

A FÖLDTANI KUTATÁS BIZONYTALANSÁ- GAI ÉS KOCKÁZATAI, ÚJ UTAK EZEK MEGOLDÁSÁRA

Bárdossy György

az MTA r. tagja, ny. egy. tanár – h4750bar@helka.iif.hu

Bevezetés

Mit értünk bizonytalanság alatt? Szerintem a bizonytalanság tág, általános fogalom, amely ismereteink tökéletlenségét fejezi ki. Szükség van ebben a tárgykörben egy további fogalomra is és ez a *hiba*. A hiba valamely mérés vagy megfigyelés eltérése a természeti valóságtól. Ebben az értelemben a hiba számszerűsített bizonytalanság.

A földtant más természettudományoknál nagyobb bizonytalanságok jellemzik. Ennek egyik fő oka térbeli: a Föld kergét alkotó képződményekhez ugyanis csak igen korlátozott mértékben lehet hozzáférni, felszíni feltárásokban, fúrásokkal vagy föld alatti bányákban. Ezeken felül csak a geofizika szolgáltathat közvetett információkat a Föld mélyéről. A bizonytalanságok másik fő forrása az idő. A földtani kutatások fő színtere ugyanis a földtörténeti múlt, a jelenben szerzett földtani ismeretek és feltevések alapján. Minél jobban távolodunk a jelentől, annál bizonytalanabbá válnak feltevéseink, sőt bizonyos időhatáron túl olyan folyamatok is léteztek, amelyek a maiaktól érdemben különböztek. Hasonló bizonytalanság kíséri azokat a feladatokat, amelyekben a jövő földtani jelenségeiről kell véleményt mondanunk, például vulkáni kitérőések, földrengések és földcsuszamlások bekövetkezését kellene előre jelezniük. Mindez teli van bizonytalansággal.

A tudományos jellegű földtani kutatásban a bizonytalanságok gyakran vezetnek téves következtetésekre, sőt teljesen hamis tudományos elméletek is születtek és tartották magukat évtizedeken át a valós elképzelésekkel szemben. Elég itt a kontinensvándorlás, ill. a lemeztectonika elmélete körül évtizedekig zajlott vitára gondolni. Mindezek ellenére mindmáig viszonylag kevés figyelmet fordítottak a bizonytalanságok feltárására, mondván, hogy a földtudomány általános fejlődése előbb-utóbb úgys megoldja ezeket a problémákat.

Más a helyzet a *gyakorlati földtani kutatásban*. A bizonytalanságok ezen a területen hamar előtűnnek és gyakran komoly anyagi következményekkel járnak. Ennek ellenére sem idehaza, sem külföldön nem kapott eddig kellő figyelmet a hibák és a velük járó kockázatok átfogó elemzése. Ezért határoztuk el néhány évvel ezelőtt néhány geológus kollegámmal az ezirányú vizsgálatokat, amelyekhez sikerült néhány kiváló magyar matematikus – Fodor János és Varga Zoltán professzor, valamint Sebestyén Zoltán kutató matematikus – együttműködését megnyerni. A következőkben röviden beszámolunk eddig elért eredményeinkről.

A földtani bizonytalanságok okai

Első felismerésünk az volt, hogy nem lehet a bizonytalanságok problémáit azok okainak és fajtáinak feltárása nélkül megoldani.

Átfogó értékelés eddig erről sem készült. Felmérésünk szerint a földtani bizonytalanságok okait két fő csoportra lehet osztani:

1. A földtani képződmények és folyamatok *természetes változékonysága*. Ez a földtani valóság egyik alapvető jellegzetessége. A természetben nincsenek teljesen homogén kőzetek, de még a korábban homogénnek tartott ásványok kristályszerkezete sem teljesen homogén, belső szabálytalanságok, rácshibák teszik változékonynyá. Megjegyzem, ha a kőzetek és az ércek teljesen homogének lennének, akkor megismerésükhöz nem lenne szükség részletező kutatásra, elegendő lenne egy tetszőleges helyen vett mintát megvizsgálni, az az egész képződményt jellemezné. Általában igaz: minél nagyobb egy képződmény tulajdonságainak változékonysága, annál több hibával jár a megkutatása. Még szerencse, hogy egyes tulajdonságok változékonysága több-kevesebb szabályszerűséget követ, ezért ezeket úgynevezett trendvizsgálatokkal jól meg lehet határozni.

