

Repedéshálózatok geometriai paramétereinek meghatározása

Kamera Rita

GolderAssociates (Magyarország) Zrt., rkamera@golder.hu

M. Tóth Tivadar

Szegedi Tudományegyetem Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, mtoth@geo.u-szeged.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: Kutatásunk során a Bátaapátiban (DNY-Dunántúl) létesített kis-, és közepes radioaktivitású hulladéklerakó kiépítése során kialakított vájvégekről készült fényképek felhasználásával kidolgoztunk egy, a törésrendszerek modellezéséhez felhasználható adatbázist, amely 3D repedéshálózat modellező szoftverekhez alkalmazható. A repedéshálózat-szimuláció egy többlépcsős folyamat, amelynek első lépéseként a vájvégek fényképein látható diszkrét töréseket digitalizáltuk, ebből kialakítottunk egy olyan adatbázist, amely tartalmazza a repedések vég-, és középpontjainak xy koordinátáit és a hosszúságok értékeit. Második lépésben létrehoztuk a repedések hosszúságának tapasztalati eloszlásfüggvényeit (hisztogramok), majd ezeken log-log transzformációt végeztünk. Harmadik lépésben kiszámítottuk a repedés középpontok sűrűségéből származtatott fraktál dimenzió értéket.

Kulcsszavak: Mórággyi-rög, repedéshálózat, modellezés, hosszúságeloszlás, fraktál dimenzió

1 BEVEZETÉS

A repedések, repedéshálózatok vizsgálata az alkalmazott földtan számos területén fontos információt nyújt a fluidum tárolási kapacitás, a transzport folyamatok és az ásvány kiválások megbecsléséhez. Ezért a repedéshálózatok térbeli viselkedésének megismerése kiemelten fontos feladat a repedezett rezervoárok szénhidrogén tartalmának kinyerése, a radioaktív hulladéktárolók optimális kialakítása, vagy a geotermikus energia vagyon kitermelése során.

A vizsgálandó terület Magyarország első kis-, és közepes radioaktivitású hulladék tárolója, amely Bátaapáti térségében helyezkedik el. A terület földrajzilag a Geresdi-domsághoz (D-Dunántúl), földtanilag a Mórággyi-rög ÉK-i részéhez tartozik, amelyet ÉNy-on a Keleti-Mecsek előtere határol. A területet két nagy egység alkotja, a paleozóos kristályos kőzetekből (monzonit és monzogránit) felépülő Mórággyi Gránit Formáció (MGF), amelyet üde és mállott kőzetblokkok építenek fel, míg felette negyedidőszaki üledékek, elsősorban lösz található. A tárolót 0 m Bf szinten alakították ki, a felszíntől 270-280 m mélységben. A terület a földtörténet folyamán számos deformációs eseménynek volt kitéve, amelynek következtében erősen töredezetté vált.

Bár a törésrendszerek elemzésének alapvető módszere a repedésmodellezés, ennek input paramétereinek meghatározása számos szubjektív elemet tartalmaz. Az alábbi munkában bemutatunk a repedésrendszer geometriai paramétereinek meghatározását szolgáló olyan többlépcsős elemzési sort, amely szubjektív döntésektől lényegében mentes. Eredményként létrejön egy olyan adatbázis, amely alapján felépíthető a 3D repedéshálózat egy megfelelően választott modellező szoftver (pl. RepSim, M. Tóth et al., 2004) segítségével.

2 REPEDÉSHÁLÓZATOK GEOMETRIAI PARAMÉTEREI

A törések és töréshálózatok értelmezésében a leíró jellegű szerkezetföldtani és mikrotektonikai jellegzetességek mellett fontos szerep jut a kvantitatív paramétereknek is. Az egyedi repedések véges kiterjedésű, rendszerint bonyolult módon és többszörösen meghajlított kétdimenziós felületekként értelmezhetők, melyek azonban a legtöbb esetben síklapokkal megfelelően közelíthetők (Chiles & de Marsily, 1993). Alakjuk a legtöbb esetben homogén összetételű kőzetben, pl. a gránitban (Twiss & Moores, 1992) körhöz közeli, míg jól fejlett rétegzettséggel, padossággal jellemzett üledékes kőzetekben (rétegzett homokkövek, karbonátos kőzetek) nagyfokú anizotrópia (ellipszis) is kialakulhat. Esetünkben mind a törések parametrizálása, mind a későbbi szimuláció során a kör reprezentációt követjük, megjegyezve, hogy más szimulátorok (pl. Long, 1996; Zhang & Sanderson, 2002 stb.) sokszög alakú re-

