

Összehasonlító módszerek kőzetek felületi érdesség mérésére laboratóriumi körülmények között

Buocz Ildikó

BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, ildikobuocz@yahoo.com

Török Ákos

BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, torokakos@mail.bme.hu

Rozgonyi-Boissinot Nikoletta

BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, rozgonyi.boissinot.nikoletta@gmail.com

Görög Péter

BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, gorog.peter@gmail.com

Deák Ferenc

Kőmérő Kft., deakferenc@komero.hu

Berényi Attila

BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, berenyi.attila@gmail.com

ÖSSZEFOGLALÁS: Nyírószilárdság laboratóriumi meghatározásánál a felületi érdesség az egyik legfontosabb vizsgálatot befolyásoló paraméter. A felületi érdesség meghatározásának hagyományos módszere a 2D-s vonal menti vizsgálat, amely a valóságnak csak a durva közelítése. A cikk három alternatív módszert hasonlít össze a felületi érdesség meghatározására, amelyek különböző elméleten alapulnak. Az első a hagyományos 2D-s módszer, míg a másik kettő különböző mérési eljárással elvégezhető 3D-s felület leképző módszerek. A 2D-s elmozdulásmérővel mért profilok, valamint a 3D-s felületből kinyert 2D-s profilok, a kőzet felületén előre meghatározott vonal mentén szolgáltatnak adatokat. A második módszer DAVID Lézerszkennert alkalmaz. A lézerszkennelés eredményeképpen a felület koordinátapontokból (ún. pontfelhőből) rekonstruálható. A harmadik módszer a ShapeMetriX3D rendszerrel kivitelezhető, amely 2D-s képekből alkot 3D-s felületi modelleket. A 2D-s profilok nem alkalmasak a kőzet egész felületének jellemzésére, így speciális algoritmusokkal lehet a felületet jellemezni. A kísérletek célja a különböző kőzettípusok felületi érdesség alapján történő osztályozása, s így a tagoló felület menti nyírószilárdságot befolyásoló paraméter pontosabb meghatározása volt.

Kulcsszavak: felületi érdesség, tagoló felületek, 3D felület leképzés, lézerszkennelés, fotogrammetria

1 BEVEZETÉS

Bátaapátiban kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére szolgáló felszín alatti hulladéktároló épül. A tároló biztonsága és a kőzetkörnyezet állékonysága szempontjából az egyik legfontosabb tervezési paraméter a befogadó kőzet tagoló felületei mentén mérhető nyírószilárdság. A megfelelő megtámasztási rendszer kiválasztása érdekében szükséges a kőzet nyírószilárdságának pontos mérése. Ez az érték leggyakrabban laboratóriumi mérések eredményeiből, valamint numerikus úton határozható meg. A laboratóriumi mérések eredményei a legmegbízhatóbbak, de abban az esetben, amikor előállításukra nincs lehetőség (pl.: nyíróberendezés hiánya), az értékeket numerikus úton is meg lehet becsülni. Barton (1973) megalkotott egy olyan képletet, amelynek alkalmazásával a nyírószilárdság értéke jól becsülhető. Az eredmények nagymértékben függenek a tagoló felület menti érdesség mértékétől. A felületi érdesség meghatározásához egy 2D-s, az úgynevezett Bartonfésűsmódszer ajánlott. A Bátaapáti radioaktív hulladéktároló kőzetein a Bartonfésűssel analóg módszer alkalmazásával készültek a mérések a felületi érdességről. A nyírószilárdság értékeket laboratóriumi vizsgálatokkal is meg határozták, így a numerikus- és a teszteredményeket össze lehetett hasonlítani. A 2D-s felületi érdesség mérő módszereknek megvan az a hátrányuk, hogy a teljes felület helyett csak egyes metszeteket lehet így felvenni. A 3D-s felületleképző módszerek lehetőséget biztosítanak arra, hogy a teljes felületet figyelembe lehessen venni a számításoknál. Ilyen 3D-s vizsgálatok közül kettőt mutat be a cikk, az egyik egy fotogrammetriai, a másik egy lézerszkennertes eljárás. Bármelyik módszer alkalmazásával a nyers adatok további elemzése szükséges. Ahhoz, hogy a kőzeteket felületük alapján osztályozni lehessen a felület alakját még matematikai úton is le kell írni.

