

A matematikai statisztika és a geostatistika alkalmazási lehetőségei a geofizikában

VERŐ LÁSZLÓ¹ (témavezető), GULYÁS ÁGNES¹, KISS JÁNOS¹, KUMMER ISTVÁN¹,
OCSENÁS PÉTER¹

L. VERŐ, Á. Gulyás, J. KISS, I. KUMMER, P. OCSENÁS: Potential geophysical applications of mathematical statistics and geostatistics

OTKA nyilvántartási szám: T 14447

Bevezetés

A pályázattal az volt a célunk, hogy a geofizika különböző területein megvizsgáljuk a statisztikai módszerek alkalmazási lehetőségeit, az ily módon elérhető eredményeket. Először is megvásároltuk és üzembe helyeztük az SSPS statisztikai programrendszert. Ezután az elemzéseket a geofizika három részterületén — szeizmika, légi geofizika, hidrogeológiai célú mérések — végeztük. A felszíni geofizikai adatokra az SSPS-t alkalmaztuk, a légi geofizikai adatelemzésre pedig az ERDAS programrendszer statisztikai moduljait is felhasználtuk.

A hidrogeológiai célú geofizikai kutatásokkal kapcsolatban két eltérő felépítésű terület földtani és geofizikai adatait (vertikális elektromos szondázások, mérnök-geofizikai szondázások, szemcseeloszlási és egyéb laborvizsgálatok eredményeit) elemeztük statisztikailag. Meghatároztuk a paraméterek közötti statisztikai összefüggéseket, majd ezek felhasználásával azt vizsgáltuk, hogy a geofizikai paraméterekből hogyan lehet hidrogeológiai paramétereket megbecsülni és egyben számítottuk ezek megbízhatóságát is.

A légi geofizikai és távérzékelési adatrendszerek értelmezése során sikerrel alkalmaztuk a főkomponens transzformációt adattömörítési és adategyesítési feladatok megoldására. Az adatok kvalitatív vizsgálatánál fontos szerepet kaptak az osztályozási eljárások, ezek lehetővé tették a földtani képződmények jellemzését, lehatárolását. Ezen a területen az adott feladattípus megoldására legkedvezőbb eljárás kidolgozása továbblépést jelenthet.

Szeizmikus eredménytérképeken a szintvonalak lefutását félvariogramok segítségével vizsgáltuk, szeizmikus szelvényeken pedig értelmezett reflexiós szintek időértékeinek elemzésével vetőket nyomoztunk. A származtatott időkülönbség (időbeli vastagság) paraméter változékonyságát és hatástávolságát határoztuk meg. Az irányfüggetlen félvariogramok segítségével szerkesztett krigelt térképeken a szintvonalak jellegéből a tektonikai zóna helyére, irányára lehetett következtetni.

1. Hidrogeológiai célú geofizikai kutatások statisztikai elemzése

Az elmúlt években nagy mennyiségű adat gyűlt össze az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben a kismélységű víz-bázisok veszélyeztetettségének meghatározását célzó geofizikai kutatások során. Célkitűzésünk ezen a területen egy olyan geofizikai módszerrel kidolgozása volt, amely — laza üledékekben — alkalmas lehet felszínközeli földtani szerkezeteknek a hidrogeológia által használt rétegparaméterekkel való jellemzésére is.

1.1. A mérnökgeofizikai szondázások és a laboratóriumi elemzések eredményeinek statisztikai vizsgálata

A mérnökgeofizikai szondázási adatokból való közetparaméter-becslést két területen végeztük el: a döntően homokból és kavicsból felépített szigetközi, valamint az elsősorban agyag, kőzetliszt, homok összetételű békési területen.