2. A bizonytalanságok másik fő csoportja kutatási tevékenységünk tökéletlenségéből következik. Tökéletlenek szakmai ismereteink, műszereink; kutatási lehetőségeink anyagilag korlátozottak. A teljesség igénye nélkül e csoporton belül az alábbi bizonytalanságokat, illetve hibaforrásokat lehet megkülönböztetni:

2.1. A terepi megfigyelések korlátai: pl. domborzat, növénytakaró, időkorlát

2.2. A mintavétel tökéletlensége: gyakran nincsenek meg az eszközök a szükséges mélységig való fúráshoz, rossz a magkihozatal. Ezért az ún. reprezentatív mintavétel feltételei igen ritkán valósulnak meg.

2.3. A laboratóriumi mérések hibái: pl. a vegyelemzés ún. analitikai hibái.

2.4. A múltban történt folyamatok téves megítéléséből fakadó hibák.

2.5. A tudomány fejlődésével a földtani kutatásban is egyre újabb fogalmak jelennek meg, gyakran csak idegen nyelven. Gyakorta tapasztalom, hogy ezeket pontos definíciójuk ismerete nélkül kezdik használni, ami rengeteg félreértéshez, téves interpretációhoz vezet. Komoly hibaforrás lehet ez is.

2.6. A kutatás során nyert adatokból a feldolgozás során ún. *modelleket* kell előállítani. Ezek segítségével lehet a kutatás végső következtetéseit levonni. A baj az, hogy gyakran többféle modell is készíthető a rendelkezésre álló kutatási adatokból. Újabb hibák forrása az, hogy melyiket választjuk.

2.7. A nagyszámú kutatási adat feldolgozása szükségszerűen matematikai, főleg statisztikai módszerek segítségével történik. Gyakori hiba, hogy nem tartják be az alkalmazott matematikai módszer előírásait. Sok számítás előfeltétele például az adott változó ún. normális eloszlása, amit vagy meg sem vizsgálunk, vagy nem vesznek figyelembe. Gyakran túl kevés az adat, nem éri el a statisztikai vizsgálatához szükséges mintaszámot. Az ilyen hibák sajnos igen gyakoriak, és az eredmények érdemi torzulásához vezetnek.

Mindezek a felsorolt hibák a kiértékelés során összegződnek, végső soron teljesen hibás eredmények jöhetnek létre. Hangsúlyozni kell, hogy a természetes változékonyság természeti adottság lévén nem szüntethető meg, de megismerhető. A kutatás korlátaiból és emberi tökéletlenségből adódó hibákat viszont nemcsak megismerni, de érdemben csökkenteni is lehet. Ennek feltételeit és kereteit tekintjük át a következő pontban.

A bizonytalanságok és hibák kezelésének alapelvei

A földtani kutatásban a következő elveket kellene alkalmazni:

1. Olyan szemléletre van szükség, amely a földtani kutatás minden lépésében figyeli a lehetséges hibákat, továbbá megpróbálja azok okait felderíteni.

2. Olyan kiinduló (input) adatokra van szükség, amelyek önmagukban is kifejezik bizonytalanságuk mértékét. Ez az, ami a földtani kutatások során eddig szinte sohasem valósult meg. Igen fontos az is, hogy meg kell különböztetni az *eredeti* és a *származtatott* kiinduló adatokat. Eredeti kiinduló adat például a hosszúság, a tömeg vagy bizonyos ásványok száma. Származtatott kiinduló adat pl. a térfogatsűrűség, amely adott tömeg és térfogat hányadosa (g/cm^3). Itt mindkét tényezőhöz más és más hiba tartozik, ezek eredője a származtatott adat hibája. Számos olyan származtatott alapadat van a földtanban, amelyet több eredeti alapadat bonyolult képlettel kifejezett összefüggése alapján számítanak ki. Természetes, hogy ilyenkor az összes eredeti alapadat hibáját külön-külön kellene meghatározni, és a hibaterjedés törvényét figyelembe véve összesíteni. Sajnos, néhány kivételtől eltekintve erre sem került sor eddig.

3. Az adott adathalmaznak és a megoldandó problémának leginkább megfelelő matematikai módszert kellene alapos megfontolás után kiválasztani a kiértékelésre. Személyes tapasztalatom az, hogy ehhez képzett matematikusok segítségére lenne szükség. Bármennyire örömdetesen bővül egyetemünk a geológia szakon is a matematika oktatása, az ott kapott ismeretek szükségszerűen nem érhetik el egy „profi” matematikus szintjét. Azt is hangsúlyozni kell, hogy a legfejlettebb matematikai módszer is félrevezető lehet az adott földtani probléma beható megismerése nélkül!