2 NYÍRÓSZILÁRDSÁG NUMERIKUS MEGHATÁROZÁSA 2D-S FELÜLETI PROFILOK ALAPJÁN

Közetek tagolófelület menti nyírószilárdságának meghatározásához Barton (1973) a következő, még ma is használatban lévő képletet alkotta:

$$\tau_B = \sigma_n \times \operatorname{tg} \left(JRC \times \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_{\max} \right) \quad (1)$$

τ	nyírószilárdság
σ_n	normál feszültség
Φ_{\max}	maximális feszültséghez tartozó belső súrlódási szög
JRC	a tagoltság érdességének a mérőszáma (Joint Roughness Coefficient)
JCS	a tagoltság nyomószilárdsága (Joint Compressive Strength)

A JCS értéke csak kismértékben befolyásolja a nyírószilárdság értékét. Barton (2008) szerint a JCS értékét Schmidt-kalapáccsal kell meghatározni. A Bataapáti radioaktív hulladéklerakó közetein ezt a mérést nem lehetett elvégezni, mert a Schmidt-kalapács ütése megsérthette volna a felületet, valamint a felület érdessége sem tette lehetővé a pontos Schmidt-kalapácsos mérést. Így a JCS értékét a kőzet tagolófelületeinek vizsgálatából tudtuk meghatározni. Az alkalmazott 20MPa-os tolerancia szint mellett sem mutatott nagy eltérést a fenti képlet alapján számított nyírószilárdság.

A JRC érték nagysága befolyásolja a legjobban a nyírószilárdság értékét, így a pontos meghatározása a megbízható adatok érdekében elengedhetetlen. A JRC szám a kőzet tagoló felületének érdességéből határozható meg.

3 2D FELÜLET MODELLEZÉS

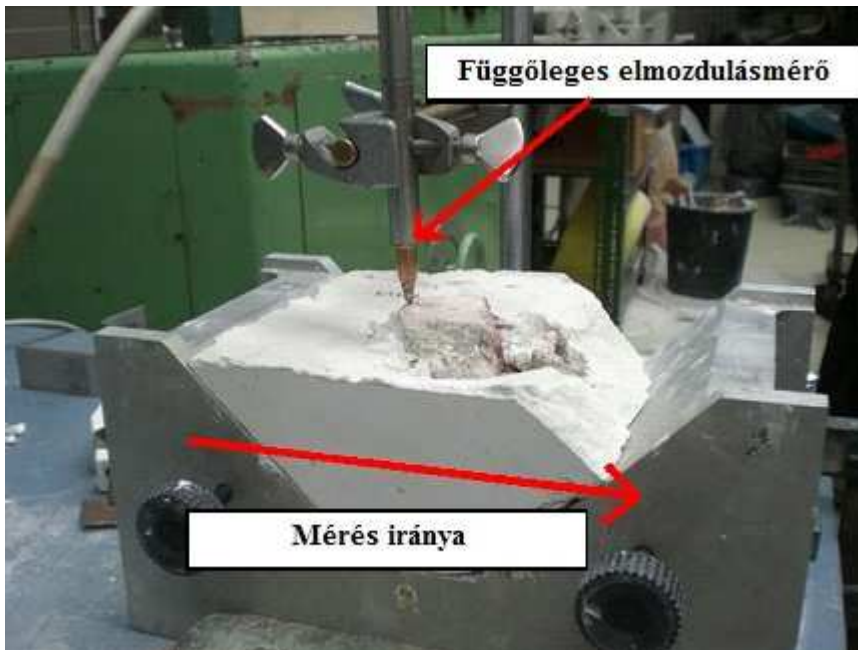
Leggyakrabban Bartonfésű segítségével állapítják meg a tagoló felületek érdességét. A mérés megadja a felület egyes profiljait, amiket utána előre megadott JRC értékkel rendelkező profilokkal kell összevetni. Ez egy 2D-s módszer, ami azt jelenti, hogy egy felülethez akár több JRC érték is tartozhat, amiből az következik, hogy egy felülethez ennek alapján különböző nyírószilárdsági értékeket lehet hozzárendelni a képlettel való számítás alapján. A Bartonfésűs módszer nem csak a JRC és a nyírószilárdság meghatározására alkalmas, hanem laboratóriumi célokra is használható. Információval szolgál a kőzet felületéről. Ennek alapján, még a nyírószilárdsági vizsgálatok megkezdése előtt, lehetőség nyílik a próbatestek felületi érdesség-szerinti mintacsoportba sorolására is.

