

## VÁLASZ

### PALÁNCZ BÉLA PROFESSZOR ÚR

#### OPPONENSI VÉLEMÉNYÉBEN FELTETT KÉRDÉSEIRE

Ezúton köszönöm Paláncz Béla professzor úrnak az akadémiai doktori értekezésem alapos bírálatát, hasznos észrevételeit és a dolgozat pozitív értékelését. Az „Általános észrevételek” című fejezetben szereplő matematikai terminológiai pontosításokat megköszönöm, azokat a jövőben publikációs tevékenységem során alkalmazni fogom.

A lineáris és globális inverziós eljárások Matlab rendszer által mért futási ideje összehasonlítását a PhD értekezésemben vizsgáltam (*Szabó, 2004*). Az újonnan kifejlesztett inverziós eljárások gyorsaságáról a 65. és 75. oldal kivételével valóban nem tartalmaz mennyiségi információt az akadémiai doktori értekezésem. A témában megjelent közleményeim alapján elmondható, hogy a CPU idő (8 magos processzorral rendelkező munkaállomáson) linearizált inverzió esetén néhány másodperc, a globális inverzió 1-2 percet vesz igénybe, valamint a hiperparaméter optimalizáción alapuló (genetikus meta-algoritmikus) inverziós eljárás alkalmazásához 4-8 perc szükséges (*Szabó, 2018*). A párhuzamos számítás lehetőségét a jövőben érdemes megfontolni, mellyel a CPU idő lényegesen redukálható és az egy időben végrehajtható műveletek együtt kezelésével az erőforrások hatékonyabban felhasználhatók. Jelenlegi kutatásaim középpontjában a Bírálóm által felvetett terepi és módszerverifikáció áll. A Miskolci Egyetem PULSE elnevezésű GINOP-2.3.2-15-2016-00010 azonosítójú projektje keretében a Derecskei-árok miocén korú nem-konvencionális szénhidrogén-tárolóiban mért lyukgeofizikai adatokon teszteljük az intervalluminverziós eljárást és az előállított közetfizikai mennyiségeket magadatokkal hasonlítjuk össze. Az első eredmények biztatók, mivel a szelvényértelmezéssel és a laboratóriumi méréssel nyert eredmények (elsősorban a kulcsparaméternek számító teljes szervesanyag-tartalom értékek) szoros kapcsolatot mutatnak.

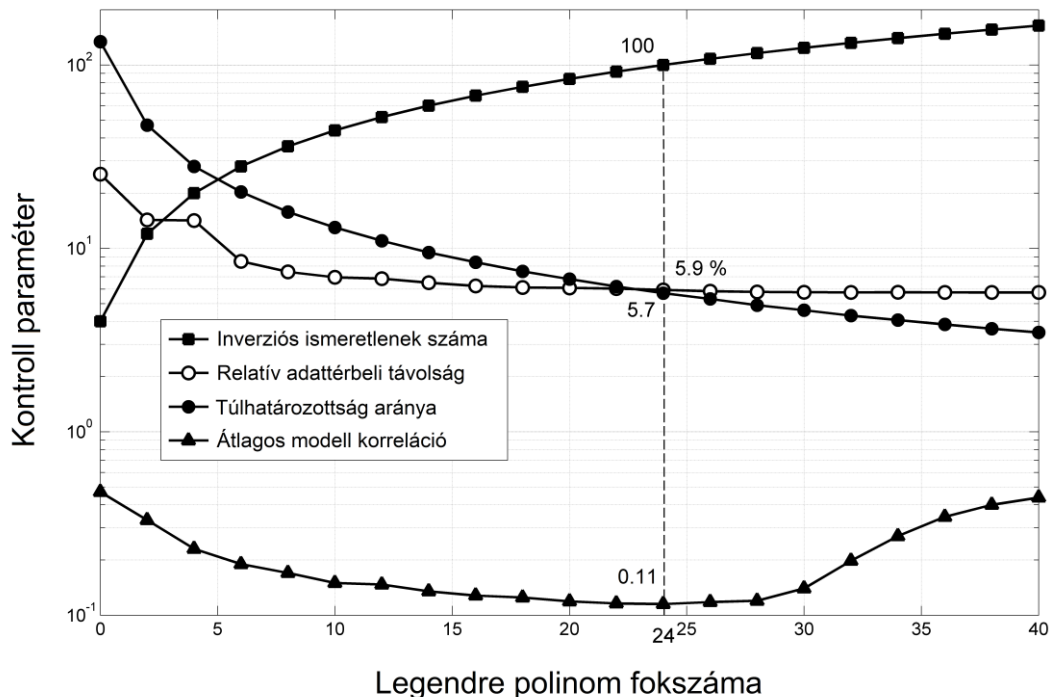
Bírálóm két, lényegre törő kérdést vetett fel, ezekre az alábbiakban válaszolok.

