

**Együttes inverziós módszer fejlesztése
rétegzett földtani szerkezetek 3D kutatására**

Zárójelentés

OTKA K62416 kutatási téma

Miskolc, 2011. március 31.

Együttes inverziós módszer fejlesztése rétegzett földtani szerkezetek 3D kutatására

(OTKA K62416, Zárójelentés)

1.) Az OTKA 62416 projekt kitűzött fő célok az alábbiak:

Egy olyan közelítő 3D együttes inverziós módszer kifejlesztése, amelyben a 3D rétegzett földtani szerkezetek paramétereit folytonos kétváltozós bázisfüggvények sorával közelítjük.

A Geofizikai Tanszéken kifejlesztett és rendelkezésre álló 1.5D és 2D sorfejtéses együttes inverziós tapasztalatok és programok felhasználása a módszerfejlesztésben.

Az együttes inverziós módszerek vizsgálata abból a célból, hogy a közelítő 3D együttes inverzióban milyen pontossággal illetve megbízhatósággal használhatók fel, milyen apriori információk szükségesek.

Elfogadható számítási sebesség elérése asztali személyi számítógépeken.

A kitűzött célok megvalósítását a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszéken kifejlesztett egyedi szemléletű együttes inverziós 1.5D illetve 2D módszerekre és számítógépi programokra alapoztuk. Valamennyi módszerben alkalmasan választott bázis függvények szerinti sorfejtést alkalmazunk a rétegzett geológiai szerkezetek, struktúrák fizikai (pl.: fajlagos ellenállás, szeizmikus sebességek, abszorpció), és geometriai paramétereinek (rétegvastagságok, határfelületek) vertikális (fúrásban) és laterális (felszínen) leírására, transzformációs célokra az indukált polarizációban, valamint adatfeldolgozás területén a Fourier transzformációban. A rétetparaméterek függvényekkel való leírásával a nemzetközi irodalomban ugyan gyakran találkozunk, ezeket azonban többségükben lokális interpolálásra és lokális simításra alkalmazzák.

A jelen kutatás alapját a refrakciós szeizmikus és geoelektromos mérési adatok együttes inverzióját megvalósító módszerek és programok adják. Maximálisan 5 különböző adatrendszer együttes invertálása valósítható meg a Geofizikai Tanszéken a fenti programokkal: szeizmikus refrakció longitudinális (P) és horizontálisan poláros transzverzális (SH) hullámok első beérkezési időadatai esetére, egyenáramú geoelektromos látszólagos fajlagos ellenállások schlumberger, dipol-dipol és pole-pole elektróda elrendezésekre. Az

együttes inverzióban a geoelektromos direkt feladatokat 1D-s közelítésben, a refrakciós direkt feladatokat közelítő 2D-s sugárútkövetéses saját fejlesztésű eljárással („ray-tracing”) oldottuk meg. A megvalósított geoelektromos 1.5D és szeizmikus refrakciós inverziós eljárások külön-külön és együttesen is alkalmazásra kerültek, terepi adatokon bizonyították használhatóságukat, alkalmasságukat.

A módszerek alkalmazása során eddig több kérdés is felmerült, amelyek megoldásra vártak.