A közvetlen nyírószilárdsági vizsgálatok előtt a Bartonfésű analógiáját felhasználva egy új típusú 2D-s felületi érdesség mérést végeztünk a Bataapátiban gyűjtött mintákon. A vizsgálat előtt a nyírószilárdsági vizsgálatokra előkészített mintákat gipszbe öntve lehetett rögzíteni. A nyírás irányával megegyezően két egymással párhuzamos vonal mentén készültek a mérések. A két vonal kiválasztása úgy történt, hogy a mérés a kőzet jellemző felületét adja meg. A mérés indításakor egy függőleges elmozdulásmérőt helyeztünk a mérendő nyomvonal egyik végére, majd a minta nyírási irányba mozdításával útdó mérte a felület érdességét a vizsgált profil mentén (1. ábra). A profilok adatait (az útdó függőleges elmozdulás értékeit) digitálisan úton rögzítette a felépített mérőrendszer.

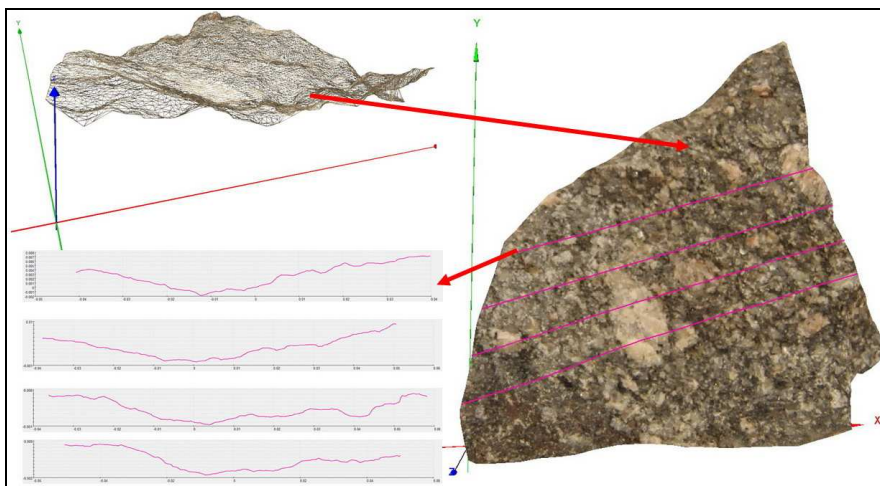
Két-dimenziós felület profilt a kőzetek 3D-s felületi modelljéből is megkaphatjuk a megfelelő metszetek kiválasztásával. Ez a módszer is a Bartonfésűs mérési elvet követi. A 2. ábra mutatja a profilvételezés pontos helyét. A baloldali képen láthatók a metszetek külön-külön. Az így kapott mérési profilokat hasonlíthatjuk össze az előre meghatározott, már JRC-vel rendelkező profilokkal.

A vizsgált minták esetében a JRC értéke 4 és 6 közé esett. A profilok a nyírás irányával megegyező irányúak voltak és a 3D-s modellből származtak. Az 1. táblázat szemlélteti a Bataapátiból származó kőzetek nyírószilárdságát, melyek értékeket egyfelől a Barton egyenletéből (1) számítottuk, másfelől laboratóriumi mérésekből kaptuk meg. Az eredmények jól korrelálnak (szórás: 0,5).

A fent említett módszer a Barton-fésűs módszerhez képest már fejlettebbnek tekinthető, mert a digitális profilokból az érdesség amplitúdójának nagysága könnyen lekérdezhető, így a metszet nem csak egy ábrázolásmód, hanem egy olyan ábra, amelyből a pontos értékek meghatározhatók.



1. ábra. 2D-s felület profil meghatározása elmozdulásmérős módszerrel



2. ábra. 2D-s felület profil meghatározása 3D-s felületi modellből

1. táblázat. Számított nyírószilárdság (τ_B), mért nyírószilárdság (τ_L). A JRC értékeket a 3D-s modellből származtatott 2D-s profilok alapján határoztuk meg. A maximális feszültséghez tartozó belső súrlódási szög (φ_{max}) és a normál-feszültség (σ_n) értéke a laboratóriumi vizsgálatokból származik. A JCS a tagoltságok állapotából származó becslést.