pedésekkel dolgoznak. Ennek megfelelően az egyedi töréseket egyértelműen leíró geometriai paraméterek a kör középpontjának térbeli helyzete, a kör sugara és irányítottága (dőlés, csapás). Törés rendszerek esetén mindez a középpontok térbeli sűrűségét leíró függvényként, valamint a sugárra és a dőlés-csapás értékpárokra jellemző eloszlás függvényekként értelmezhető. A törésrendszer hidraulikai jellemzése feltételezi az egyedi törések pozitív térfogatát, ezért a vastagság nélküli körlapokat adott nyitottságú („aperture”) lapos korongokkal („parallel plate model”, Witherspoon et al., 1980; Neuzil & Tracy, 1981; Zimmerman & Bodvarsson, 1996) helyettesítjük. Munkánkban a repedés és a törés fogalmak között nem teszünk jelentésbeli különbséget.

A repedéshálózat parametrizálása során előforduló jelöléseket az alábbiakban foglaljuk össze:

Repedés („fracture”)	f (indexben)
Hosszúság (sugár) a 3D-ban	L
Hosszúság nyoma 2D síkon	l
Fraktál dimenzió 1D, 2D, 3D metszetben	$D1, D2, D3$
Repedés középpontok dimenziója	Dc
Dőlés	α
Csapás	β
Hosszúság eloszlás paraméterei	$E, F - N(L) = F * L - E$
Nyitottság függvény paraméterei	$A, B - a = A * L + B$
Cella oldalhossza	r

2.1 Hosszúság

A töréses elemek egyik legfontosabb, fluidum vezetés-tárolás szempontjából is alapvető tulajdonsága a repedések hossza, illetve három dimenzióban – a korong modellt alkalmazva – azok átmérője. Számos szerző foglalkozott adott generációba tartozó törések méreteloszlásának leírásával (pl. Davy, 1993; Bour & Davy, 1997; de Dreuzy et al., 2001; Bonnet et al., 2001). Általános egyetértés van abban a tekintetben, hogy a hosszúság adatok valamely nem szimmetrikus eloszlással közelíthetők megfelelően, azaz – a Griffith-féle törésterjedési modellnek megfelelően – a kisméretű törések száma jelentősen meghaladja a nagy töréseket. A leggyakrabban alkalmazott modell szerint (Yielding et al., 1992; Min et al., 2004) legjobban a

$$N(L) = F * L - E \quad (1)$$

sűrűségfüggvényű hatványfüggvény típusú eloszlás írja le a repedésméretetek viselkedését.

2.2 Orientáció

Adott generációhoz tartozó törés rendszerek rendszerint jól definiált irányokat jelölnek ki. Míg a szisztematikus litoklázisok megközelítőleg párhuzamos lefutásúak, a vetők rendszerint két markáns iránnyal jellemezhető konjugált, esetleg bonyolultabb Riedel rendszereket alkotnak. A repedéseket jelképező korongok térbeli helyzetét meghatározó paraméterek a dőlésszög és a dőlésirány, melyek együttes eloszlását számos szerző kétváltozós Fisher eloszlásfüggvénnyel tartja közelíthetőnek. Mivel a mintázás irányával akár 1D, akár 2D esetben kis szöget bezáró törések törvényszerűen alulreprezentáltak a mintában, célszerű a dőlés/csapás adatokat a Terzaghi (1965) által bevezetett formula alapján korrigálni.

A továbbiakban a tapasztalatunk szerint nagy hibával közelítő elméleti eloszlásfüggvények alkalmazása helyett az eredeti, mért adatok alapján korrigált adatbázist használjuk a szimuláció során

2.3 Térbeli sűrűség

Míg a korábban tárgyalt kvantitatív paraméterek definíciója lényegében egyértelmű, törésrendszerek térbeli sűrűségének megadására több, különböző elméleti megfontolású meghatározás ismert. Ezek számos további mellett a törés intenzitás („fracture intensity”), a törés sűrűség („fracture density”), a törési index („fracture index”), a törés felszín területe („fracture surface area”), a törés metszések sűrűsége („fracture intersection density”) és a törés távolság („fracture spacing”).

