röleve çalışmalarında en çok kullanılan modern ölçme aletleridir. Diğer klasik ölçme aletleri ile kıyaslandığında, gerek hızlı veri elde edilmesi, gerekse maliyet açısından büyük avantajları vardır. Dünyada yersel lazer tarama teknolojisi ile yapılan birçok çalışma vardır. Gelişen teknolojinin paralelinde geliştirilen tarayıcı ve yazılımlar bize başka çözüm yolları sunmaktadır. Elde edilen verilerden görselleştirme, yapıların sayısal ortamda bir arşivinin oluşturulması, binalar ve bina elemanlarının tarihi ve kültürel ilişkilerinin gösterimi, bilgilerin gelecek kuşaklara iletilmesi, bilgi sistemlerinin oluşturulması, röleve ve restorasyon çalışmalarına altlık hazırlanması, tahrip durumda olan binaların aslına uygun yapılması gibi çalışmalar, lazer tarayıcılarla yapılan uygulama alanları arasındadır [48].



Şekil 3.13 : Kültürel mirasın korunması ve arkeolojik uygulama örnekleri

Yersel lazer tarama tekniğinin uygulama alanları son günlerde yaygınlaşmaktadır. Gelişen bilgisayar teknolojisiyle paralel olarak 3 boyutlu veri elde etme olanağı hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Yersel lazer tarama tekniği kullanım alanları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Projelerin sahaya uygunluğunun kontrolü, planlarla yapı ilerleyişinin karşılaştırılması ve kalite kontrolün sağlanması.

- Sanal planlama ve mevcut arazi ilişkilerini içeren mekânsal durumun analiz edilmesi (birleşik yapılar, çok katlı ulaşım merkezleri, alışveriş merkezleri, vb.)

- Binaların, yapıların uygun bakımını sağlamak için, interaktif yapı incelemeleri, risk keşifleri ve çürüme kontrollerini amaç edinen yapı bilgi sistemleri kurulması.

- Görsel 3-B fabrika yaratmak için endüstriyel ortamların belgelenmesi, yani mevcut fabrika veya tesisin tam dijital modelinin elde edilmesi. Bir görsel 3-B kurulumuyla, yeni ekipman programlanabilir ve üretim durdurumu gerekmeksizin çalışmalar devam edebilir. 3-B model yardımıyla, değişiklikler nedeniyle eskiyen mevcut çizimleri, gerçeğe uygun olarak saklamak mümkündür. [49]

- Bir ülkenin altyapı tesislerinin belgelemesi. Demiryolu, yol şebekesi, tüneller, köprüler, enerji hatları gibi hasar görmüş alanların teşhisi için olağan araştırma gerektiren değerlendirme yöntemleri için bir temel sağlar. Bu şekilde gerekli onarımlar gecikmesiz tamamlanabilir.

- Taranacak obje ya da alanın deformasyon kontrolü sadece ayrık noktalar olmaksızın yersel lazer tarayıcılarla sıklıkla analiz edilebilir. Böylece yerel deformasyonlar ortaya çıkabilir.

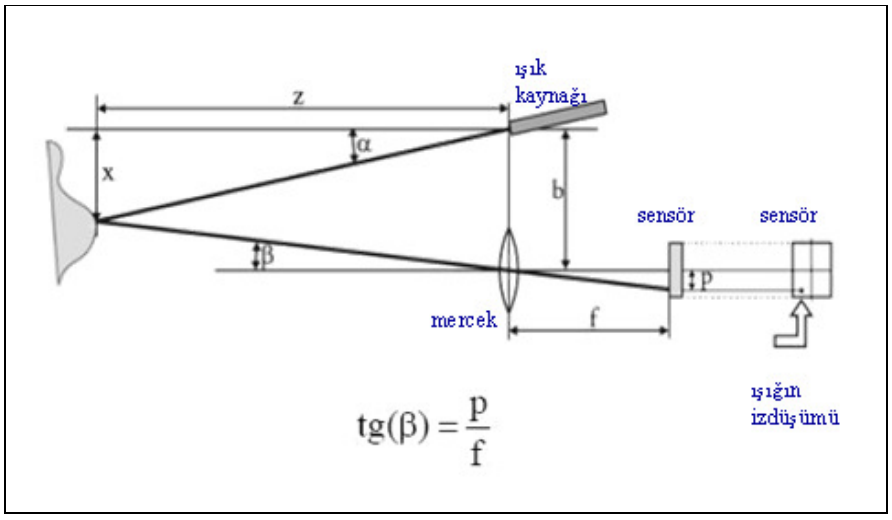
- Tarihi mirasın (kiliseler, kaleler, saraylar, vb.) detaylı durumu ve hasar değerlendirilmesi, bunların muhafazası için gerekli belgelendirmelerin yapılması, hasar ve yıkım durumunda gelecekte verilen herhangi bir zaman için restorasyonun sağlanması. Bu durumlarda, en narin yapılar ve detayları dokümanlaştırılmalıdır. Bu, ulusal anlamda kültürel miras bilgi sisteminin kurulması için daha fazla temel sağlayabilir. Doğru, gerçek, görsel 3B modeller sayesinde, internet aracılığıyla dünyadaki tüm insanlara tarihi miraslar sanal (Sanal Turizm) olarak ziyaret ettirilebilir.

4. UYGULAMA

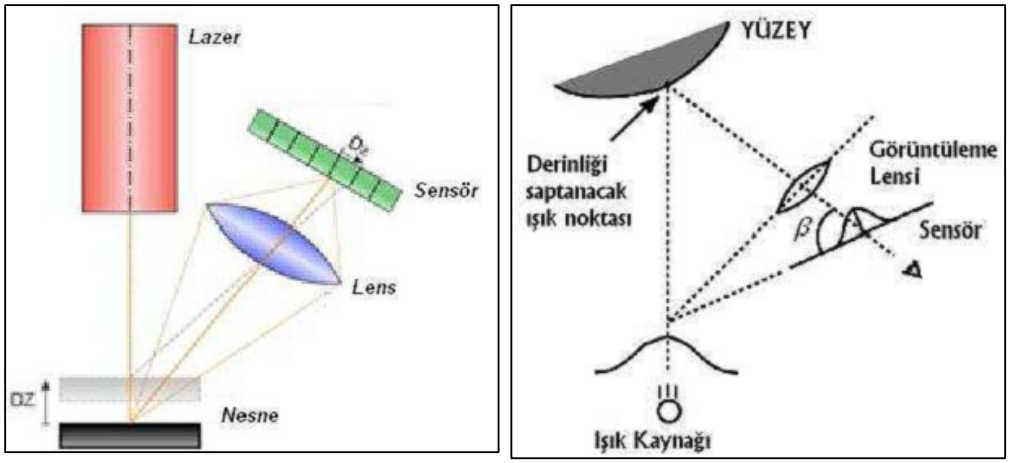
4.1 Genel Bilgiler

Lazer teknolojisi alanındaki araştırmalar, 1960 yılından bu yana 40 yılı aşkın bir tarihe sahiptir. Yersel lazer tarama teknolojisinin bir ölçüm aracı haline gelebilmesi ise son 10 yıla dayanmaktadır. Yersel lazer tarayıcılar objelerin 3 boyutlu geometrik verisini, temassız, kısa sürede ve detaylı bir şekilde elde etmemizi sağlayan ölçme sistemleridir. Lazer teknolojisinde nesne, yansıma yoğunluğu verisi içeren 3 boyutlu nokta verisi olarak elde edilmektedir. Nokta bulutlarının kaydedilmesi, birleştirilmesi, inceltilmesi, nokta boşluklarının doldurulması, filtrelenmesi ile nesnelerin 3 boyutlu modelleri oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu modeller üzerinden, mühendislik uygulamaları için gerekli her türlü veriye ulaşılabilmektedir. Yürütülen bu çalışmada, Brezilyan indirekt çekme deneyi ile kırılmış olan 3.5 x 7 cm boyutundaki kireçtaşı karot örneği yüzeyinde oluşan pürüzlülüğün ve buna bağlı olarak pürüzlülük açılarının ölçülmesi, değerlendirilmesi ve matematiksel olarak ifade edilmesi amaçlanmıştır. Kırılma deneyi sonunda elde edilen yüzeyler değerlendiğinde, en uygun ölçme ve modelleme yönteminin yersel lazer tarama olduğuna karar verilmiştir.