Azok a kutatási adatok, amelyeket fel akarunk dolgozni matematikai szempontból háromféleképpen lehetnek:

1.) *Kvantitatív adatok.* Méréseken alapulnak, a mérés relatív hibája 25 %-nál

kisebb. Fizikus és kémikus barátaink számára ez a határ túl magasnak tűnhet, de a földtani kutatások jelenlegi szintjén ez látszik számomra legracionálisabbnak.

2.) *Félkvantitatív adatok.* Ezek is méréseken alapulnak, de a mérés relatív hibája 25 %-nál nagyobb. Az ilyen adatok a földtani kutatásban igen gyakoriak.

3.) *Kvalitatív adatok.* Csak megfigyelésekre alapulnak, többé-kevésbé részletező leírás segítségével határozzák meg őket. Ezen belül vannak olyanok, amelyeket az adott tulajdonság növekvő (vagy csökkenő) szerepe alapján sorrendbe lehet szedni (ordinális adatok), de vannak olyanok is, amelyeknél sorrend kialakítására nincs lehetőség (nominális adatok). Igen sok van belőlük a földtanban, és az eddigi gyakorlat szerint többnyire kimaradnak a kiértékelésből. Ordinális adatsor például az ásványok keménységi skálája, ahol csak annyit tudunk, hogy a skála minden egyes tagja keményebb a megelőzőnél, de a skálának számszerű értéke nincs.

A földtani kutatás egyik fő jellegzetessége a térben és időben való meghatározottság.

Ezért kíváncsi a bizonytalanságok értékelését is ehhez igazítani. Három csoportot célszerű megkülönböztetni:

a.) *Skaláris értékelések.* Ilyenkor nem vizsgáljuk az adatok térbeli és időbeli helyzetét, kizárólag a mérések és megfigyelések eredményeit értékeljük pl. a vegyi összetétel értékelésekor.

b.) *Térbeli értékelések.* Ilyenkor minden mérési eredményhez X, Y, Z térkoordinátákat rendelünk, és az adott tulajdonság térbeli változásait értékeljük. Ez az értékelési mód különösen az ásványi nyersanyag-kutatásban nyert alkalmazást.

c.) *Tér és időbeli értékelések.* A térkoordináták mellett időkoordinátát is rendelünk minden egyes adathoz. Elsősorban a hidrogeológiában nélkülözhetetlen ez az

értékelési mód, de minden földtani folyamat értékeléséhez szükség van rá. Pl. egy kútcsoport, amelyben hosszú időn át méri a vízszintet és a vízminőséget.

Könnyen megérthető, hogy mindhárom értékelési mód más és más hibaforrásokat rejt.

Általában a skaláris értékelések a legegyszerűbbek e tekintetben, a tér és időbeliek pedig a legbonyolultabbak. A földtani kutatás egy további sajátága, hogy igen tág *térbeli dimenzióban* történik. Így a lemeztektonikai folyamatokat kontinensnyi méretekben vizsgálják. Az ún. tektonikai vizsgálatok egy-egy hegységre terjednek ki. A legtöbb földtani kutatás ennél is kisebb területekre terjed ki, egy-egy földtani képződményre vagy nyersanyagtelepre. Az ásványtani és kőzettani kutatások során gyakran tenyérnyi kőzetmintákat vizsgálnak, hasonlítanak össze. Végül a kőzetek és ásványok belső szerkezetére irányuló kutatások mikroszkópos és szubmikroszkópos mérettartományban folynak. Minden egyes mérettartománynak megvannak a maguk kutatási keretei és hibaforrásai. Ezek felismerése a kutatás eredményessége és szavahihetősége szempontjából döntő jelentőségű. E téren is rengeteg a tennivaló.

A geomatematikai értékelés hagyományos módszerei

A kialakult gyakorlat szerint a földtani kutatásokban többnyire a valószínűségelmélet és a matematikai statisztika módszereit alkalmazzák. Közülük az ún. *paraméteres módszerek* a leghatékonyabbak. Sajnos, alkalmazásukhoz gyakran hiányoznak a földtani előfeltételek. Súlyos hibaforrást jelent, ha ennek ellenére mégis alkalmazni kívánják őket. A *robustus módszerek* feltételei kevésbé szigorúak, ezért szélesebb körben alkalmazhatók. A *nem paraméteres módszerek* a fentieknél pontatlanabbak, de nem kívánják meg az eloszlások ismeretét.