Részletes mérésekkel számos szerző igazolta, hogy a szerkezetfejlődéstől és a litológiától lényegében függetlenül a törésrendszerek geometriája fraktál-szerű geometriai objektumként kezelhető (Barton & Larsen, 1985; La Pointe, 1988; Hirata, 1989; Matsumoto et al., 1992; Kranz, 1994; Tsuchiya & Nakatsuka, 1995; Roberts et al., 1998). Azaz a repedéseket jelképező korongoknak általában nem csak a méretét (átmérő, nyitottság), hanem térbeli helyzetét is a választott mérettartomány függvényében vizsgálhatjuk. Mivel a továbbiakban ezt az elvet követjük, a fenti törés sűrűségfogalmak részletes is-

mertetésétől eltekintünk. A repedéshálózatot minden méretben sűrűbben és ritkábban repedezett zónák egymásmellettsége jellemzi, az egyenletesen, vagy éppen teljesen esetlegesen repedezett kőzettömegek igen ritkák. Ezért a repedés középpontok elhelyezkedésének törvényszerűségeit a mérettartomány függvényében vizsgáljuk, s a középpontok sűrűségét a mintázat fraktáldimenziójával jellemezzük.

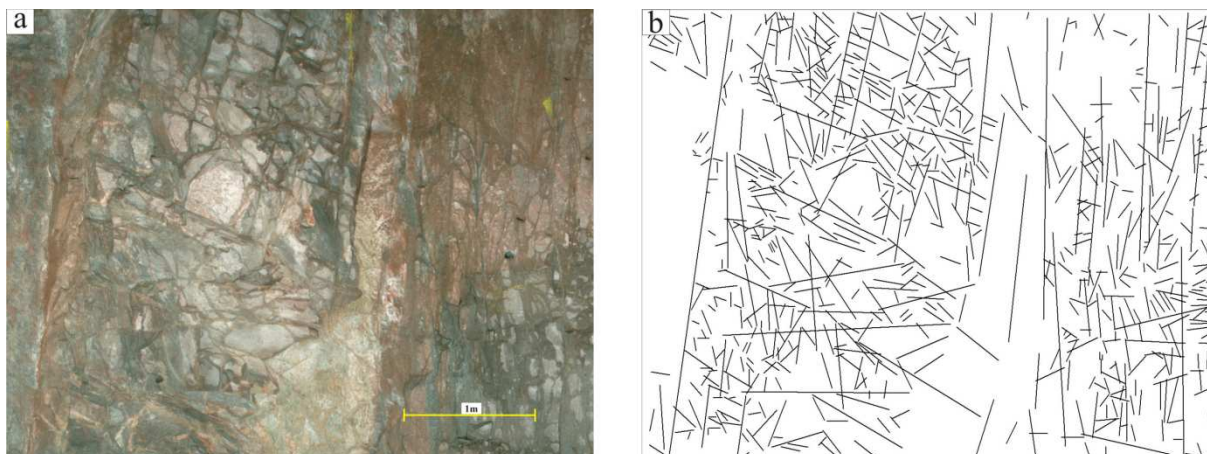
3 A PARAMETRIZÁLÁS LÉPÉSEI

A parametrizálás egy három lépésből felépülő folyamat, amely számos problémával terhelt. Az algoritmus kidolgozása során ezekre a problémákra megoldásokat dolgoztunk ki (M. Tóth & Kamera, 2010). A vizsgálathoz 22 db, a bátaapáti lejtaknák mélyítése során dokumentált vájvég fotót használtunk fel. A továbbiakban bemutatjuk az elemzési sor fő lépéseit.