Son yıllarda, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle kişisel bilgisayarların grafik işlemcileri güçlenmiş, buna bağlı olarak 3B modellerin gerek bilimsel gerekse son kullanıcıya yönelik kullanımı yaygınlaşmıştır. Bugünlerde, dünyada, birçok şirket ve araştırma enstitüsü, bu teknoloji için araştırma yapmak ve sistemi geliştirmek ve 3B sisteminin yerini alabilecek kendi ürünlerini yaratabilmek için çok fazla para ve insan gücü sarf etmektedir. [44]. Yapılandırılmış ışıktan 3B bilgi elde edilmesi, triangülasyon prensibine dayalı olarak yapılır. Triangülasyon prensibine göre lazer ve kamera arasındaki mesafe (d) ve üçgenin iki açısı (α) ve (β) bilinir ise (c) (Şekil 4.1) noktasının koordinatının hesaplanması mümkün olur. (γ) açısının büyüklüğü ise derinlikteki çözünürlüğe etki eder. (γ) büyür ise derinlik çözünürlüğü artar, küçülür ise azalır [45].



Şekil 4.1 : Triangulasyon yöntemi [45]



Şekil 4.2 : Triangulasyon yöntemi tekniğinin şematik gösterimi

Çalışmada Nextengine 3B Desktop (Şekil 4.3) yersel lazer tarayıcı kullanılmıştır. Nextengine 3B Desktop tarayıcı, düşük bütçeli bir tarayıcı sistemi olup sağlamış olduğu ölçme doğruluğu ve hız bakımından etkili bir tarayıcı sistemdir. Sistemin sağlamış olduğu ölçme doğruluğu üretici firma tarafından makro modda ±0.127 mm, geniş modda ±0.328 mm olarak verilmiştir [50]. Üçgenleme prensibiyle çalışan cihazlar bir lazer kaynağı ve bir veya daha çok kamera sisteminden oluşmaktadır. Yansıtılan çizgisel lazer ışını bilinen bir açı altında bir kamera sistemi tarafından görüntülenir ve çizgi üzerinde gözlenen bozulmalar yükseklik farkları olarak hesaplanır. Objenin tüm yüzeyine kesintisiz olarak yansıtılan çizgisel ışının gözlenmesi sonucu objenin şekli 3 boyutlu olarak yeniden oluşturulur [46].

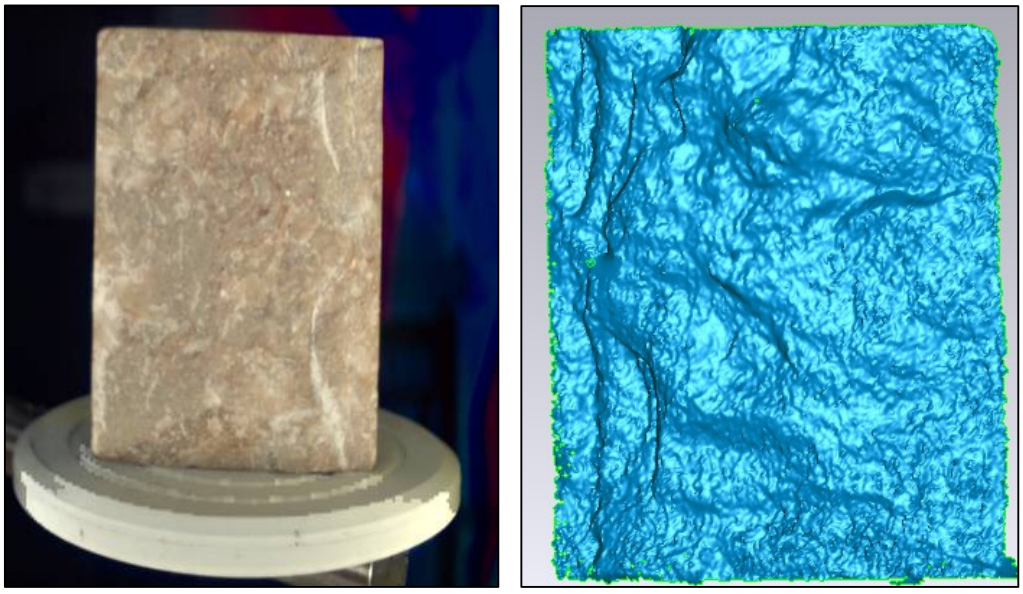


Şekil 4.3 : Nextengine 3B masaüstü tarayıcı

4.2 Ölçme ve Modelleme

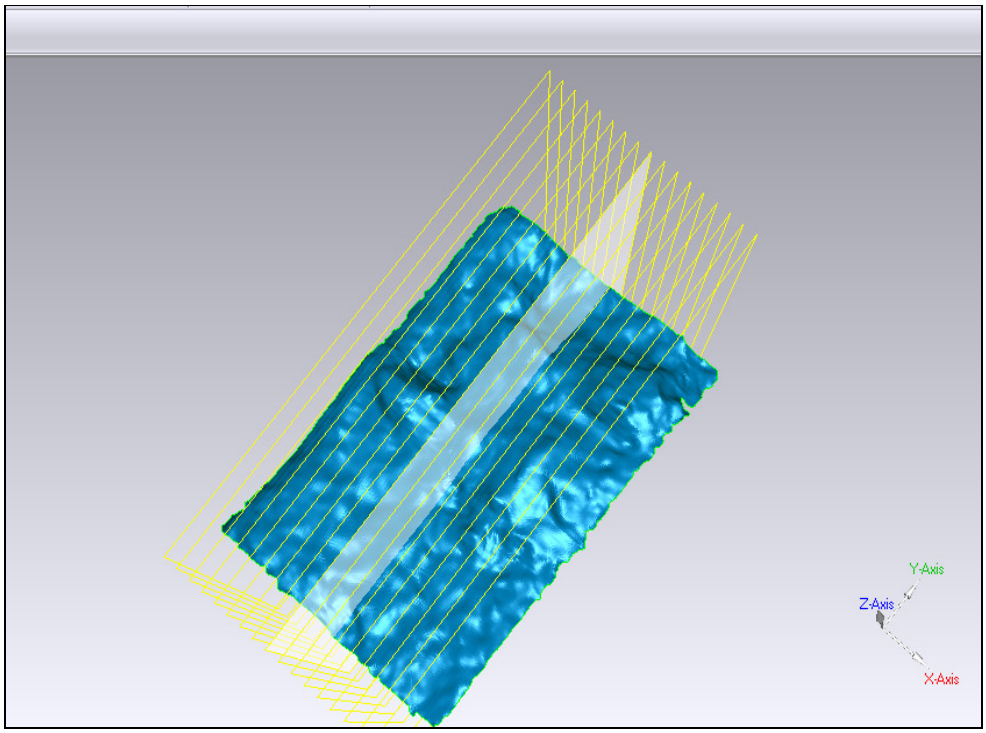
Modellenecek olan obje tarayıcı sistemin yaklaşık 15 cm önünde yer alan ve üzerinde objeyi belirli açılarla otomatik olarak döndüren bir tabla bulunan sisteme yerleştirilmiştir. Objenin tamamının cihazın görüş açısında olmasına dikkat edilmelidir. Tarama cihazını kontrol etmek ve uygulamayı yapabilmek için cihazla birlikte gelen ScanStudio HD yazılımı kullanılmıştır. Objenin üzerine yerleştirildiği tabla 360^{o} dönme kapasitesine sahiptir ve her bir seferde önceden programa girilen dönme sayısına uygun olarak hesaplanan dönme açılarında objeyi döndürerek objenin tümünün taranmasını sağlamaktadır. Tarayıcının kamera sistemi, lazer kaynağı ve obje arasındaki vektör uzayı sabit olduğundan objenin farklı bölgelerine ait taramalar otomatik olarak ScanStudio HD programında birleştirilmektedir. Tarama esnasında tarayıcının ya da objenin üzerinde yer aldığı sitemin konumunun değişmemesine dikkat edilmelidir. Böyle bir durumun ortaya çıkması halinde program birleştirme işlemini otomatik olarak yapamamaktadır. Bu durumda yazılımda bulunan birleştirme (alignment) menüsünden birleştirme işlemi iki farklı taramada yer alan en az üç ortak noktanın işaretlenmesi ile manuel olarak yapılmalıdır. Elde edilen model vrl formatında kaydedilerek Geomagic Studio

programına aktarılmıştır. Elde edilen nokta bulutu üzerinde öncelikle düşük seviyeli noise azaltma işlemi uygulanmıştır. İkinci işlem adımı olarak yazılımın curvature sample metodu kullanılarak toplam nokta sayısı 62682'ye indirgenmiştir. Curvature sample metodu, düz yüzeylerdeki nokta sayısını azaltırken kavisli alanlardaki nokta sayısını korumakta, böylelikle detay kaybını önlemektedir. Azaltılan ve filtrelenen nokta bulutundan TIN formatında üçgenleme yapılmıştır. İşlem sonunda toplam 124184 üçgenden oluşan yüzey modeli elde edilmiştir (Şekil 4.4). Yersel lazer tarama yönteminde tarama ortamındaki ışık koşulları, obje geometrisinin karmaşıklığı ve objenin materyal özelliklerine bağlı olarak veri kayıplarının olduğu bölümlere sıklıkla rastlanmaktadır. Bu tür veri kayıplarının olduğu bölgeler uygun enterpolasyon yöntemlerinden birisi seçilerek doldurulmalıdır. Bu çalışmada curvature-based yöntemi seçilmiştir [50].

