

SÜREKSİZLİK YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜ SAYISALLAŞTIRMAK İÇİN YENİ BİR ÜÇ BOYUTLU TARAMA CİHAZI

¹İ. Emre ÖNSEL, ²C. Atilla ÖZTÜRK

^{1,2}*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL*

¹onsel@itu.edu.tr, ²ozturk1@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 25.12.2013; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.01.2014)

ÖZET: Bu çalışmada kaya kütlelerinde bulunan süreksizliklere ait pürüzlülüklerin sayısallaştırılması için yeni bir üç boyutlu tarayıcı cihaz geliştirilmiştir. Cihazın çalışma prensibi, taranacak yüzeye dikey olarak çizgi lazer yansıtılması ve farklı bir açıdan görüntü alınarak, direk lineer transformasyon yöntemiyle profilin elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Sistem üç ana parçadan, mekanik, elektronik ve yazılımdan oluşmaktadır. Mekanik kısım, üzerinde çizgi lazer ve kamera bulunan bir taşıyıcı ve bu taşıyıcının üzerinde hareket edebildiği kızak sisteminden oluşmaktadır. Kızak üzerinde taşıyıcının hareketini sağlayan sonsuz mil ve buna hareketi veren bir adım motor vardır. Elektronik kart, yazılımdan gelen komutlara göre, adım motoru ve lazeri idare etmektedir. Yazılım aracılığıyla kamera kalibrasyonu, tarama, görüntü iyileştirme, lazer çizgisinin tespiti ve direkt lineer transformasyon ile üç boyutlu yüzeyin elde edilmesi işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu cihaz kullanılarak, temassız olarak, istenilen yüzeyin üç boyutlu topoğrafyası elde edilerek, analiz için gerekli veriler elde edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Kaya kütlesi, Süreksizlik, Pürüzlülük, Üç boyutlu tarayıcı*

A New 3D Scanner for Digitizing Discontinuity Surface Roughness

ABSTRACT: In this study, a new 3-dimensional scanner is developed to digitize the roughness of the discontinuity surfaces of rock mass. The device uses a camera and a laser which projects a line on the surface with right angle. The camera is placed diagonally to the surface so the profile of the surface can be recorded and can be digitized by direct linear transformation algorithm. The system consists of three main parts: hardware, electronic card and software. In the mechanical setup, the laser and the camera are scrolled along a rail by a worm gear which is driven by a step motor. Electronic card controls the laser and the step motor according to the commands from the software. Camera calibration, scanning, image analysis, detection of the laser stripe and direct linear transformation calculations are made by using the developed software. By using this device, a 3D topography of the surface can be obtained. With this data the roughness can be analyzed.

Key Words: *Rock mass, Discontinuity, Roughness, 3DScanner*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kaya kütlesi, sağlam kayaç malzemesi ve süreksizlik ağının birlikte oluşturduğu bir sistemdir. Sağlam kayaç malzemesi ise herhangi bir süreksizlik düzlemi tarafından sınırlandırılmamış birim kaya elemanıdır. Süreksizlikler; kaya kütlelerindeki eklem, tabaka düzlemi, fay, klivaj, foliasyon, çatlak gibi yüzey veya kırıklardır. Varlıkları, kaya kütlelerinin dayanım, stabilite, su depolama kapasitesi ve geçirgenliği gibi mekanik ve hidrojeolojik özelliklerini kuvvetli şekilde etkiler. Bu özellikler,

mühendislik tasarımlarında ve de yeraltı suyunun bulunması ve hareketinde ana rolü oynar (Şen ve Kazi, 1984, Şen, 2000, Goodman, 1993).

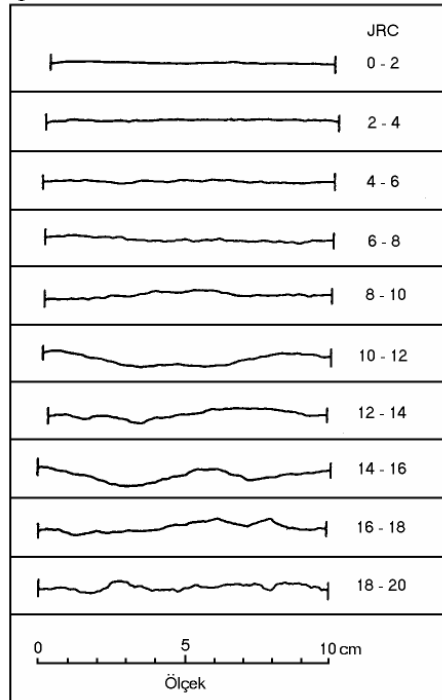
Süreksizliklerin önemli rol oynadığı başlıca mühendislik çalışmaları şöyle sıralanabilir:

- Yer altı ocaklarında, galeri ve tünellerde;
 - Tahkimat seçimi (Maerz ve Germain, 1996)
 - Su geliri tahmini (Park ve diğ., 2002)
 - Liçlenebilme potansiyelinin hesaplanması (Liu ve Brady, 1999)
 - Üretim yönteminin seçimi (Wang ve diğ., 2003)
 - Atık depolarının projelendirilmesi (Chen ve diğ., 2001)
- Açık ocaklarda şev stabilitesi hesapları (Ming ve diğ., 2013)
- Patlatmaların planlanması ve veriminin hesaplanması (Hamdi ve Mouza, 2005)
- Baraj temelinde sızdırmazlık ve stabilite hesapları (Johansson, 2009)
- Doğal taş ocaklarının planlanması (Onsel ve Nasuf, 2007)

Bu projelerin gerçekleştirilebilmesi için süreksizliklerin geometrik ağ modelinin, mekanik ve hidrolik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir (Um, 1997). Süreksizliğin en temel mekanik özelliği kesme dayanımıdır. Kesme dayanımının tespit edilmesi için kaya kütesinden süreksizliği içeren blok veya karotların elde edilerek direk kesme deneylerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Numunelerin elde edilmesi de, deneyin yapılması da çok zor, zahmetli ve zaman alıcıdır. Alternatif olarak Barton ve Choubey (1977) tarafından geliştirilen ve aşağıda verilen eşitlik kullanılarak, direk kesme deneyi yapılmadan kesme dayanımı bulunabilir.

$$\tau = \sigma_N \tan \left(\text{JRC} \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_N} \right) + \phi_r \right) \quad (1)$$

σ_N yüzeye gelen dikey gerilmedir. Eklem basınç dayanımı (JCS) ve temel sürtünme açısı (ϕ_r) basit deneylerle objektif olarak kolayca tespit edilebilmektedir. Eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) tespitinde ise, şu anki geçerli ISRM (1981) standardı subjektif bir yöntemdir. Barton ve Choubey (1977) tarafından hazırlanmış olan abak (Şekil 1), yüzeydeki pürüzlülüğün sayısallaştırılmasında kullanılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü, 10 adet 2 boyutlu pürüzlülük profil resmi ile karşılaştırılır. En çok benzetilen profilin katsayısı seçilerek sayısallaştırma yapılır.