A szigetközben a kőzet vízvezetési viszonyait jellemző hatékony szemcseátmérő (d_h) regressziós becslését a csúcshellenállás (c_p), porozitás (Φ) és természetes γ aktivitás (TG) adatok felhasználásával végeztük. A meghatározott regressziós modell:

$$\lg d_h = a TG + b c_p + c \Phi + d$$

A békési területen d_h becslésére a szűk határok között változó porozitás és csúcshatár adatok nem voltak felhasználhatók, így itt egyváltozós regressziós modellt alkalmaztunk:

$$\lg d_h = a TG + b$$

A regressziós becslések eredményeinek felhasználásával mindkét területen kiszámíthatók az egyes mérnökgeofizikai szondázási pontokhoz tartozó hatékony szemcseátmérő, víztelítettség (s_w) és porozitás paraméter-mélység szelvények.

1.2. A vertikális elektromos szondázási adatok hidrogeológiai értelmezése

Az értelmezés első lépéseként azt vizsgáltuk, hogy egyes területeken mely tényezők befolyásolják az ellenállás adatokat. Az elemzéshez felhasználtuk a mérnökgeofizikai szondázásokból számított hidrogeológiai paraméterek mélység-szelvényeit, valamint az azonos helyen mért vertikális elektromos szondázások réteg-

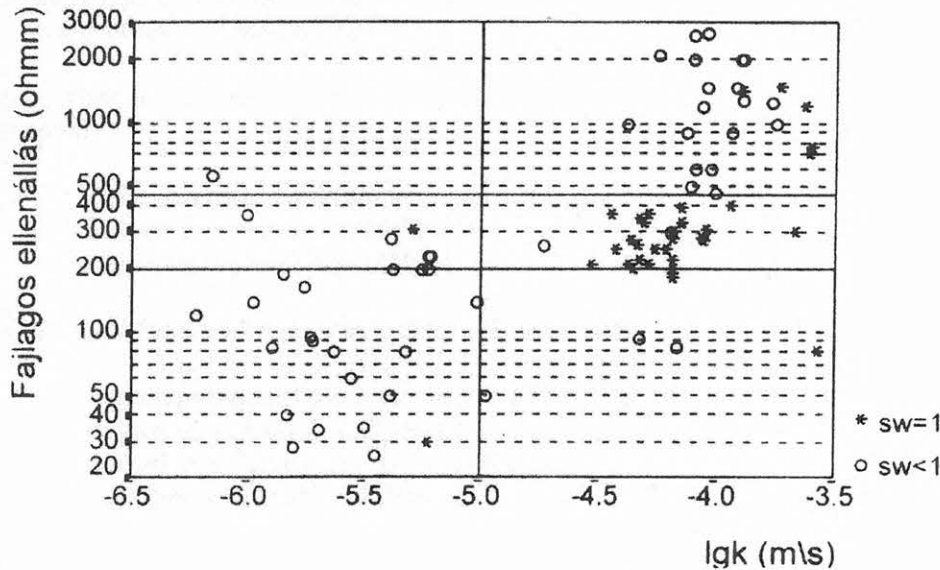
¹ Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145 Budapest, Kolumbusz u. 17-23.

ellenállás adatait. A szigetközi területen a három (d_h , Φ és s_w), a békésin két (d_h és s_w) közetparaméter együttesen jól meghatározza a rétegellenállás adatokat, további paraméterek (például a pórusfolyadék ellenállása) hatása nem számottevő.

A hidrogeológiai minősítés következő lépése a vertikális elektromos szondázásokból meghatározott rétegeket jellemző átlagos szivárgási tényező (k) számítása. Ezt követően ábrázolhatjuk az összetartozó átlagos $\lg(k)$, s_w és R (rétegellenállás) adatokat a $\lg(R)-\lg(k)$ síkon, a vízszint alatti és feletti adatokat elkülönítve.

A következő feladat az ellenállás adatok intervallumokra történő felosztása oly módon, hogy az egyes hidrogeológiai kategóriákhoz tartozó ellenállás eloszlások a lehető legkisebb mértékben fedjék át egymást. A $\lg(R)-\lg(k)$ „crossplot”-ról (1. ábra) leolvashatók a szigetközi hidrogeológiai kategóriákhoz tartozó ellenállás tartományok:

- 1) telítetlen, rossz vízvezető, gyengén vízzáró — $0 < R < 200 \Omega m$,
- 2) telített vízvezető — $200 < R < 450 \Omega m$,
- 3) telítetlen vízvezető — $450 \Omega m < R$.