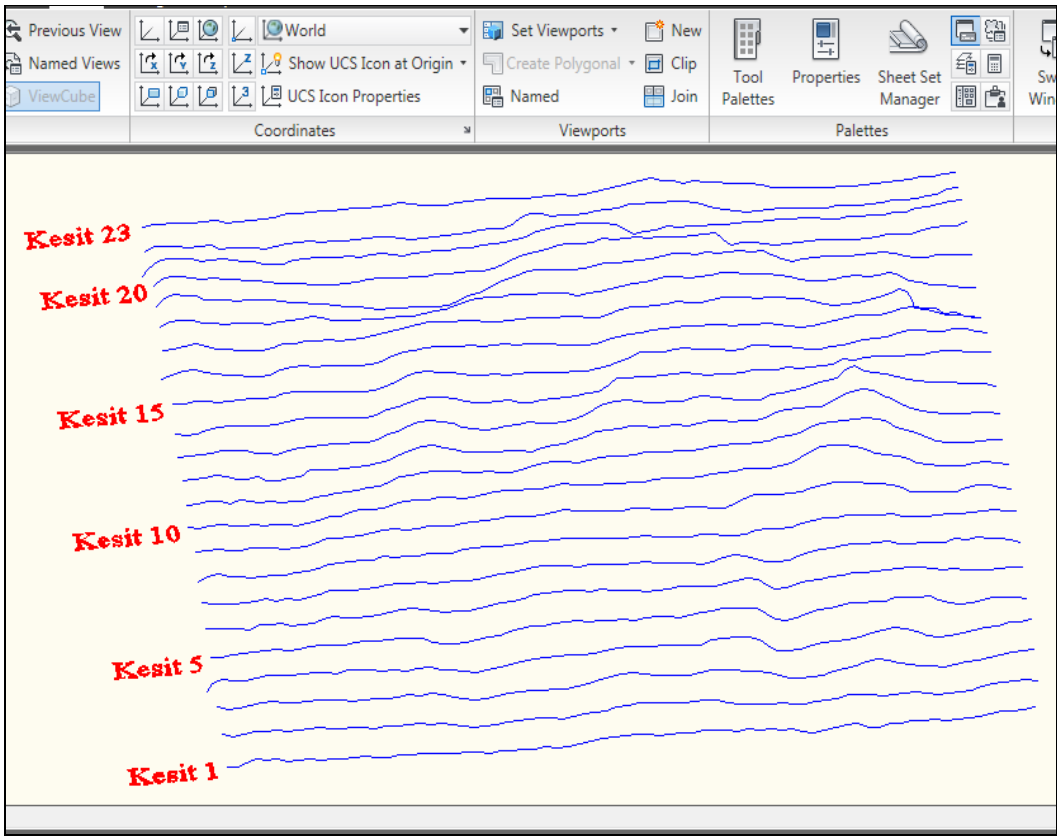


Şekil 4.4 : 3B Model

Yüzey modeli oluşturulduktan sonra kırılma açılarının ölçülebilmesi ve değerlendirilebilmesi için yüzey üzerinde 2 mm aralıklarla boyuna kesitler alınmıştır (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Alınan boyuna kesitler, bir profil üzerinde olduğu için x ekseni sabit olarak alınmıştır. Y ve z değerleri değişken olup, ulaşmamızı istediğimiz eğim değerlerine yani kırılma açılarına bu değişkenlerden ulaşılacaktır. 2 mm aralıklarla alınan boyuna kesitler Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 da farklı şekillerde gösterilmişlerdir.



Şekil 4.5 : Kesitlerin alınması işlemi



Şekil 4.6 : Kesitlerin CAD ortamında gösterimi

4.3 Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi

Bu aşamada, yüzey üzerinde elde edilen 23 adet boyuna kesitler, belirli nokta aralıkları belirlenerek pürüzlülük açılarının hesaplanması adımları gerçekleştirilmiştir.. Bu amaçla, MATLAB yazılım programının Curve Fitting Toolbox'ı kullanılmıştır. Alınan 23 kesit üzerinden YZ düzleminde yaklaşık 1 mm aralıklarla olmak üzere yüzey 1-A için toplam 1723 nokta verisi, yüzey 1-B için toplam 1725 nokta verisi ürettirilmiştir (Çizelge 4.1),(Çizelge 4.2). Üretilen noktalar her bir kesit için parçalanmış, sıralanmış ve Matlab yazılımının Curve Fitting Tool'u kullanılarak şekil koruyan (shape preserving) eğri geçirilerek kesit üzerinde 0.001 mm aralıklarla 1. türevler alınmıştır (Şekil 4.7 ve şekil 4.8). Elde edilen 1. türevler eğrinin o noktadaki eğimini, eğimin tanjantının tersi de o noktadaki "i" kırılma açısını vermektedir. Her bir kesite ait negatif ve pozitif yöndeki en küçük, en büyük ve ortalama değerler ile elde edilen açıların mutlak değerlerinin ortalamaları hesaplanmıştır (Çizelge 4.3), (Çizelge 4.4).

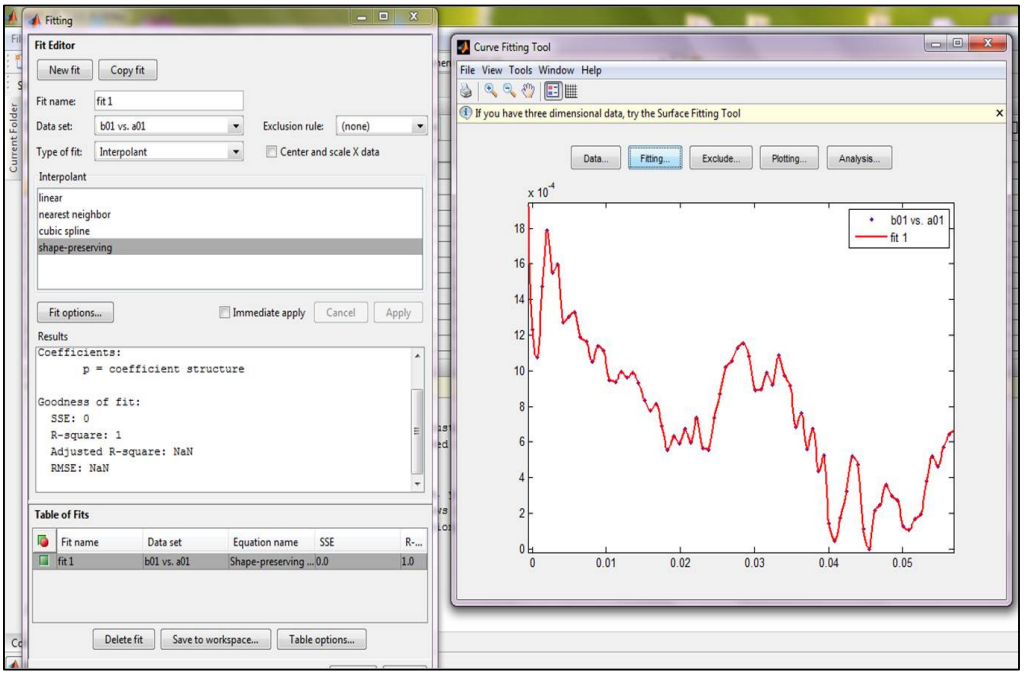
Çizelge 4.1 : Yüzey 1-A ve Nokta sayıları

Kesit No	Nokta Sayısı	Uzunluğu (mm)		Kesit No	Nokta Sayısı	Uzunluğu (mm)		Kesit No	Nokta Sayısı	Uzunluğu (mm)
1	74	56.3		9	74	56.9		17	76	57.0
2	75	56.8		10	75	57.1		18	75	56.8
3	74	56.9		11	76	56.9		19	76	56.8
4	73	57.4		12	76	57.0		20	75	56.6
5	75	56.8		13	76	57.0		21	76	57.0
6	75	56.9		14	74	56.9		22	75	56.6
7	75	57.0		15	74	56.8		23	76	56.7
8	74	57.0		16	74	56.8				

Yüzey 1-B için üretilen 1725 nokta verisi özet tablosu Çizelge 4.2 de verilmiştir.