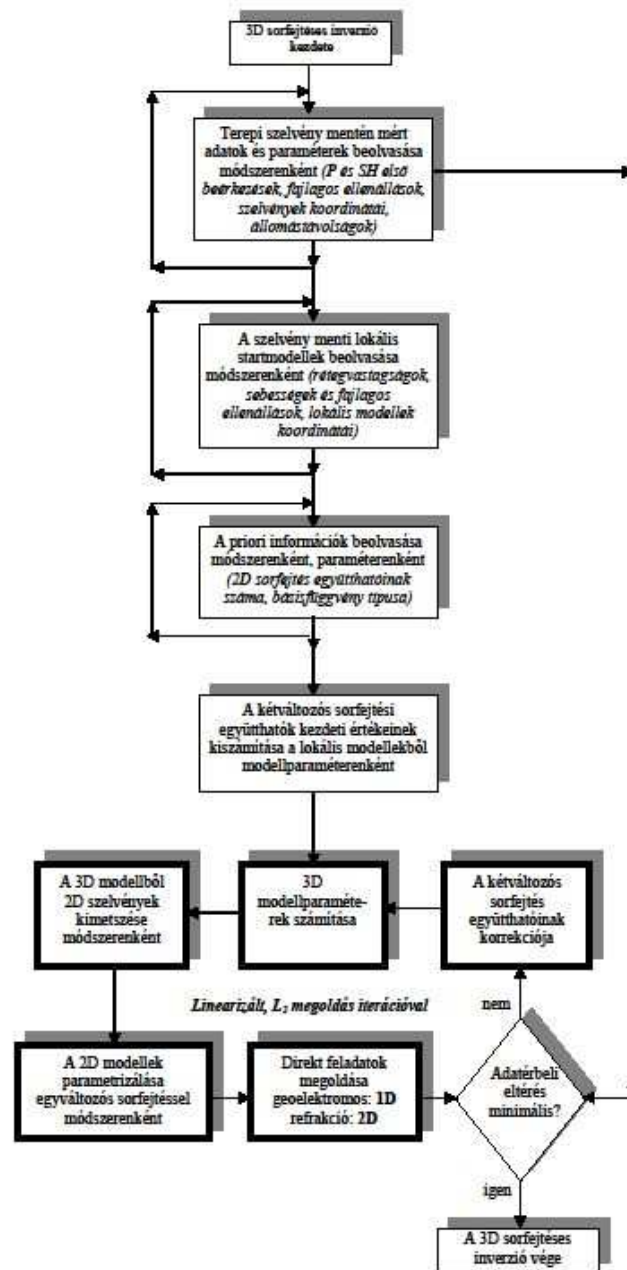
- Mivel a felszínközeli földtani szerkezetek sohasem tekinthetők sem egydimenziósnak sem kétdimenziósnak, a valós 3D inverz feladatok megoldása azonban nagy számítógépi teljesítményt és számítási időt igényelnek - sokszor a megoldások bizonytalansága mellett – megvizsgálandó milyen gyorsabb, de még elegendően pontos módszerek fejleszthetők ki.
- A fenti célok eléréséhez közelítő megoldásokra van szükség elsősorban a direkt feladatok megoldása során - amelyek szükségszerűen különböző hibákkal terheltek. Ezen hibák ismerete nagyon fontos az inverzió szempontjából, amely szisztematikus vizsgálatokkal deríthetők fel.
- A sorfejtéses inverziók egyik sokat említett kérdése a sorok optimális hosszának - azaz az optimális együtthatószám - meghatározásának módja.
- Annak tisztázása, hogy valóságosnál kisebb dimenziószámú közelítések milyen modellek esetében milyen hibával terheltek.
- Annak megvizsgálása, hogy a különböző geofizikai módszerek együttes (joint) inverzióban való összekapcsolása során a módszerek milyen súllyal vesznek részt az együttes eredmény kialakításában.

A kutatómunka során a fenti kérdésekre kerestünk megoldásokat.

2.) Sorfejtéses közelítő 3D együttes inverziós algoritmus kidolgoása:

Az algoritmus a már korábban kifejlesztett és a gyakorlat próbáját kiállt refrakciós 2D és egyenáramú geoelektromos 1.5D együttes inverz feladatok megoldásán alapul, azok kétváltozós megoldásának is tekinthető.

A 3D rétegzett földtani szerkezetek fizikai és geometriai paramétereit az eddigi egyváltozós helyett kétváltozós függvénysorokkal közelítjük. Mind a fizikai, mind a geometriai paraméterekre érvényes feltétel, hogy laterálisan folytonosan és lassan változzanak. Vertikális értelemben a fizikai paraméterek csak a réteghatárokon változnak ugrásszerűen. Az inverzióban, illetve együttes inverzióban e kétváltozós függvénysorok együtthatóit számítjuk (becsüljük) linearizált inverziós algoritmus segítségével az L_2 norma alkalmazásával. Az algoritmus folyamatábrája az 1. ábrán látható.



Az algoritmus működése röviden a következő:

Adatok beolvasása: a terepi mérési adatokat szelvény mentén gyűjtjük. Ezzel alkalmazkodunk a felszín közeli kutatási feladatok megoldása során megszokott és olcsóbb szelvény szerinti mérések gyakorlatához (pl.: multielektrodás geoelektromos, valamint vonal menti szeizmikus refrakciós mérések). A szelvények iránya tetszőleges lehet, az adatállományok formátuma megegyezik a 1.5D illetve 2D inverziós algoritmusok alkalmazásánál.