Gyakran ezek adják az egyetlen értékelési lehetőséget az adott körülmények között. Sajnos, ma még kevésbé elterjedtek. Bármilyen metodikát is alkalmazunk, maga az értékelés kétféle megközelítéssel történhet:

A.) Determinisztikus. Ez a megközelítés azon a feltevésen alapul, hogy a vizsgálandó kérdés minden összetevőjét ismerjük, sőt ezek arányait is és ezért az eredményt egyetlen számmal lehet kifejezni („pontbecslés”). Ez a nemzetközi szakirodalomban oly sokat emlegetett *best guess* vagy *best estimate* elve. Személyes tapasztalataim szerint a földtani kutatások oly sok bizonytalanságot tartalmaznak, hogy determinisztikus értékelések csak kivételes esetekben lehetnek megbízhatóak.

B.) Sztochasztikus (probabilisztikus). Ez a megközelítés megpróbálja a hibákat a statisztika eszközeivel feltárni. Ezért a pontbecslés helyett intervallumbecslést alkalmaz, megfelelően megválasztott konfidenciaszinten. Elméletileg bizonyítható – erről később szölok –, hogy a sztochasztikus megközelítés csak a természetes változékonyságból fakadó hibák meghatározására képes, a hibák másikat, korábbiakban ismertetett csoportjának meghatározására nem alkalmas. De vannak a sztochasztikus megközelítésnek a földtani kutatás számára nem elhanyagolható más korlátai is:

- A földtani képződményekben igen gyakoriak a fokozatos átmenetek. Sok helyen több az átmenet, mint a tiszta típus. Márpedig a valószínűségelmélet *Kolmogorov* által felállított axiómái „egymást kizáró eseményekkel” dolgoznak, tehát átmeneteket nem fogadnak el. Ez a feltétel sajnos súlyosan torzítja a legtöbb földtani értékelést.

- A statisztika legtöbb módszere „megismételt kísérleteket” ír elő. Ez számos földtani vizsgálat során kivihetetlen. Teljesen elképzelhetetlen például egy költséges

mélyfúrási hálózat többszöri megismétlése a fúrópontok kis eltolásával ill. elforgatásával. Nincs is példa ilyesmire.

- A fix összeggel jellemzett, ún. „zárt rendszerek” számos statisztikai mutatója nem természeti valóságot, hanem formális összefüggéseket fejez ki. Az ezt kiküszöbölő számítási eljárások (Aitchison 1997) rendkívül bonyolultak és igen nehezen értékelhetők.

- A félkvantitatív és kvalitatív adatok a hagyományos statisztikai módszerekkel csak korlátozottan értékelhetők. Igen sok értékes információ megy így veszendőbe.

A felsorolt okok miatt az a véleményem, hogy a hagyományos módszerek bár korrektek, de a földtani hibák értékelésére nem optimálisak. Ezért kellett az elméleti matematika által kidolgozott új módszerek alkalmazását megpróbálni.

Új, bizonytalanságorientált módszerek

Az összes hagyományos értékelési eljárás közös jellegzetessége, hogy kiinduló adatokként *valós számokat* használnak. Ezek önmagukban nem fejezik ki a hozzájuk tartozó hibákat. Az utóbbi évtizedekben olyan új elméleti matematikai módszerek láttak napvilágot, amelyek újfajta, a bizonytalanságot is kifejező számokkal dolgoznak. Ezek közül a földtani szempontból leghasználatosabbnak látszó módszerek a következők:

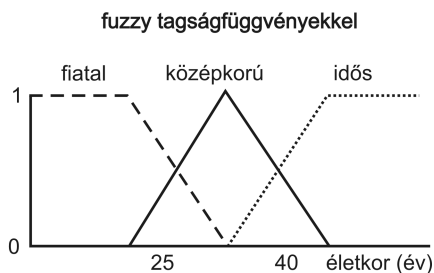
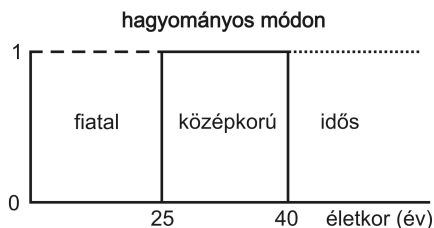
1. Intervallum analízis (Moore, 1979).

