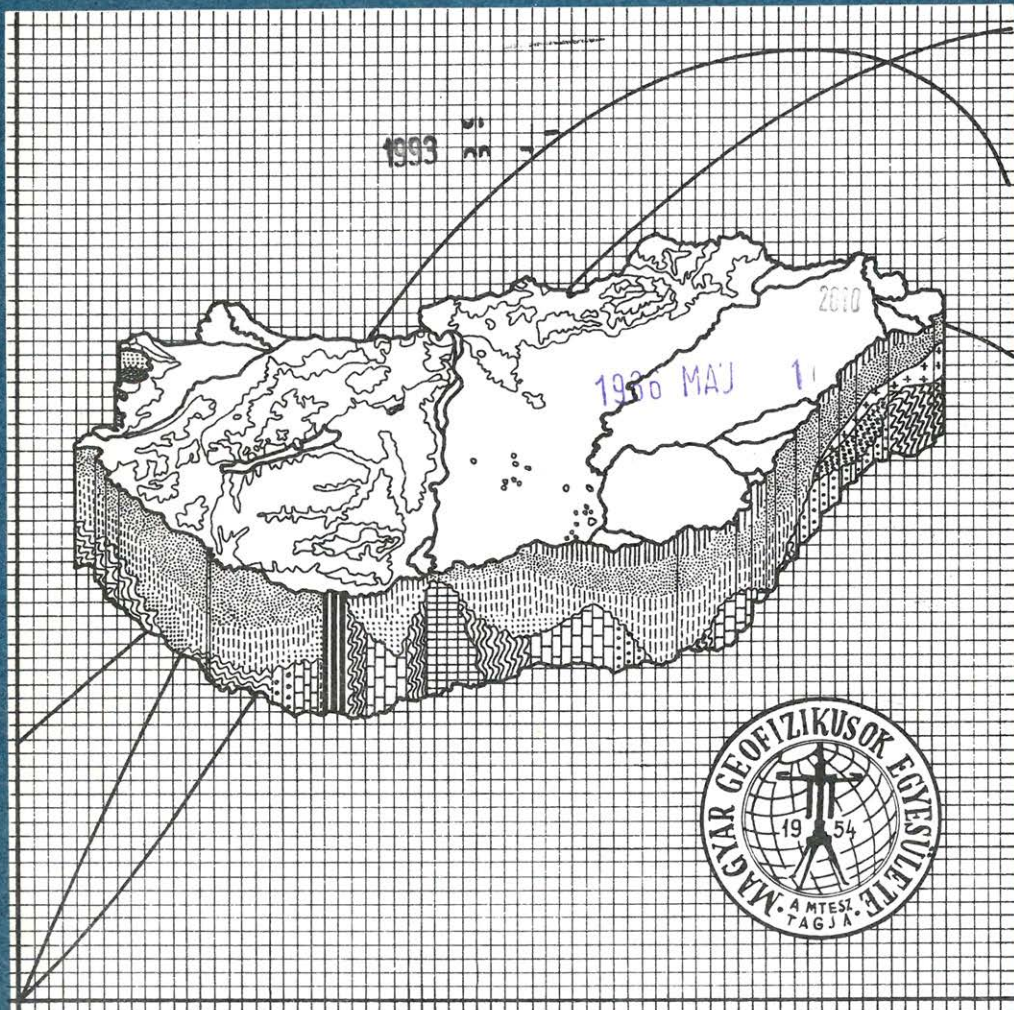


# MAGYAR 1

# GEOFIZIKA



A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETE FOLYÓÍRATA  
BUDAPEST, 1986. XXVII. ÉVFOLYAM, 1. SZÁM

TARTALOMJEGYZÉK

<i>Turai Endre:</i> Síkhullámú elektromágneses (EM) terek matematikai modellezése integrálegyenletek útján .....	1
<i>Tóth József:</i> A korszerű mélyfúrési geofizikai szelvényezés és szelvényinterpretáció szerepe egy rossz tárolótulajdonságokkal rendelkező szénhidrogénmező kutatásában .....	17
<i>Elek István:</i> A főkomponens analízis néhány mélyfúrési geofizikai alkalmazása. (Kutak közti korreláció, karotázs szelvények rétegekre bontása) .....	26



# Síkhullámú elektromágneses (EM)-terek matematikai modellezése integrálegyenletek útján\*

TURAI ENDRE\*\*

A bemutatandó eljárás segítségével lehetővé válik a tetszőleges többdimenziós határfelületekről visszavert és a felületeken megtört EM-tér, az egydimenziós földtani modellekben kialakult EM tér és az EM-térbe tett tárgyak eredő térre gyakorolt torzító hatásának az egzakt meghatározása.

A két- és háromdimenziós földtani modellek jelentős részénél, a bennük kialakuló EM-térnek a gyakorlatban használható közelítő megoldását kapjuk meg aránylag egyszerű és szemléletes úton.

Az előzéken túl a módszerrel meghatározásra került a véges visszaverő felület, ill. a véges visszaverődési szám esetén fellépő hiba és meghatározható, hogy egy háromdimenziós szerkezet milyen csapásirányú kiterjedésnél kezelhető kétdimenziósként.

A matematikai modellezések mértezéséhez fontos a modell horizontális kiterjedésének és a közelítő rácshálózatnak (felületelem-hálózatnak) a megtervezése, amelyek az integrálegyenletes módszerrel szintén megoldhatók.

Az előzők figyelembevételével olyan algoritmus és erre épülő számítógépi program került kifejlesztésre, amely kiküszöböli a véges modellmértékből a közelítő rácshálózat felvételéből adódó hibát, s a pontosság növelése érdekében analitikus összefüggéseket használ a közelítés helyett a modellek azon részein, ahol ez megtehető.

При помощи описанного метода стало возможным точно определять искажающее влияние электромагнитного поля преломленного и отраженного на многомерных граничных поверхностях, электромагнитного поля одномерных геологических моделей, а также предметов расположенных в электромагнитном поле, на равнодействующее поле.

Для значительной части двух- трехмерных геологических моделей относительно простым и наглядным путем можно получить пригодное в практике приближенное решение электромагнитного поля образующегося в этих моделях.

Кроме вышеописанного, с помощью данного метода были определены ошибки, возникающие в случае ограниченной отражающей поверхности или ограниченного числа отражений. Так же можно определить, при каких азимутах простираения данную трехмерную структуру можно рассматривать как двухмерную.

При определении размеров математических моделей важным этапом является планирование горизонтального простираения моделей и сетки приближения, которые рассчитываются с помощью метода интегрального уравнения.

Исходя из вышеизложенного, разработан такой алгоритм и основанная на нем программа, который исключает ошибки, возникшие в результате ограниченного размера моделей и использования сетки приближения. Кроме того, с целью повышения точности, вместо приближения используют аналитические зависимости в тех местах модели, где это возможно.

The process described here makes possible an exact determination of deformation effects in multi-reflected and refracted EM-space and in one dimension geological models:

Approximative solution that can be used in practice is given for 2D and 3D geological models of EM-spaces.

Moreover the finite reflecting surface determination and error computation was made. Also, it can be determined when a 3D structure can be analysed as a 2D structure.

For mathematical modeling it is important to plan the horizontal extension of the model and the grid size. This can be done by the use of integral equation method.

An algorithm was made and a computer program was written that solves the error that comes from the finite modelsize and proximal grid size. Where it is possible analytic functions are employed in the models to increase the exactness.

\* Készült az Ifjú Szakemberek Ankétján 1985. március 21-én elhangzott és III. díjat nyert előadás kéziratára alapján

\*\* NME Geofizikai Tanszék

Minden fizikai tér modellezésének a lényege, hogy a térjellemzőket tetszőleges helyen és időben meghatározzuk. Ennek az ún. direkt feladatnak a megoldása gyakorlati szempontból az inverz probléma feloldásához elengedhetetlenül szükséges. Konkrétan fogalmazva, a mérési eredményeinket összehasonlítva a modellszámítás eredményeivel, a megfelelő egyezés esetén elfogadhatjuk a modell paramétereit a valóságot közelítő szerkezet geometriai és rétegvastagságok és a rétegek fajlagos elektromos ellenállásainak meghatározásával ér véget egydimenziós esetben az inverz feladat megoldása.

A dolgozatban szereplő síkhullámú elektromágneses terek modellezésének eredményei főleg a magnetotellurikus és a rádiófrekvenciás geofizikai mérések kiértékelését, értelmezését és a terek viselkedésének jobb megismerését segíthetik elő. Megjegyzem, hogy az elv természetesen nemcsak síkhullámú EM-terek modellezéséhez alkalmas, azonban ezen esetekben főleg a reflexiós együtthatók körüli problémák miatt romlik a pontosság, illetve jelentősen megnövekedhet a számítási igény.

Az előző indokok miatt a számításokat csak síkhullámú esetre végeztem.

A matematikai modellezéseknél természetesen az analitikus eljárás a legpontosabb, hiszen itt nem terheli az egyes módszerekből adódó numerikus hibák a számítási eredményeinket. Ezt az eljárást általánosan azonban csak az egydimenziós szerkezeteknél használhatjuk, két- és háromdimenziós esetekben csak néhány speciális modellre alkalmazható. A természet azonban leggyakrabban két- és háromdimenziós problémákat produkál, amelyeknél általánosan csak a közelítő (numerikus) módszerek használhatók. Ezeket az EM-modellezésnél a következő három csoportba oszthatjuk: differenciálegyenletes, integrálegyenletes és ún. hibrid módszerek.

## 1. A modellezési eljárás vázlatos ismertetése

Eljárásunk az integrálegyenletes módszerekhez tartozik, a vektoriális *Huygens*-elvet használja fel a *Stratton-Chu* utat követve, amikor is a Maxwell egyenletek integrális alakjaiból kiindulva vezetjük le a felhasználandó összefüggéseket [3], [5], [7], amelyeket *Stratton-Chu* egyenleteknek nevez a szakirodalom.

A módszer adott feladatra történő alkalmazásához jelentős mennyiségű matematikai levezetésre volt szükség, azonban engedjék meg, hogy ezeket és a formulákat teljességgel mellőzzem és csak a számítások végeredményéből levonható fontosabb eredmények közlésére szorítkozzam. Teszem ezt azért, mert a részletes matematikai levezetések a szakirodalomban ([1], [3], [4], [5], [6], [7]) megtalálhatók.

Vegyünk fel két különböző elektromos paraméterekkel rendelkező közeget, amelyek egy háromdimenziós felület mentén érintkeznek egymással. Essen az első közeg felől egy EM-síkhullám a határfelületre. Ez a hullám a felületről visszaverődik és azon áthaladva megtörik. Az EM teret az első közegben a beeső és a visszavert hullámok terének összege adja, míg a második közegben a megtört hullám terét kell meghatározni. A háromdimenziós határfelületen megtört és arról visszavert hullámok terét a *Stratton-Chu* összefüggésekkel megadhatjuk, amelyek kimondják, hogy ha az EM-térben egy zárt felületen ismerjük az EM-tér térerősségértékeit, akkor a zárt felülettel körülvett térrészen kívüli tetszőleges

pontban megkaphatjuk az EM-tér elektromos és mágneses térerősvektorait a zárt felületre vett vektoriális integrálok segítségével [1], [5], [7]. A háromdimenziós határfelületet egy hengerszerű [1], [7] zárt felülettel körülveve, s ezen zárt felületet a határfelületre simítva kimutatható, hogy a visszavert és a megtört hullámok térerősségértékeit a határfelületre vett felületi integrálok segítségével határozhatjuk meg, ahol a határfelületen az EM-tér értékeit a beeső tér térerősségvektor értékeiből a síkhullámú reflexiók, illetve a törési együtthatók felhasználásával számíthatjuk.

Kétréteges esetben a határfelületről visszaverődött hullámok visszaverődnek a felszínről, majd újra visszaverődnek a határfelületről, s az eredő teret stacionárius esetben ennek a végtelen sok visszavert hullámnak az eredője írja le.

A visszavert és megtört hullámok nyomon követése és leírása igen hosszadalmas és munkaigényes feladat volna, ezért azt kell eldönteni, hogy gyakorlati szempontból meddig kell figyelembe venni a visszaverődéseket. A legegyszerűbb eset az, amikor csak a határfelületről történő első visszaverődést vesszük figyelembe és az első rétegben az EM-tér térerősségeit ennek a visszavert hullámnak és a beeső (primer) hullám térerősségeinek vektori összegével közelítjük.

## 2. Az integrálegyenletes módszerrel végzett modellszámításokból levont néhány fontos következtetés

A következőkben – minden különösebb részletezés nélkül, utalva azonban a szakirodalom megfelelő részeire, ahol a levezetések, számítások megtalálhatók – a modellszámításokból levont néhány olyan megállapítást közlök, amelyek meghatározzák a módszer alkalmazhatósági körét, illetve rámutatnak az elektromágneses modellezések néhány fontos problémájára.

Mindezek a vizsgálati eredmények fel lettek használva a 3. részben bemutatott számítási algoritmus, valamint az ezt megvalósító számítógépi programok kifejlesztésénél.

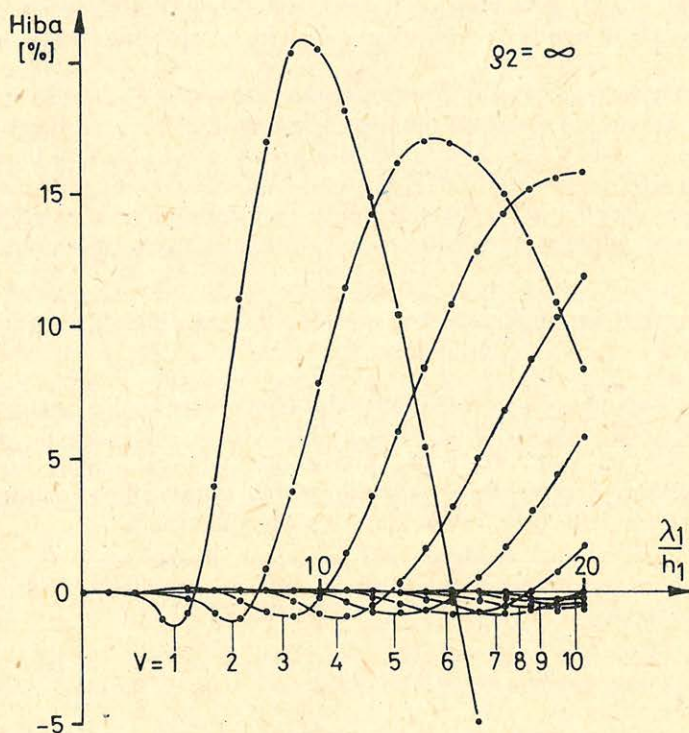
### 2.1. A szükséges visszaverődési szám vizsgálata

Az összehasonlító vizsgálatok azt mutatták, hogy ha kétréteges egydimenziós modell esetén az előzőekben leírt módon a réteghatárról csak egy visszaverődést figyelembe véve képezzük különböző frekvenciáknál az E/H impedanciákat és ezekből látszólagos fajlagos ellenállásgörbét számítunk, az egzakt eredményt kapjuk [7]. Ennek az az oka, hogy a visszaverődés után is síkhullámú marad az EM-tér.

Mint azt a számítások is igazolták, [1], [4], [6], ezért azoknál a modelleknél, amelyeknek a geometriája olyan, hogy a síkhullám a visszaverődések után csak kevésbé torzul, a számításoknál a gyakorlati pontosság eléréséhez elég csak egyetlen visszaverődést figyelembe venni a határfelületről.