Şekil 1. 10 Standart süreksizlik profili ve JRC değerleri (Barton ve Choubey, 1977) (10 Standart fracture profiles and their JRC values (Barton and Choubey, 1977))

Sayısallaştırma sırasındaki subjektiflik sorununu aşmak için çok sayıda yöntem ve ölçme tekniği geliştirilmiştir. Ölçüm yapmak için çok çeşitli cihazlar denenmiştir. Bu cihazların bir kısmı başka alanlarda kullanılmakta olan mevcut ticari ürünler veya bu iş için özel olarak geliştirilmiş cihazlardır. Bu cihazların bir kısmı laboratuvarında kullanılırken bir kısmı arazide de kullanılabilir. Bazıları çok basit mekanik sistemlerken, bazıları 0,05 µm çözünürlüğe kadar ulaşabilen optik sistemlerdir.

SÜREKSİZLİK PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜ SAYISALLAŞTIRMADA KULLANILAN CİHAZLAR (DEVICES FOR DIGITIZATION DISCONTINUITY ROUGHNESS)

Temasla Ölçüm Yapan Cihazlar (Tactile Measurement Devices)

Bu cihazlar ince bir iğne ucunu bir eksen boyunca yüzeye temas ettirerek kaydırırlar veya eşit aralıklarla adım attırırlar. İğne ucunun dikeydeki konumunun, yataydaki konumuna bağlı olarak kaydedilmesiyle profil elde edilir. İstenirse art arda gelen profillerin birleştirilmesiyle 3 boyutlu yüzey çizilir. Çözünürlük iğne ucunun çapına, yatay ve dikey konumunu belirleyen sensörlerin hassasiyetine, adım atılıyorsa adımların büyüklüğüne ve profiller arası mesafeye bağlıdır. Çalışma hızları düşüktür. İğne ucu zamanla aşınır. Temas ederek çalıştığı için çok yumuşak malzemede iz bırakabilir. İlk geliştirilen versiyonlar kağıt üzerine direkt çıktı alan, elle itilen mekanik sistemlerdir. Daha sonra bilgisayar kontrollü, sayısal çıktı veren modeller geliştirilmiştir. Arazi ve laboratuvar için geliştirilmiş versiyonları vardır.

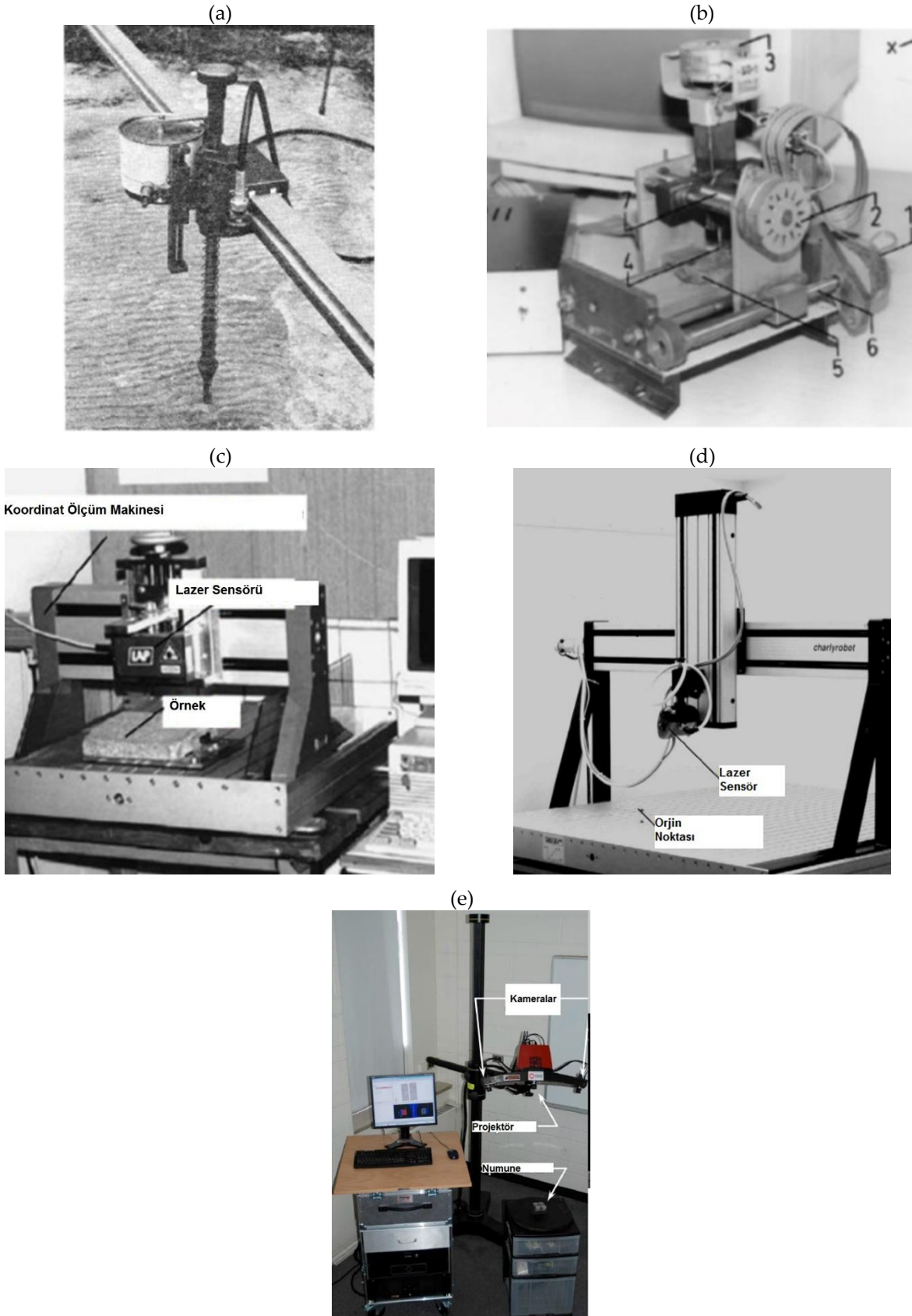
Mekanik sistemlere örnek olarak, Fecker ve Rengers (1971) tarafından geliştirilen cihaz verilebilir. Bir kızak üzerine komperatör yerleştirilmiştir (Şekil 2-a). Kızak süreksizlik yüzeyine paralel yerleştirildikten sonra komperatör kızak boyunca ötelenir. Komperatörün dikeyde yaptığı hareketler üstüne yerleştirilmiş tambura çizilir. Yüzeydeki girinti çıkıntılara takılmadan ilerlemesi için komperatörün ucuna bilye yerleştirilmiştir. Dikeydeki hassaslığı bu bilyenin çapı belirler. Çizilebilecek maksimum profil uzunluğu kızığın uzunluğuna bağlıdır. Bu yöntem, arazideki büyük ölçekli yüzeylerin kaydedilmesinde kullanılmıştır.