Az inverzióhoz szükséges lokális startmodelleket szintén szelvény menti értelemben olvassuk be az algoritmusunkba. Ezen adatállományok formátuma is megegyezik a 1.5D illetve 2D inverziós algoritmusok startmodell adatállományainál alkalmazottakkal.

Az inverzióhoz szükséges további adatok beolvasása. A leglényegesebbek: minden modellparaméterre vonatkozóan a sorfejtés bázisfüggvényének típusa (jelenleg csak Fourier), valamint a sorfejtés hossza mindkét koordináta szerint (jelenleg azonos hossz mindkét irányban)

Az inverzió előkészítéseként kiszámítjuk a beolvasott lokális modellek koordinátáit a szelvények kezdő és végpontjainak koordinátáiból, illetve a lokális modellek szelvény menti távolságaiból. A lokális modellek valamennyi fizikai és geometriai paraméterére nézve a megadott elemszámú kétváltozós sorba fejtett bázis függvény (Fourier) együtthatóit számítjuk ki, amelyek a linearizált inverz feladat iteratív úton korrigálandó „ismeretlenjei” lesznek.

Az inverz feladat megoldása során valamennyi iterációban a kétváltozós sorokkal a lokális modellek koordinátáin előállítjuk az aktuális fizikai és geometriai paramétereinek értékeit a mérések szelvényvonalában, majd ezekre egy-egy egyváltozós Fourier sort illesztünk maximális elemszámmal, amely hibátlan illesztést eredményez. Ezzel a második „segéd” sorfejtéssel előállítjuk a modellparaméterek szelvény menti folytonos egyváltozós függvényét, amely függvényre a már korábban az 1.5D illetve 2D inverziós módszerek számára kifejlesztett direkt feladat megoldások közvetlenül illeszkednek.

A kétváltozós sorfejtés együtthatóinak számítása (becslése) a már megszokott algoritmus szerint történik. Az iterációt addig folytatjuk, amíg az adattérbeli relatív távolság, valamint a fizikai paraméterek becslési hibája minimálissá nem válik.

Az *inverzió eredményeként* a kétváltozós sorfejtés becsült együtthatóit kapjuk, amelyek alkalmazásával a mérések által lefedett területen bárhol előállíthatók a lokális modell paraméterek. Az eredményeket grafikusán megfelelő diszkretizálást követően akár tetszőleges vertikális szelvény mentén, akár térképszerűen ábrázolhatjuk.

A fent ismertetett közelítő 3D együttes inverziós algoritmus *számítógépi program kódját Fortran 77 nyelven* készítettük. A kód alapját a már korábbi kutatások során megírt – közelítőleg 12000 soros - 1.5D illetve 2D együttes inverziós Fortran kód szolgáltatta. Az eredeti programból számos rutint változtatás nélkül átvettünk (pl. adatbeolvasó rutinok, közvetett differenciahányadost képző speciális rutinok, sorfejtési együtthatókból való ray-tracing, geoelektromos direkt feladatmegoldások, stb.), egy részüket átírtuk, valamint újakat írtunk. Végül valamennyit egy új főprogramba illesztettük. Ezáltal a korábbi 1.5D illetve 2D együttes inverziós programok szinte valamennyi szolgáltatását átvittük az új programba (kivéve a modellparaméterenkénti bázisfüggvény választásának lehetőségét).

A programban lévő hibákat, a meghosszabbított kutatási idő ellenére sem sikerült mind kijavítani, *ezért közölhető számítási eredményeket nem tudunk egyelőre bemutatni*. A munka természetesen folytatódik, és amint publikálható eredményre jutunk abban az OTKA kutatás számát feltüntetjük.