Egyszerűen és szemléletesen igazolhatjuk az előzőeket, ha az integrálegyenletes módszerrel az egydimenziós, kétréteges modellnél nyomon követjük a többszörös reflexiókat. Jellemezzük  $I$ -es visszaverődési számmal ( $V$ ) azt az esetet, amikor a réteghatárról visszaverődött tér még a felszínről is visszaverődik.  $N$ -szeres lesz a reflexió ( $V = N$ ), ha az EM-hullám már  $N$ -szer verődött vissza a felszínről. (Az utolsó figyelembe vett visszaverődés mindig a felszínről történik.)

A többszörös reflexiók figyelembevételével számított látszólagos fajlagos ellenállásértékek hibafüggvényei – a pontos értéktől való eltérés a pontos érték százalékában kifejezve – láthatók az 1. ábrán. Megállapítható, hogy a többszörös visszaverődések figyelembevételével a közelítés hibája csak akkor kerül 1% alá a  $\lambda_1/h_1 = 1-20$ -nak megfelelő frekvenciatartományban ( $\lambda_1$  az EM-hullám első rétegbeli hullámhossza;  $h_1$  az első réteg vastagsága), ha legalább 10 db visszaverődést figyelembe veszünk a felszínről. A többszörösök ilyen értelmű figyelembevétele tehát csak ront a pontosságon, hiszen így az egzakt eredmény egy végtelen konvergens geometriai sor összegeként kapható meg [7].



Geo 86/1-1

1. ábra  
Рис. 1.  
Fig. 1.

Az előzőekből következik, hogy olyan modellek esetén, amikor a visszaverődés után is közel síkhullámú marad a tér (a réteghatár reliefjének az alakja dönti el), jó közelítést remélhetünk az integrálegyenletes módszer felhasználásától. A számításoknál csak a réteghatárról történt első visszaverődést célszerű figyelembe venni, illetve a többszörös reflexiók esetleges nyomon követésénél mindig ügyelni kell arra, hogy az utolsó még figyelembe vett reflexió a réteghatárról származzon.

## 2.2 A módszer alkalmazhatósága

Az egyszerű visszaverődés kiszámítása a Stratton – Chu integrálokkal aránylag egyszerű numerikus feladatot jelent még általános esetben is, azonban az előzőekből is következik, hogy azoknak a modelleknek a körét, ahol ez a közelítés még jó eredményt ad, be kell határolni.

A számítások azt mutatták, hogy a  $\lambda_1/h_1 < 20$  egyenlőtlenséget kielégítő frekvenciáknál elfogadhatók a közelítő számítások eredményei, ha az aljzatváltozás ( $\Delta h$ ) nem haladja meg a fedőösszlet átlagvastagságának ( $h_1$ ) felét [6], [7]:

$$\frac{h_1 + \Delta h}{h_1} < 1,5.$$

## 2.3. Egy adott hibahatáron belüli számításhoz szükséges modellkiterjedés meghatározása

Az MT és rádiófrekvenciás geofizikai méréseknél lényeges annak az ismerete, hogy a mérési pont egy bizonyos környezetének a hatása milyen súllyal szerepel a mérési eredményekben, továbbá igen fontos az említett módszerek matematikai-, valamint az analóg modellezésénél a szükséges modellkiterjedés méretezése.

Egyszerű fizikai szemlélettel belátható ugyan, hogy a mérési (térszámítási) ponthoz közeli visszaverő felületrészek hatása a legnagyobb, azonban az integrálegyenletes módszerrel mindezt kvantitatíve is megfogalmazhatjuk.

Kétreteges. 1 – D esetben a módszerrel ugyanis pontosan meghatározható az EM-térerősségkomponensek értéke abban az esetben is, ha csak a réteghatárnak a térszámítási pont vertikális vetülete körüli tetszőleges  $R$ -sugarú környezetét vesszük figyelembe a reflexió számításánál [2], [7].

A véges visszaverő felület figyelembevételével kapott elektromos és mágneses térerősségekből normált látszólagos fajlagos ellenállás értékeket –  $[e_a(f)/e_1]_R$  – számíthatunk, ahol  $e_1$  az első réteg fajlagos ellenállását jelöli, az  $f$  argumentum pedig a látszólagos fajlagos ellenállás frekvenciafüggésére utal.

Mivel a teljes határfelület figyelembevételével nyert pontos érték –  $e_a(f)/e_1$  – szintén ismert, ezért a

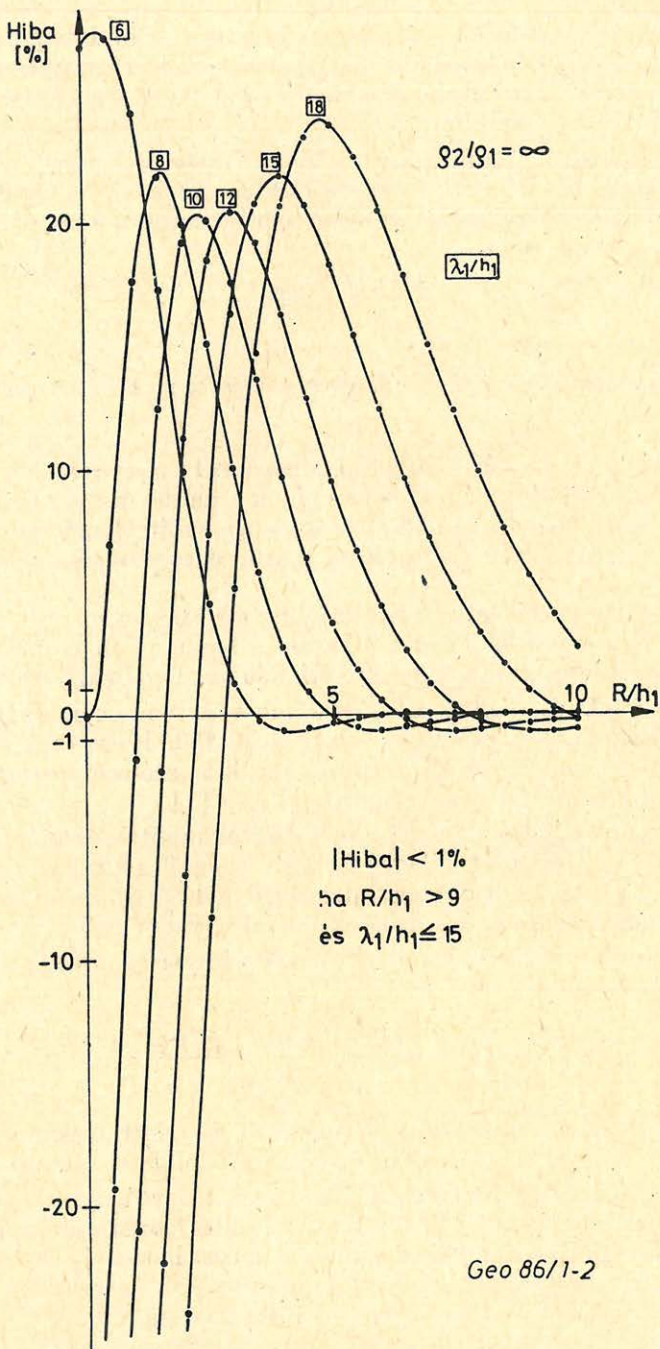
$$\text{hiba}_R(f) = \frac{[e_a(f)/e_1]_R - e_a(f)/e_1}{e_a(f)/e_1}$$

összefüggéssel kiszámíthatjuk adott  $R$ -sugárnál és adott frekvenciánál, hogy milyen hibát követünk el, ha csak a véges visszaverő felületet vesszük figyelembe.

Amennyiben a teljes visszaverő felület hatását egységnyinek vesszük, úgy az egyes  $R$ -sugarakhoz tartozó véges visszaverő határfelület a mérési (számítási) eredményekben megjelenő hatásának a súlya is megadható:

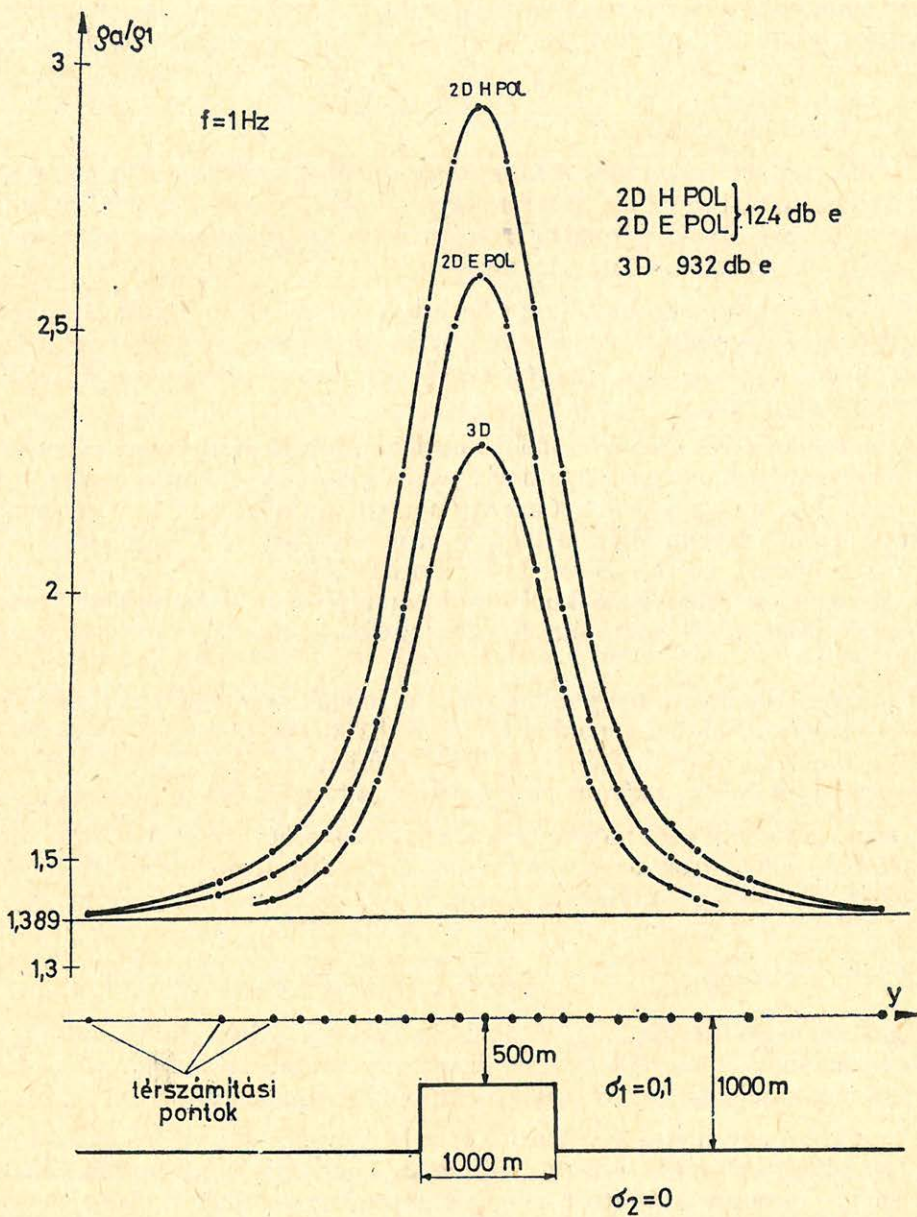
$$\text{súly}_R(f) = 1 - \text{hiba}_R(f).$$

A 2. ábrán végtelen nagy fajlagos ellenállású aljzat ( $e_2 = \infty$ ) esetére számított [6], [7] százalékosan megadott hibafüggvények láthatók. (A független változó  $R/h_1$ , a görbék paramétere pedig  $\lambda_1/h_1$ .) Megállapítható, hogy a hiba ab-



Geo 86/1-2

2. ábra  
 Puc. 2.  
 Fig. 2.



Geo 86/1-3

3. ábra  
 Puc. 3.  
 Fig. 3.

szólút értéke  $R/h_1 > 9$  egyenlőtlenséget kielégítő visszaverő felület választása esetén csökken  $1\%$  alá a  $\lambda_1/h_1 \leq 15$  összefüggésnek megfelelő frekvenciáknál.

Az integrálegyenletes módszerrel végzett számításokból összefoglalólag levonható az a fontos következtetés [2], [6], hogy ha az  $R$ -sugarat az első rétegbeli hullámhosszal egyenlőnek választjuk ( $R = \lambda_1$ ), akkor a véges visszaverő határfelület használatából adódó hiba  $0,1\%$  alá csökken, ami a gyakorlati pontosság igényét messze kielégíti.

Az előzőekben vázolt számítások eredményének a felhasználásával tehát a mérési (térszámítási) pont alatti tetszőleges  $R$ -sugarú visszaverő felületnek a mérési eredményekre gyakorolt súlya megadható tetszőlegesen megkívánt frekvenciájú EM-hullám esetén, adott  $\rho_2/\rho_1$  viszony mellett.

Meghatározható továbbá, hogy ha adott hibahatáron belüli pontossággal akarjuk a modellszámításokat, illetve a mérések értelmezését elvégezni, tetszőleges frekvencia és  $\rho_2/\rho_1$  viszony esetén milyen  $R$ -sugarú visszaverő felülettel kell minimum foglalkozni.

A matematikai és analóg modellek horizontális méretezése úgy végezhető el, hogy felvesszük a modellen azt a horizontális (felülnézeti) határvonalat, amelynek pontjainban még egy meghatározott pontosságú (adott hibájú) térmeghatározást akarunk végezni. Mivel a határpontok alatt ismert az első reflektáló réteghatár mélysége, ezért minden határpontban számítható az előzőekben szereplő  $R$ -sugár. A határpontokból így meghatározott sugarakkal köríveket „rajzolva”, ezen ívek burkolója fogja megadni a modell horizontális határvonalát.

Könnyen belátható, hogy a horizontális modell méretezést minden esetben célszerű elvégezni, hiszen a modell horizontális kiterjedésének a határvonala a modell geometriai struktúrájának, a rétegek fajlagos ellenállásának, az EM-tér frekvenciájának és a megkívánt pontosságnak a függvényében változik.

Természetesen inverz módon arra is következtethetünk, hogy adott modell-situációban, adott frekvencián számított eredmény legfeljebb milyen pontosságú lehet.

#### 2.4. A két- és háromdimenziósság megjelenése a mérési eredményekben

Igen lényeges kérdés a geofizikai méréseknél, a két- és háromdimenziós szerkezetek elkülönítése, illetve az, hogy egy szerkezet milyen csapásirányú kiterjedésnél kezelhető a mérés szempontjából kétdimenziósnak.

Az integrálegyenletes módszerrel ez a kérdés igen jól vizsgálható. Erre látnunk egy példát a 3. ábrán, ahol a kétdimenziós gerinc fölött E-polarizációs és H-polarizációs esetekre számított normált látszólagos fajlagos ellenállás profilgörbéit vethetjük össze a háromdimenziós sasbérc fölött számított görbével [6]. (A sasbérc laterális kiterjedése  $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ .) Az ábráról látható, hogy jelen modellméreteknel a 3-D modell görbéje jól elkülönül a 2-D modell görbétől. Jól látszik a görbéken az E-polarizáció regionális (átlagoló) hatása és a H-polarizáció lokális jellege.

Azt hogy egy adott pontban történő térmeghatározásnál az adott frekvencián a modell kétdimenziósként kezelhető-e, az előző részben leírt véges visszaverő felület sugarának a meghatározásával dönthetjük el.