Develi ve diğ. (2001) tarafından tasarlanıp geliştirilen bilgisayar kontrollü yüzey tarama cihazı'nın maksimum tarama alanı 54x54 mm olup, yükseltelerin ölçümündeki hassaslığı ise 1/10 mm'dir (Şekil 2-b). Cihaz ile bilgisayar arasındaki haberleşme özel tasarlanmış bir kontrol ünitesi ile sağlanmıştır. Geliştirilmiş olan program, ölçüm sırasında okunulan değerleri eş zamanlı olarak bilgisayarda oluşturduğu veri dosyasına kaydetmektedir.

Temas Etmeden Ölçüm Yapan Cihazlar (Non-Contact Measuring Devices)

Bu yöntemde, iğne uç yerine alternatif olarak dikey ekseninde yükseklik ölçmek için lazer sensörü kullanılır. Yüzeye nokta lazer yansıtılır ve yansıma bir kamera veya sensör tarafından algılanarak mesafe hesabı yapılır. Nokta lazerin çapı ve onu algılayan sensörün hassasiyeti dikey çözünürlüğü belirler. Zhou ve Xie (2004) yaptıkları çalışmada, kumtaşı numunesi üzerinde 0,15 mm aralıkla, dikeyde ölçüm hassaslığı 7 µm olan profil ölçümleri gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2-c).

Diğer bir uygulama ise nokta lazer yerine çizgi lazer kullanmaktır. Çizgi lazer kullanıldığında çizgi boyunca kamera çözünürlüğü miktarınca noktanın aynı anda koordinatları tespit edilebilir. Ord ve Cheung (1991), çizgi lazer ve kamera kullanarak sahada yüzey taraması yapmışlardır. Lanaro (2000) yaptığı çalışmada çizgi lazer ve çift kamera sistemi, bir tabla üzerinde üç ekseninde de hareket edebilen bir kol üzerine açısı da ayarlanabilecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu şekilde numune her açıdan taranabilmektedir. Çizgi lazer 25 mm uzunluğunda olduğu için böyle hareketli bir sisteme gerek duyulmuştur. Böylelikle, 100cmx140cm boyutuna kadar olan numuneler taranabilmektedir (Şekil 2-d).

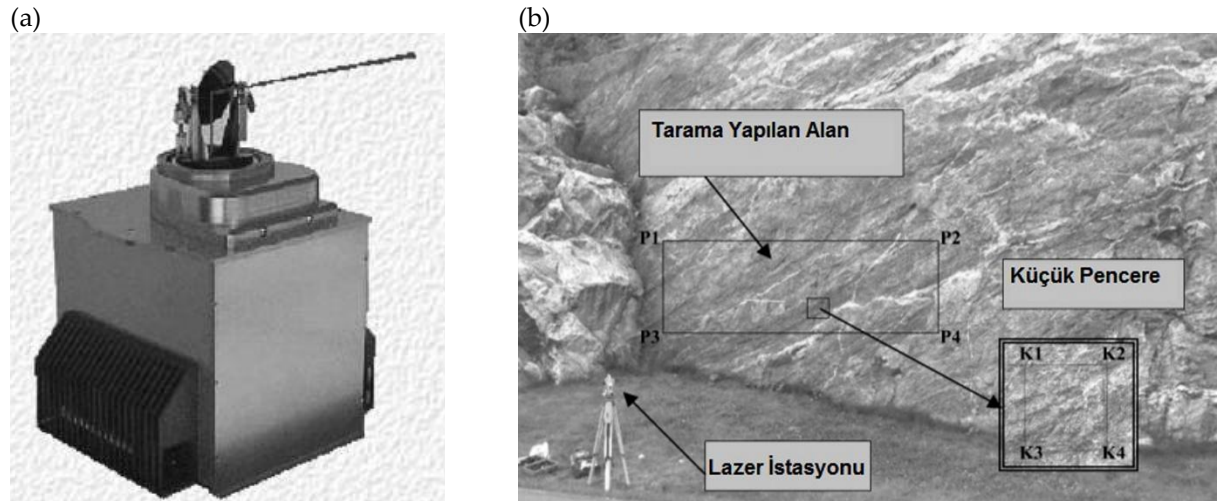


Şekil 2. (a) Fecker ve Rengers (1971), (b) Develi ve diğ. (2001), (c) nokta lazer (Zhou ve Xie, 2004), (d) çizgi lazer (Lanaro, 2000), (e) ATOS II 3B tarama cihazı (Tatone ve Grasselli, 2009) ((a) Fecker and Rengers (1971) (b) Develi et al. (2001), (c) dot laser (Zhou and Xie, 2004) (d) line laser (Lanaro,2000) (e) ATOS II 3D Scanner (Tatone and Grasselli, 2009))

Farklı bir uygulama ise, bir projektör ve onun iki tarafına yerleştirilmiş kameralardan oluşan bir sistemdir. Projektör ile taranacak yüzeye desenler yansıtılarak, üçgenleme yöntemiyle oluşan kontürlerin koordinatları belirlenir. Tek seferde çok sayıda noktanın koordinatı tespit edilir. Cihazın boyutları taşımaya uygundur. Bu yöntemle çalışmakta olan ticari bir ürün olan ATOS II tarayıcısı Grasselli tarafından birçok çalışmada kullanılmıştır (Şekil 2-e)(Grasselli ve diğ., 2002; Grasselli ve Egger, 2003; Grasselli, 2006; Tatone ve Grasselli, 2009).

Fardin ve diğ. (2004) boyut etkisini incelemek için büyük süreksizlik yüzeylerinde çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bunun için lazer radarı olarak adlandırılan robotların navigasyonu için geliştirilmiş yüksek hıza sahip, 0,4-54 m arasındaki mesafeleri tarayabilen, açık alanda kullanılabilen sistemi kullanmışlardır. Sistem nokta lazerle ölçüm yapan bir kafa ve bunu yönlendiren mekanik kısımlardan oluşmakta ve 3-5 mm hassaslığında çalışmaktadır. Saniyede 625.000 nokta ölçülebilmektedir. Lazer ile mesafe ölçülmekte, mekanik bölüm yatay ve dikey açıyı vermektedir (Şekil 3-a).

Lazer istasyonu (total station), genellikle uzayda kontrol noktalarının koordinatlarını ölçmede kullanılan reflektörsüz jeodezik bir cihazdır. Nokta lazer kullanılarak istenilen mesafeden, belirlenen alan istenen adım büyüklüğüyle taranır. Feng, 2002 'de yaptığı çalışmada, Leica TCRM 1102 lazer istasyonunu kullanmıştır. Bu cihaz 1 mm çözünürlüğe ve 3 mm +2 ppm hassasiyete sahiptir (Şekil 3-b).