3.1 A repedéshálózat digitalizálása

A repedéshálózat geometriai paramétereinek meghatározásához különböző lehetőségek állnak rendelkezésünkre: légifelvételek (Clifton & Schlische, 2003), feltárások, kézipéldányok, fényképek, Computer Tomográfia adatok, vékonycsiszolatok, fúrómagok stb. Esetünkben vájvég fotókat használtunk fel a vizsgálathoz, amelyeket a JointMetrix szoftver 3D megjelenítéséből származtattunk. A kapott 2D-s felvételeket a Kőmérő Kft. és Schön Roland által fejlesztett Vágókép 1.0 szoftver segítségével vágtuk ki.

A repedések digitalizálása a megfelelő grafikus szoftver segítségével egyszerűen elvégezhető. A fényképeken látható vájvégek $\sim 3,5 \times 4,5$ m területén megjelenő különböző méretű repedések digitalizálását az Arcview GIS 3.2 szofver segítségével végeztük. A repedéseket a digitalizált képeken látható egye-



nes szakaszok (a térbeli kör alakú repedés húrjai) reprezentálják (1.a-b ábra).

1. ábra. a. A vájvégről készült fotó; b. A vájvég fotón digitalizált repedések

A diszkrét törések egyértelmű azonosítása általában problémamentes, ugyanakkor különböző földtani, illetve a képminőségéből (pl. fényerősség, rossz képfelbontás stb.) eredő problémáknak köszönhetően a repedések azonosítása esetenként nehézségekbe ütközik. A Mórággyi gránit fejlődéstörténete során bekövetkezett nagyobb elmozdulásoknál a nyírósík mentén kialakult hézagokban különböző kiterjedésű vetőbreccsa zónák jöttek létre. Az ilyen szögletes és különböző méretű kőzetdarabokból, illetve valamilyen alapanyagból álló kőzetekben a diszkrét repedések nehezen azonosíthatók. Ebben az esetben csak azokat a repedéseket detektáltuk, amelyek egyértelműen elkülöníthetőek voltak a fényképek alapján. Azonban, ha nem találtunk ilyen repedéseket, akkor a breccsa zónát felépítő repedéseket nem vettük figyelembe a digitalizálás során. A repedéshálózat sűrűbben és ritkábban repedezett kőzettestek együtteséből épül fel, az egyenletesen vagy teljesen repedezett zónák nem jellemzőek. Vagyis kialakulhatnak olyan sűrűn, sok apró repedésekkel behálózott területek, amelyeken diszkrét törések nehezen határozhatók meg. Ezek a részterületeken, a breccsa zónákhoz hasonlóan, csak az egyértelműen meghatározott egyedi repedéseket digitalizáltuk. A repedésfalakat, vagyis azokat a repedéseket, amelyek a fénykép síkjával kis szöget zárnak be, nem kezeltük törésként és kihagytuk őket a repedések digitalizálása során. Minden fényképen találtunk kifizető repedéseket, ebből következően az eredeti hosszúságukról nem kapunk tényleges információt, ilyenkor a képen látható hosszúságot tekintettük a repedés valós méretének. Minden olyan diszkrét repedést, amelynek 2D metszete nem egy egyenes, hanem valamilyen hajlított vonal, a két végpontját összekötő egyenes definiál. A különböző elmozdu-

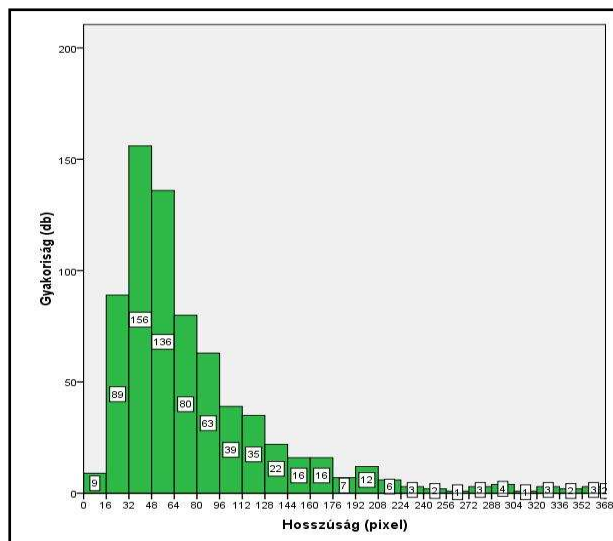
lásoknak köszönhetően egy repedésből esetenként több diszkrét repedés alakult ki, amelyeket külön töréseknek értelmeztünk a digitalizálás során. A program segítségével kiszámított törés hosszúságokat és középpontok xy koordinátáinak értékeit a parametrizálás második illetve harmadik lépéséhez használtuk fel.