1. ábra. A fajlagos ellenállás adatok a szivárgási tényező függvényében, a víztelítettség feltüntetésével (szigetközi adatok)

Fig. 1. Resistivity data plotted against hydraulic conductivity, water saturation (s_w) is also indicated (data from Szigetköz)

Hidrogeológiai kategóriák	R kategóriák		
	$0 < R < 200$	$200 < R < 450$	$450 < R$
rossz vízvezető (gyengén vízzáró)	23	8	1
vízszint alatt	71,9%	25,0%	3,1%
vízvezető	5	23	5
vízszint alatt	15,2%	69,7%	15,2%
vízszint felett	17,2%	65,7%	25,0%
vízvezető	1	4	14
vízszint felett	5,3%	21,1%	73,7%
	3,4%	11,4%	70,0%

1. táblázat. A fajlagos ellenállás kategóriák és a hidrogeológiai kategóriák keresztábrázolása (szigetközi adatok)

Table 1. Cross-table of resistivity and hydrogeological categories (data from Szigetköz)

Az ellenállás kategóriákból történő hidrogeológiai kategória becslések megbízhatósága az 1. táblázatban követhető nyomon. A táblázatban található cellák első sora a cellába tartozó elemek száma, a második sor az aktuális elemszám és az aktuális sor összes elemszámának hányadosa, a harmadik sor a cellaelemszám és az aktuális oszlop összes elemeinek hányadosa. Ezek jelentése: például a táblázat $0 < R < 200$, rossz vízvezető cellájában 23 adat szerepel, a rossz vízvezető réteg az esetek 71,9%-ában $0 < R < 200 \Omega m$ ellenállású és a $0 < R < 200 \Omega m$ ellenállású rétegek az esetek 79,3%-ában rossz vízvezetők.

Mindezek alapján a szigetközi fajlagos ellenállás kategóriákkal 65–80%-os pontossággal becsülhetők a hidrogeológiai kategóriák.

A békési területen is hasonló eredmények adódtak, természetesen az eltérő földtani felépítésnek megfelelően a kategóriák másképpen alakultak (az eredményeket OCSENÁS [1998] tartalmazza).

A hidrogeológiai és földtani minősítés statisztikai bizonytalanságai a geoelektromos rétegszelvények szerkesztése és értelmezése közben többnyire kiszűrhetők, mivel ennek során további, a bemutatott statisztikai elemzésnél figyelmen kívül hagyott információk is rendelkezésre állnak. Ilyen információk lehetnek a rétegtörésvonalak elhelyezkedésére vonatkozó feltételezések és egyéb földtani-hidrogeológiai adatok.

1.3. Következtetések, javaslatok

A mért geofizikai adatok és a közetparaméterek kapcsolatának leírására általánosan érvényes összefüggés nem adható, az eltérő felépítésű területeken különböző függvények alkalmazhatók. A függvénykapcsolatok meghatározásának hatékony módszere lehet a bemutatott statisztikai analízis. A statisztikai módszerekkel eldönthető, melyek azok a geofizikai jellemzők, amelyek lényegesen befolyásolják a geofizikai paramétereket, ez alapján meghatározható, melyek azok a geofizikai adatok, amelyek alkalmasak a közetjellemzők becslésére.

A statisztikai módszerek alkalmazásának másik lényeges eredménye, hogy a paraméterbecslések megbízhatósága számítható, azaz minőségük ellenőrizhető.