Şekil 3. Arazide ölçüm yapabilen tarayıcılar: (a) LARA 3B tarayıcı (Fardin ve diğ., 2004) (b) Lazer istasyonu (Feng ve diğ., 2004) (Devices for in situ measurements: (a) LARA 3D Scanner (Fardin, 2004) (b) Total Station (Feng et al., 2002))

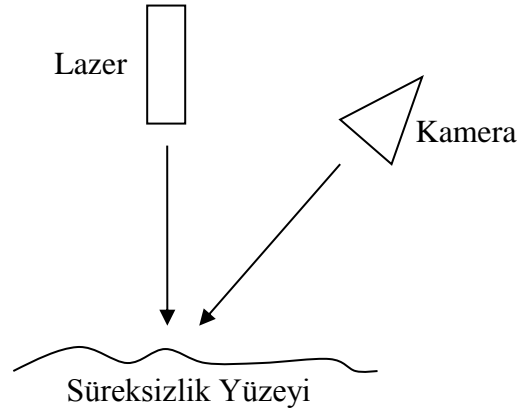
Chae ve diğ. (2004) yaptıkları çalışmada konfokal lazer tarama mikroskobu (KLTM) kullanmışlardır. KLTM galvanometre tarama aynaları kullanarak ve ışık polarizasyonu yaparak tarama yapar. 10x10 cm boyutundaki numunelerde, yatay eksenlerde 2,5 μm , dikeyde 0,05 μm çözünürlükte tarama yapabilmektedir (Şekil 4). Kullanılan tüm cihazlar içerisinde en hassas sonuç bu cihazda elde edilebilmektedir.



Şekil 4. Konfokal lazer tarama mikroskobu (Chae ve diğ., 2004) (*Confocal laser scanner microscope (Chae et al., 2004)*)

GELİŞTİRİLEN TARAYICI (THE DEVELOPED SCANNER)

Pürüzlülüğün tespiti için, çizgi lazer ve video kamera kullanarak ölçüm yapan bir cihaz geliştirilmiştir. Şekil 5'de ölçüm sistemi gösterilen cihazın, çalışma prensibi şu şekildedir. Dik yerleştirilen lazer ile süreksizlik yüzeyine çizgi şeklinde lazer ışını yansıtılır. Çapraz yerleştirilen bir kamera ile fotoğraf çekilir. Bu fotoğraf işlenerek lazer çizgisinin koordinatları elde edilir. Bu koordinatlar çizginin düştüğü yüzeyin profilini verir. Art arda alınan profillerin birleştirilmesiyle üç boyutlu görüntü elde edilir.



Şekil 5. Lazer ve kameranın yüzeye göre konumu (*Location of laser and camera according to the surface*)

Cihaz, bilgisayardan kontrol edilecek şekilde tasarlanmıştır. Donanım olarak kamera ve lazerin monte edildiği tek eksenli adım motor kullanarak hareket sağlayan sistem ve bu sistemi bilgisayardan gelecek komutlarla idare etmek için kullanılan elektronik kontrol kartı geliştirilmiştir. Geliştirilen

yazılım ile tarayıcı kontrol edilebilmekte ve toplanan veriler işlenerek 3 boyutlu yüzey elde edilmektedir.

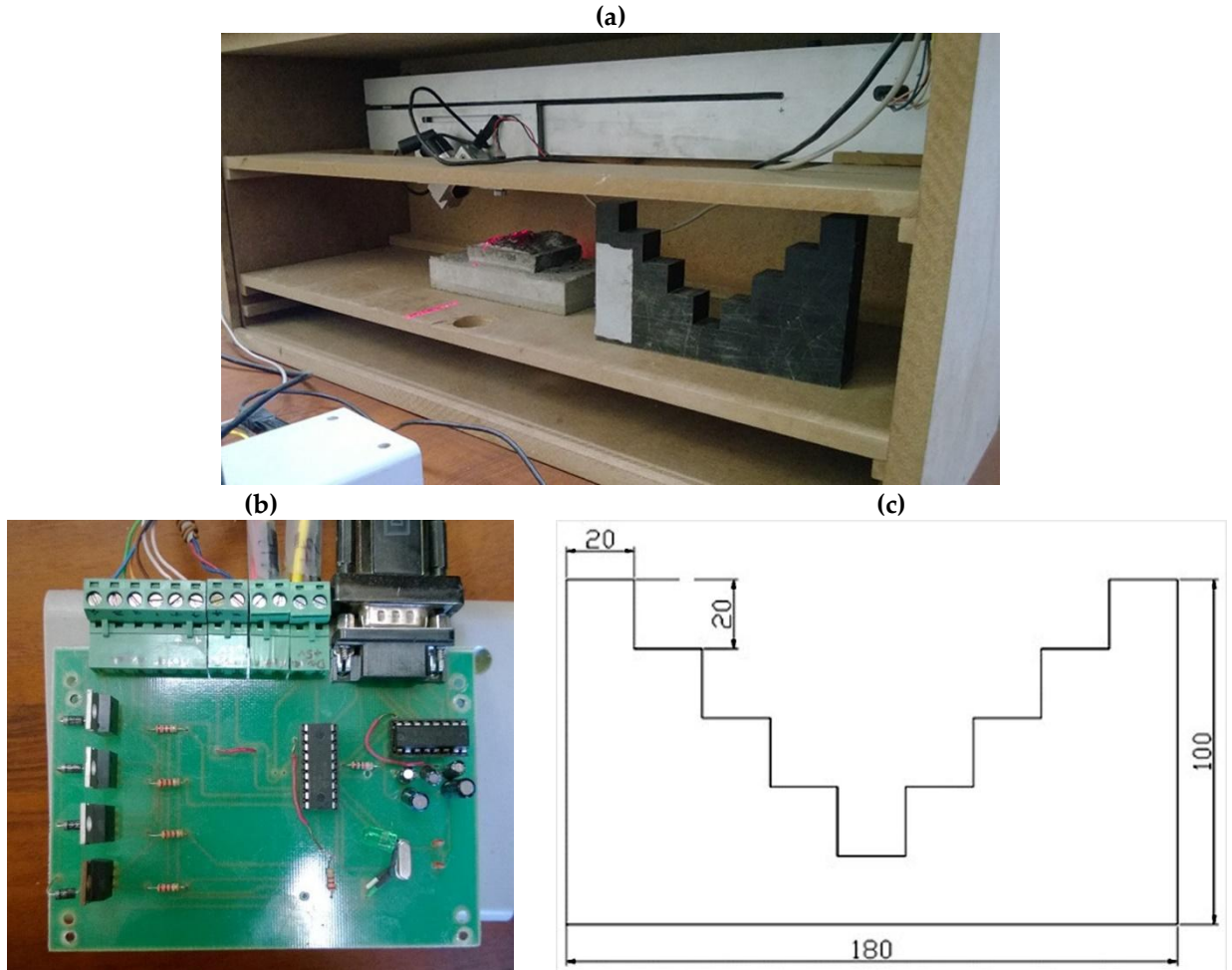
Donanım (Hardware)

Kamera ve lazerin, Şekil 5'deki düzende istenilen açıda yerleştirilebilecekleri bir platform tasarlanmıştır. Bu platform 45 cm uzunluğundaki ray üzerine yerleştirilmiş ve sonsuz bir vidaya bağlanmıştır. Sonsuz vida adım motora bağlanarak mekanik sistem tamamlanmıştır.