A kiinduló adatok intervallumok, amelyek hossza a bizonytalanság mértékét fejezi ki. A valódi érték valahol az intervallumon belül helyezkedik el, de nem tudni, hol. Az intervallumokkal az összes szokásos aritmetikai műveletet el lehet végezni.

2. Lehetőség-elmélet (Zadeh 1978, Dubois és Prade, 1988).

Valószínűségek helyett lehetőségekkel, a statisztikai sűrűségfüggvények helyett tagságfüggvényekkel dolgozik. Az utóbbiak óriási előnye, hogy

alkalmasak az átmenetek bemutatására. Példaként az életkorcsoportok hagyományos (éles határral történő) és tagságfüggvényekkel történő ábrázolását láthatjuk (1. ábra). A lehetőség-elmélet gyakorlati alkalmazását szolgálják a *fuzzy* (bizonytalan) számok, amelyekkel ugyancsak elvégezhető az összes szokásos aritmetikai művelet.



1. ábra • Az életkor-csoportok elválasztása hagyományos módon és fuzzy tagságfüggvények segítségével

3. Valószínűségi sávok (Ferson et al. 1999).

A kiinduló adat hibáját két eloszlásfüggvény közé eső terület nagysága fejezi ki. A módszer nagy előnye, hogy az adott tulajdonság eloszlásának jellegét is figyelembe veszi.

4. Hibrid aritmetika (Cooper et al., 1996, Ferson és Ginburg, 1996).

Ez a módszer valós számok, intervallumok, fuzzy számok és valószínűségi sávok együttes értékelését teszi lehetővé, ezért a földtani kutatás számára kivételes jelentőségű.

Az új módszerek részletes ismertetése messze meghaladná e cikk kereteit. A ki-

lencvenes évektől kezdve e módszerek egyre szélesebb körű alkalmazást nyertek az orvostudományban, a mikrobiológiában, az ipar és a gazdaság számos területén. Felismerve jelentőségüket széleskörű földtudományi alkalmazásukra tettünk javaslatot (Bárdossy, Fodor J., Molnár, Tungli, 2000). Ezt követően egy egész sor gyakorlati alkalmazásba kezdtünk, amelyeket a következőkben röviden bemutatok.

Az új módszerek alkalmazásai a földtani kutatásokban

A felsorolt módszerek közül a fuzzy aritmetikát tartottuk a legegyszerűbbnek és legkönnyebben értékelhetőnek. Ezért első lépésben ezt a módszert alkalmaztuk. Elvégeztünk 29 kőzetminta (perm korú agyagkő) kvantitatív ásványtani vizsgálatát röntgen-diffraktométerrel és értékeltük a kapott eredményeket (Bárdossy, Árkai, Fodor J., 2001). A fuzzy számok segítségével egyértelműen számszerűsíteni lehetett a meghatározások hibáit, sőt szét lehetett választani a természetes változékonyságból származó és a mérésekből adódó hibákat. Ezután a kőzetminták termikus vizsgálatának eredményeit értékeltük fuzzy számokkal (Földvári, Bárdossy, Fodor J., 2002). Az eredmények megerősítették fent említett vizsgálatainkat, sőt, a két vizsgálati módszer hibáinak összehasonlítása további új felismerésekhez vezetett.

A Golder Associates Magyarország munkatársaival együttműködve két területen, gránitban ill. az említett perm korú agyagkőben a vízvezető képességet – transzmisszivitását – értékeltük fúrólukokban végzett mérések alapján. A mérések hibáira sikerült számszerű értékeket meghatározni (Bárdossy, Fodor, Molnár, Tungli, 2000).

Átfogó számítássorozatot végeztünk hazai bauxittelepek ásványvagyonának meghatározására fuzzy számokkal, és ezek eredményeit összevetettük a hagyományos módon végzett

számításokkal (Bárdossy, R. Szabó, Varga, 2001). A kapott eredmények a hagyományos módszerek több belső ellentmondására világítottak rá. Először sikerült a számított ásványvagyon mennyiségének és minőségi mutatóinak, pl. vegyi összetételének hibáit számszerűsíteni. Ezek a számítások olyan eredményesek voltak, hogy az új számítási módszert más szilárd ásványi nyersanyagok (érc, energiahordozók) ásványvagyon számítására is kiterjesztettük (Bárdossy, Fodor B., 2001).