A közelítő 3D együttes inverziós módszer *számítási időszükséglete várhatóan csak kissé fog növekedni* a szelvény menti 1.5D illetve 2D inverz feladatok megoldásához szükséges időkhöz képest – azonos számú ismeretlent (sorfejtési együtthatók) és azonos számú mérési adatot alapul véve. *A bemutatott módszer három különböző elektróda konfigurációban mért geoelektromos és két hullámtípussal mért refrakciós időadatok együttes inverzióját képes megvalósítani.*

A relatív gyors számítási időt az teszi lehetővé, hogy a 3D szerkezeteken a geoelektromos direkt feladat megoldás csupán lokálisan 1D, továbbá a refrakciós direkt feladat közelítő 2D megoldást szolgáltat.

A kutatás során az algoritmus illetőleg programfejlesztéssel párhuzamosan kutatásokat végeztünk abból a célból, hogy a 3D közelítő együttes inverzióban részvevő módszerek milyen feltételekkel alkalmazhatóak közelítésként, illetve az alkalmazott közelítések, milyen várható pontatlanságokat okozhatnak az eredményekben. E területen elért eredmények – mivel mind publikálásra kerültek – röviden összefoglalva a következők:

3.) A refrakciós sorfejtéses kinematikai inverzió során elért eredmények

A refrakciós kinematikai inverzió során olyan gyors saját fejlesztésű direkt feladat megoldást (ray-tracing) alkalmazunk, amelyik kizárólag csak a direkt és refraktált hullámakat veszi figyelembe, az ettől eltérő úton terjedőket nem. Ezért a modellek leképezése sem lehet megfelelően pontos. Különböző változékonyságú modelleken véges differenciás (FD Vidale) módszerrel előállított zajos szintetikus adatok felhasználásával elvégzett szisztematikus vizsgálatokkal kimutattuk, hogy még viszonylag gyorsan változó modellparaméterek esetén is *a gyakorlat szempontjából elfogadható pontosságú eredményeket kaptunk a közelítő direkt feladat megoldás (ray-tracing) alkalmazásával.* Az itt szerzett tapasztalatok, valamint a geoelektromos 2D inverz feladat megoldásának eredményei alapján egy fejlesztés indult el (egy készülő PhD dolgozat keretében) amely során a közelítő ray-tracing modult egy FD modullal tervezzük kiváltani (Paripás N., Ormos T. EAGE Near Surface konferencia, Zürich 2010)

A refrakciós kinematikai inverz feladat - tudomásunk szerint különlegességként – **egyszerre több** változó sebességű és vastagságú réteg paramétereinek becslésére alkalmas. Ez a lehetőség azonban a becslés bizonytalanságához (hasonlóan az ekvivalenciához) is vezet, amely feloldását az együttes inverziótól is várhatjuk. A jelen kutatás során megvizsgáltuk, hogyan csökkenthető ez a bizonytalanság, amely során arra az eredményre jutottunk, hogy a modellparaméterek eltérő bázisfüggvények szerinti sorbafejtése, illetőleg eltérő hosszúságú sorok alkalmazásával ez a cél elérhető. (Paripás ,N., Ormos T. MicroCAD konferencia, Miskolc, 2011.) *Az eredmények azt valószínűsítik, hogy a rendelkezésre álló gyors ray-tracing algoritmus a 3D problémák megoldásakor is megfelelő pontossággal alkalmazható lesz, laterálisan nem túl gyorsan változó földtani szerkezetek esetén.*

4.) A geoelektromos sorfejtés inverzió fejlesztésében elért eredmények

A geoelektromos inverziós módszer fejlesztése során sikerrel építettünk be egy 3D véges differenciás algoritmust inverziós programunkba, amelyet 2D szintetikus és terei adatok feldolgozásában sikerrel alkalmaztunk. A megvalósított algoritmusban az iterációk kezdetén 1D közelítést megvalósító direkt feladat megoldást alkalmaztunk (1.5D inverzió), majd a megoldás közelében 2D feladat megoldásra (FD módszer) váltottunk. *Ezzel a kombinált eljárással jelentősen megnőtt a leképezés pontossága, és az FD feladat megoldás jelentős számításigénye nem növelte irreális mértékben az inverz feladat megoldás összes idejét, valamint megteremtettük a valódi 2D direkt feladat megoldás lehetőségét is. E kombinált módszer tette lehetővé egy módszer kidolgozását, amellyel az együtthatók számának optimumát tudjuk megbecsülni.* Ezen eredményekről több konferencián, valamint referált folyóiratban számoltunk be. (Gyulai, Á., Ormos T., Dobróka M. Journal of Applied Geophysics 2010. Várható impakt faktor 1.294. Az eredmények iránti érdeklődést mutatja, hogy folyóirat oldaláról legtöbbször letöltött cikkek rangsorát immár negyedik hónapja vezeti 2011. március 8-ig.) (2. ábra)