Kullanılan lazer, yansıtıldığı yüzeyde çizgi şeklinde ışın vermektedir. Dalga boyu aralığı ~625-740 nm Frekans aralığı ~480-405 THz dir. Üzerinde odak ayarı vardır. Kamera, yatayda 1920, dikeyde 1080 adet pikselin kaydını yapabilen bir web kamerasıdır.

Açısal konumu adımlar halinde değiştiren, çok hassas sinyallerle sürülen motorlara adım motorları denir (MEB, 2011). Adımdan da anlaşılacağı gibi adım motorları belirli adımlarla hareket ederler. Bu adımlar, motorun sargılarına uygun sinyaller gönderilerek kontrol edilir. Bu cihazda kullanılan adım motor, her sinyalde 7,5 derece dönmektedir. Sonsuz mil bir tur döndüğünde, platform 1 mm ilerlediği için her adımda platform ~0,021 mm ilerlemektedir.

Bu sistemin laboratuvar da pratik olarak kullanımı için bir kasa tasarlanmıştır (Şekil 6-a). Kasa kapalı şekilde tasarlandığı için ışık almamakta, bu da tüm taramaların aynı kamera ayarlarında yapılabilmesini sağlamaktadır. Arazide kullanıldığı durumlarda ise tarayıcı 190 cm uzunluğundaki bir alüminyum profil ile teodolit sehпасı üzerine monte edilmektedir.



Şekil 6. (a) Tarayıcının, laboratuvar kullanımlarında içerisine yerleştirildiği kasa, (b) Elektronik kart, (c) Kalibratörün boyutlandırılmış kesiti (boyutlar mm'dir) ((a) Scanner is placed in a box for laboratory usage, (b) Electronic card (c) Section of Calibrator scaled in "mm")

Elektronik Kontrol Kartı (Electronic Card)

Şekil 6-b'de gösterilen kart seri port üzerinden bilgisayara bağlanmaktadır. MAX232 entegresi kullanılarak seri port verisi PIC 16f628A mikro denetleyicisine aktarılmakta ve gelen komutlara bağlı olarak PIC, lazeri ve adım motoru kontrol etmektedir. PIC'ten gelen sinyaller ise IRLZ44N mosfeti kullanılarak adım motora iletilmektedir.

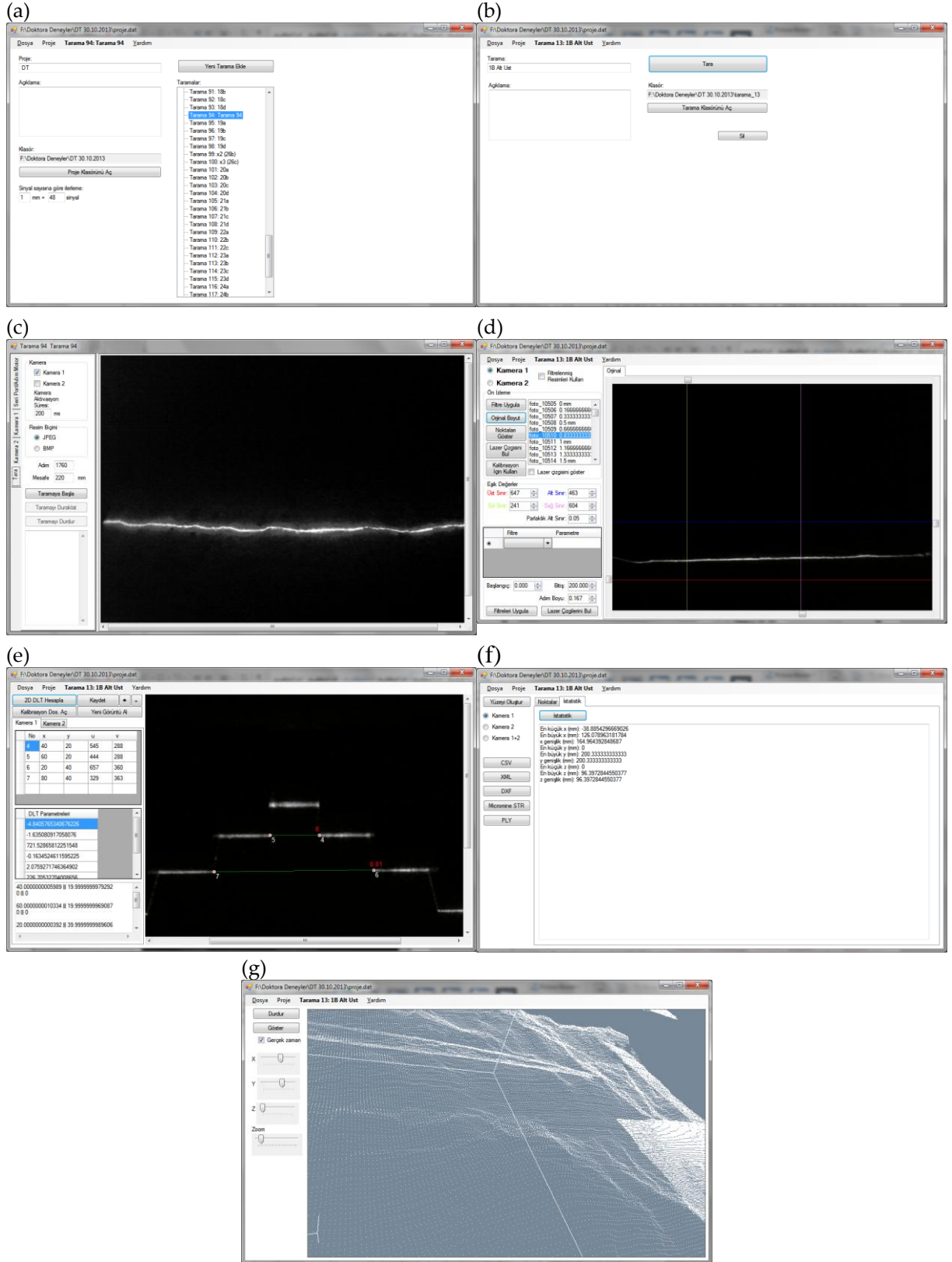
Yazılım (Software)

Geliştirilen tarayıcıyı kontrol etmek üzere, Microsoft Visual Basic kullanılarak, bir bilgisayar programı yazılmıştır. Yazılımın ana bölümleri ise; tarama işleminin yapılması, kamera kalibrasyonu, görüntü işleme, 3 boyutlu verinin hesaplanması ve görüntülenip, kaydedilmesi kısımlarından oluşmaktadır. Şekil 7'de yazılımın arayüzü verilmiştir.