2. Légi geofizikai adatok statisztikai vizsgálata

2.1. Korreláció vizsgálatok: radiometriai paraméterek és a topográfia (DTM), ill. a repülési magasság kapcsolatának vizsgálata (minőség ellenőrzés)

A légi radiometriai mérések során feltételezzük, hogy egy sík féltér felett (2π geometria) végeztük a méréseket. A valóságban azonban ettől jelentős eltérések is lehetnek, ha igen meredek és változékony a domborzat és kicsi a repülési magasság. Egy hegycsúcs felett mérve a valóságnál nagyobb beütésszám mérhető a lecsökkenő magasság miatt ($<2\pi$ geometria), egy szűk völgybe bepervülve ($>2\pi$ geometria) a valósnál nagyobb, jóval felette repülve pedig kisebb beütésszámok mérhetők. A normál feldolgozás során a repülési magasság változását korrekcióba vesszük (a radarral mért magasságadatok alapján). Érdekes azonban a repülési nyomvonalnak a domborzathoz viszonyított helyzetét is figyelnünk.

Ennek érdekében a digitális topográfiai térképből (DTM) elkészítettük a a Finn Geológiai Szolgálat által 1992-ben végzett mérések területének lejtőkategória térképét és vizsgáltuk a radiometriai paraméterek — különösen a legkritikusabb urán paraméter — korrelációját. A térképek közti korrelációt számító program egy, az Egyesült Államok Geológiai Szolgálatával által kidolgozott nyílt szoftver továbbfejlesztésével készült (a programozási munkákat Kiss János végezte). Megállapítható volt, hogy a terület 73%-án nincs korreláció ($-0,5 \pm 0,5$ közti értékek), alig több mint 10-10% esetén volt gyenge korreláció vagy antikorreláció. 90%-ot meghaladó korreláció, antikorreláció csak 0,2, illetve 0,3%-ban volt jellemző. Megjegyezzük, hogy tagoltabb topográfiajú területek lemérése során, például Svájcban, speciális szoftverek segítségével veszik figyelembe a topográfiát [SCHWARZ et al. 1991].

A paramétertérképeken látható csíkosság — különösen az ekvivalens uránkoncentráció és teljes beütésszám térképeken — kisebb korrekciós hibára utal (szintelésűzés). Az igen szélsőséges repülési magasságok esetén — például Eger felett, 150–200 m — nem tökéletes a korrekció.

A másik érdekes repülési paraméter a repülési magasság. Az ekvivalens uránkoncentráció és a repülési magasság közti korreláció vizsgálata során kiderült, hogy a terület 58%-án nincs korreláció ($-0,5 \pm 0,5$ közti értékek), 22% esetén gyenge korreláció, 18% esetén pedig gyenge antikorreláció figyelhető meg. Határozott kapcsolat csak mintegy a terület 1–1%-án van ($0,9$ feletti értékek).

2.2. Azonos geológiai adottságú területek elkülönítése légi geofizikai és felszíni geofizikai mérések statisztikai jellemzőinek vizsgálatával

A légi geofizikai mérés egyik feladata a felmért terület geológiai térképének pontosítása vagy megszerkesztése lehet. Ezen feladat megoldása érdekében először meg kell állapítanunk, hogy a különböző földtani felépítésű területekre mely — a légi geofizikai kutatás során mért — paraméter(ek) jellemző(ek). A terület digitális földtani térképének segítségével meghatároz-

hatjuk a különböző földtani felépítésű területek felett mért geofizikai paraméterértékek szórását és átlagértékét. Amennyiben a mért paraméterek egy bizonyos kombinációja csak egy bizonyos földtani felépítésre jellemző, akkor ezen a területen a

$$\sum_{i=1}^n \frac{a_{0i} - a_{ki}}{\sigma_i}$$

kifejezésnek minimuma lesz, ahol i az aktuális mért paraméter indexét, a_{0i} a terület felett mért aktuális paraméter értékét, a_{ki} és σ_i a terület felett mért aktuális paraméter várható értékét, illetve szórását jelöli. A fenti összefüggés numerikus értékét az összes mérési pontra kiszámítva a vizsgált földtani képződmény területi előfordulásának valószínűségi térképét kapjuk. A szükséges programozási munkákat SÁRHIDAI Attila végezte.