Számomra a legizgalmasabb alkalmazási területek a radioaktív hulladékok elhelyezésével kapcsolatos *biztonsági elemzések* voltak. Az eddig alkalmazott determinisztikus és sztochasztikus módszerek ugyanis nem képesek a hibák teljeskörű feltárására és számszerűsítésére. Ezért Fodor János professzorral a fuzzy halmazok elméletére épülő, teljesen új metodikát dolgoztunk ki, amely a hibákat az input adatoktól kezdve figyelembe veszi (Bárdossy, Fodor J., 2001). Az érintett szakterületek szakembereinek bevonásával folyamatban van az őslénytani, a rétegtani és a geofizikai adathalmazok feldolgozása fuzzy módszerekkel.

A fenti, különböző területekre kiterjedő vizsgálatok eredményei alapján egyértelműen ki lehet mondani, hogy a fuzzy halmazok elméletének alkalmazása egymagában is jelentős előrelépést hozott a bizonytalanságok feltárása és számszerűsítése terén. Ezen túlmenően, sikerült feloldani a hagyományos módszereknél említett korlátokat és belső ellentmondásokat.

A fuzzy módszert egyébként az utóbbi években a földtudomány több részterületén alkalmazták, teljes sikerrel: pl. Cagnoli (1998) a vulkanológiában, valamint a Földrajzi Információs Rendszereknél (GIS) (Unwin, 1995), a bizonytalanságok és hibák átfogó vizsgálatával azonban eddig nem foglalkoztak.

A földtani kockázatok bizonytalanságai

A kockázatok kérdéseivel korábban elsősorban a banki és biztosítási szakmában foglalkoztak, és e problémakörnek gazdag szakirodalma van. A kockázatelemzés módszereivel nemzetközi társaság (Society for Risk Analysis) foglalkozik, amely folyóiratot ad ki *Risk Analysis* címmel. Ennek ellenére a kockázatelemzés a földtan területén kevésbé terjedt el. Mindenekelőtt a földtani veszélyforrások és kockázatok fogalmait kell tisztáznunk, majd arra a kérdésre próbálunk választ találni, hogy milyen hibákat tartalmazhatnak a kockázatelemzések?

A *földtani veszélyforrások* olyan természeti jelenségek, amelyek lappangó módon a Föld legkülönbözőbb részein jelen vannak és időnként, többnyire váratlanul, katasztrófákat okozva fellépnek. Ilyenek a földrengések, a vulkáni kitörések, a földcsuszamlások, az árvizek, valamint egyes folyók hirtelen irányváltozásai. Ezek tanulmányozásával bonyolultságuk miatt a geológia, a geofizika, a geográfia, a hidrológia, sőt a meteorológia szakemberei közösen foglalkoznak. A bizonytalanságok szerepe e kérdéskörben még igen nagy és a kétségtelenül növekvő erőfeszítések ellenére pontos előrejelzések még nincsenek, számos alapvető kérdés még megválaszolatlan. Meggyőződésem szerint a fenti, bizonytalanságorientált új módszerek alkalmazása – az input adatoktól kezdődően – érdemi előrelépést eredményezhet. A Magyar Tudományos Akadémia támogatásával reményeim szerint a közeljövőben e szakterületen is sor kerülhet e módszerek kipróbálására.

A *kockázat* fogalmát Mályusz és Tusnádi (1999) nyomán a következő módon írhatjuk le:

- a kockázat egy személy, csoport vagy szervezet döntéséhez kapcsolódik;
- a cselekmény kedvezőtlen, káros ki-

menetelére vonatkozik;

- előre nem látható módon, véletlenszerűen következik be.