Az adott pontban a megkívánt pontosság figyelembevételével meghatározzuk az  $R$ -sugarat és megvizsgáljuk, hogy a modell a térszámítási pont alatt valamilyen irányban változatlan marad-e a  $[-R, R]$  intervallumban. Amennyiben találunk ilyen irányt, úgy ezt az irányt csapásiránynak elfogadva, az adott pontban, az adott frekvencián történő térszámításnál, a megkívánt hibahatáron belül a modell kétdimenziósként kezelhető.

### 2.5. A felületelem-hálózat, ill. rácshálózat felvételéből adódó hibák a numerikus modellezéseknél

A numerikus modellezéseknél differenciálegyenletes módszereknél rácshálózatot, az integrálegyenletes módszereknél pedig felületelem-hálózatot veszünk fel.

Ezeknek a hálózatoknak a megfelelő méretezése a számításoknál kulcskérdés lehet, mert a számításidő és a korlátozott memóriakapacitás miatt lehetőleg kis felületelem számú, illetve csomópont számú hálózatokat célszerű felvenni, ugyanakkor a hálózatok nem megfelelő méretezése esetén az eredmények nem lesznek függetlenek a hálózatok méreteitől.

Az előzőek igazolására mutatom be az integrálegyenletes módszerrel elvégzett számítás eredményeit [2], melyet a 4. ábra szemléltet.

Kétdimenziós gerinc fölött H-polarizációs és E-polarizációs esetben láthatunk normált látszólagos fajlagos ellenállás profilgörbéket. A görbék 44 db, ill. 124 db felületi ívelem (kétdimenziós esetben a Stratton – Chu felületi integrálok görbe menti integrálokká alakíthatók át [7]) figyelembevételével lettek kiszámítva. Láthatjuk, hogy a számított eredmények – különösen E-polarizációs esetben – függenek a felületelemek számától.

A numerikus modellezéseknél tehát minden esetben el kell menni egy optimális hálózatsűrűségig, amely fölött már a számított eredmények függetlenek a hálózat méreteitől.

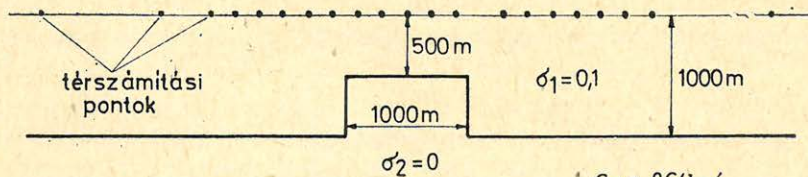
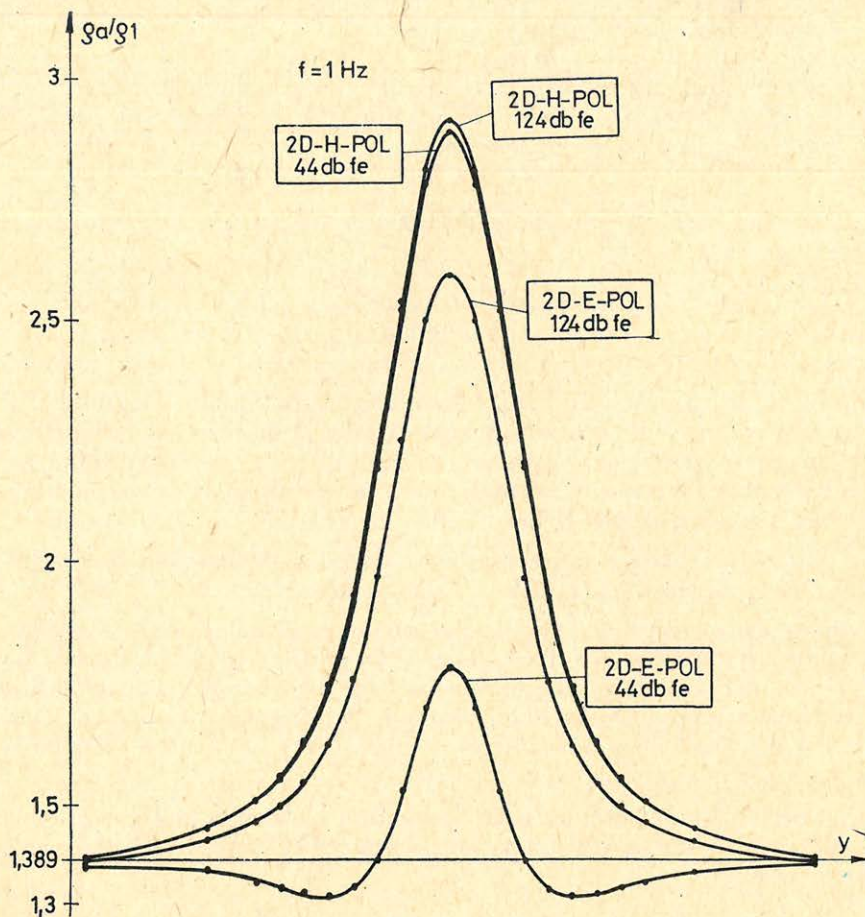
Véges differenciás, ill. véges elemes módszereknél ugyanígy kulcskérdés a rácshálózat modellezése, hiszen adott rácshálózathoz felépített lineáris rendszerek megoldásaként konvergens eredményeket kaphatunk ugyan, csak rossz rácshálózat felvételénél ezek messze esnek a valós eredményektől.

A modellezéseknél akkor járunk el helyesen, ha a számításnál használt különböző frekvenciák mindegyikére méretezzük a felületelem, ill. a rácshálózatot.

### 3. Új számítási algoritmus a 3D integrálegyenletes EM-modellezésekhez

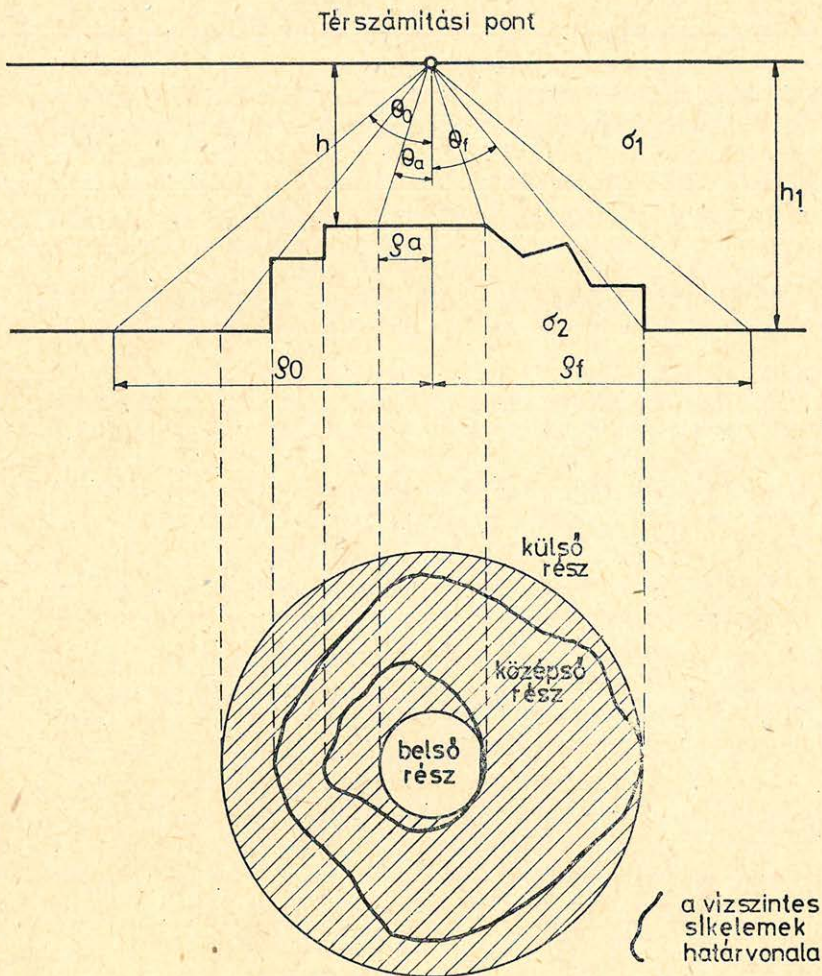
Az előzőekben leírt tapasztalatokat felhasználva olyan számítási algoritmus és az azt megvalósító számítógépi program készült el, amely a pontosság növelésének és a számításgényesség relatív csökkentésének kívánalmait igyekszik kielégíteni.

A modellt úgy építjük fel, hogy az egyes részeket síknak vesszük, s a síkelemek egyenletével maga a modell is megadható matematikailag. Az egyes síkelemeket  $x$ ,  $y$  és  $z$  koordináták minimális és maximális értékeinek megadásával határozhatjuk le.



4. ábra  
Puc. 4.  
Fig. 4.

A számításokat tetszőleges  $X_0, Y_0, Z_0$  koordinátájú kezdőpontból kiindulva egy általunk megszabott  $DX, DY, DZ$  növekménnyel, egy szintén tetszőleges  $XM, YM, ZM$  felső határig haladva végezzük el.



Geo 86/1-5

5. ábra  
Puc. 5.  
Fig. 5.

Minden egyes ponton tetszőleges számú és értékű frekvenciánál történhet számítás.

A számítási algoritmus szemléltetéséhez tekintsük az 5. ábrán látható szemléltető modellsémát. Használjuk ki, hogy a számításnál az integrálegenletes módszerrel analitikus módon megadhatók azok az eredmények, amelyeknél azokat a körlemezeket vesszük figyelembe, melyek középpontja a térszámítási pont függőleges vetülete. Szintén analitikusan számítható annak a „lyukas” félsíknak az esete, amelyből a térszámítási pont függőleges vetülete közül egy tetszőleges sugarú körlemez hiányzik.

Az utóbbi esetet felhasználva, teljesen kiküszöbölhetjük a modell véges felvételéből adódó hibát, hiszen csak meg kell keresni azt a  $\varrho_f$  külső sugarat, amelyen túl a modell már egydimenziósnak tekinthető, s ennek a „lyukas” félsíknak a járulékát az analitikus formulák felhasználásával teljesen pontosan meg tudjuk határozni. Megjegyzem, hogy minden modell esetén található egy ilyen külső sugár, még azoknál a modelleknél is, amelyek nem minden irányban szimmetrikusak a végtelenben, hiszen adott hibával történő számításnál adott frekvencián a térszámítási pontnak csak egy véges sugarú környezete szól bele döntően az eredményekbe, így e környezetet túl ha egydimenziósnak tételezzük fel a modellt, már nem követünk el döntő hibát. A program a számításokat gömbi koordináta-rendszerre áttérve végzi el. Megkeresi a  $\varrho_f$  külső sugarat és a már említett analitikus formulák alapján kiszámítja a „külső rész” járulékát.

Amennyiben a térszámítási pont alatt vízszintes visszaverő felület helyezkedik el, úgy kijelölhető egy  $\varrho_a$  sugarú körlemez, melynek a hatását szintén analitikusan levezetett formulák alapján számíthatjuk. A pontosság növelése és a számítási idő csökkentése végett tehát a program, ha lehetséges, megkeresi ezen ún. „belső rész” határát és az analitikus összefüggések alapján kiszámítja a járulékát. A külső rész határához egy  $\Theta_f$ , a belső rész határához pedig egy  $\Theta_a$  azimutuszög rendelhető.

Az előzőekben leírtak megvalósításával elérhető, hogy csak a  $\Theta_a < \Theta < \Theta_f$  tartományban (középső rész) kell közelítő számításokat végezni.

A közelítő számítások kiindulásánál meghatározunk egy kezdő térszög-meretet és a középső térrészt ennek megfelelő sugársorral felosztva, az egyes sugarakkal „döfjük” a visszaverő felületet és az egyes térszögekhez tartozó visszaverő felületelemek a döféspontok segítségével jelölhető ki.

Ezután duplájára növeljük a középső részbe tartozó térszektorok számát és így is kiszámítjuk az eredményt. A térszögek finomítását mindaddig végezzük, amíg a két egymás utáni felosztáshoz tartozó eredmény különbsége egy tetszőlegesen megszabható hibahatár alá nem csökken. A középső rész járulékaként ekkor a sűrűbb térfelosztáshoz tartozó eredményt fogadjuk el. A közölt algoritmussal így mindig kézben tartható a rácshálózat-tervezés, mivel a méretezést maga a program megvalósítja.

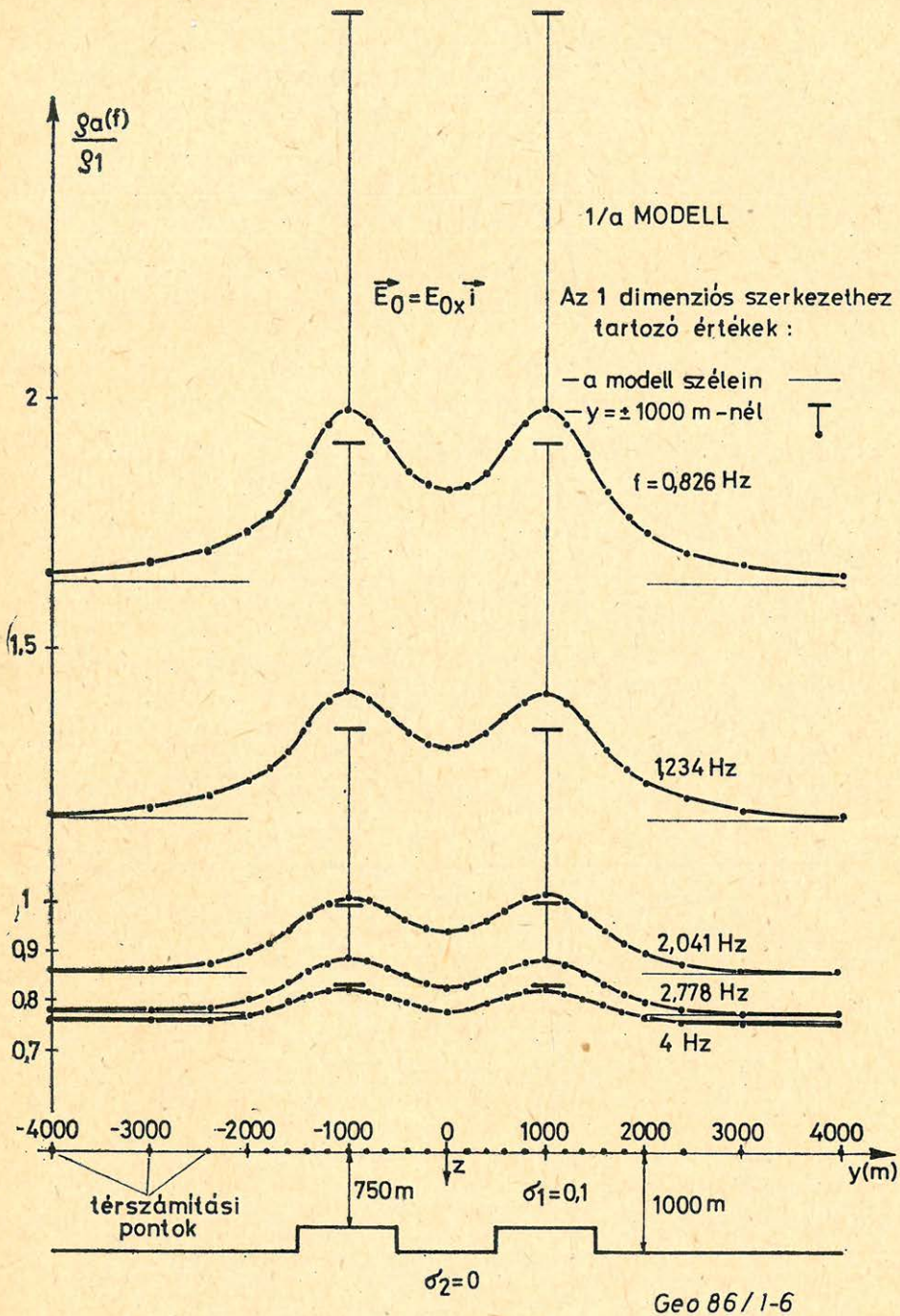
A számítások meggyorsítása végett megadható egy ún.  $\Theta_0$  látószög, s a program csak ennél kisebb azimutuszög értékeknél keresi a külső és a középső rész határát.