Gránit minták	φ_{max} (°)	σ_n [MPa]	JRC	JCS	τ_B Nyírószilárdság (Barton) [MPa]	τ_L Nyírószilárdság (labor) [MPa]	$\tau_B - \tau_L$ [MPa]
1	30.30	1.73	12	80	2.08	1.87	0.21
2	25.10	1.65	6	100	1.19	1.24	-0.05
3	10.80	8.05	15	80	3.88	3.83	0.05
4	16.00	2.43	10	60	1.40	1.29	0.11
5	16.60	4.42	5	100	1.91	1.88	0.03
6	12.50	3.02	17	80	2.25	2.30	-0.05
7	20.40	7.55	4	60	3.36	3.38	-0.02
8	17.00	3.98	11	60	2.29	2.32	-0.03
9	18.90	6.13	6	100	3.01	2.97	0.04
11	27.40	2.90	10	80	2.59	1.57	1.02
11	20.40	1.72	4	60	0.86	0.77	0.09
12	23.30	3.17	2	60	1.54	1.48	0.06
13	31.50	2.02	10	80	2.20	1.24	0.96
14	38.80	3.09	2	80	2.75	2.48	0.27
15	34.50	4.84	2	60	3.61	3.32	0.29
16	31.30	6.82	8	100	5.85	4.06	1.79
17	22.70	2.89	8	100	2.02	1.92	0.10
						Átlag:	0.29
						Szórás:	0.50

4 3D-S FELÜLET MODELLEZÉS

Korábban Grasselli (2001) végzett 3D-s kísérleteket kisméretű kőzetmintákon ATS szkennelvel. Ezt követően Slob et al. (2002) Cyrax 3D lézerszkennert használt, egész sziklafalak helyszíni felületi modellezésére. A cikkben két, a fentiekől eltérő, 3D-s felület leképzési módszer szerepel, amely kisméretű laboratóriumi vizsgálatokhoz használt kőzeteknél alkalmazható. A nyers adatok pontossága számos paramétertől függ, például a szkennel felépítésétől, a kamera/fényképezőgép paramétereitől, a berendezés pontosságától.

4.1 Fotogrammetriai módszer

A fotogrammetriai módszer egyike a 3D-s felületleképzési lehetőségeknek. A sztereoszkopikus fotogrammetria foglalkozik a 3D-s és térbeli információméréssel, amely ugyanazon objektum két különböző szögéből készített 2D-s képeiből származik. Fotogrammetriai módszerrel mind kisméretű, mind nagyméretű vizsgálatokat is lehet készíteni.

Nagyméretű objektumok mérésénél a felületi vizsgálat koordinátarendszerhez kötött, így az úgynevezett kontroll pontok használata szükségszerű. A pontokat a készülék kép területén belül helyezik el, még a felvétel előtt. A kontroll pontok koordinátáit mérőállomással vagy GNSS mérésel határozzák meg. Ezeket a modelleket georeferenciás 3D-s optikai modelleknek hívják.

Kisméretű objektumok mérésénél a szkenneléshez, vagy fotózáshoz elég a lokális koordinátarendszer használata.

A 3. ábrán látható, hogy egy referencia tárgyat helyeztünk el a kőzetfelület mellé, amely lehetőséget biztosít a pontok közötti távolságok pontos megadására.



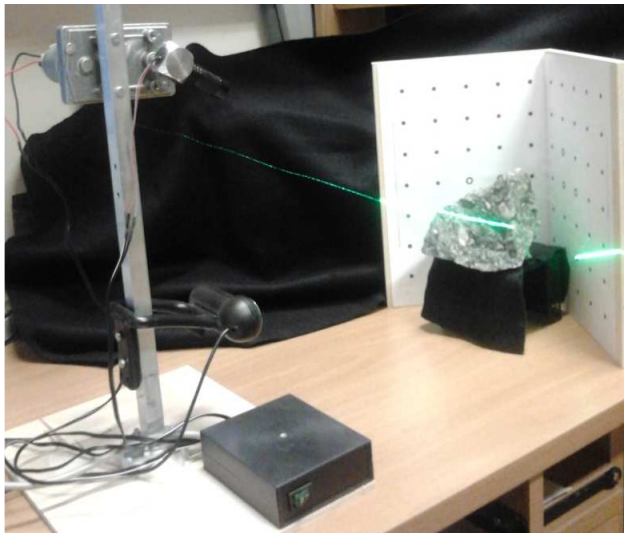
3. ábra. Kőzet felület két irányból készített képe

A 2D-s képekből 3D-s modellek készültek a ShapeMetriX3D (© 3G Software & Measurement) szoftver segítségével (2. ábra).