Vizsgálatainkba a légi geofizikai mérés során nyert adatokon (látszólagos fajlagos ellenállás, urán-, tórium- és káliumkoncentráció, mágneses térerősség) kívül bevontuk még a földi gravitációs adatokat és a mérési terület bizonyos részéről készült Landsat TM űrfelvételeket, valamint néhány, légi mérési adatból lezármasztatható analitikus értékeket, vagy a radioaktív paraméterek bizonyos kombinációit is.

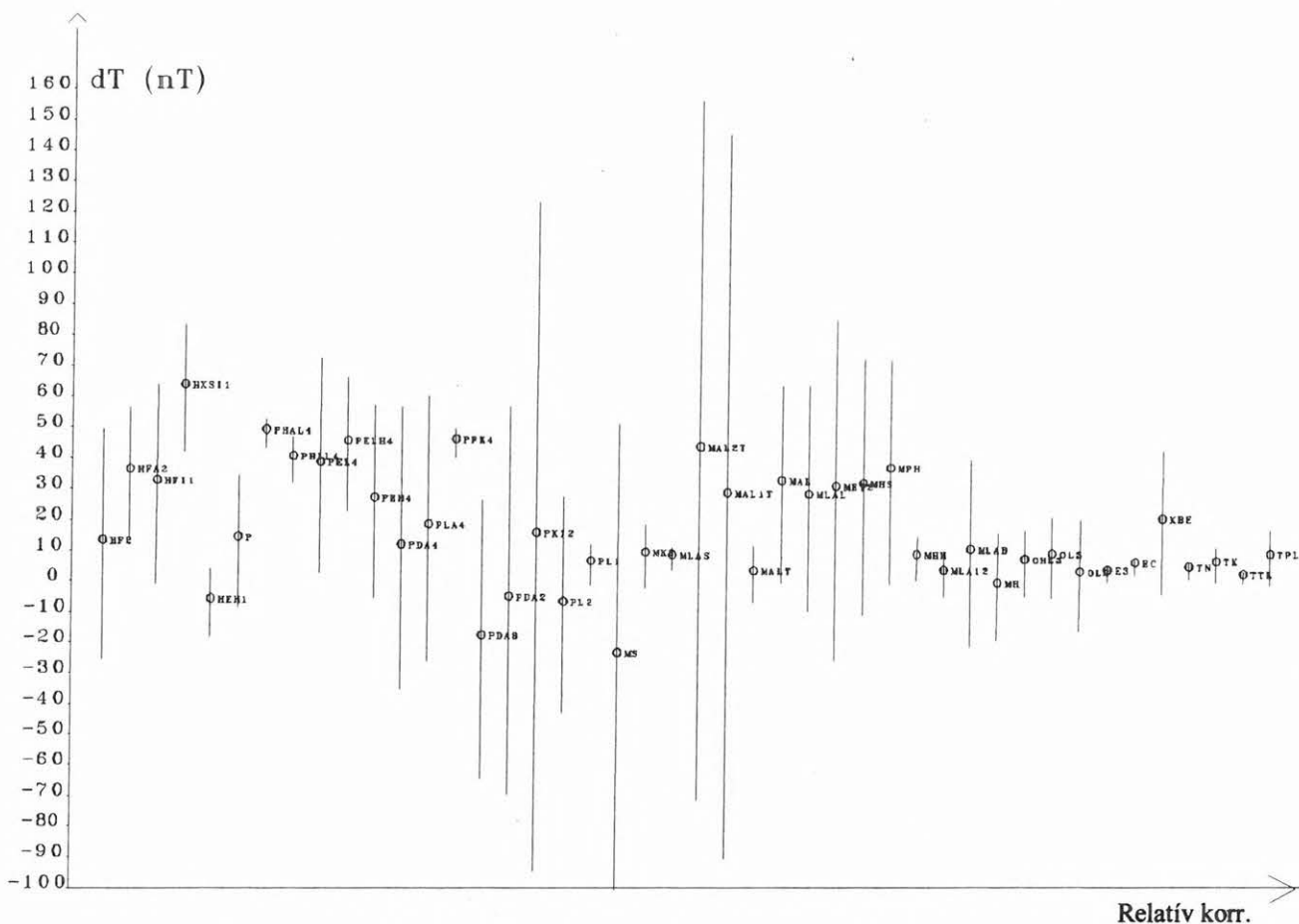
Ettől az eljárástól olyan földtani felépítésű területek esetén várhatunk jó eredményt, amelyekre egy vagy több paraméter értéke viszonylag kis szórású és átlagértéke jelentősen eltér a többi értékétől.