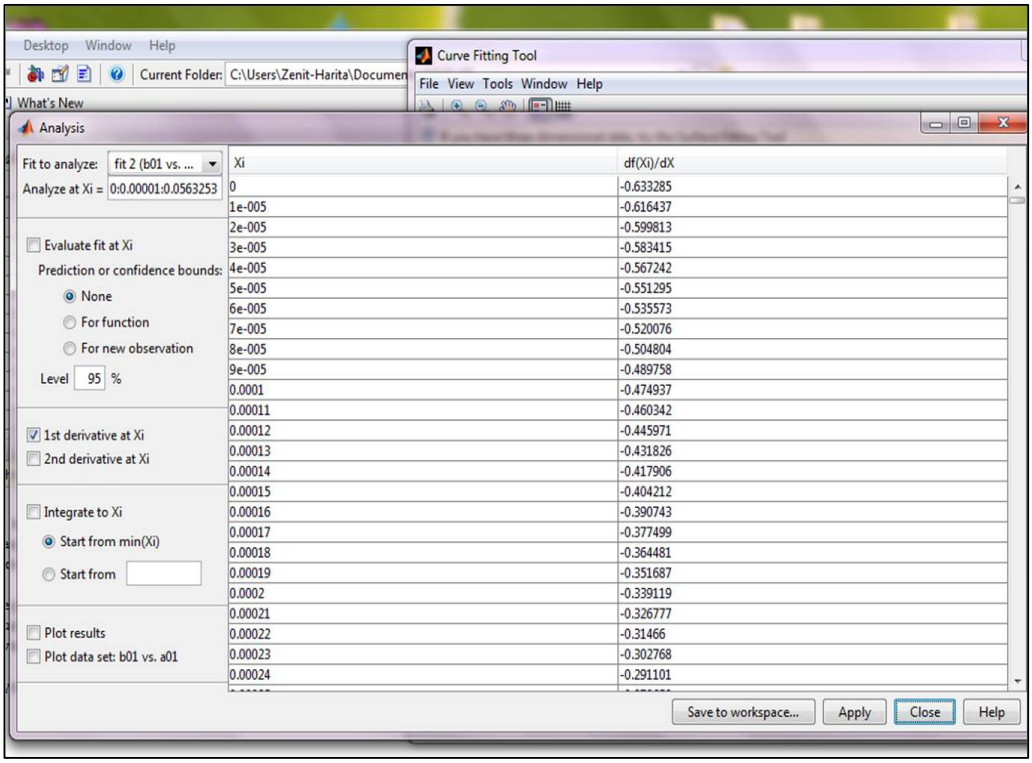
Çizelge 4.2 : Yüzey 1-B ve Nokta sayıları

Kesit No	Nokta Sayısı	Uzunluğu (mm)		Kesit No	Nokta Sayısı	Uzunluğu (mm)		Kesit No	Nokta Sayısı	Uzunluğu (mm)
1	73	56.7		9	76	56.9		17	75	56.9
2	73	56.7		10	76	56.9		18	75	56.7
3	75	56.8		11	75	56.9		19	74	56.6
4	75	56.7		12	77	56.9		20	75	56.8
5	75	56.7		13	76	56.9		21	74	56.6
6	76	57.3		14	75	56.9		22	74	56.6
7	77	57.2		15	75	56.9		23	74	56.6
8	76	56.9		16	74	56.9				

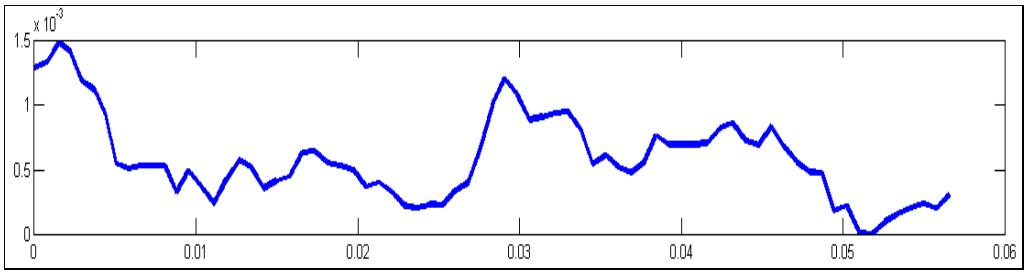


Şekil 4.7 : Matlab yazılımında şekil koruyan eğrilerin geçirilmesi

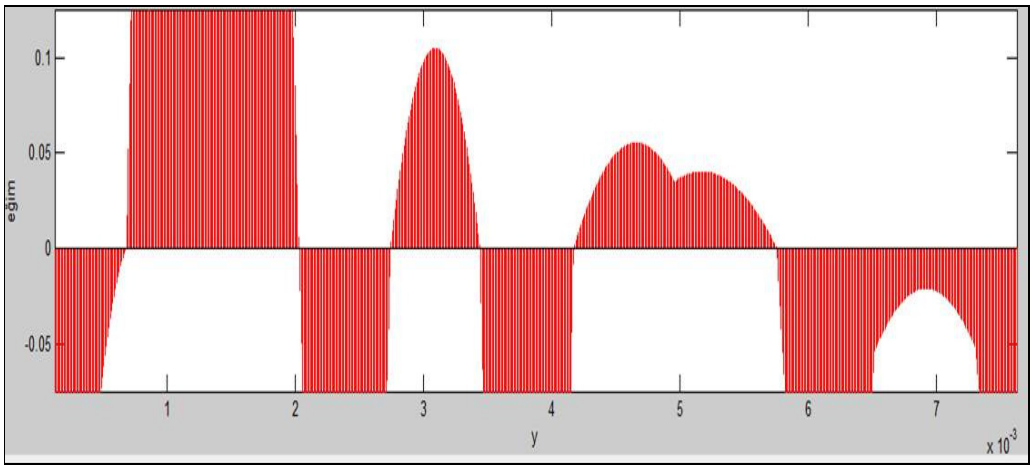
Curve Fitting Tool kullanılarak 0.001 mm aralıklarla türevlerin alınması aşağıda Şekil 4.8 de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Kesitler üzerinde 0.001 mm aralıklarla türevlerin alınması