1. „*Miként történt a polinom együtthatók keresési terének meghatározása?*”

A (9) egyenletből következik, hogy a  $q=1$  esethez tartozó sorfejtési együttható a homogén réteg  $m_i$ -edik közetfizikai paraméterével egyezik meg. Mivel térfogatjellemzőkről beszélünk, ezért a  $B_1$  együtthatók értékét a  $[0,1]$  tartományból kell választanunk. Ezt tovább szűkíthetjük

a mérési területre vonatkozó előzetes fizikai és földtani ismeretek felhasználásával. A porozitás például in situ kőzetekben általában nem haladja meg a 35–40 %-ot ( $0 \leq B_1 \leq 0.4$ ). (Tökéletesen elrendezett gömbszemcsék (mesterséges kőzetek) esetén pedig ugyanaz nem lehet nagyobb, mint 47.6 %.) A vizsgált kőzetfizikai mennyiségek finom változásait a mélység magasabb hatványait tartalmazó bázisfüggvények segítségével írjuk le. Összhangban a linearizált inverziós kísérletekkel, az ezekhez tartozó sorfejtési együtthatóknak néhány tizedes terjedelmű keresési tartományt választottam a genetikusan alkalmazása során.

A keresési tér dimenzióját a sorfejtésnél alkalmazott bázisfüggvények (sorfejtési együtthatók) száma határozza meg, melynek optimális kiválasztását a *Dobróka és szerzőtársai (2016)* cikkben tárgyaltuk. Megállapítottuk, hogy a sorfejtési együtthatók számát úgy célszerű megadni, hogy a (20) formula szerint számított korrelációs együtthatók átlaga minimális legyen. Tekintsük az értekezésben szereplő inverz feladatot (19. oldal 4. ábra). Ismételjük meg az inverziót különböző számú sorfejtési együtthatók választása mellett. Például, ha az xx51 és xx61 m közötti szakaszon elhelyezkedő gáztároló réteget szeretnénk egyazon intervalluminverziós eljárással megvizsgálni, akkor 24 együtthatóval becsülhetjük a legmegbízhatóbban a rétegjellemzők mélységváltozását. A sorfejtési együtthatók megválasztásának elvét az alábbi ábra mutatja.



A futási idő csökkentése és a becslés megbízhatóságának biztosítása szempontjából érdemes viszonylag kisszámú ismeretlent választani, azonban a kívánt felbontás elérése érdekében azok száma nem lehet túl kicsi. A fenti módszerrel a becsült paraméterek közötti korrelációt minimalizálva meghatározhatjuk a modell tér dimenzióját. Fontos azt is megemlíteni, hogy az újonnan kifejlesztett kombinált intervalluminverziós módszer lehetővé teszi azt is, hogy a keresés kezdeti (evolúciós) szakaszában kevesebb számú együtthatót választhassunk, mint a befejező (linearizált) fázisban (Szabó és Dobróka, 2019). Ez lényegesen csökkenti a futási időt, és miután a globális inverzióval az optimum környezetébe eljutunk, nagyobb számú sorfejtési együttható szerepeltetése mellett (növelve a vertikális felbontást) a Marquardt-algoritmussal (megfelelően választott csillapítási tényezővel) stabil inverziós eljárásban határozzuk meg a megoldást.

2. a) „Az elérhető kereskedelmi szoftverek pl. a) Mira GeoScience termékei, lásd <http://www.mirageoscience.com/our-products/software-solutions/3d-geophysical-modelling-and-inversion> mennyire alkalmasak a dolgozatban tárgyalt problémák megoldására?”