A bemutatott algoritmus legdöntőbb előnye, hogy a modell véges felvételéből és a rácshálózat nem megfelelő tervezéséből adódó hibákat teljesen kiküszöböli.

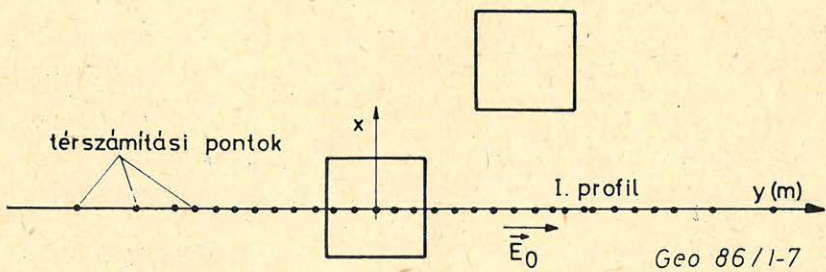
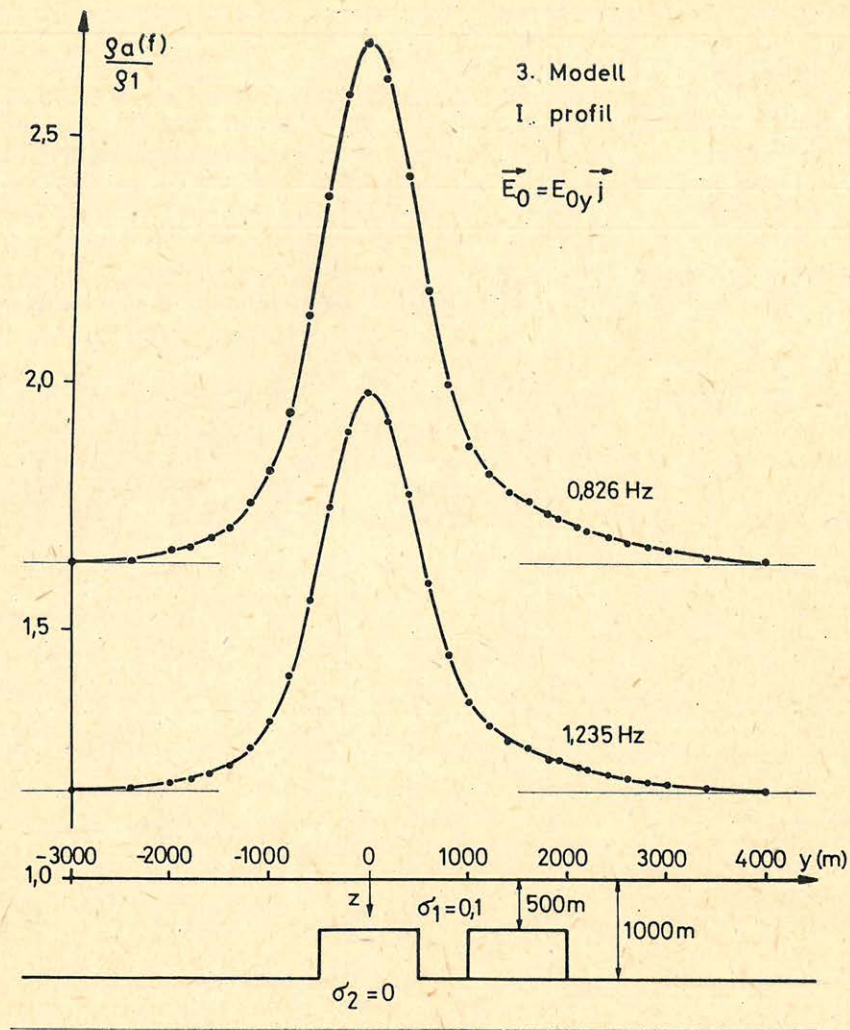
A továbbiakban a programmal végzett 2 db modellszámítás eredményét mutatom be [2].

A 6. ábra egy az aljzatról kiemelkedő kettős – egyenként négyzet alapterületű – sasbérc  $y$ -irányú szimmetriatengelyében számított normált látszólagos fajlagos ellenállás profilokat mutatja 5 db különböző frekvenciánál. (A sasbércek  $x$ -irányú kiterjedése 1000 m.)

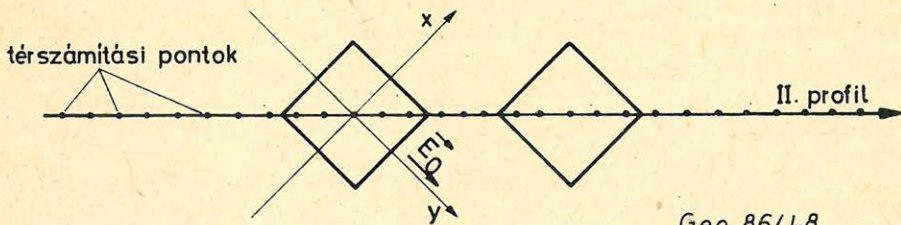
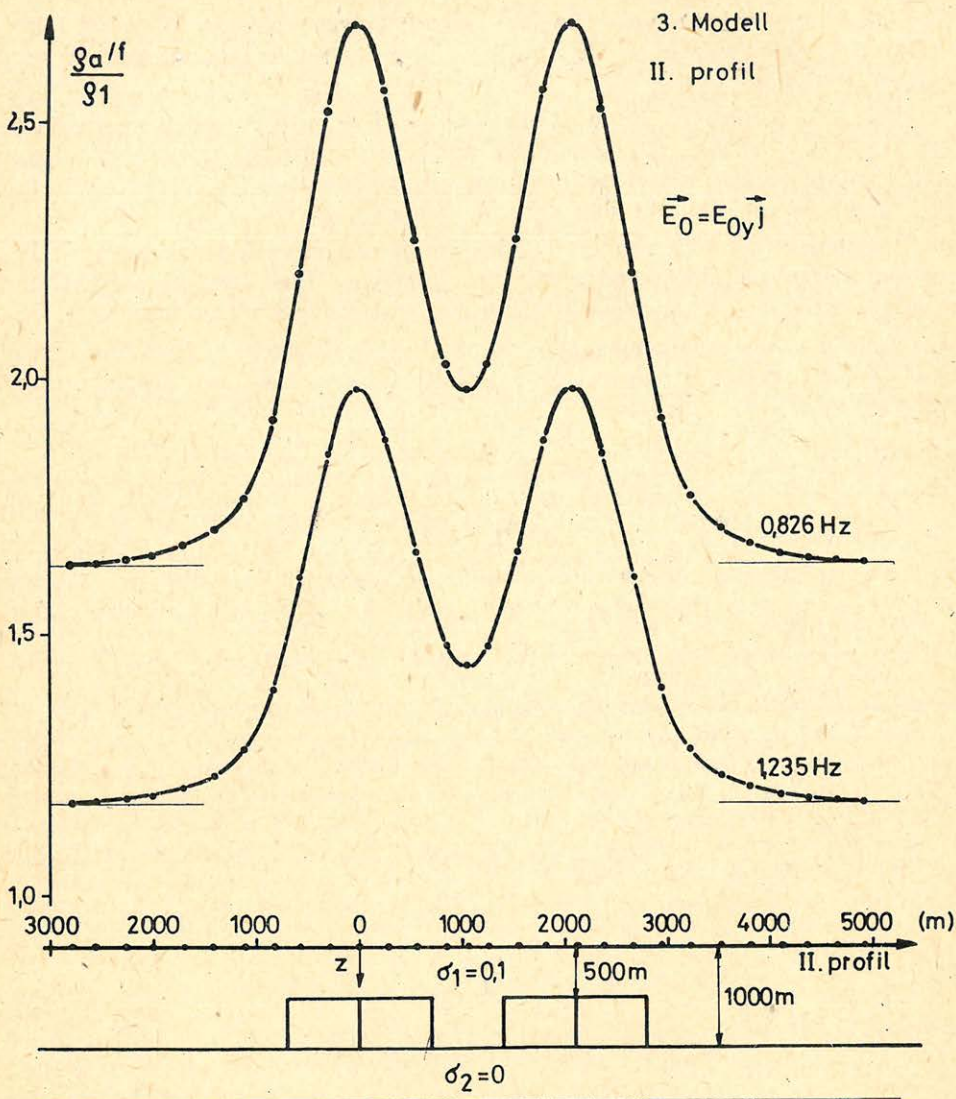
A számítás eredményeiből látható, hogy mindegyik frekvenciánál szétválasztható a normált látszólagos fajlagos ellenállásgörbék alapján a két kiemelkedés hatása.



6. ábra  
 Puc. 6.  
 Fig. 6.



7. ábra  
Рис. 7.  
Fig. 7.



Geo 86/1-8

8. ábra  
Puc. 8.  
Fig. 8.

A 7. és 8. ábra két egymáshoz képest eltolt helyzetű sasbérc fölött két különböző irányú profil mentén végzett normált látszólagos ellenállás számítások eredményeit mutatja.

A 7. ábráról látható, hogy az ellenállásprofil a profilból kieső anomália hatását csak a görbék aszimmetrikussá válásával mutatja, de nem jelentkezik kettős maximummal, amint az természetesen a 8. ábrán látható profilirány melletti számításoknál tapasztalható.

A dolgozat, az 1982 óta dr. Takács Ernő tanszékvezető egyetemi tanárral közösen végzett munka eredményeit tartalmazza. Ezen munkára részben az OKGT Geofizikai Kutató Vállalattól kapott megbízások adtak módot.

Ezúton is szeretném megköszönni az OKGT illetékeseinek a téma biztosítását, Takács professzornak pedig azt a szakmai irányítást, amit közös munkánk során nyújtott.

#### IRODALOM

- [1] A magnetotellurikus és dipol szondázások interpretációjának fejlesztése (jelentés), NME, 1982.
- [2] A MT- és dipol-frekvenciaszondázás numerikus modellezési feladataival kapcsolatos vizsgálatok (jelentés), NME, 1985.
- [3] *M. N. Berdicsevszkij, M. C. Zsdanov* (1981), „Interpretacii anomalii peremennova elektromagnytynova polja zemli”, Moszkva.
- [4] Elektromágneses szondázások értelmezési módszereinek fejlesztése (jelentés), NME, 1983.
- [5] *Simonyi K.* (1967), Elméleti villamosságtan, Budapest.
- [6] *E. Takács and E. Turai* (1985), Approximative solution of the direct problem of magnetotellurics for two-layered, three-dimensional structures, *Acta Geodaetica, Geophysica et Montanistica XXI/1–2* (megjelenés alatt)
- [7] *Turai E.* (1984), Elektromágneses (EM) síkhullámú terek modellezése integrálegyenletek útján. (Egyetemi doktori értekezés), NME, Miskolc.

# A korszerű mélyfúrési geofizikai szelvényezés és szelvényinterpretáció szerepe egy rossz tárolótulajdonságokkal rendelkező szénhidrogénmező-kutatásban

TÓTH JÓZSEF\*

*A metamorf szénhidrogén-tárolók kutatása korszerű mélyfúrési geofizikai méréseket, szelvényinterpretációt és a rendelkezésre álló adatok minél szélesebb körű feldolgozását igényli. A cikk ezt a munkát mutatja be egy mező példáján keresztül.*

*Поиск месторождений метаморфических углеводородов требует современного уровня каротажных измерений, интерпретации и обработки полученных данных. В данной статье эта работа рассматривается на примере одного месторождения.*

*Exploration of metamorphic reservoirs requires up-to-date well logging and log interpretation moreover processing of the available data on a widest possible scale. This work is shown in the paper on the example of a productive area.*

## 1. Bevezetés

A szénhidrogén-kutatás a feltárt szénhidrogénkészlet egy jelentős részét a kisebb (de iparilag művealó) telepek megkutatásával fogja biztosítani.

Az elmúlt években és jelenleg megtalált szénhidrogéntelepek szerkezete, litológiája egyre bonyolultabb, a tárolótulajdonságok rosszabbodnak.

A telepek egy része a kristályos medencealjzat repedezett – mállott zónájához kapcsolódó halmaztelep. Jellemzőjük a szerkezet bonyolultságán túlmenően a kettős porozitás. Ezen tárolók kutatása, megismerése nehéz feladat, a fajlagos anyagi és munkaráfordítás a korábbiaknál lényegesen nagyobb.

## 2. Az értelmezői munka fejlesztésének lehetőségei

A kutatási hatékonyság növelése iránti igény jelentős feladatot ró a mélyfúrési geofizikára, ezen belül is elsősorban a szelvényinterpretációra.

A mélyfúrési geofizikai tevékenység technikai bázisa az elmúlt években jelentősen fejlődött a terepi mérőrendszerek, a digitális jelrögzítés, a számítógépes szelvényinterpretáció hardware feltételeinek javításával. Ez a technikai bázis hosszabb időre állandónak tekinthető, így a mélyfúrési geofizikai tevékenység színvonalának növelése elsősorban az értelmezői munka fejlesztésével biztosítható. Ebbe beletartoznak a következők:

- a) Értelmezési módszer és számítógépes software fejlesztés.
- b) A szelvények által hordozott információ maximális kinyerése:
  - a kutankénti szelvényadatok komplex számítógépes feldolgozása;
  - az eredmények többoldalú ellenőrzése;

\* Kőolajkutató Vállalat, Szolnok

- a karotázs adatok területi feldolgozása (metszetek, térképek);
- a szelvények, eredmények jellegzetességeinek vizsgálata, az egyedi, mezőre jellemző vagy általánosabb érvényű sajátosságok feltárása.

A mindennapi értelmező munkában döntően a *b*) pontban felsorolt feladatok megoldása jöhet számításba. A karotázs interpretáció akkor tudja hatékonyan segíteni a kutatást, ha gyors és megbízható. Nincs mód megvárni a kutatás befejezését, amikor minden adat egyszerre rendelkezésre áll, az új eredményeket, ismereteket fokozatosan be kell építeni az interpretáció rendszerébe. Ezzel párhuzamosan a korábbi eredményeket újra kell értékelni.

A kisebb mezők kutatásánál, a tárolók egyre bonyolultabb jellemzőit is figyelembe véve nehézséget okoz, hogy a kutatási feladatot viszonylag kevés számú fúrás adataiból kell megoldani.

Ezért szükség van a mélyfúrási geofizikai szelvényezés és szelvényinterpretáció jelenlegi lehetőségeinek maximális kihasználására. Ennek egyik első példája a *K* kutatási területen feltárt gáztelep.