3.2 A repedések hosszúságeloszlásának meghatározása

A digitalizált képek alapján meghatározott hosszúság adatok gyakorisági eloszlásának vizsgálatát SPSS 17.0 szofver segítségével végeztük el. A hisztogramok generálása (2. ábra) során az intervallum szélességének meghatározása nem egyszerű, mivel ha nagyon kicsi ez az érték, akkor egy adott intervallumon belül nincs megfelelő mennyiségű repedés, viszont ha túl nagy, akkor túl sok törés található egy intervallumon belül. Ezért egy gyakran követett szabályt alkalmaztunk a megfelelő szélesség (k) kiszámításához, amely felhasználásával a mi esetünkben általában $k = 16$. Az alkalmazott szabályt a következőképpen

$$k = 2 * \text{INT}(\text{az})$$

$$\text{INT}(\log_2(\max(l)) \text{ egészrész függvény})$$



2. ábra. Egy tetszőleges vājvég fotón digitalizált repedések hosszúságeloszlása, ahol $k=16$

A kép minőségére vagy a nem reprezentatív vizsgált térfogatra vezethető vissza, hogy a kisméretű törések száma minden mérettartományban jelentősen meghaladja a nagy töréseket (hatványfüggvény eloszlás), a tapasztalati eloszlásfüggvényeken a rövid repedések darabszáma elmarad a várt értéktől, illetve a hosszú törések esetében nem teljesül az eloszlásfüggvény monotonitása.

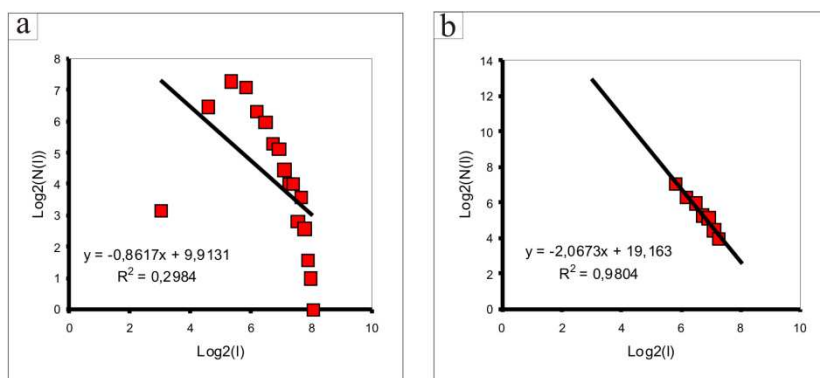
Annak érdekében, hogy log-log transzformáció után kapott tapasztalati eloszlásfüggvény megfelelően illeszkedjen a regressziós egyenesre, a két szélső tartományban elhelyezkedő értékek törlendő az alábbiak szerint (3. a-b ábra):

- ha $f(i) < 10$, $f(i)$ törlendő,
- ha $f(i+1) - f(i) \geq 0$, $f(i)$ vagy $f(i+1)$ törlendő, ha ezáltal a korrelációs együttható szignifikánsan nő,
- bármely további pont törlendő – akár a módus is – ha ezáltal szignifikánsan nő az r értéke,
- ahhoz, hogy a tapasztalati eloszlásfüggvény megfelelően illeszkedjen a regressziós egyenesre és megkapjuk az E értéket, minimum 5 pontra van szükség. Ha 5 pontnál kevesebb érték áll rendelkezésünkre (pl.: kis repedésszám miatt), csak tájékoztató jellegű az eloszlásfüggvény.

Előfordulhat, hogy különböző földtani, esetleg rossz képminőségéből eredő problémák miatt nem sikerült megfelelő mennyiségű repedést detektálnunk, aminek következtében a tapasztalati eloszlásfüggvény kiértékelésének végeredményét csak tájékoztató információnak tekintjük. Tapasztalataink szerint minimum 350-400 db repedésre van szükség ahhoz, hogy értelmezhető eredményeket kapjunk.