A mérés típusa	Kutatási mélység
légi elektromágneses	a felső 30 – 150 méter
légi mágneses	a ható „erősségétől” függő (kilométeres mélységtartomány)
légi radiometria	legfelső néhány 10 cm
gravitáció	a hatótól is függően kilométeres nagyságrendű
űrfelvételek	gyakorlatilag csak a felszínt érzékelik

2. táblázat. Az alkalmazott módszerek kutatási mélységtartománya

Table 2. Investigation depth of the applied methods

A számított statisztikák megjelenítésénél a legfontosabb szempontnak az egyértelműséget, illetve a közép- és szórásértékek egyidejű megjelenítését tartottuk. Így abszcisszaként egy relatív idő- vagy kortengelyt választottunk (a területen előforduló képződményeket, függetlenül a köztük lévő korkülönbségre, egymáshoz képest azonos távolsággal toltuk el a jobb összehasonlíthatóság kedvéért), míg az ordináta az adott fizikai/mérési paraméter változásának tengelye. A diagramokon feltüntettük az adott paraméter középértékét és szórását is. Ez a fajta megjelenítés azért érdekes, mert a képződmények fizikai paramétereinek korfüggése rögtön szembeötlő. Így például jól látszik a korral együtt növekvő sűrűség, illetve fajlagos ellenállás, vagy jól kijelölhető a vulkáni aktivitás ideje a mágneses és radiometriai paraméterek alapján. Példaképpen a 2. ábrán a mágneses adatok ilyen ábrázolását mutatjuk be.



2. ábra. A mágneses tér statisztikai vizsgálatának eredménye az egyes földtani képződmények felett (légi geofizikai mérés, Eger, 1992)

Fig. 2. Result of magnetic field's statistical analysis over different geological formations (airborne geophysical survey, Eger, 1992)

3. Vetőnyomozás geostatistikai módszerrel

Célunk a szeizmikus szelvények alapján szerkesztett vetők vizsgálata volt geostatistikai módszerrel, ily módon közelítve egymáshoz a földtani és matematikai szemléletmódot. Eredményeinket részletesen ismerteti KUMMER et al. [1996].

A félvariogramok segítségével szerkesztett krigelt térképek alkalmazása sokféle feladat megoldásánál bizonyult sikeresnek, például szintvonalak lefutásának elemzésében. A szeizmikus szelvényeken értelmezett reflexiók szintek időértékeinek vizsgálatával törésvonalakat nyomoztunk. A félvariogramok felhasználásával a származtatott időkülönbség (időbeli vastagság) paraméter változékonyságát és hatástávolságát határoztuk meg. Az irányfüggetlen félvariogramok alapján szerkesztett krigelt szintvonalak jellegéből a tektonikai zóna helyére, irányára és mértékére lehetett következtetni. A vetők csapásirányai ugyanis bizonyos rendszert mutatnak, aminek geostatistikai módszerekkel is kimutathatóknak kell lennie.