### 3. A telep jellemzői

A telepet tartalmazó földtani képződmény a sekély-közepes mélységkategóriába tartozó, ÉK–DNY csapásirányú elnyúlt boltozat, amelynek magját prekambriumi kőzetek alkotják. A szerkezet szárnyhelyzetében helyenként jelentéktelen elterjedésben és vastagságban törmelékes-karbonátos miocén képződmények vannak. A fedőkőzet alsópannon márga, agyagmárga összlet.

A prekambriumi képződmények változatos kőzettani kifejlődést mutatnak. Uralkodó kőzettípus a repedezett, palás, diafforitosodott amfibolit, amfibolos gneisz. Gyakori még a palás, breccsásodott biotit-muszkovitgneisz, migmás gránit. A kőzetek néhol kémiaiilag átalakultak. A miocénben homokkő, konglomerátum, mészkő, mészmárga rétegek vannak.

A szerkezeten belül kialakult telep a gáz–víz fázishatár alapján két részre bontható.

A prekambriumi tárolókőzet általános jellemzője a rossz átteresztőképesség. A kutak napi gázhozama néhány ezer  $m^3$  és néhány tízezer  $m^3$  között változik.

A területen eddig 18 db kutatófúrás mélyült, ebből 14 db produktív.

### 4. Mélyfúrási geofizikai tevékenység

#### 4.1. Nyitott lyukszelvényezés és szelvényinterpretáció

A kutatófúrások jelentős részében a nyitott lyukszelvényezés Dresser–Atlas berendezésekkel történt, a következő szelvényválasztékkal:

- dual laterolog (*LLD*; *LLS*);
- lyukkompensált neutron (*CNL*);
- közetsűrűség (*DEL*);
- akusztikus terjedési idő (*ATL*);
- természetes potenciál (*SP*);
- természetes gamma (*TG*);
- lyukátmérő (*DL*).

Mikroellenállás (mikrolaterolog, mikrolog) szelvények felvételére az alkalmazott kis fúróátmérők miatt általában nem volt mód.

A karotázs interpretáció a három porozitáskövető szelvényre kidolgozott KISS metamorf modell alapján történt. Ez általános esetben a vegyes porozitás metamorf tárolókban a következők meghatározását teszi lehetővé:

a) *Tárolójellemzők:*

- teljes porozitás (*FITO*), ezen belül elsődleges (*FII*), másodlagos (*FI2*), üreges (*FIU*) és repedéses (*FIFR*) porozitás;
- effektív tárolóvastagság (*HE*);
- víztelítettség (*SW*), ha az elsődleges porozitás  $> 10\%$ , egyébként csak becsülhető.

b) *Litológiai összetétel:*

Három porozitáskövető szelvényből, független agyagtartalom-meghatározás esetén két kőzetmátrix komponens fajlagos térfogatának meghatározására van mód.

c) *Az áteresztőképes szakaszok kijelölése részben mért, részben számított (eredmény-) szelvények és cross plotok alapján.*

Az eljárást minden esetben a tároló jellegzetességeinek megfelelően adaptálni kell, ezt a számítógépes program nagyfokú rugalmassága biztosítja.

## 4.2. Termelési kútszelvényezés (PWL)

A mező kútjaiban nagy számban került sor a termelési kútszelvényezés alkalmazására.

A kutatás kezdeti időszakában több esetben előfordult cementpalást hiba, illetve beléscső sérülés. Az első PWL mérések ezek meghatározására történtek és az előfordult kútproblémák felderítésén túl adatokat szolgáltatottak a beléscső mögött gáztermelést adó zónákról.

A későbbiekben rétegvizsgálati adatok azt bizonyították, hogy a tároló amúgy is rossz áteresztőképességét a beléscső cementezése tovább rontja. Esetenként előfordult, hogy a fúrás közbeni teszterezéssel bizonyítottan gázos tárolószakaszon a beléscsővezés utáni rétegvizsgálatok egyáltalán nem adtak beáramlást. Ezért a tárolóvédelem érdekében a beléscsővet csak a tároló metamorf összetétel felett cementezték, a tárolószakaszra előre perforált beléscső került. A teljes tárolószakasz egyszerre volt vizsgálva, a termelvény származási helyének (termelési profil, fázishatárok) megállapítása a termelési kútszelvényezés feladata volt. Ennek érdekében nagy érzékenyséű hőmérséklet és differenciális hőmérséklet (*TEL; TEDL*); fluidum sűrűség és elektromos fajlagos vezetőképesség (*DEFL; CFL*); forgólapátos áramlás (*VEML*) és neutron-neutron termikus (*NT*) mérések történtek.

## 4.3. A karotázs adatok komplex feldolgozása

A termelési kútszelvényezés az alkalmazott metodika miatt (hosszú nyitott szakaszok vizsgálata) képet szolgáltat a tároló beáramlás és fázisviszonyairól.

Mivel eredményei szelvények, hozzárendelhetők a nyitott lyukszelvényekhez, illetve interpretációjukhoz. Így vizsgálhatók a következők:

- A beáramlás intenzitása, a termelési profil, a termelő zónák vastagsága, a zónák termelésének egymáshoz viszonyított aránya megfelel-e a kvantitatív karotázs interpretáció által meghatározott kőzetfizikai jellemzőknek?
- A beáramlás repedésekből, üregekből származik-e?
- A számított víztelítettség értékek alapján várható fluidum minőség (szénhidrogén, víz) megfelel-e a ténylegesen beáramlónak?

Fenti tényezők vizsgálata együttesen vagy külön-külön segít eldönteni, hogy jó-e:

- a számított porozitás, áteresztőképesség;
- a mátrix- és agyagjellemzők;
- a porozitás felbontása (*FI1*, *FI2*, *FIU*, *FIFR*);
- az alkalmazott agyagindikátorok;
- agyag- és rétegvíz-ellenállás.

(Az, hogy a két módszer közötti eltérés nem a tárolóban végbement változások miatt következett-e be, referencia szelvények segítségével eldönthető.)

A két módszer együttes alkalmazása nagymértékben segíti egy-egy tárolóban az interpretációs modell kialakítását, illetve a számítógépes szelvényinterpretáció lehetőségeinek kihasználásával (nagy számú variáció gyors kipróbálása) az interpretációs modell pontosítását.

A mezőben a mélyfúrési geofizikai adatok komplex feldolgozása alapján a következő fő feladatokat sikerült megoldani.

#### 4.3.1. A kvantitatív karotázs interpretáció pontosítása

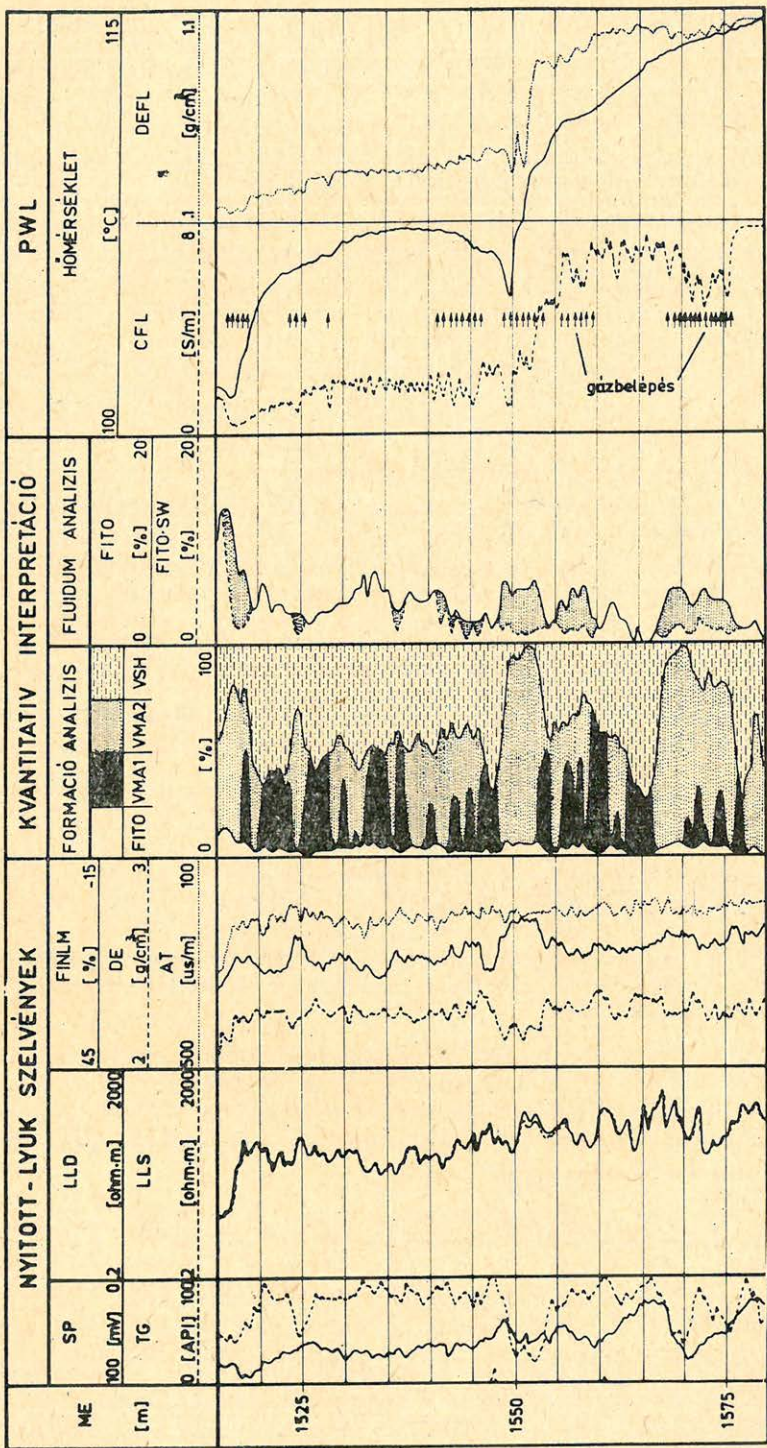
A nyitott-lyuk kvantitatív szelvény interpretáció legfontosabb paramétere a teljes effektív porozitás.

Ennek meghatározásához a litológiai összetétel megfelelően pontos ismerete szükséges. A litológiai összetételen belül kiemelt szerepe van a térfogati agyagtartalomnak, mivel ezt az interpretációs eljárás — annak érdekében, hogy két kőzetmátrix térfogati összetevőt lehessen meghatározni — nem a porozitáskövető szelvényekből, hanem független agyagindikátor szelvényekből biztosítja.

Az agyagtartalom pontossága a víztelítettség számítások pontosságát is befolyásolja.

Szelvényelemzésből (nyitott lyuk és *PWL*) a kvantitatív interpretáció eredményei (cross plotok, számított szelvények) felhasználásával sikerült a legmegfelelőbb agyagindikátorokat kiválasztani. Ezek érvényessége változó, van amelyik egy telepreszen belül használható, más esetekben kútszakaszonként is változik. Az agyagindikátorok képzéséhez a természetes potenciál és természetes gamma szelvényeket használtuk, kiszűrve az áramlási potenciált és a kőzetmátrix helyenként extrém magas (nem agyagtartalomtól származó) természetes gamma-sugárzását. (Ez utóbbi szakaszok a *PWL* mérések szerint részben át-eresztőképesek.)

E munkafázis precíz elvégzése alapján nemcsak a porozitás-meghatározás vált pontosabbá, de mint az *I. ábra* szemlélteti, a víztelítettség-számítás porozi-



Geo 86/2-1

1. ábra  
Fücc. I.  
Fig. 1.

tásküszöbét is sikerült  $FITO = 5\%$  körüli értékre csökkenteni. (A nyitott lyukszelvény-interpretáció kb. 1 hónappal a  $PWL$  mérés előtt készült.)

Megállapítottuk, hogy a repedéses porozitás aránya a teljes porozitáson belül igen kicsi. Figyelembe véve a kis összporozitást is, a kvantitatív interpretáció első fázisában a porozitás felbontásától eltekintettünk. Ugyanakkor – mivel a  $PWL$ -mérések azt bizonyították, hogy a beáramlás egy része repedésekből származik – szükséges volt a repedezett zónák kijelölése.

Mivel az erre a célra legmegfelelőbb mikroellenállás szelvények hiányoztak, más indikátorokat kellett keresni. A  $PWL$ -mérések és a nyitott lyukszelvények elemzése alapján megállapítottuk, hogy a repedéseket, repedezett zónákat (a lyukátmérő szelvényen kívül) az akusztikus terjedési idő szelvények fázisugrások szakaszai – melyeket egyébként a kvantitatív karotázs interpretációhoz szűrőssel eliminálni kell – tükrözik legjobban. Erre mutatnak példát a 2. ábrán a nyitott lyukban mért akusztikus ( $ATL$ ) és a kút termelése közben felvett hőmérséklet ( $TEL$ ) és differenciális hőmérséklet ( $TEDL$ ) szelvények.

A számításokhoz szükséges rétegvíz ellenállásokat ( $RW$ ) kezdetben csak vízminta analízisből tudtuk meghatározni. Az adatok – a savas rétegkezelések miatt – nagy szórást mutattak. A későbbiekben – a  $PWL$ -mérések számának növekedésével – fluidum elektromos fajlagos vezetőképesség szelvények ( $CFL$ ) alapján az  $RW$  értékét sikerült több kútban méréssel meghatározni.

#### 4.3.2. A metamorf összlet belső szerkezetének pontosítása

A karotázs interpretáció ellenőrzéséhez az adatokat metszeteken ábrázoltuk. Ennek során megállapítottuk, hogy a különböző kutakban felvett szelvények jellegzetességei a kutak között korrelálhatók. Ezek a jellegzetességek – markerek – a következők voltak:

- ellenállásszelvények „jellegzetes alakzatai”;
- extrém magas természetes gamma indikációk;
- extrém magas közetsűrűség-értékek.