Bizonyos esetekben a hisztogramokon látszólag több módusz alakult ki, amelynek oka lehet valódi, földtani okokra visszavezethető bimodalitás (két egymástól független esemény), vagy numerikus hiba

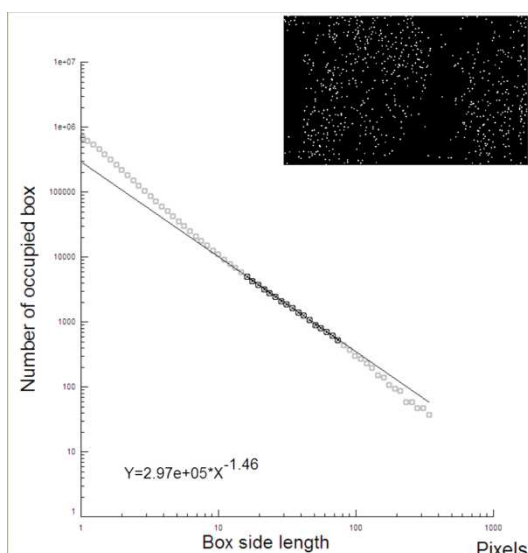
(kis mintaszám). Az ilyen esetekben a kapott végeredményeket szintén tájékoztató jellegűnek tekintjük.



3. ábra. a. A legrövidebb és a leghosszabb repedések nem illeszkednek a regressziós egyenesre;
b. Meghatározott pontok kitörlése után megkapjuk a megfelelő hosszúság kitevőt (E)

3.3 A törésközéppontok eloszlásának meghatározása

A harmadik lépésben meghatároztuk a repedéshálózat térbeli sűrűségét, amelyet a repedés középpontok fraktál dimenziója definiál. A mérés elve a „box-counting” módszer (Mandelbrot, 1983), amely során a vizsgált objektumot különböző oldalhosszúságú rácshálóval fedjük le. Az eloszlás vizsgálatát, vagyis a fraktál dimenzió értéket a BENOIT 1.0 szofver segítségével, egy kétszínű (fekete-fehér) kép felhasználásával határoztuk meg (4. ábra).



4. ábra. A vájvég fotón digitalizált repedések fraktál dimenzió számítása, (esetünkben $D=1,46$)

A diagram pontjaira illeszkedő regressziós egyenes meredekségéből határoztuk meg a keresett értéket, úgy, hogy a pontok által definiált vonalon jelentkező két töréspont előtti és utáni szakaszokat kitöröltük. Az első töréspont előtti pontsorból a mintázat bonyolultsága helyett a kisméretű dobozokban elhelyezkedő 1-1 pont méretét kaptuk eredményül. A második töréspont utáni szakaszból származtatott eredmény nem reprezentatív, amely a dobozok nagy méretéből és azok kis számából adódik. A regressziós egyenes középső szakaszát meghatározó pontok adják a mintázat fraktál dimenzióját (4. ábra).

3.4 Az orientáció meghatározása

A repedések orientációja (dőlés, csapás) a vájvég fotókról nem meghatározható, illetve a mérhető áldölések nem alkalmazhatók a 3D szimulációhoz. Ebből következően az orientáció meghatározásához más, tradicionális módszereket kell alkalmazni, mint BHTV, Magscanner vagy vágatfalakon történő terepi mérések.

4 ÖSSZEGRZÉS

A fent bemutatott minimális szubjektív döntést tartalmazó algoritmust alkalmazva a repedéshálózatok geometriai paraméterei meghatározhatók és azokat felhasználva megfelelő 3D modellező program segítségével szimulálható a töréshálózat.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozunk Kovács Lászlónak és Máté Kornélnak a Kóméró Kft. munkatársainak a kutatásban nyújtott segítségükért.