The screenshot shows the Elsevier website for the Journal of Applied Geophysics. The page features a navigation bar with 'Home', 'Products', 'User Resources', 'About Us', 'Support & Contact', and 'Elsevier Websites'. Below the navigation bar, there is a search bar and a 'Browse Journals' section. The main content area displays the journal's cover, a description, and a prominent badge indicating an impact factor of 1.294, ranked 4th in Mining & Mineral Processing. A list of recent articles is provided, including titles such as 'A quick 2-D geoelectrical inversion method using series expansion' and 'Traveltime tomography of crosshole radar data without ray tracing'. The right sidebar contains additional information, including the editorial board, readers, authors, and librarians.

5.) Az együttes inverzió fejlesztésében elért eredmények

Az együttes inverzió során az inverzióba bevont különböző módszerek eltérő sajátosságokkal rendelkeznek. Ezért célszerű e módszerek között különbséget tenni, annak érdekében, hogy a végeredményhez a módszerek különbözőképpen járuljanak hozzá az adott modellen megbízhatóbb pontosabb módszer nagyobb mértékben a kevésbé pontos pedig kisebb mértékben. Az eddigi együttes (joint) inverziós algoritmusokban - jobb híján – valamennyi módszer azonos súllyal vett részt az eredmény kialakításában. Egy másik kutatás során kidolgozott „automatikus” súlyozási módszert alkalmaztunk, építettünk be a sorfejtéses *inverz feladatot megoldó programunkba. A geoelektromos együttes inverz feladat megoldása (egymásra merőleges irányú elektróda elrendezések mellett mért VESZ adatokra) során alkalmazott súlyozással arra az eredményre jutottunk, hogy ennek a módszernek az alkalmazása eredményezi a legkisebb hibájú és legmegbízhatóbb paraméterbecslést.*

Az elért eredményeket nemzetközi konferenciákon ismertettük, *az elkészült publikáció bíráló alatt áll az Acta Geophysica and Geodaetica Hungarica folyóiratnál. (Várható impakt faktor 0.22)*

6.) Az inverz feladatok gyakorlati alkalmazásai

A kutatásfejlesztéssel párhuzamosan a kifejlesztett módszereket terepi adatokon is alkalmaztuk. Erre a célra más célú alkalmazott kutatási feladatok megoldása során nyert adatokat, vagy kifejezetten jelen kutatás céljára végzett mérésekből (pl. 2D refrakció mérések P és SH hullámokkal) származókat használtunk fel. Ezen mérési eredmények nagy részét az eddigi publikációinkban már fel is használtuk. Egy másik alkalmazott (bányabeli) kutatási feladat során elvégzett geoelektromos dipole-dipole mérés eredményeit felhasználva a vizsgált terület valódi 2D fajlagos eloszlását térképét állítottuk elő. *Az erről szóló előadásunk (Ormos,T, Gyulai Á., Dobróka,M. EAGE Near Surface konferencia 2008 Krakow) meghívást nyert az amerikai SAGEEP (Forth Worth, Texas 2009) konferencia „Best of EAGE-NSG” szekciójába.*

7.) A kutatás anyagi feltételei

A kutatáshoz valamennyi szükséges feltétel (eszköz, műszer, szoftver) rendelkezésre állt, amelyek szinten tartására illetőleg kismértékű fejlesztésére fordítottuk az OTKA által beruházásra rendelkezésre bocsájtott pénzkeretet. A kutatási eredmények első megismertetésének fórumain a nemzetközi konferenciákon illetve impakt faktoros folyóiratban jelen OTKA kutatás során rendelkezésre állt források nélkül nem tudunk volna megjelenni.

A kutatás futamideje során kettő ízben kértünk és kaptunk az eredeti pénzügyi tervhez képesti módosítást. Mindkét esetben költség rovaton belüli átcsoportosításra került sor: egyszer konferencia részvétel érdekében, másodszer pedig egy terepi műszer előre tervezett átalakításának/kiegészítésének módosítása volt, amelyet az időközben tönkrement kiegészítendő terepi műszer helyett más forrásból vásárolt ugyanolyan célú terepi műszer kiegészítésre alkalmaztunk.