Szeizmikus szelvényeken kijelölt (és hagyományos módon, a Landmark értelmező rendszeren térképezett) kréta és miocén felszín, valamint pannonbeli szekvenciahatárok időszint adataiból időbeli vastagság térképet állítottunk elő. Ezen vastagságértékek félvariogramokkal történő vizsgálata eredményeképpen krigelt szintvonalas térképeket is szerkesztettünk. A hagyományos módon és a geostatistika

módszereivel készített térképek összehasonlítása mutatja az utóbbiak előnyös tulajdonságait.

A kréta felszín — amely egyben a miocén fekéje is — irányfüggetlen félvariogramjára illesztett elméleti, hatványfüggvény típusú félvariogram hatástávolsága 16 000 m körüli érték. A tapasztalati félvariogram jellegéből úgy tűnik, hogy összetett, két küszöbszintes félvariogrammal találtunk. A K–Ny irányú empirikus félvariogram elméleti közelítése hasonló eredménnyel jár, mint az irányfüggetlen esetében, azonos az elméleti függvénnyel való közelítés és azonosak a hatástávolságok, sőt még a szórásnégyzetek is megegyeznek.

Elvégezve a számítást az alacsonyabb küszöbszintre is, azonos szórással és azonos elméleti függvény típussal való közelítés mellett a hatástávolság 7200 m körüli érték. Ebből az a következtetés vonható le, hogy a keresett szerkezeti elemek nagy valószínűséggel két csoportba sorolhatók. E két csoporthoz tartoznak külön-külön az említett két hatástávolsággal jellemezhető szerkezeti elemek.

Két pannon szekvencia hatásterületi ellipsziseit is összehasonlítottuk. Ezek közel azonos paraméterekkel jellemezhetők, ellentétben a szekvencia vastagságára vonatkozó ellipszis paramétereivel, amelyek gyakorlatilag használhatatlanok az ellipszisek erős polarizáltsága miatt.

A statisztikai módszer tehát hasonlóan az eredeti, kvalitatív értelmezéshez két különálló csoportba sorolható szerkezeti elemeket mutatott ki.

A geostatistika módszereivel is azonosítani tudtuk a vetőzóna helyét, fő irányát és a vetődés mértékét. Az ilyen típusú feladatok esetében a kvalitatív értelmezés után érdemes elvégezni a leírtakhoz hasonló vizsgálatokat, elősegítendő a térképszerkesztés során a vetőirányok helyesebb megválasztását. A tektonikai kép további pontosítása érdekében azonban indokolt egyéb geostatistikai elemzések elvégzése is, figyelembe véve a két kimutatott különböző léptékű szerkezeti elemet.

Összefoglalás

A geostatistikai OTKA-pályázat keretében sikerült megtenni az első lépéseket különböző adatrendszerek matematikai vizsgálatában, elemzésében. Az a tény, hogy több geofizikai módszer, távérzékelési, légi és felszíni adatok esetében is sikerült eredményeket, az értelmezés pontosítását, javítását elérni, arra utal, hogy

mindenképpen érdemes hasonló elemzéseket más adatrendszereken is elvégezni.

IRODALOM

- OCSÉNÁS P. 1996: Mérnökgeofizikai adatok elemzése statisztikai módszerekkel. *Magyar Geofizika* 37, 4
- OCSÉNÁS P. 1998: Kontrollált VESZ adatok hidrogeológiai minősítése statisztikai módszerek alkalmazásával. *Magyar Geofizika*, közlésre elfogadva
- KOVÁCSVÖLGYI S., OCSÉNÁS P. 1997: Klaszter analízis alkalmazása felszíni geofizikai adatok komplex értelmezésében, *Magyar Geofizika* 38, 1
- KUMMER I., UNGER Z., KISS P. P. 1996: Tektonikai zónák kimutatása félvariogramok alkalmazásával egy szeizmikus kutatási területen, *Magyar Geofizika* 37, 2
- SCHWARZ G. et al. 1992: How to handle rugged topography in airborne gamma-ray spectrometry surveys. *First Break* 10, 1, 11–17



VERŐ József és VERŐ László