IRODALOMJEGYZÉK

- Barton, C. C., Larsen, E. 1985. *Fractal geometry of two-dimensional fracture networks at Yucca Mountain, Southwestern Nevada*. In: Stephanson, O. (ed.): *Proc. Int. Symp. On Fundamentals of Rock Joints*, 77-84.
- Bonnet, E., Bour, O., Odling, N. E., Davy, P., Main, I., Cowie, P., Berkowitz, B. 2001. *Scaling of fracture systems in geological media*. *Reviews of Geophysics*, 39/3, 347-383.
- Bour, O., Davy, P. 1997. *Connectivity of random fault networks following a power-law fault length distribution*. *Water Resources Research*, 33, 1567-1583.
- Chiles, J., de Marsily, G. 1993. *Models of fracture Systems*. In: Bear, J., Tsang, C. F., de Marsily, G. (eds.): *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*. Academic Press, INC.
- Clifton, A. E., Schlische, R. W. 2003. *Fracture populations on the Reykjanes Peninsula, Iceland: Comparison with experimental clay models of oblique rifting*. *J. Geophys. Res.* **108/B2**, 2074.
- Davy P. 1993. *On the frequency-length distribution of the San Andreas fault system*. *J. Geophys. Res.*, **98**, 12414-12151.
- De Dreuzy, J. R., Davy, P., Bour, O. 2001. *Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power-law length distribution 1. Effective connectivity*. *Water Resources Res.*, **37/8**, 2065-2078.
- Hirata, T. 1989. *Fractal dimension of fault system in Japan: fracture structure and rock fracture geometry at various scales*. *Pure and Applied Geophysics*, 131, 157-170.
- Kranz, R.L. 1994. *Fractal point patterns and fractal fracture traces*. In: Nelson, Laubach, (eds.): *Rock mechanics*. Balkema, Rotterdam, 793-800.
- La Pointe, P.R., 1988. *A method to characterize fracture density and connectivity through fractal geometry*. *Int. J. Rock Mech. Mining Scie. & Geomech. Abstr.*, **25**, 421-429.
- Long, J.C.S. 1996. *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. National Academy Press, Washington D. C., 551.
- M. Tóth, T., Hollós, Cs., Szűcs, É., Schubert, F. 2004. *Conceptual fracture network model of the crystalline basement of the Szeghalom Dome (Pannonian Basin, SE Hungary)*. *Acta Geol. Hung.* **47/1**, 19-34.
- M. Tóth, T., Kamera, R. 2010. *Repedésrendszer legfontosabb tulajdonságainak elemzésére és a vizsgált paraméterek térbeli kiterjesztésére alkalmazható elemzési eljárás módszertani kidolgozása, ellenőrzése és optimalizálása*. Kézirat. RHK-K-
- Mandelbrot, B. B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, New York, 468.
- Matsumoto, N., Yomogida, K., Honda, S. 1992. *Fractal analysis of fault systems in Japan and the Philippines*. *Geophysical Research Letters*, 19/4, 357-360.
- Min, K.B., Jing, L., Stephansson, O. 2004. *Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic REV approach: Method and application to the field data from Sella field, UK*. *Hydrogeology J.* **12/5**, 497-510.
- Neuzil, C. E., Tracy, J. V. 1981. *Flow through fractures*. *Water Resources Research*, 17/1, 191-199.
- Roberts, S., Sanderson, D. J., Gumieli, P. 1998. *Fractal analysis of the Sn-W mineralization from central Iberia: In sights into the role of fracture connectivity in the formation of an ore deposit*. *Econ. Geol.* **93**, 360-365.
- Terzaghi, R. 1965. *Sources of error in joint surveys*. *Geotechnique*, 15, 287-304.
- Tsuchiya, N., Nakatsuka, K. 1995. *A two-dimensional mono-fractal approach to natural fracture networks in rock*. *Geotherm. Sci. Tech.*, 6, 63-82.
- Twiss, R.J., Moores, E. 1992. *Structural geology*. W H Freeman, 532.
- Witherspoon, P. A., Wang, J. S. Y., Iwai, K., Gale, J. E. 1980. *Validity of cubic law for fluid flow in deformable rock fracture*. *Water Resources Research*, 16/6, 1016-1024.
- Yielding, G., Walsh, J.J., Watterson, J. 1992. *The prediction of small scale faulting in reservoirs*. *First Break*, 10, 449-460.
- Zhang, X., Sanderson, D.J. 2002. *Numerical Modelling and Analysis of Fluid Flow and Deformation of Fractured Rock Masses*. Pergamon press, 288.
- Zimmerman, R.W., Bodvarsson, S. 1996. *Hydraulic conductivity of rock fractures*. *Transport in Porous Media*, 23/1, 1-30.