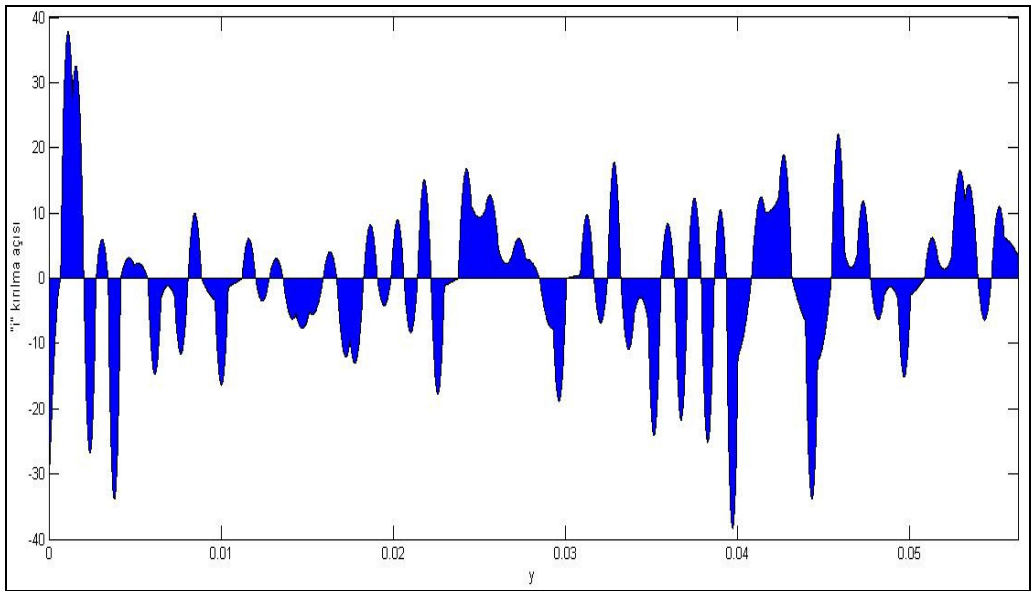


Şekil 4.9 : Kesit Grafiği

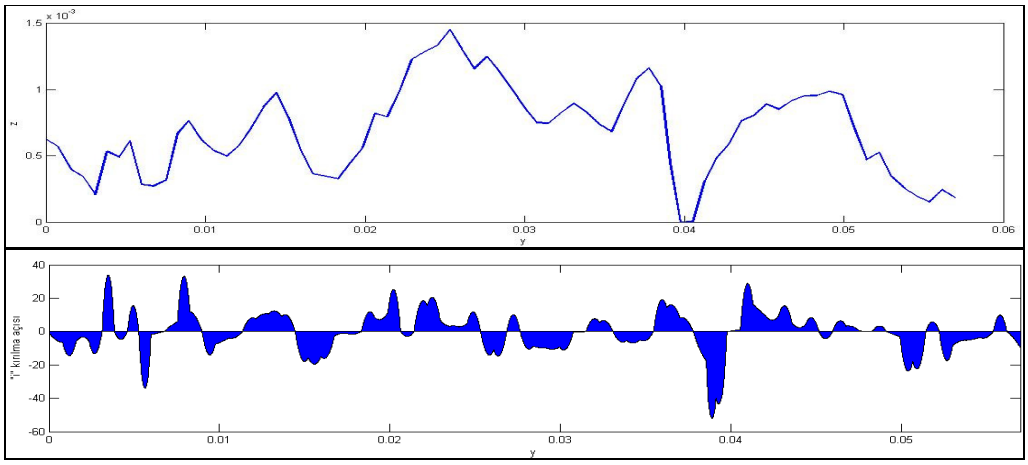


Şekil 4.10 : Kesit-Eğim Grafiği

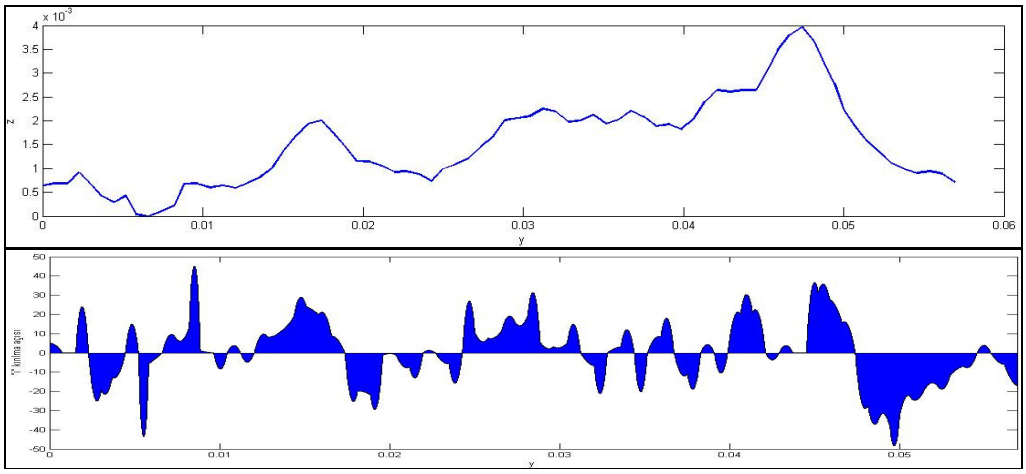
Kesit ve "i" kırılma açısı grafiği aşağıda Şekil 4.11 de gösterilmiştir.



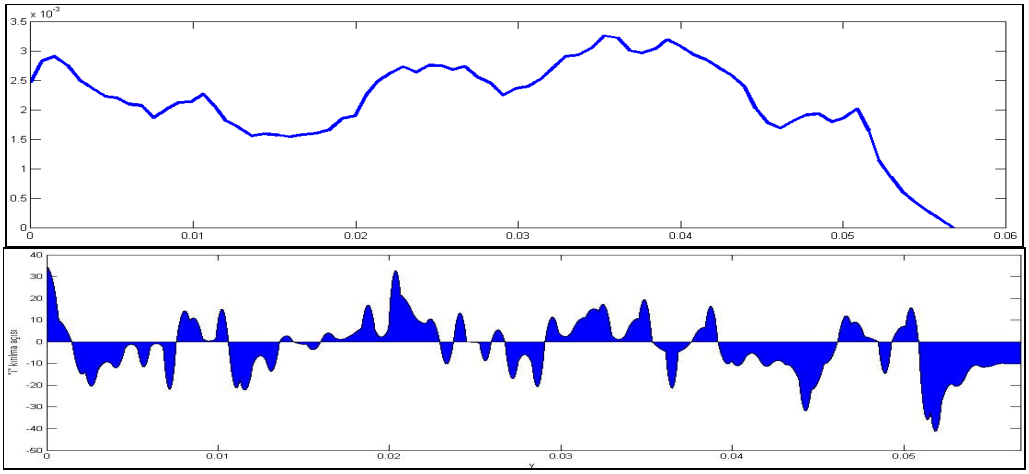
Şekil 4.11 : Kesit -"i" kırılma açısı grafiği



Kesit 6

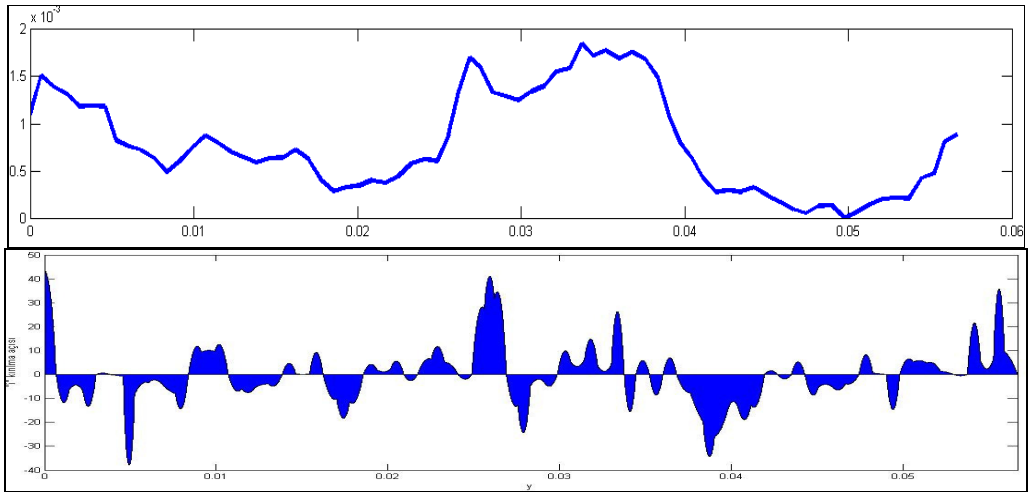


Kesit 12



Kesit 18

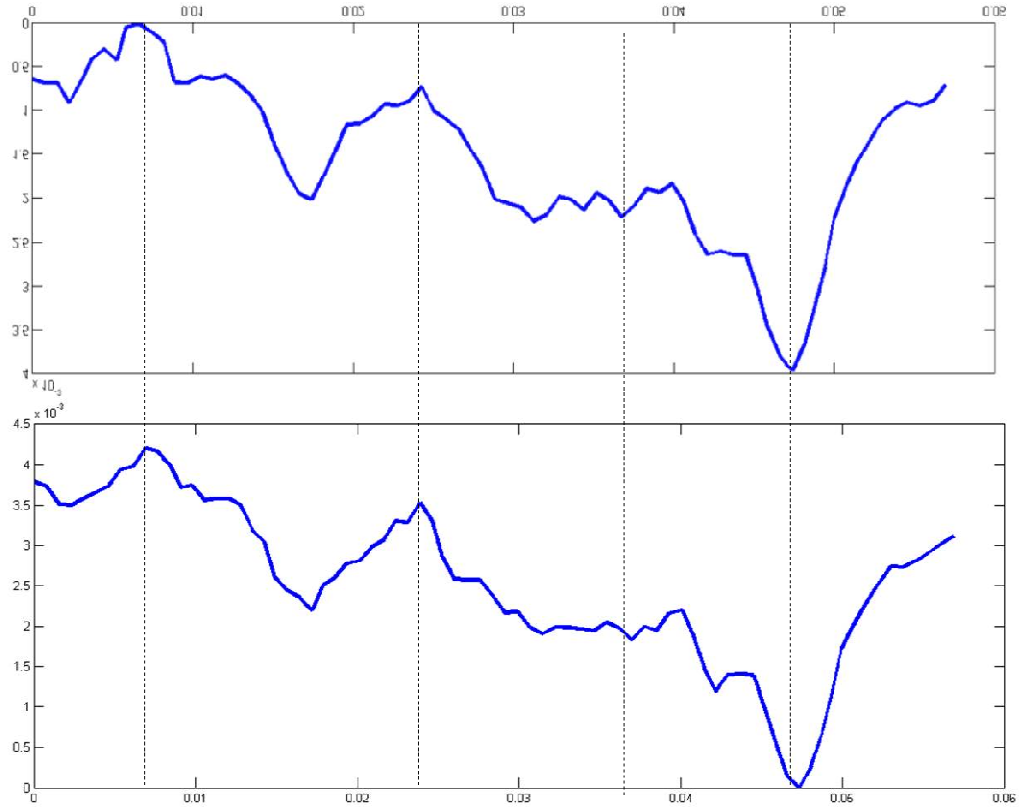
Şekil 4.12 : Kesit ve Kesit-"i" kırılma açısı grafikleri (Kesit 6-12-18-22) (devam)