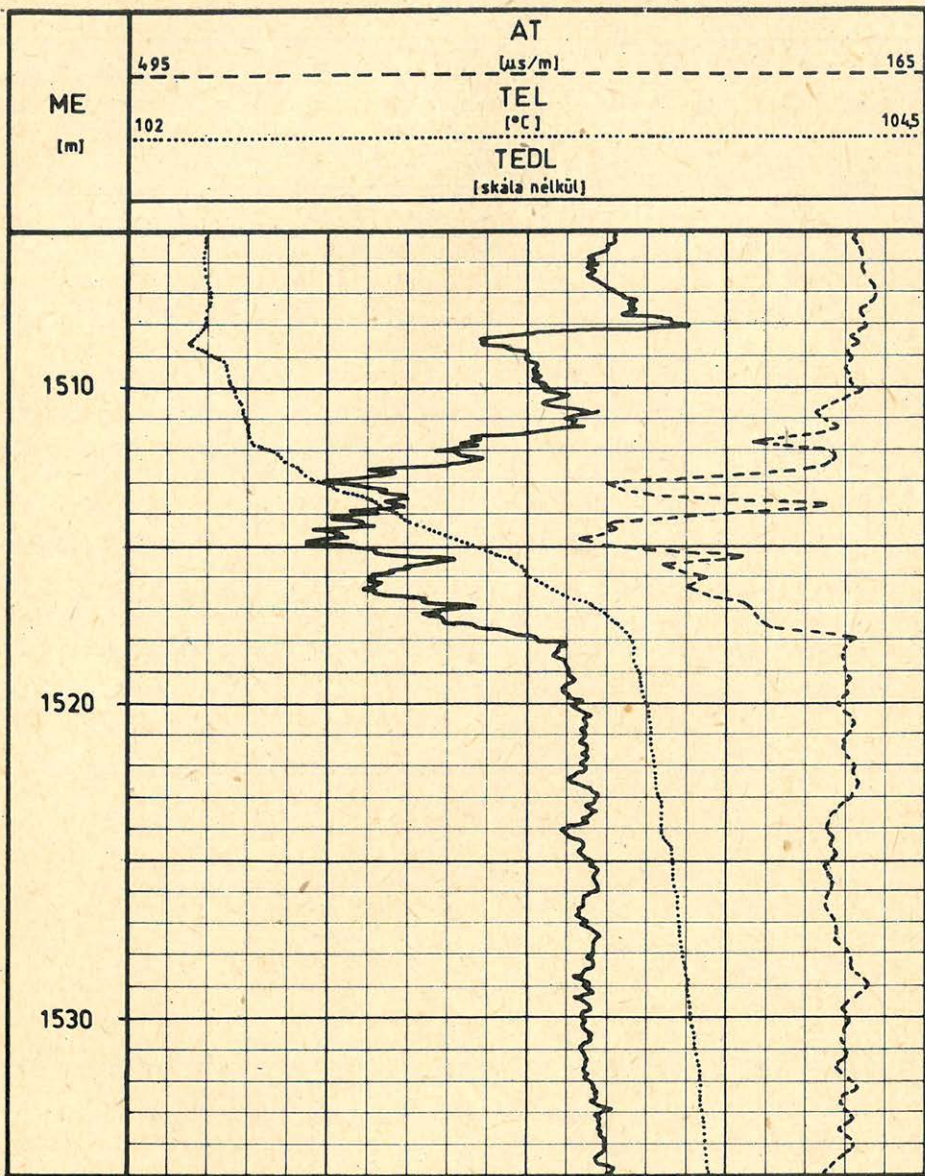
Két szomszédos fúrás között több marker is követhető volt, azonban a különböző fúrások közötti korrelációt más és más markerek biztosították. A korreláció elvét a 3. ábra szemlélteti.

A kapott modell, annak ellenére, hogy nem kapcsolható egyértelmű rétegzettséghez vagy litológiai tagozódáshoz, a rétegvizsgálati eredmények feldolgozása és a modell alapján prognosztizált események bekövetkezése alapján tükrözi a tároló belső szerkezetét. Az alkalmazott elv – megfelelő markerek esetén – más tárolókban is felhasználható.

#### 4.3.3. A tároló termelési jellemzőinek megismerése

A termelési kútszelvényezés a mezőben – az eredetileg kitérített feladatok teljesítésén túlmenően – az alábbi fontosabb ismereteket szolgáltatotta:

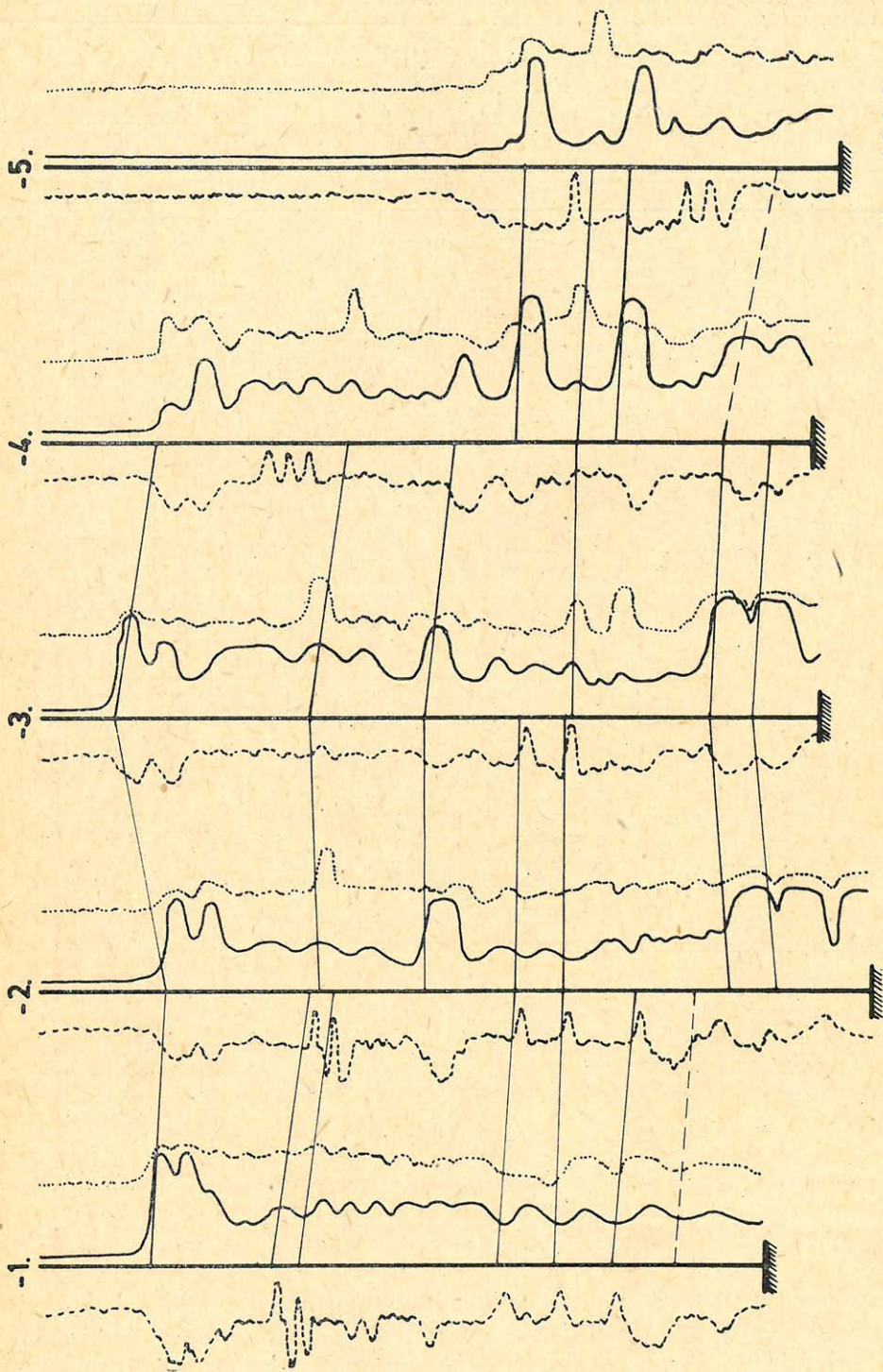
- Termelési szempontból kevés kitérített zóna van. A nagyobb gázhozamú kutak termelésének döntő része a metamorf összlet tetőréséből származik, míg a kis hozamú kutaknál az ipari szempontból termeltetésre érdemes gáz mennyiség nagyon sok, önmagában jelentéktelen beáram-



*Geo 86/2-2*

2. ábra  
Puc. 2.  
Fig. 2.

lásból 50 – 150 m-es kútszakaszon „gyűlik össze”. (Ezekben a kis hozamú kutakban a hagyományosan lefolytatott perforációs rétegvizsgálat esetén, néhány méter hosszú szakaszokat vizsgálva sok esetben nem lett volna ipari mennyiségű gáztermelés, ami a mező értékelését esetleg ron-



Geo 86/2-3

Fig. 3.

Рис. 3.

3. ábra

totta volna.) A beáramlási sajátságokat a termelő kútkiképzéseknél figyelembe kell venni.

- A mérések több ízben kimutattak a gázbeáramlást adó zónán belül kis intenzitású vízbelépést. Az eddigi ismeretek szerint a tárolóban nincs aktív víztest, a vízutánpótlódás korlátozott és a tárolókőzet is rossz átteresztőképességű. Ez alapján felmerül a gyanú, hogy a víztermelés nem a vízfázissal kapcsolatban levő repedésrendszeren keresztül történik, azaz a telep nem halmaztelep, hanem a metamorf összleten belül rétegtelepek alakultak ki. Ennek bizonyítására további vizsgálatok szükségesek.

## 5. Összefoglalás

Az egyre bonyolultabb kutatási feladatok megoldásánál a mélyfúrású geofizika csak akkor tud megfelelni az elvárásoknak, ha alkalmazza a nyitott-lyukszelvényezés, termelési kútszelvényezés és számítógépes adatfeldolgozás korszerű eszközeit és módszereit.

A korszerű technikai eszközök alkalmazása szükséges feltétel, de az adatszolgáltatás színvonalát döntően az értelmezői munka határozza meg.

Az értelmezési tevékenységben alapelvnek kell lennie, hogy az adatszolgáltatás értékét a gyorsaság és megbízhatóság határozza meg. Ennek érdekében:

- az értelmezői munkát elemző munkává kell fejleszteni;
- az interpretációba minden rendelkezésre álló adatot be kell vonni, fel kell tárni ezek kapcsolatait;
- a feldolgozást lehetőleg az adatok keletkezésének a helyén kell elvégezni, mivel így kevesebb az információvesztés és könnyebb az ellenőrzés;
- egy-egy kutatási terület valamennyi fúrásának kiértékelésével ugyanaz az interpretátor vagy csoport foglalkozzon, így az összegyűlt tapasztalatok könnyebben integrálhatók és a szubjektív hibák egy része kiszűrhető.

## IRODALOM

- [1] *Kiss Bertalan*: A metamorf kőzetanyagú szénhidrogén-tárolók mélyfúrású geofizikai jellemzői és interpretációjuk. Egyetemi doktori értekezés. Szolnok, 1980.
- [2] *Tóth József*: Bonyolult felépítésű szénhidrogén-tárolók kutatásánál végzett termelési kútszelvényezések tapasztalatai. Magyar Geofizika 1982. XXIII. évf. 3. szám.

# A főkomponens analízis néhány mélyfúrási geofizikai alkalmazása (kutak közti rétegtani korreláció, karotázs szelvények rétegekre bontása)

ELEK ISTVÁN\*

*A főkomponens analízis (Principal Component Analysis) egy, a mélyfúrási geofizikában még alig alkalmazott többváltozós statisztikai módszer. Más tudományágak – mint például a biometria – sikerrel alkalmazzák. A dolgozat célja, hogy bemutassa a főkomponens analízis matematikai alapjait, valamint két eljárást, amelyek nagymértékben támaszkodnak ezen statisztikai módszerre:*

- a) *A különböző kutakban mért karotázs szelvények alapján rétegtani korreláció adható meg, amely jelentős segítséget nyújthat a geológusoknak. Az ismertetésre kerülő eljárás egy interaktív, félautomatikus korrelációs módszer.*
- b) *Néhány példán keresztül bemutatásra kerül egy eljárás, amely tetszőleges szelvényválaszték alapján a felhasználó igényeinek megfelelő nagyságú rétegekre bontást képes elvégezni.*

*Анализ главных компонент в ГИС — это многомерный статистический метод, который еще довольно мало применяется. Другие науки, как, например, биометрия, в данное время успешно используются. Цель статьи — показать математическую основу анализа главных компонент, а также два способа, которые в значительной степени опираются на эти статистические методы:*

- a) *По каротажным диаграммам полученных в различных скважинах можно получить послойную корреляцию, которая может оказать существенную помощь геологам. Способ, с которым мы знакомим в данной статье, — это интерактивный, полуавтоматический метод.*
- b) *На нескольких примерах показан способ, при помощи которого на основе произвольно выбранной диаграммы проводят вскрытие пласта такой мощности, которая в данный момент необходима.*

*The Principal Component Analysis is a rarely employed multi-variable statistical log interpretation method. It is successfully used in other sciences e.g. biometry. The aim of this paper is to demonstrate the mathematical base of principal components analysis and to introduce two methods based on these statistical analysis:*

- a) *Based on logs taken in various boreholes identified layers can be correlated for use of geologists. The introduced process is an interactive semi-automatic correlation method.*
- b) *On some examples a process is demonstrated to show the correlation width as required by the geologist.*

## A főkomponens analízis rövid áttekintése

*I. Mikor érdemes főkomponens analízist alkalmazni:*

- a) *Gyakran előfordulhat, hogy valamely változócsoporthoz mögött egy szakmailag jól értelmezhető, közös komponens ismerhető fel, amelyet közös okváltozónak vagy háttérváltozónak tekinthetünk. Ha nem ismerjük fel a háttérváltozót, de több vizsgálat alapján hasonló változócsoporthoz kapunk, indokolt a háttérváltozóra hipotézist felállítani és kísérletileg ellenőrizni a hipotézis helyességét.*

\* SZKFI, Budapest

- b) A főkomponens analízis egyik nagy előnye, hogy általa csökkentjük a változóink számát, ugyanakkor kitűnik, hogy melyek a jelentéktelen változók. A változók számszerű csökkenése a változók összevonásában nyilvánul meg, így tehát – a probléma természetétől függően – több változó együttes vizsgálata kevesebb számú változó vizsgálatával helyettesíthető.

## II. Matematikai alapok:

Az adatrendszerünk legyen a következő szerkezetű: legyen  $p$  számú megfigyelési egységünk, amelyek egységenként  $n$  számú adatot tartalmaznak ( $p$  számú megfigyelési vektorunk van)

$X^{(1)}$	$X^{(2)}$	.....	$X^{(p)}$
$x_1^{(1)}$	$x_1^{(2)}$	.....	$x_1^{(p)}$
$x_2^{(1)}$	$x_2^{(2)}$	.....	$x_2^{(p)}$
⋮			
$x_n^{(1)}$	$x_n^{(2)}$	.....	$x_n^{(p)}$

Tekintsük az  $x^{(j)}$  vektorokat valószínűségi változóknak, a vektorok elemeit a valószínűségi változók egy realizációjának. Így tehát minden megfigyelési egység megfelel egy vektor valószínűségi változónak. Mivel a megfigyelési egységek különböző dimenziójú fizikai mennyiségek is lehetnek, ezért standardizáljuk a változóinkat:

$$\tilde{x}_i^{(j)} = \frac{x_i^{(j)} - \bar{x}^{(j)}}{s^{(j)}}$$

ahol  $\bar{x}^{(j)}$  az  $j$ -edik vektor elemeinek átlaga  $s^{(j)}$  az empirikus szórása.

Így dimenziótlanná, 0 várható értékűvé, 1 szórásúvá tettük a vektorokat.

Ezek után számítsuk ki az adatrendszerünk korrelációs mátrixát

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & & & \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{bmatrix}$$

ahol

$$r_{ij} = \text{Korr} (x^{(i)}, x^{(j)}) \quad i, j = 1, p$$

Határozzuk meg a korrelációs mátrix sajátértékeit és a hozzájuk tartozó sajátvektorokat. Legyen  $|\lambda_1| > |\lambda_2| > \dots > |\lambda_p|$  a mátrix sajátértékei, és  $\mathbf{v}^{(1)}, \mathbf{v}^{(2)}, \dots, \mathbf{v}^{(p)}$  a hozzájuk tartozó sajátvektorok.

A  $j$ -edik főkomponens a következőképpen számítható ki:

$$C_i^{(j)} = x_i^{(1)} \cdot v_1^{(j)} + x_i^{(2)} \cdot v_2^{(j)} + \dots + x_i^{(p)} \cdot v_p^{(j)} \quad \begin{array}{l} i = 1, n \\ j = 1, p \end{array}$$

Amint az látható, maximum annyi főkomponenst tudunk számítani, mint ahány megfigyelési egység áll rendelkezésünkre.