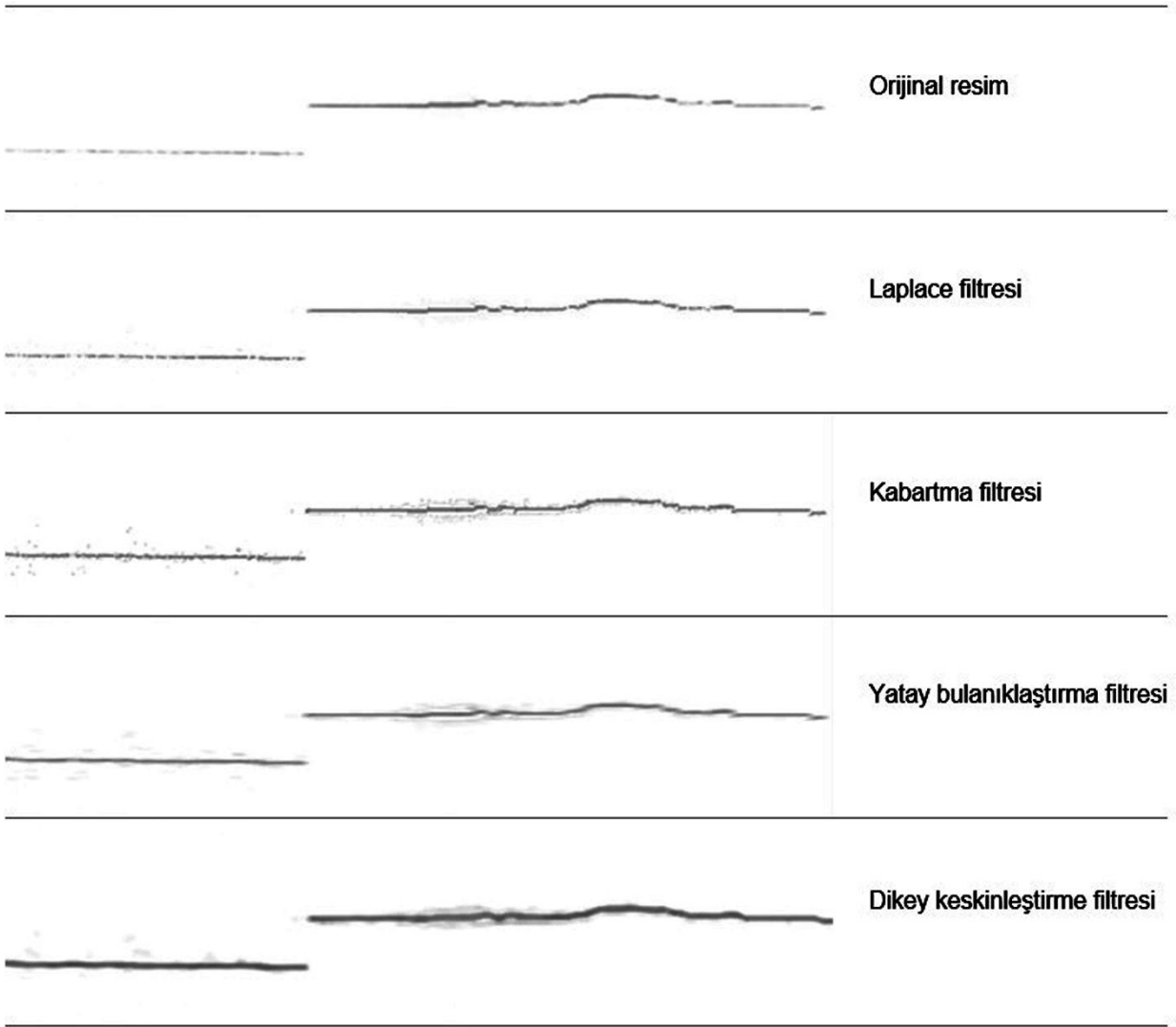
Tarama işlemi için önce seri porttan karta bağlantı sağlanır. Daha sonra kamera seçilip, çözünürlük, odak, parlaklık, beyaz dengesi gibi ayarlar yapılır. Taranmak istenen mesafe ve bu mesafe boyunca kaç tane görüntü alınacağı bilgileri girilerek tarama işlemi başlatılır. Burada girilen parametreler tarama çözünürlüğünü belirlediği için önemlidir. Kamera çözünürlüğü seçimi, kameranın yüzeye olan uzaklığına bağlı olarak, taranan yüzeye dik olan yatay eksenin ve dikey eksenin çözünürlüğünü belirler. Taranan yüzeye paralel olan yatay eksenin çözünürlüğü de taranacak mesafedeki profil sayısına bağlıdır. Tarama bittiğinde işlenmeye hazır halde ve istenen miktarda profil görüntüsü elde edilmiş olur.

Kamera ile alınan görüntülerden lazer çizgisinin konumunun tespit edilmesi gerekmektedir. Görüntülerdeki en parlak piksellerin lazer çizgisine ait olması gerekmekte ve bu kabule dayanarak geliştirilen kod her sütundaki en parlak pikseli bulup kaydetmektedir. Bu işlem görüntüye bağlı olarak her zaman doğru sonuç vermeyebilmektedir. Taranan yüzeyin parlaklık/matlık özellikleri, ortamın ışığı, kameranın ayarları, optik özellikleri ve sensör özelliklerine göre lazer çizgisi istenilen netlikte görüntüde yer almayabilir. Bu sorunu çözmek için görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır.

Bir resmin üzerinde filtre varmış gibi görüntüyü değiştirebilen algoritmalara filtre olarak adlandırılır. Bu algoritmalarından ortalama, medyan, kabartma, keskinleştirme, gauss bulanıklaştırma, yatay bulanıklaştırma, dikey keskinleştirme, gri tonlama, Laplace, sınır geliştirme, sınır tespit etme, eşik değer ve parlaklık, genel olarak konvolüsyon yöntemi kullanarak kodlanmıştır. Şekil 8'de örnek bir uygulama verilmiştir.