4.2 Lézerszkennelés

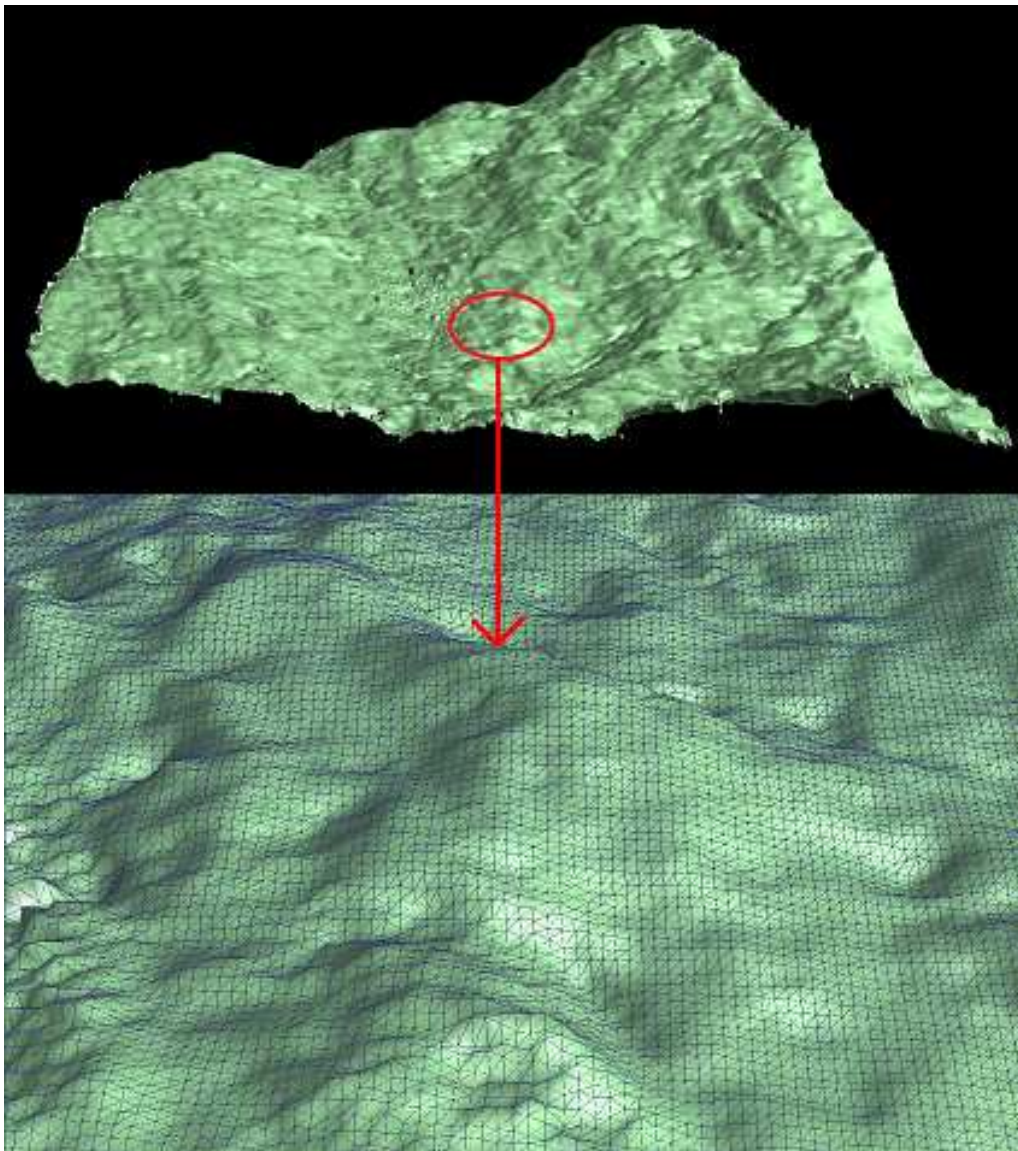
Kisméretű kőzetminták felületének digitalizálására a második alkalmazott módszer a 3D-s lézerszkennelés volt. A mérési eszközt a BME Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszéken építették össze. A műszer egy állványból áll, amelyre egy lézervonal kibocsátó eszköz és egy kamera van erősítve. A lézervonal forráshoz egy kis szervomotort rögzítünk, amely a kibocsátott lézercsík mozgását szabályozza a Z tengely mentén (4. ábra). A mérés kiértékeléséhez felhasznált szoftver: DAVID Laserscanner 3D version 2.6.1 (© 2007-2009 Simon Winkelbach) volt.