Az így kapott főkomponensek néhány tulajdonságát érdemes megemlíteni:

A főkomponensekből képzett korrelációs mátrix diagonális, azaz a főkomponensek korrelálatlanok. (Átlagértékük nulla, szórásnégyzetük pedig a megfelelő sajátértékekkel egyenlő).

$$\mathbf{R}_C = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & & \\ & \lambda_2 & & & & \\ & & \cdot & & & \\ & & & \cdot & & \\ & & & & \cdot & \\ & & & & & \lambda_p \end{bmatrix}$$

A sajátvektorok a következő tulajdonságokkal rendelkeznek:

normáltak, azaz  $\langle \mathbf{v}^{(i)}, \mathbf{v}^{(j)} \rangle = \delta_{ij}$  ( $\langle \rangle$  jel skaláris szorzás,  $\delta_{ij}$  Kronecker delta. A sajátvektorokból képzett mátrix transzponáltjából vett oszlopvektorokra is ugyanez igaz.

Vizsgáljuk meg az  $\mathbf{R}_C$  mátrixot. Belátható, hogy igaz a következő:

$$\sum_{j=1}^p \lambda_j = p = \sum_{i=1}^p s_i^2 = \sum_{j=1}^p s_j^2 = p$$

azaz a standardizált változók és a főkomponensek szórásnégyzeteinek összege, azaz az összvarianciája azonos.

### III. A főkomponens analízis szemléletes jelentése:

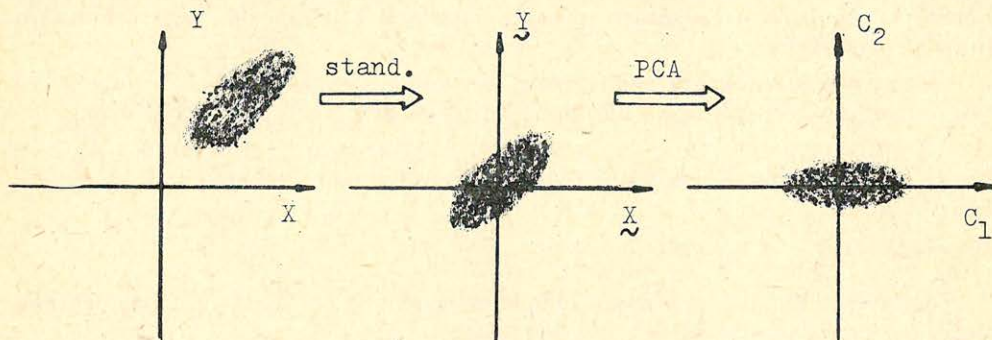
Amint az a fenti tulajdonságokból látszik, a főkomponens analízissel átrendeztük a varianciákat. Míg a standardizált változók mindegyikének variancia szempontból azonos a jelentősége, addig a főkomponensek közül az első magában foglalja az összes változó varianciájának legnagyobb közös részét. A második főkomponens a megmaradt varianciák legnagyobb közös részét tartalmazza, és így tovább. Az utolsó főkomponensre már alig marad varianciarész, ezért szokták ezeket jelentéktelennek tekinteni. Ebből látható az, hogy számos esetben ele-

gendő az első (vagy az első néhány) főkomponenst figyelembe venni egy adott probléma megoldásához. Az a kérdés viszont, hogy mikor mondható valamely főkomponens jelentéktelennek, a probléma jellegétől, a vizsgálat céljától stb. függ.

### A főkomponens analízis geometriai jelentése

A szemléletesség kedvéért tekintsünk csak két változót ( $x, y$ ).

Az 1. ábráról leolvasható, hogy amit csináltunk az nem más, mint egy koordináta-transzformáció (főtengelytranszformáció), azaz a standardizált adatrendszert olyan koordináta-rendszerbe transzformáltuk, ahol a transzformáltak korrelációs mátrixa diagonális.



Geo 86/3-1

1. ábra  
Puc. 1.  
Fig. 1.

### Kutak közti rétegtani korreláció

Egy adott terület különböző kútjai között a rétegek követése egyik kútból a másikba fáradságos, hosszadalmas munka. A gyakorlatban főként az 1:1000 ellenállás szelvényt használják, bár előfordul más szelvények figyelembe vétele is, főként komplikáltabb rétegződés esetén. A rutinszerű korreláció azonban szinte sohasem használja föl valamennyi karotázsszelvényt. Nézzünk meg egy olyan ideális esetet, amikor minden karotázsszelvényt föl akar használni a korrelációt végző geológus. Ehhez három – négy (de nem ritkán hat) szelvényt is egyszerre kell figyelnie. Ha a vizsgált kútszakasz 4–500 m hosszú, a korreláció rendkívül fáradságos, nehézkes és hosszadalmas, viszont felhasználn minden információt. Az ellenállás szelvény alapján végzett korreláció gyorsabb, kevésbé fáradságos, viszont nem vesz figyelembe minden információforrást ami rendelkezésre áll.

Ezért célszerű egy olyan kompromisszumos megoldást választani, amely az egyetlen szelvényvel végzett korreláció előnyeit megtartja és minden lényeges információt felhasznál.

Erre nyújt megoldási lehetőséget a főkomponens analízis. Számítsuk ki az összes karotázás szelvény első főkomponensét. Ezzel kapunk egy olyan dimenziót-

lan „karotázs szelvényt”, amely a felhasznált szelvények varianciáinak legnagyobb közös részét fogja tartalmazni. Ezáltal az információvesztés mértéke sokkal kisebb lesz, mint ha csak az ellenállás szelvényét használtuk volna föl, viszont változatlanul kihasználható szemünk kiváló alakfelismerő képessége, ami a jelenlegi korrelációs módszerek alapja.

#### *Az eljárás gépi megvalósítása:*

Az eljárás kihasználja az SZKFI Geofizikai Főosztályán rendelkezésre álló HP 9845/B típusú számítógép fejlett grafikai adottságait, de bármely más jó grafikával rendelkező gépen könnyen megvalósítható.

A grafikus display rajzmezője két részre van osztva, az alsó részen az egyik kút első főkomponense van felrajzolva, a felső részen a másik kút első főkomponense. A cursorral az összetartozó mélységpontok kijelölhetők, amelyeket tárolunk a háttértárban.

Egy rajzoló program segítségével kutanként megjeleníthetők az első főkomponens szelvények és a különböző kutak összetartozó mélységpontjai.

A grafikus display a 2. ábrán látható. A 3. ábrán a Battonya – É – 4 – 5 – 6 kutak korrelációjának eredménye látható és a bemenő szelvények.

#### *Karotázs szelvények rétegekre bontása:*

Ezen probléma megoldására már létezik néhány megoldás, amely megtalálható a szakirodalomban. ([4], [7], [8], [10])

Az ismertetésre kerülő eljárás egyetlen szelvény figyelembevételével képes réteghatárokat kijelölni. Több szelvény egyidejű használatát a főkomponens analízis teszi lehetővé.

Először ismertetjük az egy szelvényen alapuló módszert, majd kiterjesztjük tetszőleges szelvényválasztókra.

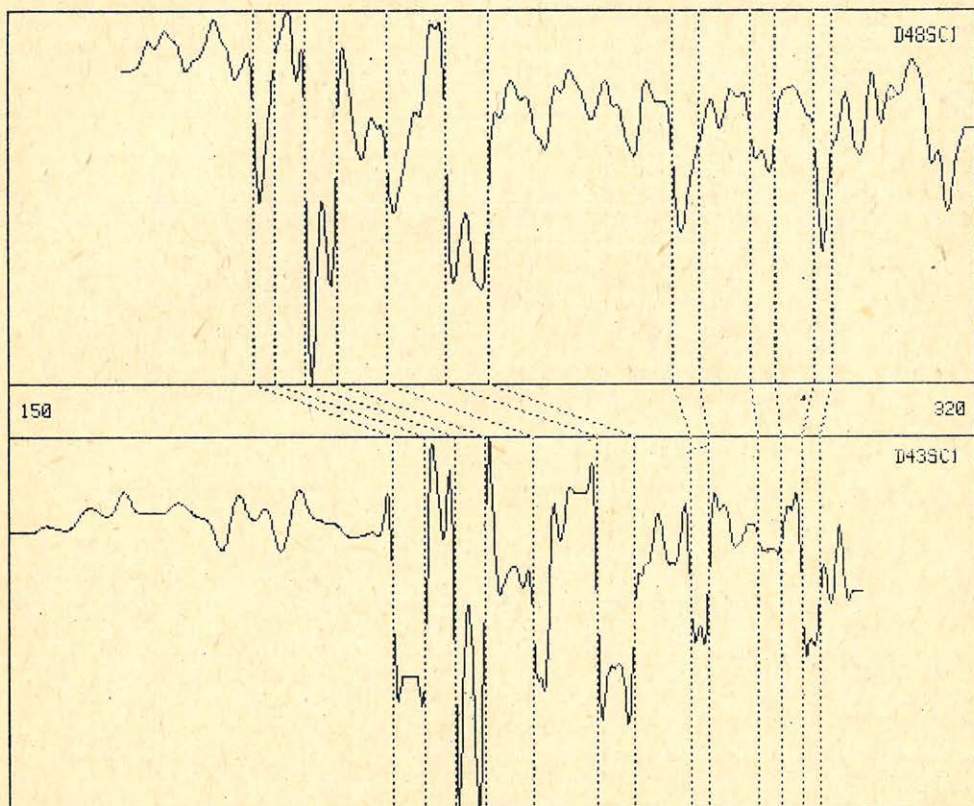
Döntsük el, hogy mekkora az a legkisebb réteg, amelynek kimutatását még elvárjuk az eljárástól. Hajtsunk végre mediánszűrést a szelvényünkön a minimális rétegvastagságnak megfelelő ablakhosszal. Ezzel az élmegörző szűrési eljárással kapunk egy helyenként szögletes görbét. Ennek szögleteit eltüntethetjük egy megfelelően választott felső határfrekvenciájú szűréssel. Ennek eredménye látható a 4. ábrán.

Ezek után a simított szelvényen jelöljük meg az összes csúcs és völgy között a legmeredekebb pontokat, mint a keresett réteghatárokat.

Tekintsük egy rétegen belül a szelvények értékeit állandónak, és nevezzük ezt az értéket a rétegre jellemző értéknek. Ezzel a valóságot egy olyan modellel helyettesítjük, amely feltételezi, hogy egy rétegen belül a fizikai tulajdonságok homogének, a határokon ugrásszerűen változnak, és a mérési eredmények nem „szögletes” voltát a mérőműszerek véges felbontóképessége okozza.

A jellemző érték megállapítása a következő igen egyszerű módon történik:

- a) ha a rétegen belül a maximum a szélső pontoktól eltérő helyre esik, akkor a rétegjellemző értéke a maximum.
- b) ha a minimum a szélső pontoktól eltérő helyre esik, akkor a jellemző érték a minimum.



Geo 86/3-2

2. ábra. A Demjén – K – 443 és 448 kutak első főkomponensei láthatók az alsó, ill. felső rajzterületen, valamint az összetartozó pontok, amelyeket a szaggatott vonalak jelölnek. Az ábra a grafikus display-ről készített hard-copy.

Рис. 2. Первые главные компоненты скважин Демьен – К – 443 и 448! изображенные в верхней и нижней части рисунка, прерывистые линии изображены пунктиром.

Fig. 2. Principal components of wells Demjén – K 443 and 448 seen on the upper and lower part. Dashes show the corresponding points. The hard copy was prepared on the garphic display.

(Az eljárás természetéből adódóan olyan eset nem fordulhat elő, hogy a szélső pontokra essen akár a maximum akár a minimum.)

A jellemző értékképzésre mutat példát az 5. ábra.

Az így kapott rétegek elég finom felbontásúak, ezért fölmerülhet az igen! nagyobb egységek kijelölésére, amit a meglevő réteghatárok szelektálásával oldhatunk meg.

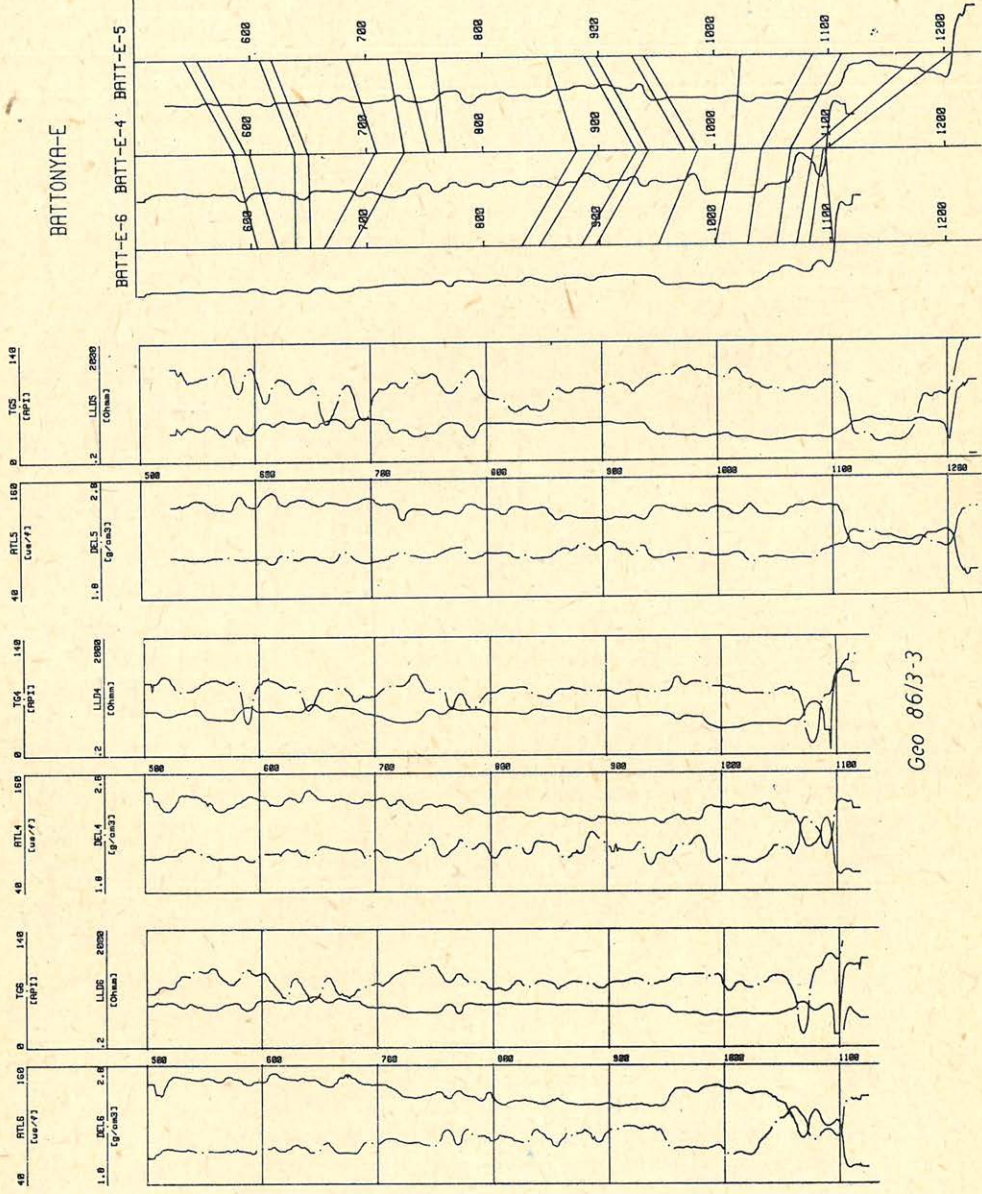
Erre a problémára egy lehetséges megoldási mód a következő: adjunk meg előre egy kritikus értéket, amely a rétegzettség finomságára lesz jellemző (tapasztalatilag kell megállapítani).