A megadott linken elérhető szoftverek közül a kanadai UBC GIF kutatócsoport által fejlesztett MAG3D és GRAV3D inverziós programokkal dolgoztam korábban (finnszági oktatómunka, ill. a Miskolci Egyetemen TDK témavezetés kapcsán). Ezeket és a geoelektromos adatok (IP, EM) feldolgozásra alkalmas hasonló elvű inverziós módszereket alapvetően nagy mennyiségű mérési adat és ismeretlen (akár milliós cellaszám) kezelésére dolgozták ki. A gravitációs direkt feladatot tekintve külön érdekesség, hogy egy magyar geofizikus tollából évtizedekkel ezelőtt született formulát tekintik alapul a nehézségi gyorsulás értékek számításánál, mely a prizmaható terét a potenciál térfogati integráláson alapuló előállításában gyors és hatékony közelítő eljárással számítja (Haáz, 1953). A programok a nemlineáris inverz feladatot mind a gravitációs, mind pedig a mágneses adatok feldolgozása esetén linearizálják. Azonban, hogy a kellő gyorsaságot elérjék a Jacobi mátrixot wavelet transzformációval tömörítik. Alapvetően mindkét inverz feladat nagymértékben alulhatározott (néhány száz adatról kell általában több ezer/tízezer ismeretlent meghatározni), ezért többféle kikötést tesznek a megoldásra (adattérbeli súlyozás, iránymenti simítás, büntető-függvények alkalmazása, csökkenő mélység-érzékenység kompenzálása stb.). Megfelelő előzetes információ birtokában a fenti inverziós módszerek célravezetőek, és a gyakorlati igényeknek eleget tesznek. A nagyfelbontású grafikus megjelenítés gyors és kiváló minőségű, a modern GPU-k felhasználásával kedvünkre szeleltelhetjük a becsült közetsűrűség/mágneses szuszceptibilitás modellt különböző mélységszinteken és irányok mentén.

Az értekezésemben tárgyalt mélyfúrési geofizikai inverz feladatok alapvetően egydimenziósak, azonban léteznek a szakterületen többdimenziós feladatok is. A megadott szoftverekhez hasonló 3D modellezési és inverziós megoldásokat alkalmazhatunk a fúróluk közvetlen környezetében elhelyezkedő iszappal elárasztott (kisepert) zóna fajlagos ellenállásviszonyainak meghatározására és az elárasztási sugár iránymenti leképezésére. A GRAV3D és MAG3D szoftverek az együttes inverzió során fúróluk gravimetriai és mágneses (in situ) adatokat is képesek feldolgozni, mellyel jelentősen csökkenthető a felszíni gravitációs és mágneses adatok értelmezésének többértelmősége.

A mélyfúrési geofizikai inverz feladat megoldására alkalmazható kereskedelmi szoftverek jellemzően linearizált (1D mélységpontonkénti) inverzió alapúak, melyek hosszú mélységzakaszokon is elég gyors számítást tesznek lehetővé. Az ipari rendszerek közül mélyebb betekintést a MOL Nyrt.-nél alkalmazott Schlumberger Express és Techlog programokba nyertem. Az 1D direkt feladat megoldása lényegesen gyorsabb, mint a 3D gravitációs/mágneses inverzió esetén. Így a mélyfúrési geofizikai inverz feladatnál hatékonyan felhasználhatók a globális optimalizációs módszerek. A meta-heurisztikus módszerek az ipari alkalmazásoknál még nem nyertek jelentős teret, azonban az ML és AI térhódításával a jövőben ez a helyzet jelentősen változhat. Bonyolult ásványi összetétel és sok ismeretlen, durva hibával terhelt adatok és hiányos területi ismeretek esetén a lokális inverzió hatékonysága jelentősen lecsökken. Dolgozatomban e problémát vezettem fel és megoldásként a túlhatározottság növelését javasoltam. Eddigi eredményeim azt mutatják, hogy a sorfejtésen alapuló inverzió megfelelő pontossággal és megbízhatósággal képes meghatározni a közetfizikai modellek széles körét. Módszerfejlesztéseim fő célja a karotázs inverziós eljárás pontosságának és megbízhatóságának növelése, melynek megvalósítása érdekében saját fejlesztésű (Matlab) programokat fejlesztettem.

2. b) „pyGIMLi, *Geophysical Inversion and Modeling Library* [https://www.pygimli.org/examples\\_auto/index.html](https://www.pygimli.org/examples_auto/index.html) mennyire alkalmasak a dolgozatban tárgyalt problémák megoldására?”

A mélyfúrési geofizika elektromos direkt feladatának megoldásánál nyújthatnak segítséget a fenti szoftvercsomag eljárásai, pl. a FEM modellezés. A rácshálót általában hengerkoordináta-rendszerben célszerű létrehozni, ezen kívül egyéb hibrid megoldások is lehetségesek. A modell alapján számított látszólagos fajlagos ellenállás szelvényeket az inverzió során a mért szelvényekkel hasonlítjuk össze, melynek alapján a valódi fajlagos-ellenálláseloszlást becsüljük. Az inverziós eljárásban a különböző behatolással mért (array laterolog eszközökkel

legfeljebb 8-féle) fajlagos ellenállásszelvényeket együtt dolgozzuk fel, mellyel elég részletesen képezhetjük le az elárasztott zóna tulajdonságait (*Jarzyna és szerzőtársai, 2016*). Ennek alapján a víztelítettség az 1D inverzióhoz képest pontosabban és megbízhatóbban becsülhető, mely az olajipari alkalmazásokban a készletszámítások szempontjából nagy jelentőséggel bír.