Kesit 22

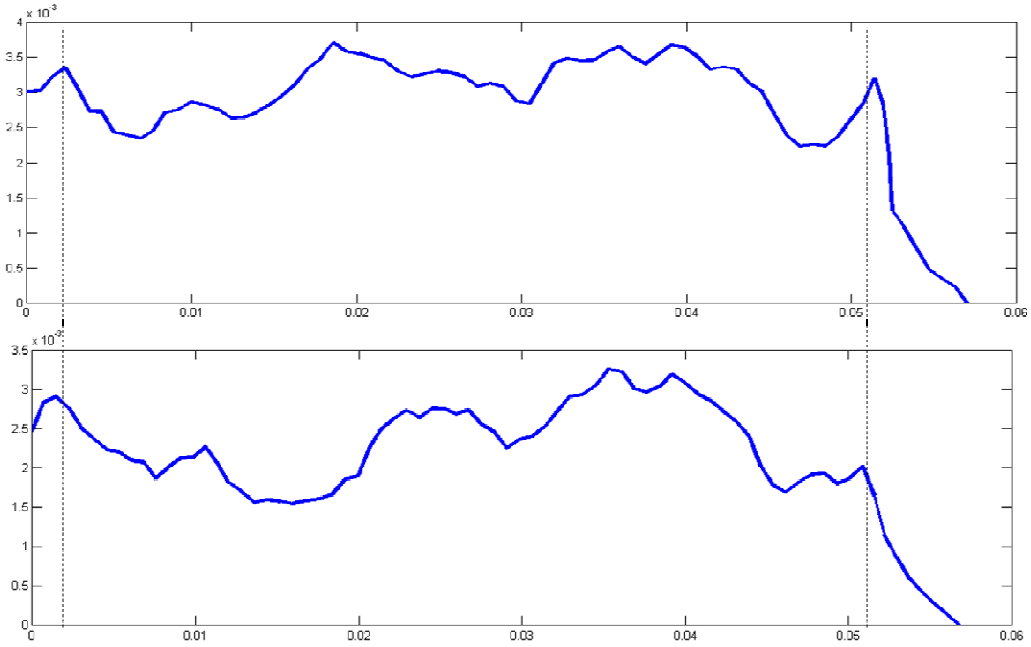
Şekil 4.12 : Kesit ve Kesit-"i" kırılma açısı grafikleri (Kesit 6-12-18-22)

İki yüzeyin 12. kesitlerinin karşılaştırılması aşağıda Şekil 4.13 de verilmiştir.



Şekil 4.13 : Yüzey 1-A'nın 12. kesiti ile yüzey 1-B'nin 12. kesitinin karşılaştırılması

İki yüzeyin 17. kesitlerinin karşılaştırılması aşağıda Şekil 4.14 de verilmiştir.



Şekil 4.14 : Yüzey 1-A'nın 17. kesiti ile yüzey 1-B'nin 17. kesitinin karşılaştırılması

Çizelge 4.3 : Yüzey 1-A üzerinde belirlenen kırılma açıları özet tablosu

Kesit No	Max Negatif	Min Negatif	Negatif Ortalama	Max Pozitif	Min Pozitif	Pozitif Ortalama	Mutlak Ortalama
1	-38.3208	-0.0023	-8.6558	37.8129	0.0053	7.8049	8.2364
2	-28.8836	-0.0002	-8.5227	25.2196	0.0072	7.3106	7.9476
3	-32.4174	-0.0001	-9.7604	30.3303	0.0010	9.2803	9.5361
4	-51.1690	-0.0097	-10.9820	70.7124	0.0001	9.9061	10.3960
5	-49.2474	-0.0083	-10.0108	29.1622	0.0020	9.5984	9.8086
6	-51.8865	-0.0021	-9.0071	33.8289	0.0098	8.9310	8.9700
7	-40.9286	-0.0002	-8.5929	30.7779	0.0141	9.3326	8.9235
8	-27.3463	-0.0017	-7.4216	41.7957	0.0007	6.9598	7.1749
9	-41.6546	-0.0002	-8.6367	40.3866	0.0002	9.0993	8.8519
10	-40.2161	-0.0012	-10.2423	33.7836	0.0001	9.5857	9.9120
11	-43.6502	-0.0003	-10.6123	45.9457	0.0001	9.0375	9.7651
12	-48.3877	-0.0099	-13.9258	45.0932	0.0021	11.6384	12.6654
13	-45.6043	-0.0127	-12.5224	54.0756	0.0010	12.8832	12.7046
14	-32.0336	-0.0156	-7.6283	50.3778	0.0187	9.4029	8.5432
15	-30.2673	-0.0029	-8.1418	36.3438	0.0023	11.3643	9.5386
16	-52.4033	-0.0001	-10.0970	31.3093	0.0013	9.6459	9.8737
17	-79.4900	-0.0019	-10.8761	35.4719	0.0036	9.4417	10.2498
18	-41.2093	-0.0003	-11.2599	34.8028	0.0096	8.5900	10.0593
19	-40.2175	-0.0024	-10.2501	58.3608	0.0037	11.2775	10.6701
20	-57.2543	-0.0020	-9.0562	60.7888	0.0005	9.2235	9.1379
21	-47.9730	-0.0013	-8.2178	60.6611	0.0020	9.8163	9.0052
22	-37.9007	-0.0015	-8.3276	44.0149	0.0004	8.1110	8.2220
23	-32.7216	-0.0052	-7.8704	25.2149	0.0019	5.7189	6.7924
Ortalama	**-43.0949**	**-0.0036**	**-9.5921**	**41.5770**	**0.0038**	**9.3026**	**9.4341**

Yüzey 1-B nin kırılma açıları özet tablosu aşağıda Çizege 4.4 de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : Yüzey 1-B üzerinde belirlenen kırılma açıları özet tablosu

Kesit No	Max Negatif	Min Negatif	Negatif Ortalama	Max Pozitif	Min Pozitif	Pozitif Ortalama	Mutlak Ortalama
1	-22.2532	-0.0031	-4.7395	20.9355	0.0005	5.3992	5.0226
2	-37.0282	-0.0001	-7.1784	32.5097	0.0082	6.3095	6.7787
3	-42.4844	-0.0015	-8.2903	34.4913	0.0060	6.8181	7.5882
4	-42.4970	-0.0007	-9.4483	34.8669	0.0072	8.1778	8.8414
5	-28.4814	-0.0008	-8.1338	31.6658	0.0011	8.3582	8.2247
6	-43.8789	-0.0033	-9.2872	65.1024	0.0060	8.7023	9.0074
7	-80.1964	-0.0017	-12.0688	31.4274	0.0037	7.5786	9.7572
8	-48.3746	-0.0024	-10.6385	34.7633	0.0007	7.4387	9.0066
9	-62.7150	-0.0006	-11.1253	29.2037	0.0019	8.7939	10.0534
10	-56.3402	-0.0003	-10.0533	42.1077	0.0039	10.5082	10.2372
11	-48.4896	-0.0013	-11.8776	49.0535	0.0147	12.0006	11.9325
12	-38.9898	-0.0030	-12.3449	46.8040	0.0008	11.7214	12.0390
13	-41.4193	-0.0006	-8.7397	41.3355	0.0121	10.1598	9.3276
14	-41.2478	-0.0022	-10.0056	41.7020	0.0092	10.3035	10.1448
15	-42.1544	-0.0014	-8.9390	38.6490	0.0043	7.8412	8.3700
16	-39.7966	-0.0029	-8.9424	24.8028	0.0026	6.3791	7.5617
17	-47.4872	-0.0037	-9.2782	42.8687	0.0006	9.5134	9.3925
18	-40.8778	-0.0094	-8.6220	51.8174	0.0036	7.9821	8.3277
19	-36.9743	-0.0002	-7.9001	26.8338	0.0002	6.5134	7.2289
20	-50.4330	-0.0007	-7.8946	44.7233	0.0054	6.8289	7.3739
21	-33.6755	-0.0038	-8.7612	28.0918	0.0021	5.9099	7.3867
22	-57.6406	-0.0003	-8.8582	35.4143	0.0016	9.9759	9.2410
23	-77.2630	-0.0048	-9.3909	35.6105	0.0002	8.4176	9.0135
Ortalama	**-46.1173**	**-0.0021**	**-9.2399**	**37.5991**	**0.0042**	**8.3318**	**8.7764**