BRATTONYA-E-6

BRATTONYA-E-4

BRATTONYA-E-5

BATTONYA-E

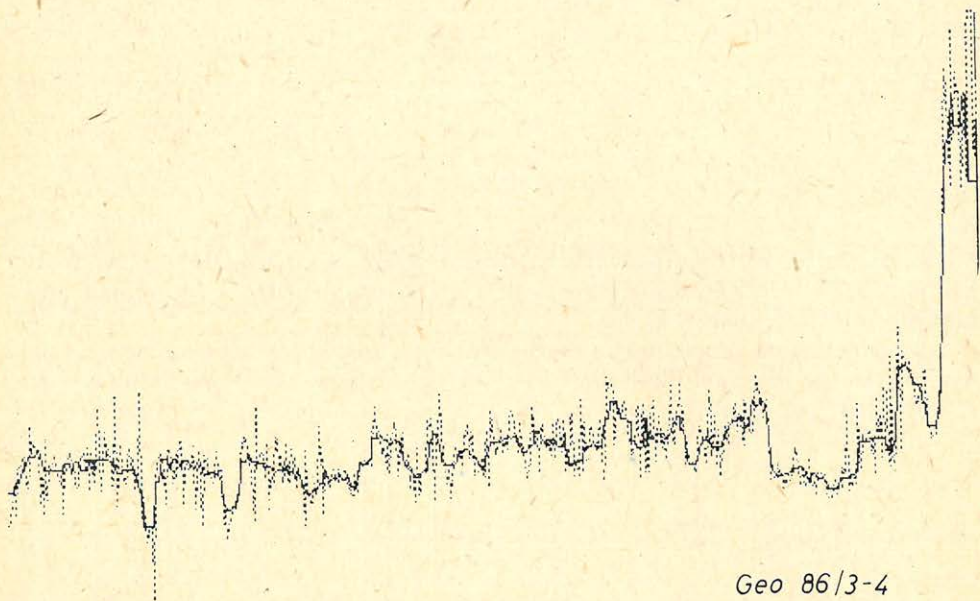


Geo 86/3-3

3. ábra. A Battonya-É-4-6-5 kutak szelvényei és a korreláció eredménye. A kutak rajzon látható távolságai nem arányosak a valódi távolságokkal. A három fúrás közel egy egyenesbe esik. Az ábrán látható szelvények az áttekinthetőség kedvéért 10 m-es ablakhosszal mediánszűrt és simított szelvények. A korrelációt ábrázoló oszlopban a kutakhoz tartozó első főkomponensek vannak felrajzolva. Az összetartozó mélységpontok az egyes fúrások tengelyére mint mélységtengelyre vannak vonatkoztatva.

Рис. 3. Диаграммы скважин Баттоны-Е-4-6-5 и результаты корреляции. Расстояние между скважинами, показанными на рисунке, условно. Три буровые приблизительно попадают на одну прямую. Изображенные на рисунке диаграммы в целях наглядности подвергнуты медианной фильтрации и сглаживанию при длине окна 10 м. В графе, где изображена корреляция, отмечены первые главные компоненты относящиеся к скважинам. Соответствующие глубинные точки относятся к осям единичных скважин, как к осям глубин.

Fig. 3. Profiles of wells Battonya-É-4-6-5 and results of correlation. Well distances are not real. All three wells are lined up approximately along a straight line. Profiles shown were filtered with a 10 Meters window length and smoothed. Correlation columns contain the first principal well components. Common depth points are corrected to the various well axis.



4. ábra. A szaggatott görbe az eredeti, szűretlen görbe, a folytonos görbe a mediánszűrt majd simított görbe.

Рис. 4. Прерывная кривая, кривая без фильтрации, непрерывная кривая после медианной фильтрации и сглаживания.

Fig. 4. Dashed line is the original unfiltered curve. Continuous line is median filtered smoothed curve.

Tegyük fel, hogy már benne vagyunk egy „nagy” rétegben az  $i$ -edik adatig (az  $i$  a réteg kezdetétől számítandó).

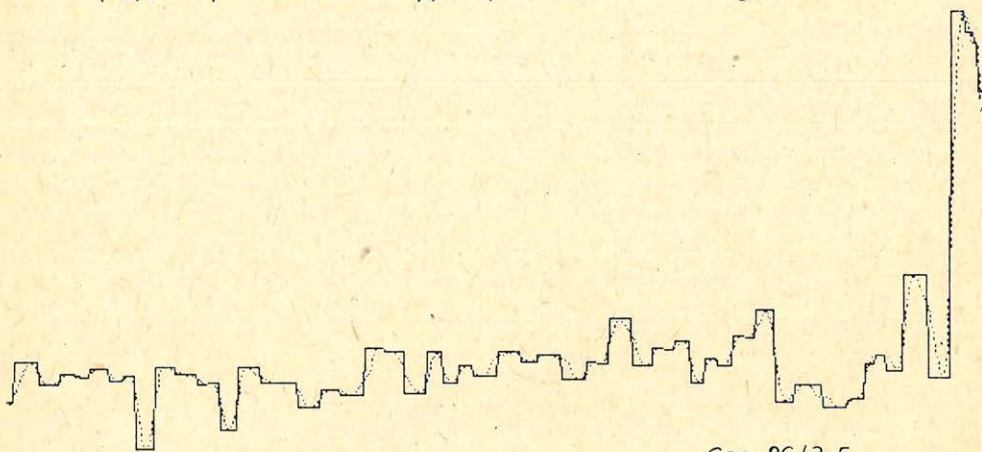
Az  $i$ -edik adatig a szelvény átlagértéke  $m$ .

$$m = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i a_j \text{ ahol } a_j \text{ a szelvény } j\text{-edik pontban felvett értéke.}$$

Vizsgáljuk meg az  $a_{i+1}$ -dik adat és  $m$  viszonyát:

ha  $|a_{i+1} - m| \geq \text{kritikus érték}/(i+1)^{1/2}$ , akkor van réteghatár az  $i+1$ -edik helyen,

ha  $|a_{i+1} - m| < \text{kritikus érték}/(i+1)^{1/2}$  akkor nincs réteghatár.

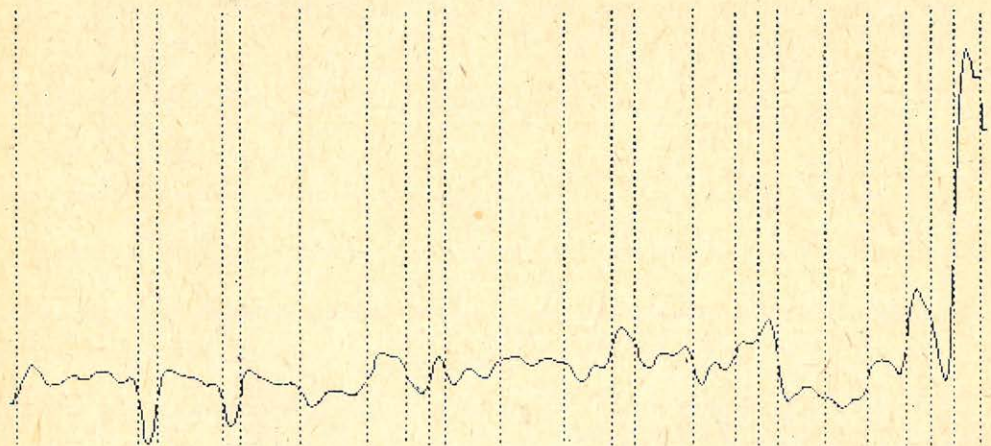


Geo 86/3-5

5. ábra  
Puc. 5.  
Fig. 5.

A kritikus érték változtatásával a felbontott rétegek *markánsága* is változik, azaz a kritikus érték növekedtével csak a markánsabb változások fognak megmaradni mint réteghatárok.

Az ismertetett procedúrát alkalmazhatjuk a már kijelölt finom rétegek jellemző érték szelvényére. Ezáltal a finom rétegek határai közül elhagyjuk a jelentékteleneket. (6. ábra)



Geo 86/3-6

6. ábra  
Puc. 6.  
Fig. 6.

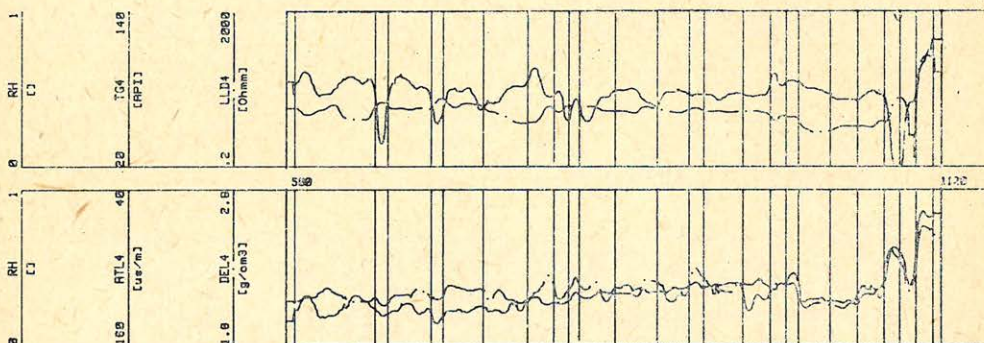
Az eddig ismertetett eljárás csak egyetlen szelvényt használ föl a réteghatár-kijelölésre. Azonban semmi okunk nincs arra, hogy kitüntessünk bármely karotázs szelvényt, és azt állítsuk, hogy valamelyik szelvény legyen a réteghatár kijelölés alapja. Célszerű volna minden nem technikai szelvényt fölhasználni. A szelvényenként történő réteghatár-kijelölés sajnos nem teszi lehetővé, hogy egy egységes, minden szelvényre igaz réteghatárképet hozzunk létre. Ennek oka, hogy a magyarországi szelvényezési gyakorlat nem néhány szondaszerelvény felhúzásával végzi a méréseket, hanem az egyes szondákat külön-külön húzza föl. Emiatt a mérési anyagon mélységeltérések vannak, amelynek oka a kábelnyúlás, az eszköz megszorulása stb. Ez tehát azt jelenti, hogy a valóságban azonos mélységbe eső pontok a regisztrátumokon nem esnek azonos mélységbe.

A fent ismertetett eljárás szelvényekénti alkalmazása tehát a különböző szelvényeken más-más helyre fogja rakni a réteghatárokat és ezek utólagos egyeztetése reménytelennek látszik, különösen nagyobb rétegek esetén. A szelvényenként kijelölt réteghatárok még a leggondosabb mélységegyeztetés után sem közösíthetők.

Az egységes réteghatárkép kialakítására nyújt lehetőséget a főkomponens analízis (I/b. pont).

Hajtsunk végre főkomponens analízist a standardizált szelvényeinkre. Ekkor annyi darab főkomponens szelvényt kapunk, mint ahány bemenő szelvényünk volt. E szelvények variációjának legnagyobb közös részét az első főkomponens fogja magába sűríteni. Így célszerűnek látszik csak az első főkomponensre alkalmazni az ismertetett réteghatárkijelölő-eljárást, az összes szelvény helyett. Ezáltal létre tudunk hozni egy minden szelvényre igaz réteghatárképet. A bemenő szelvények kisebb mélységeltérései nem okoznak durva hibát, az így kapott réteghatárok többnyire minden szelvényre megfelelők.

Egy főkomponens analízissel kombinált réteghatár kijelölés eredménye látható a 7. ábrán.



Geo 86/3-7

7. ábra  
Puc. 7.  
Fig. 7.

## Összefoglalás

Az ismertetett két alkalmazás csak ízelítőt kívánt adni a főkomponens analízis használhatóságáról. Az ismertetett eljárások nem tekinthetők befejezetteknek, noha a kitézött feladatokat egy bizonyos szinten megoldják. A kutak közti korreláció megoldásában jelentős javulást hozhat a korrelációs procedúra alakfelismerésen alapuló automatizálása. Az elkészült programok már jelenlegi állapotukban is hathatós segítséget nyújthatnak a geológus kollégáknak, különösen olyan esetekben, amikor a vizsgált területen a rétegződés bonyolult, a rétegek követése egyik kútból a másikba nehezen valósítható meg. A kutak közti korreláció a szeizmikus interpretátorok munkáját is segítheti.

## IRODALOM

- [1] *Serra, O. and H. T. Abbot*: The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphy 1982. SPE 9270
- [2] *Carlos A. Pomalaza-Raez and Clare D. McGillen*: An adaptiv edge-preserving filter IEEE Transaction on Acoustics, speech and signal processing vol. ASSP - 32, No. 3, june 1984
- [3] *Jan Biemond and Jan J. Gerbrands*: An edge-preserving recursive noise-smoothing algorithm for image data IEEE Transaction systems man and cybernetics vol. smc. 9 No. 10. october 1979.
- [4] *Elek István és Kovács György*: A Walsh-transzformáció alkalmazása a mélyfúrési geofizikában. Alkotó Ifjúság Pályázat, SZKFI, 1984.
- [5] *Dr. Sváb János*: Többváltozós módszerek a biometriában, Mezőgazdasági Kiadó, 1984.
- [6] *Donald F. Morrison*: Multivariate Statistical Methods Mc Graw-Hill New York, 1979.
- [7] *Vermes Mátyás*: Rétegsor-meghatározás karotázsszelvények számítógépes feldolgozásával, Magyar Geofizika 1984. 5-6.
- [8] *Vermes Mátyás*: Szeizmikus rétegmódellemel számítása akusztikus karotázsmérések alapján, Magyar Geofizika 1983. 4. sz.
- [9] Proc. Schlumberger Well Evaluation Conference, Algiers (dec. 1979.)
- [10] *Lannig E. N. and Johnson D. M*: Automated identification of rock boundaries: an application of the Walshtransform to geophysical well-log analysis, GEOPHYSICS, v. 48, february, 1983.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Тураи Э:</i> Математическое моделирование электромагнитного поля плоской волны с использованием интегрального уравнения .....	1
<i>Тотх Й:</i> Роль ГИС и каротажной интерпретации в поисках углеводородных месторождений с плохими коллекторскими свойствами .....	17
<i>Элек И:</i> Применение анализа главных компонент в ГИС .....	26

## CONTENTS

<i>Turai E:</i> Mathematical modeling of planewave electromagnetic spaces by integral equations .....	1
<i>Tóth J:</i> Role of up-to-date well logging and log interpretation in the exploration of a hydrocarbon field having bad reservoir properties .....	17
<i>Elek I:</i> Some borehole geophysical application of the principal component analysis (layer correlation between boreholes, layer interpretation of logs) .....	26

---

### MAGYAR GEOFIZIKA

A szerkesztésért felelős: Zelei András

A szerkesztőség címe: 1368 Budapest VI., Anker köz 1. Telefon: 429-754

Kiadja: a Delta Szaklapkiadó és Műszaki Szolgáltató Leányvállalat 1442. Budapest VII., Garay u. 5.

Telefon: 415-583, 215-440

Felelős kiadó: Faklen Pál igazgató

86.134. Állami Nyomda, Budapest — Felelős vezető: Mihalek Sándor igazgató

Terjeszti a MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETE

Egyesületi tagoknak tagdíj ellenében

Megjelenik évente hatszor

**Index: 26 507**