A „Crosshole travelttime tomography” modul közvetlenül felhasználható a fúrólukák közötti átvilágításra. Megmérve a radarhullámok beérkezési idejét és csillapodását, sebesség és abszorpciós tomogramokat számíthatunk. A radar módszer kismélységben jól használható, elsősorban ott ahol a fúrólukák nem helyezkednek el túl távol egymástól és a kőzetek masszívak, kis porozitásúak. A tomografikus leképezéssel a repedezettségre és a másodlagos porozításra következtethetünk, valamint a nagyobb víztartalmú zónák hatékonyan körülhatárolhatók. Példaként említhetjük Európában a radar és a szeizmikus tomográfia nukleáris hulladékéltelvezési feladatokban való széleskörű alkalmazását, vagy a CO<sub>2</sub> beszajtolás időbeli nyomon követését.

Az ingyenesen hozzáférhető Python nyelvű kódokat sok ipari rendszer képes megnyitni, szerkeszteni és futtatni. A Schlumberger Techlog rendszere alatt emellett még sajátfejlesztésű algoritmusaink szkriptjeit is felhasználhatjuk, melyekkel önállóan elvégezhetjük a fúróluk-geofizikai szelvények kiértékelését. A Geofizikai Tanszék munkatársai a faktoranalízisen alapuló agyagtartalom és áteresztőképesség meghatározására alkalmas Python nyelvű programot fejlesztett és egy innovációs-fejlesztési együttműködés során a MOL Nyrt. szolnoki Petrofizika Osztályon a mindennapi gyakorlat számára elérhetővé tette (*Dobróka és szerzőtársai, 2016*). A Geofizikai Tanszék és a Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszéke munkatársai kőzetmagadatok hiányos mátrixának klaszteranalízisére fejlesztettek módszert, melyet szintén Python nyelven integráltak a MOL Nyrt. rendszerébe (*Szabó és szerzőtársai, 2019*).

## 2. c) „Mi az eltérés a heurisztikus és a metaheurisztikus algoritmusok között?”

A két fogalom élesen nem választható el egymástól. A heurisztika egy megoldási módot jelent, a meta-heurisztikus eljárás a heurisztikus algoritmus paramétereit keresi. Esetünkben a genetikus algoritmus, mint meta-heurisztikus módszer, az inverz probléma paramétereit, mint géneket határozza meg. A heurisztikus megközelítést akkor alkalmazzuk, ha nem létezik egzakt matematikai módszer vagy azok éppen túl lassúak. A heurisztikus kereséssel elfogadható időn belül találhatunk megoldást, azonban a módszer nem mindig szavatolja, hogy az optimális. Például a genetikus algoritmusnál általánosan nem ismert olyan matematikai bizonyítás, amely

garanciát adna a globális minimumra, mégis egy igen jól adaptálható és hatékony módszer révén a mérnöki igényeinknek legtöbbször (CPU idő tekintetében is) megfelelő megoldást kapunk. A szimulált hűtés is meta-heurisztikus eljárás, azonban ott létezik matematikai bizonyítás (a Markov láncok elméletének felhasználásával), mely az optimális hűtési ütem mellett garantálja a globális minimum megtalálását.

#### Hivatkozott irodalom

Dobróka M., Szabó N. P., Tóth J., Vass P., 2016: Interval inversion approach for an improved interpretation of well logs. *Geophysics* 81, D163–D175.

Dobróka M., Szabó, N. P., Vass P., Turai E., Kiss A., 2016: Mélyfúrési geofizikai adatok faktoranalízise és az eredmények hasznosítása (2015-2016). Zárójelentés, ME.

Haáz I., 1953: Relationship between the potential of the attraction of the mass contained in a finite rectangular prism and its first and second derivatives. *Geophysical Transactions* II, No 7.

Jarzyna J., Cichy A., Drahos D., Galsa A., Bała M. J., Ossowski A., 2016: New methods for modeling laterolog resistivity corrections. *Acta Geophysica* 64(2), 417–442.

Szabó N. P., 2004: Mélyfúrési geofizikai adatok értelmezésének modern inverziós módszerei. PhD értekezés, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 118 p.

Szabó N. P., Mihály D., 2019: Series Expansion-Based Genetic Inversion of Wireline Logging Data. *Mathematical Geosciences* 51, 811–835.

Szabó N. P., Nehéz K., Hornyák O., Piller I., Deák Cs., Hanzelik P. P., Kutasi Cs., Ott K., 2019: Cluster analysis of core measurements using heterogeneous data sources: An application to complex Miocene reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 178, 575–585.

Miskolc, 2020. július 31.

  
Szabó Norbert Péter