A kőzet felszínéről visszaverődő lézervonalat egy hagyományos webkamera rögzíti. A méréshez a fenti konstrukció az ideális a DAVID laserscanner gyártója szerint (www1). A szkennelés előtt szükséges a kamera kalibrációja, amelyet a hivatalos kalibrációs panel segítségével lehet megoldni. A kalibráció során a program kiszámolja a kamera pontos pozícióját a kalibrációs panelhez képest, így amikor a kőzetminta a panel elé kerül, minden szkennelt helyzete számítható. A szkennelés folyamánál lassú szkennelési sebesség alkalmazandó, hogy minél nagyobb legyen az adatmennyiség és a pontsűrűség; ennek érdekében minden egyes kőzetfelületet háromszor szkenneltünk be.



4. ábra. A lézerszkennő felépítése

A kamera érzékeli a tárgyról visszaverődő lézersugarakat és a szoftver ennek alapján kiszámolja az egyes pontok X, Y, és Z koordinátáit. A szkennelt adatot a program nem csak koordinátpontokként menti el, hanem a háromszögelés adatait is elmenti, ami azt jelenti, hogy az eredmény nem csak egy koordináta ponthalmaz, hanem már a mért felület maga (5. ábra).



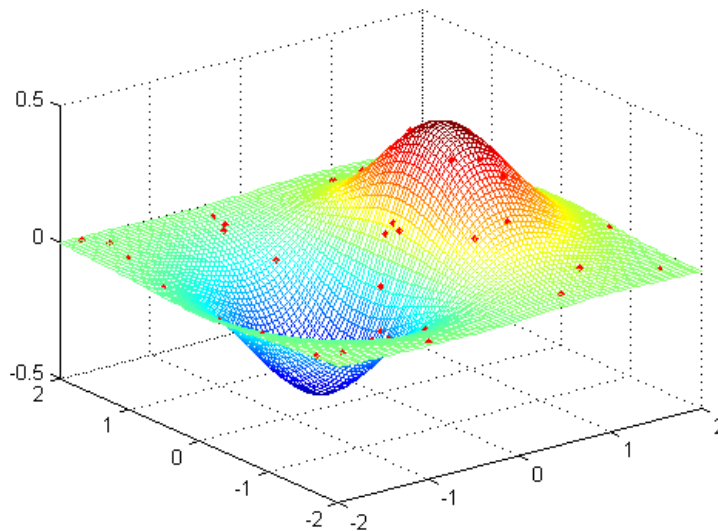
5. ábra. Beszkennelt kőzetfelszín a háromszögelés után

5 A 3D-S MODELLBŐL NYERT ADATOK ÉRTÉKELÉSE

A fent bemutatott két 3D-s modellezési módszer adatainak értékelésére két egymástól független matematikai módszert használtunk. Ezek segítségével közelíteni lehet a kőzeteknek az eredeti tagoló felület menti érdességét. A két 3D-s felületleképezési módszer adatainak kiértékelése ugyanúgy történt.

Az első módszer a Delanuy háromszögelés. A háromszögelést a szkener szoftverje végzi el. A nyers adatok csak a felület pontjait tartalmazzák, amelyből előállítható a 3D-s felület. A háromszögeknek minden egyes csúcsa egy-egy mérési pont. A háromszögek, amelyek a mért 3D-s felületet jellemzik egy hálót képeznek. Ezt a modellt Szabálytalan Háromszögháló modellnek hívják.