Maga a kockázat tehát összetett fogalom, amely önmagában nem számszerűsíthető. De számszerűsíteni lehet a kockázat *valószínűségét* és *következményeit*. Valamely kockázatnak többféle kimenetele is lehet, mindegyikhez más valószínűség tartozik. Ezek kiszámítása különösen nehéz és nagy hibával történik. A következmények egyrészt anyagiak, másrészt személyiek (megbetegedések, sérülések, halálos esetek) lehetnek. Ezek várható nagyságának kiszámítása is igen nehéz feladat. A földtudomány területén eddig elsősorban bányászati beruházásokkal, valamint hulladéktárolók elhelyezésével kapcsolatosan készültek kockázatelemzések, minden esetben determinisztikus ill. sztochasztikus megközelítéssel. A tapasztalatok szerint ezek nemegyszer hibásaknak bizonyultak, alábecsülték a kimenetek valószínűségét ill. következményeit. Ennek okait itt is abban látom, hogy a hagyományos módszerekkel nem lehet az input adatok szintjén a hibákat számításba venni. Vegyük csak egy bányászati beruházás példáját. A kockázatelemzés a nyersanyagtelep ásványvagyonára épül. Amennyiben a vagyonszámítás hibás feltevéseken alapszik, a valószínűség nem felel meg, úgy a bányászati beruházás szükségszerűen csődbe megy. Márpedig a korábbiakban elmondottak szerint a hagyományos módszerekkel nem lehet az ásványvagyon mennyiségének és minőségének hibáját számszerűen meghatározni. Az új, bizonytalanságorientált módszerekkel ezek kiszámíthatók, ezáltal a kockázatelemzés is megbízhatóvá, pontosá válhat.

Mindezekből kitűnik, hogy az ismeretett új módszerek a kockázatelemzések esetében is jelentős előrelépést, pontosodást eredményezhetnek.

Összefoglalva megállapítható, hogy a felsorolt új módszerek alkalmazása a földtudomány számára is nagy haszonnal járhat, mind a tiszta tudományos kutatásban, mind a gyakorlati feladatok megoldásában. A sikeres alkalmazásokhoz a geológusok, geofizikusok, geográfusok, hidrológusok, bányászok és meteorológusok összefogásán kívül, továbbra is szükség lesz az elmé-

leti matematikusok aktív közreműködésére és segítségére.

Kulcsszavak: *ásványvagyon-becslés, bizonytalanság, földtani jelenségek, földtani veszélyforrások, fuzzy aritmetika, geomatematika, kockázat, kockázatelemzés, lemeztektonika*

IRODALOM

- Aitchison J. (1997). The one hour course in compositional data analysis, or compositional data analysis is simple. Proc. of the 3rd Annual Conf. of the Internat. Assoc. Mathematical Geology. Barcelona. 3-35
- Bárdossy Gy., Fodor J., Molnár P., Tungli Gy. (2000). A bizonytalanságértékelése a földtudományokban. Földtani Közlöny. **130**, 291-322
- Bárdossy Gy., Árkai P., Fodor J. (2001). A bizonytalan halmazok elméletének alkalmazása röntgendiffraktométeres ásványtani fázisanalízis eredményeinek értékelésére. Földtani Közlöny. **131**, 331-341
- Bárdossy Gy., Fodor J. (2001). New possibilities for the evaluation of uncertainties in safety assessment of radioactive waste disposal. Acta Geologica Hungarica. **44/4**, 363-380
- Bárdossy Gy., R. Szabó I., Varga G. (2001). Az ásványvagyon értékelés új lehetőségei a hazai bauxitvagyon példáján. Földtani Kutatás. **38**, 35-44
- Bárdossy Gy., Fodor B. (2001). Új módszer készlet-számítások bizonytalanságának meghatározására. Földtani Kutatás. **38**, 4, 16-21
- Cooper J. A., Ferson S., Ginzburg I. R. (1996). Hybrid processing of stochastic and subjective uncertainty data. Risk Analysis. **16**, 785-791
- Dubois D., Prade H. (1988). *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. Plenum Press. New York
- Ferson S., Ginzburg I. R. (1996). Different methods are needed to propagate ignorance and variability. Reliability Engineering and System Safety. **54**, 133-144
- Ferson S., Root W., Kuhn R. (1999). *RAMAS Risk Calc. Risk assessment with uncertain numbers. Applied Biomathematics*. New York
- Földváry M., Bárdossy Gy., Fodor J. (2002). A bizonytalan halmazok elméletének alkalmazása kőzetminták termoeanalitikai vizsgálatának értékeléséhez a bodai aleurolit formáció példáján. Földtani Közlöny. **132**
- Mályusz K., Tüsnádi G. (1999). A kockázatok matematikai kezelése. Magyar Tudomány. **1**, 80-85
- Moore R. M. (1979). *Methods and applications of interval analysis. SLAM Studies on Applied Mathematics*. Vol. 2. Philadelphia
- Zadeh L. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems. 3-28