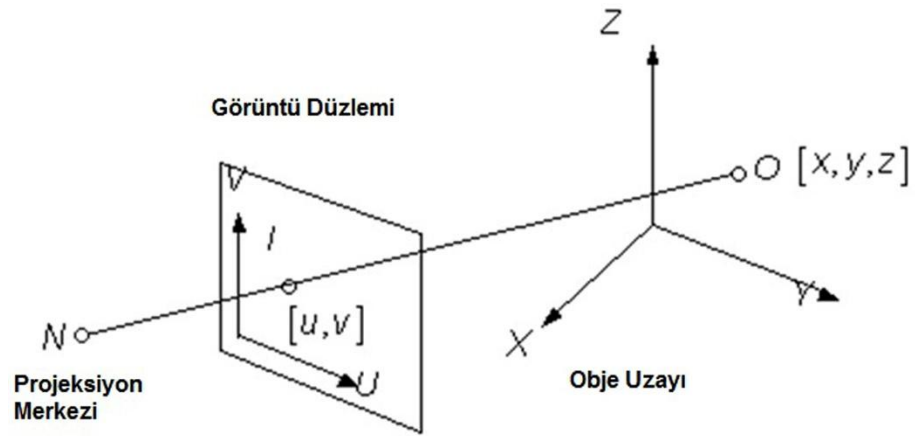
Şekil 7. Yazılımın ekran görüntüleri: (a) Proje ayarları (b) Tarama ayarları (c) Tarama işlemi (d) İmaj analiz (e) Kalibrasyon (f) 3B yüzeyin hesaplanması (g) 3B yüzeyin gösterimi (Screenshots from the software: (a) Project Settings (b) Scan Settings (c) Scanning (d) Image analysis (e) Calibration (f) 3D surface calculation (g) 3D surface view)



Şekil 8. Filtrelerden geçirilen bir profilin değişim aşamaları (*Different filters are applied to a profile*)

Kamera kalibrasyonu, kameranın yapısal geometrik ve optik karakterinin (iç parametreler) ve/veya belirli bir dünya koordinat sistemine göre kamera çerçevesinin 3 boyutlu pozisyon ve oryantasyonun (dış parametreler) belirlenmesidir. Kalibrasyonun amacı 3 boyutlu dünya koordinatları ve bilgisayardan elde edilen 2 boyutlu görüntü koordinatları arasındaki ilişkiyi belirlemektir (Lenz ve Tsai, 1988).

Şekil 9'da 3 boyutlu koordinat sistemindeki bir noktanın 2 boyutlu koordinat sistemindeki izdüşümü verilmiştir. Şekilde, "N" noktasındaki kamera, "I" noktasındaki izdüşümü ve görüntülenen "O" noktası aynı doğru üzerindedir. Bu durum direkt lineer transformasyon (DLT) metodunun temelini oluşturur (Kwon, 1998).



Şekil 9. 3 boyutlu koordinat sistemindeki "O" noktasının, 2 boyutlu koordinat sisteminde "I" noktasındaki izdüşümü (Kwon, 1998). (The projection of the point "O" in 3D coordinate system onto 2D screen plane as "I" point)

Bu çalışmada, çizgi lazerin bir düzlem oluşturmasından faydalanılarak, 3 boyutlu DLT yerine 2 boyutlu DLT metodu kullanılmıştır. z koordinatları 0 alınarak 2 boyutlu DLT matrisi elde edilir (Eşitlik 2).

$$\frac{1}{K} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_7 \\ L_8 \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Yukarıdaki matrisin doğru çözülebilmesi için, olabildiğince hatasız boyutlandırılmış, bir kalibratör üretilmiştir (Şekil 6-c). Kalibratörün üstüne çizgi lazer yansıtılıp, görüntü alınır. 4 adet nokta işaretlenip, matristeki x, y, u ve v değerleri belirlenir. Matrisin çözülmesiyle DLT parametreleri tespit edilerek kalibrasyon yapılmış olur. Bu parametreler ve görüntülerden elde edilen (u, v) koordinatları ile bu matris kullanılarak, (x, y) koordinatları saptanır ve yüzey profilleri elde edilebilir.

Yüzey profillerinin arka arkaya birleştirilmesiyle üç boyutlu nokta bulutu şeklinde yüzey elde edilir. Yüzey verisi DXF, CSV, XML veya Micromine String dosyası olarak kaydedilebilir. İstenirse program içerisinde açılıp incelenebilir.

Şekil 10-a'da gösterilmiş olan süreksizlik yüzeyi 1280x960 piksel çözünürlüğünde ve 0,125 mm aralıklarla taranmıştır. Sonuç Micromine dosyası olarak kaydedilmiş ve Micromine'da telkafes (wireframe) haline getirilmiştir (Şekil 10-b).

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

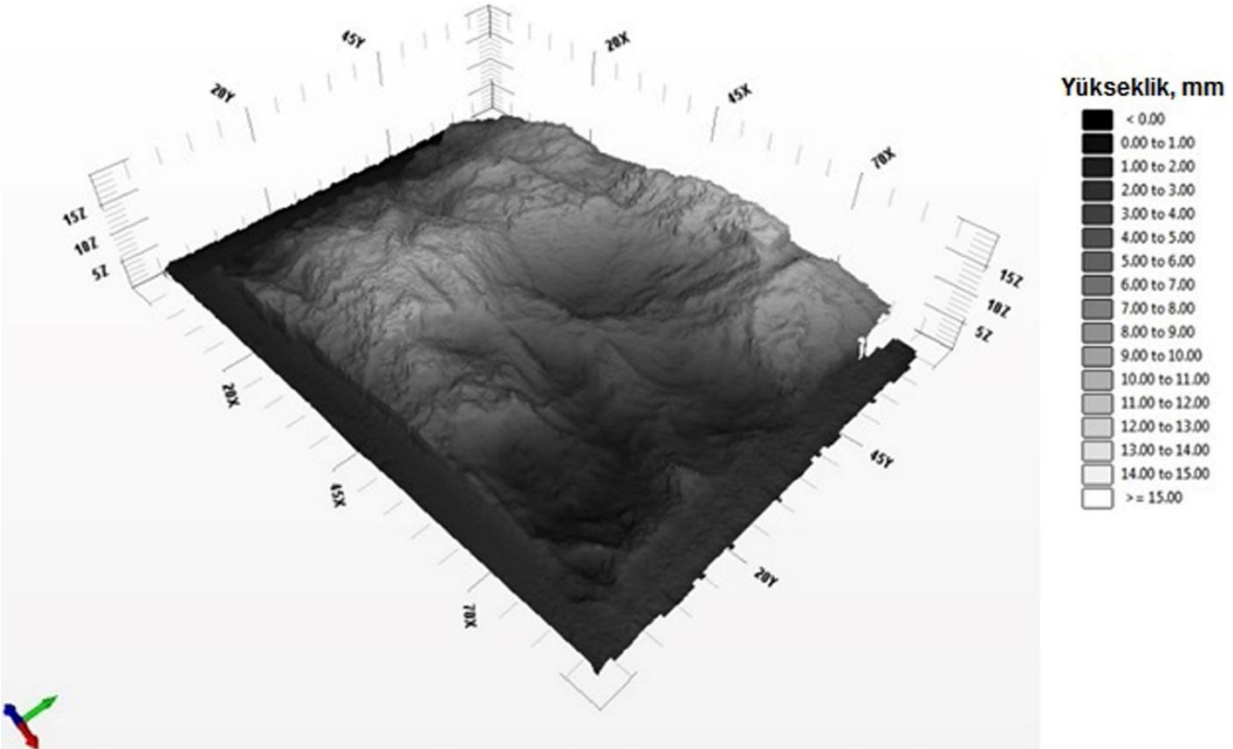
Bu çalışma kapsamında, kaya kütlelerini oluşturan süreksizlik yüzeylerindeki pürüzlülüğün sayısallaştırılabilmesi amacıyla bir cihaz geliştirilmiştir. Geliştirilen cihaz; mekanik kısım, elektronik kart ve yazılım olmak üzere 3 ana bileşenden meydana gelmektedir. Yazılım; tarama işleminin yönetilmesi, verilerin toplanması, verilerin işlenmesi ve çıktıların alınması görevlerini üstlenmektedir. Elektronik kart, yazılımdan gelen komutlara göre mekanik kısmı yönetmektedir ve mekanik kısım ise, bir kızak yardımıyla, ölçümleri yapmakta kullanılan çizgi lazer ve kamerayı istenen konuma getirmektedir. Cihaz, 45 cm boyunca, ~0,021 mm'de bir profil üretebilmekte ve bu profillerden direkt lineer transformasyon yöntemiyle elde edilen verileri kullanarak, incelenilen örneklerin yüzeylerini gerçeğe en