A második megközelítéssel az eredeti felület Radiál Bázis Függvény (RBF) módszerrel közelíthető. Ezt a módszert általában akkor alkalmazzák, ha az adatpontok szabálytalan elrendezésűek. Ez a megközelítés nem alkalmaz hálót, ami azt jelenti, hogy nem igényli a tér olyan jellegű felosztását, mint a háromszögelésnél. A RBF módszer az interpolációs függvényeknek a bázisfüggvényei lineáris kombinációját alkalmazza. Ebben az esetben a bázisfüggvény spline típusú, ami egy, a felületek nagyon pontos leképezésére alkalmas függvény (Remondino, 2003). A RBF módszer nagy előnye, hogy a felület könnyen megadható lineáris függvény egyenletrendszerek megoldásával (Mathematica or MATLAB), viszont a bázisfüggvények helyes megválasztása nagymértékben befolyásolja az eredményeket (6. ábra).



6. ábra. Radiál Bázis Függvény interpoláció – MATLAB (www2)

A nyírószilárdsági vizsgálatok kapcsán a felületi érdességhez köthető leginkább fontos kérdéskör, az hogy a kőzet tagoló felülete mentén mért nyírószilárdság meghatározását milyen mértékben befolyásolja a felületek érdessége. Amennyiben a nyírásra előkészített felületek a fent említett módszerek egyikével már pontosan felmérték, úgy következő lépésként, a bonyolult felület egyszerűsítése szükséges, amelyből olyan jellegű 3D-s osztályba sorolást lehet kialakítani, mint amilyen a Barton-féle előre meghatározott profiloké. Egyszerűsítés alatt a nyers adatok számának lecsökkentését értjük oly módon, hogy a felület tipikus jellemzői megmaradjanak.

A háromszögelt 3D-s felületek egyszerűsítése matematikai módszerekkel megoldható (pl.: 3D Douglas-Peucker algoritmus), míg a RBF módszerrel előállított felület egyszerűsítése egyszerűbb polinom függvények alkalmazásával lehetséges.

6 KÖVETKEZTETÉSEK

A kőzetek tagoló felületek menti nyírószilárdság számítására Barton (1973) alkotott egy képletet, melyben a felületi érdesség egy olyan paraméter, ami a kőzetekből vett 2D-s profilokból származik. Számos szempont alapján (mért felület jellemzése, felületek heterogenitása, stb.) szükségesnek látszik a 2D-s modellek, 3D-s modellekkel való felváltása. Egyértelmű, hogy a 2D-s felületi érdesség profilok nem tudják az egész kőzetet jellemezni, így a Barton képletéből számított nyírószilárdsági értékeknek korlátozott a használhatósága. A Bataapatiból vett kőzetminták esetében a 3D-s modellből vett 2D-s Barton-féle profilok összehasonlításából JRC értékeket lehetett megadni. Ugyan a numerikus úton számolt és a laboratóriumban mért eredmények jól korreláltak, ez az összehasonlítás inkább szubjektív, ezért egy objektív, kvantitatív megoldás szükséges, mely a teljes felületet figyelembe ve-

szi. Erre a problémára a kőzetek tagoló felületeinek 3D-s szkennelése nyújthat megoldást, amelyből az eredeti felület rekonstruálható és modellezhető. A felületek matematikai megközelítése és egyszerűsítése után (a nyers adatok számának csökkentésével) a Barton-féle JRC értékek meghatározásával analóg, egy új 3D-s felületi érdességi besorolási rendszer megalkotására nyílna lehetőség. Ennek kidolgozásához további kőzetfelületi vizsgálatokra, valamint laboratóriumi tagoló felület menti nyírószilárdsági vizsgálatokra van szükség.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönettel tartoznak Száyer Gézának és társainak, a BME Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszékéről, akik a lézerszkennert összeépítették, Dr. Paláncz Bélának BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszékéről, aki a kőzetek felület megközelítésének matematikai hátteréhez nyújtott segítséget. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

IRODALOM

- Barton, N. 1973. Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology* 7., pp. 287-332
- Barton, N. 2008. The shear strength of Rockfill, Interfaces and Rock Joints, and their Points of Contact in Rock Dump Design. *Rock Dumps 2008*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 18 p.
- Grasselli, G. 2001. Shear Strength of Rock Joints based on Quantified Surface Description. - EPF-Lausanne, Switzerland.
- Remondino, F. 2003. From point cloud to surface: The modeling and visualization problem. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV-5/W10. International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, Tarasp-Vulpera, Switzerland.
- Slob, S., Hack, R., Turner, A. K. 2002. An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques. *ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions – Eurock 2002*, Funchal, Portugal.
- www1. <http://www.david-laserscanner.com>
- www2. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10056-scattered-data-interpolation-and-approximation-using-radial-base-functions>