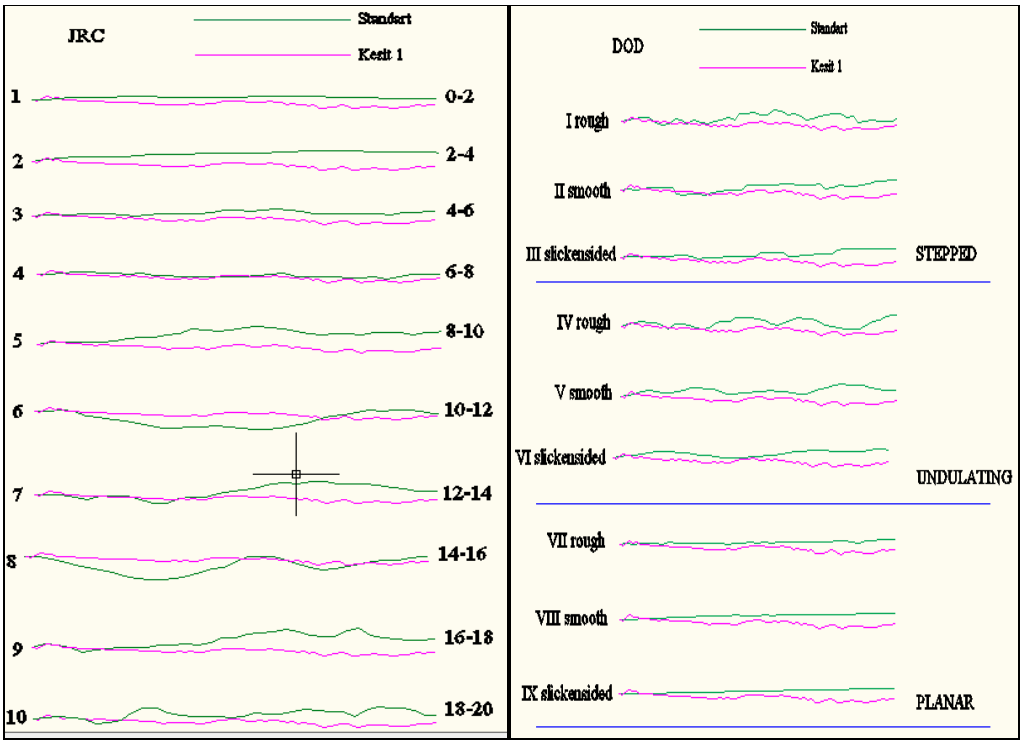
Elde edilen kesitler DOD ve JRC standartları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda, elde edilen kesitlerin standartlarla olan uyumluluk ilişkileri değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.5 : JRC standartları

Kesit No	Max Negatif	Min Negatif	Negatif Ortalama	Max Pozitif	Min Pozitif	Pozitif Ortalama	Mutlak Ortalama
1	-4.91	-0.27	-1.83	7.35	0.38	2.83	1.71
2	-2.35	-0.25	-1.45	11.76	0.37	2.87	1.87
3	-17.76	-0.23	-3.24	17.35	0.39	5.06	3.89
4	-22.64	-0.02	-5.04	20.96	0.03	4.45	4.31
5	-18.72	-0.18	-5.62	36.35	0.05	8.14	6.34
6	-24.29	-0.09	-10.31	25.17	0.56	7.07	7.66
7	-19.73	-0.56	-8.27	30.68	0.24	9.02	8.15
8	-34.30	-2.21	-12.67	36.25	0.21	10.13	10.93
9	-40.05	-0.34	-10.36	42.42	0.30	12.64	10.88
10	-33.72	-1.24	-12.68	42.95	0.58	13.08	11.97

Çizelge 4.6 : DOD standartları

Kesit No	Max Negatif	Min Negatif	Negatif Ortalama	Max Pozitif	Min Pozitif	Pozitif Ortalama	Mutlak Ortalama
1	-55.32	-1.92	-13.32	52.85	0.29	10.61	11.69
2	-43.05	-0.01	-6.58	48.67	0.97	6.17	6.33
3	-19.86	-0.03	-7.36	31.62	0.06	2.34	2.95
4	-23.27	-0.92	-9.80	35.89	0.49	11.47	10.68
5	-14.60	-0.64	-5.42	17.63	0.10	6.55	6.02
6	-7.81	-0.35	-2.93	8.34	0.02	3.57	3.33
7	-9.22	-0.48	-3.05	10.48	0.01	3.31	3.16
8	-3.66	-0.08	-1.31	6.65	0.06	1.65	1.53
9	-0.65	-0.10	-0.36	1.88	0.10	0.89	0.82



Şekil 4.15 : Kesit 1'in standart kesitlerle ilişkisi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yersel lazer tarama teknolojisi hızla gelişen bir teknolojidir. En önemli özelliği çok kısa sürede, ekonomik olarak objenin gerçeğe yakın 3 boyutlu modelinin elde edilebilmesi için nokta bulutları üretmesidir. Diğer 3 boyutlu modelleme teknikleri ile karşılaştırıldığında avantajları görülmektedir. Buna rağmen; bu sisteminde çözemediği sorunlar, elde edilen ürünlerde hatalar olabilmektedir. Bu sorunlar diğer modelleme teknikleri yardımıyla ve gelişen lazer teknolojisi ile çözülmeye başlanmıştır. Tarayıcıların konum doğruluklarını iyileştirmek, hata kaynaklarını azaltmak üzere çalışmalar yapılmaktadır. 3B ölçme verisi elde etmede yersel lazer tarama tekniği her geçen gün daha fazla alanda kullanılmaktadır. Kültürel ve tarihi mirasın belgelenmesinde, mimarlık alanında röleve çalışmalarında, deformasyon ölçmelerinde vb. birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Yersel lazer tarayıcıların yetenekleri sürekli geliştirilmekte, yeni özellikler eklenmektedir. Lazer tarayıcıların aynı zamanda total stationlar gibi kullanım özelliklerine kavuşması gelecekte olabilecek olası yeniliklerindendir.

Yapılan çalışma sonucunda yersel lazer tarama yönteminin doğruluk hız ve obje detaylarının belirlenmesi bakımından diğer ölçme tekniklerine göre daha etkili sonuçlar verdiği görülmüştür. Araziden alınan örneklerle hazırlanan karotlarla yapılan çalışmalarda masaüstü tarayıcılar, obje yüzeylerinin pürüzlülük açılarının belirlenmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılabilir. Görüldüğü gibi yersel lazer tarayıcıların kullanım alanları gün geçtikçe genişlemektedir. Verilerin elde etme aşamasından itibaren ölçme ve değerlendirme metodları, ofis uygulamaları, yazılım destekleri gibi birçok alanda yersel lazer tarayıcı sistemlerinin kullanılması etkili çözümler ve sonuçlar sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

[1] **Wittke, W.,** 1990. *Rock mechanics - theory and applications with case histories*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer.

[2] **Patton, F.D.,** 1966. *Multiple modes of shear failure in rock*. Proc. 1st Cong. ISRM, v:**1**, p:509-513. Lisbon.

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

[4] **ISRM,** 1978. *Suggested method for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 15, 319-368.

[5] **Tse, R., Cruden, D.M.,** 1979. *Estimating joint roughness coefficients*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 16, 303-307.

[6] **Türk, N., Greig, M.J., Dearman, M.R., Amin, F.F.,** 1987. *Characterization of rock joint surfaces by fractal dimension*. In, Farmel, 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, Tuscon, Arizona, Balkema, Rotterdam, 1223-1236.

[7] **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. & Geomech. Abstr. 27, 6, 453-464.