yakın şekliyle modelleyebilmektedir. Tüm bunlar, pürüzlülük ölçümlerinde objektif sonuçların üretilebilir olmasını sağlaması açısından önemlidir. Yapılacak ileri çalışmalar ile arazide ölçümlerin bu veya benzeri cihazlar ile gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

(a)



(b)



Şekil 10. (a) Taranan süreksizlik yüzeyi (b) Tarama sonucu elde edilen üç boyutlu yüzey ((a)Scanned discontinuity surface (b) 3D result of the scan)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Barton, N., Choubey, V., 1977, "The Shear Strength Of Rock Joints In Theory And Practice", *Rock mechanics*, Cilt 10, Sayı 1-2, sayfa 1-54.
- Chae, B. G., Ichikawa, Y., Jeong, G. C., Seo, Y. S. and Kim, B. C., 2004, "Roughness Measurement of Rock Discontinuities Using a Confocal Laser Scanning Microscope and the Fourier Spectral Analysis", *Engineering Geology*, 72, 3-4, 181-199.
- Chen, R. H., Lee, C. W. and Chen, C. S., 2001, "Evaluation of Transport of Radioactive Contaminant in Fractured Rock", *Environmental Geology*, 41, 3-4, 440-450.
- Develi, K., Babadagli, T. and Comlekci, C., 2001, "A New Computer-Controlled Surface-Scanning Device for Measurement of Fracture Surface Roughness", *Computers & Geosciences*, 27, 3, 265-277.
- Fardin, N., Feng, Q. and Stephansson, O., 2004, "Application of a New in Situ 3d Laser Scanner to Study the Scale Effect on the Rock Joint Surface Roughness", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 2, 329-335.
- Fecker, E., Rengers, N., "Measurements of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass", *Proceedings Symposium Rock Fracture*, Nancy, 1-18, 1971.
- Feng, Q., Fardin, N., Jing, L. and Stephansson, O., 2003, "A New Method for in-Situ Non-Contact Roughness Measurement of Large Rock Fracture Surfaces", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36, 1, 3-25.
- Goodman, R. E., 1993, *Engineering Geology : Rock in Engineering Construction*, J. Wiley, New York ; Chichester.
- Grasselli, G., 2006, "Manuel Rocha Medal Recipient - Shear Strength of Rock Joints Based on Quantified Surface Description", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39, 4, 295-314.
- Grasselli, G. and Egger, P., 2003, "Constitutive Law for the Shear Strength of Rock Joints Based on Three-Dimensional Surface Parameters", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 1, 25-40.
- Grasselli, G., Wirth, J. and Egger, P., 2002, "Quantitative Three-Dimensional Description of a Rough Surface and Parameter Evolution with Shearing", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 6, 789-800.
- Hamdi, E. and du Mouza, J., 2005, "A Methodology for Rock Mass Characterisation and Classification to Improve Blast Results", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 2, 177-194.
- Johansson, F., 2009, *Shear Strength of Unfilled and Rough Rock Joints in Sliding Stability Analyses of Concrete Dams*, Doktora Tezi, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Kwon, Y.H., *Camera Calibration*, <http://www.kwon3d.com/theory/calib.html>, Ziyaret tarihi: 20.12.2013.
- ISRM, 1981, *Rock Characterization Testing & Monitoring : Isrm Suggested Methods*, Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics by Pergamon, Oxford.
- Lanaro, F., 2000, "A Random Field Model for Surface Roughness and Aperture of Rock Fractures", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, 8, 1195-1210.
- Liu, J., Brady, B. H., 1999, "Evaluation of in Situ Leaching Processes: Dual-Porosity Model", *Min. Res. Eng.*, sayfa 205.
- Maerz, N. H. and Germain, P., 1996, "Block Size Determination around Underground Openings Using Simulations", *Measurement of Blast Fragmentation*, 215-223.
- Milli Eğitim Bakanlığı, *Step Ve Servo Motorlar, Elektrik- Elektronik Teknolojisi*, Ankara, 2011.
- Ming, M. A., Hong-jie, L. I., Lei, H.E., 2013, "3D Fracture Network And Block Analysis Of The South End-Slope Of Antaibao Coal Mine", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 353-356, sayfa 1165-1170.
- Önsel, İ.E., Nasuf, E., "Modeling of the Discontinuities in the Natural Stone Quarries", *APCOM*, 2007.
- Park, B. Y., Kim, K. S., Kwon, S., Kim, C., Bae, D. S., Hartley, L. J. and Lee, H. K., 2002, "Determination of the Hydraulic Conductivity Components Using a Three-Dimensional Fracture Network Model in Volcanic Rock", *Engineering Geology*, 66, 1-2, 127-141.
- Sen, Z., 2000, "Rock Quality Designation Model Formulation and Simulation for Correlated Fracture Intact Lengths", *Mathematical Geology*, 32, 8, 985-999.
- Sen, Z. and Kazi, A., 1984, "Discontinuity Spacing and Rqd Estimates from Finite Length Scanlines", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 21, 4, 203-212.
- Tatone, B. S. A. and Grasselli, G., 2009, "A Method to Evaluate the Three-Dimensional Roughness of Fracture Surfaces in Brittle Geomaterials", *Review of Scientific Instruments*, 80, 12.

- Tsai, R.Y.; Lenz, R.K., "Real Time Versatile Robotics Hand/Eye Calibration Using 3D Machine Vision" *1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, cilt 1, sayfa.554-561, 24-29 Apr 1988.
- Um, J., 1997, *Accurate Quantification of Rock Joint Roughness and Development of a new Peak Shear Strength Criterion for Joints*, Doktora Tezi, The University of Arizona.
- Wang, L. G., Yamashita, S., Sugimoto, F., Pan, C. and Tan, G., 2003, "A Methodology for Predicting the in Situ Size and Shape Distribution of Rock Blocks", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36, 2, 121-142.
- Zhou, H. W. and Xie, H., 2004, "Anisotropic Characterization of Rock Fracture Surfaces Subjected to Profile Analysis", *Physics Letters A*, 325, 5-6, 355-362.