Köszönetnyilvánítás

A kutatásban résztvevők nevében ezúton mondok köszönetet az OTKA zsűrijének a pályázat pozitív elbírálásáért, valamint az OTKA iroda munkatársainak a projekt végrehajtása során nyújtott támogatásukért.

Miskolc, 2011. március 31.



Dr. Ormos Tamás

vezető kutató

Miskolci Egyetem

Geofizikai és Térinformatikai Intézet

Az OTKA K62416 témára való hivatkozással megjelent publikációk

(A konferenciák megjelent anyagai legalább négyoldalas konferenciacikkek)

Gyulai, Á., Ormos, T., Dobróka, M., Kavanda, R.: *The Strategy of Joint Inversion using Function Series*, EAGE Near Surface, Extended Abstracts, P024, Istanbul 3-5.09.2007.

Ormos, T., Dobróka, M., Daragó, A.: *Joint Interpretation of P and SH Refraction Data*, EAGE Near Surface, Extended Abstracts, P021, Istanbul 3-5.09.2007

Dobróka, M., Szabó, N., Ormos, T., Kiss, B., Tóth, J., Szabó, I.: *Interval Inversion of Borehole Geophysical Data for Surveying Multimineral Rocks*, “Near Surface” 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Krakow, 15-17. September 2008. P11.

Ormos, T., Gyulai, Á., Dobróka, M.: *In-mine Geoelectric Methods for detection of Tectonic Disturbances of Coal Seams*, “Near Surface” 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Krakow, 15-17. September 2008. P62.

Ormos, T., Gyulai, Á., Dobróka, M., Drahos, D.: *2D Series Expansion Based Geoelectric Inversion Using Optimized Weights*, EAGE 70th Conference and Exhibition. Rome, 09-12 June 2008. P307.

Ormos, T., Gyulai, Á., Dobróka, M., Sasvári, T., Zelenak, S.: *Detection of Tectonic Faults Using In-mine Geoelectric Method*, EAGE 70th Conference and Exhibition. Rome, 09-12 June 2008. P213.

Ormos, T., Gyulai, Á., Dobróka, M.: *In-mine Geoelectric Methods for detection of Tectonic Disturbances of Coal Seams*, 22nd Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), Fort Worth, Texas, USA 29. March-02 Apr. 2009. “Best of NSG”,

Gyulai, Á., Ormos, T., Dobróka, M.: *A quick 2-D geoelectric inversion method using series expansion*, Journal of Applied Geophysics, 72. 232-241., 2010.

Gyulai, Á., Ormos, T., Dobróka, M.: *2-D földtani szerkezetek vizsgálata új geoelektromos inverziós módszerrel*, A Miskolci Egyetem Közleményei. 2010. ISSN 1417-5398 pp. 141-154.

Paripás, N.A.: *Examination of a refraction inverse problem on different geological models*, XXIV. MicroCAD International Scientific Conference 18-20. March 2010. Proceedings pp. 13-18. ISBN 978-963-661-907-7,

Paripás, N.A.: *Solution of a refraction inverse problem using field data measured in the Telkibánya region*. Doktoranduszok nemzetközi fóruma, Miskolci Egyetem 2010.

Paripás, N., Ormos, T.: *Investigations on Kinematic Refraction Inversion at Different Geological Models*, 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics , Zürich, 2010

Drahos, D., Gyulai, Á., Ormos, T., Dobróka, M.: *Two Dimensional Series Based Geoelectric Inversion Using Optimized Weights (bírálat alatt)*, Acta Geodaetica and Geophysica Hungarica, 2011

Gyulai, Á., Ormos, T., Dobróka, M.: *Sorfejtéses Inverzió V. Gyors 2-D geoelektromos inverziós módszer*, Magyar Geofizika, 2011

Paripás, N., Ormos, T.: *Investigating the problem of Equivalence in Kinematic Refraction Inversion*, XXV. MicroCAD International Scientific Conference 30-31. March 2011. Proceedings B, pp. 29-34. ISBN 978-963-661-9558,