[8] **Priest, S.D.,** 1995. *Discontinuity analyses for rock engineering*. Chapman & Hall, p:274, London.

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

[10] **Deere, D.U., and Miller, R.P.,** 1966. *Engineering classification and index properties for intact rock*. Air Force Weapons Laboratory Technical Report, Volume **I-II**, Leonard Hill, 270 p.

[11] **Piteau, D.R.,** 1970. *Engineering geology contribution to the study of stability in rock with partic reference to De Beer's Mine*, PhD Thesis, Faculty of Science, University of the Witwatersrand.

[12] **Fecker, E., and Rengers, N.,** 1971. *Measurement of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass*. Rock fracture, Proc. of Int. Symp. Rock Mech., Nancy, Paper 1-18.

[13] **Carr J.R., and Warriner J.B.,** 1987. *Rock mass characterization using fractal dimesion*, Rock Mech., Proc. 28th US Symp. on Rock Mech. Tuscan, Arizona, Balkema, Rotterdam, 73-80.

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

[15] **Brown, S. R. and C. H. Scholz,** 1985. *Closure of rock joints*. J. Geophys. Res. 91, 4939 - 4948.

[16] **Power, W. L., T. E. Tullis, S. R. Brown, G. N. Boitnott, and C. H. Scholz,** 1987. *Roughness of natural fault surfaces*, Geophys.Res.Lett., 14,29–32.

[17] **Schmittbuhl, J., S. Gentier, and S. Roux,** 1993. *Field measurements of the Roughness of fault surfaces*, Geophys.Res.Lett., 20,639–641.

[18] **Kulatilake, P. H. S. W., Shou, G., Huang, T. H., and Morgan, R. M.,** 1995. *New peak shear strength criteria for an isotropic rock joints*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. And Geomech. Abstr., 32 (7) , 673–697.

[19] **Krohn, C. E. and Thompson, A. H.,** 1986. *Fractal sandstone pores: Automated measurements using scanning-electron microscope images*, Phys. Rev., B33, 6366–6374.

[20] **Ferrero A. M. & Giani G.P.,** 1990. *Geostatistical description of the joint surface roughness*, Rock Mech. Contribution and Challanges, Proc.31st . US. Symp. on Rock Mechanics, Colorado, Balkema, 463-470.

[21] **Tsoutrelis,** 1990. *Study of the rock mass discontinuity system using photoanalysis*, in Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Rossmanth(ed), 103-112.

[22] **Ayday, C., ve Göktan, R. M.,** 1990. *A preliminary engineering geology study directed to the conservation of Midas monument. Proceedings of International Earth Science Colloquium on the Aegean Region (IESCA)*, İzmir-Turkey, 102-108.

[23] **Ord, A. and Cheung, C.,** 1991. *Image analysis techniques for determining the fractal dimensions of rock joints and sragment size distribution*. in: Proc. of 7th Conf. of IACMAG, Rotterdam: Balkema, pp. 87-91.

[24] **Develi K.,** 1996. *Quantification of natural fracture surfaces using fractal geometry*, Mathematical Geology, 30 (8), 971-999.

[25] **Unal M.,** 2000. *Modelling of discontinuity surface roughness and investigation of its effects on shear strength*, PhD thesis, Hacettepe University, Ankara, 219.

[26] **Einstein, H. H., Nelson, R. A., Bruhn. R. W., and Hirschfeld, R. C.,** 1970. *Model studies of jointed rock behavior*. Proc., 11th Symp. of Rock Mechanics, Berkeley, Calif., 83-103.

[27] **Barton, N. R.,** 1973. *Review of a new shear strength criterion for rock joints*. Engrg. Geol., 7(4), 287–332.

[28] **Zhao, C.B.,** 1997. *A consistent point-searching algorithm for solution interpolation in unstructured meshes consisting of 4-node bilinear quadrilateral elements*. Int. J. Num. Meth. in Eng., 45(10), pp. 1509-1526.

[29] **Barton, N. R.,** 1976. *The shear strength of rock and rock joints*. Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 13(10), 1-24.

[30] **ISRM,** 1981. *Rock Characterization, Testing and Monitoring. International Society for Rock Mechanics Suggested Methods*, Oxford, Pergamon Press, 211 p.

[31] **Maerz N.H., Franklin J.A., and Bennett C.P.,** 1990. *Joint roughness measurements using shadow profilometry*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 27(5), 329-343.

[32] **Wyllie, D.C., and C.W. Mah,** 2004. *Rock slope engineering: civil and mining*. Based on Rock slope engineering by E. Hoek and J. Bray, 4nd Edition, Spon Press is an imprint of the Taylor & Francis Group.

[33] **Lichti D. D., and Gordon S. J.,** 2004. *Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording,* Proceedings of FIG Working Week, s.on CD, Athens, Greece.

[34] **Forkou E.K., and King B.,** 2004. *Automatic Fusion of Photogrammetric Imagery And Laser Scanner Point Clouds*, ISPRS XXth Congress, Commission 4, s.921-926, Istanbul.

[35] **Waggot S. M., Cleg P., Jones R. R.,** 2005. C*ombining Terrestrial Laser Scanning, RTK GPS and 3D Visualisation*: Application of Optical 3D Measurement in Geological Exploration, Proceedings of the 7th Conference on 3-D Optical Measurement Techniques, s.on CD, Vienna, Austria.

[36] **Reshetyuk Y.,** 2005. *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*, Department of Transport and Economics Division of Geodesy 100 44 Stockholm.

[37] **Barber, D., Mills, J. and Bryan, P. G.,** 2001. *Laser Scanning and Photogrammetry: 21st century metrology*, Potsdam, Germany, September 18 – 21, pp. 360 – 366.

[38] **Wehr, A. and Lohr, U.,** 1999. *Airborne laser scanning – an introduction and overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. **54**, pp. 68 – 82.

[39] **Amann, M-Ch.,** 2001. *Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement.* Optical Engineering, 40 (1), pp. 10 – 19.

[41] **Ingensand, H.,** 2006. *Methodological aspects in terrestrial laser-scanning technology*. 12th FIG Symposium on Deformation Measurements.

[42] **Elkhrachy I., and Niemeier W.,** 2006. *Optimization And Strength Aspects For Geo-Referencing Data With Terresterial Laser Scanner Systems*, 3rd IAG/12th FIG Symposium, CD Room, Baden.

[43] **Boehler, W., and Marbs, A.,** 2002. *3D Scanning Instruments*. In Proceedings of International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording Complementing or Replacing Photogrammetry. Corfu, Greece, September, 1 – 2.

[44] **Zweywe A.,** 2006. *HDS Porducts and Solutions, Proceedings of ISPRS Lidar Workshop,* s.on CD, Istanbul.

[45] **Akyol O., ve Duran Z., Aydar U.,** 2011. Düşük Maliyetli Optik Tarayıcı Sistem Tasarım Örneği, *Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği VI. Teknik Sempozyumu*, 23-26 Şubat 2011, Antalya.

[46] **Zagorchev, L., Goshtasby, A.,** 2006. *A paint-brush laser range scanner*, Computer Vision and Image Understanding 101.

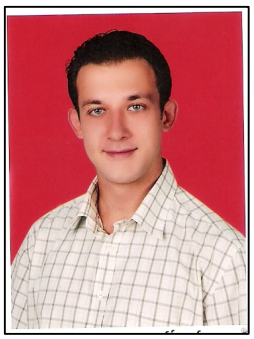
[47] **Duran Z., ve Aydar U.,** 2009. Nippur Uzunluk Ölçme Aletinin 3b Modellenmesi Ve Görselleştirilmesi*, Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği V. Teknik Sempozyumu*, Şubat 4-5, Ankara.

[48] **Gümüş K.,** 2008. *Yersel Lazer Tarayıcılar ve Konum Doğruluklarının Araştırılması*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

[49] **Altuntaş C., ve Yıldız F.,** 2008. Yersel Lazer Tarayıcı Ölçme Prensipleri ve Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi, *Hkmo Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, Sayı 98.

[50] **Aydar U., Avşar Ö., Kaya Ş., Şeker D.Z., Bozkurtoğlu E.,** 2011. Yüzeylerin Pürüzlülük Açılarının Lazer Tarayıcılar Yardımıyla Belirlenmesi, *TMMOB HKMO 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Nisan 18-22, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Emin Erbil YAZICILAR

Doğum Yeri ve Tarihi: Üsküdar 06.01.1985

Adres: Uğur mumcu mah. 2347. Sok. No:2 D:10 Sultangazi/İstanbul

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi – Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü