

Refrakciós SH hullámbeérkezések sorfejtéses inverziója

PARIPÁS ANIKÓ NOÉMI[@], ORMOS TAMÁS

Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

[@]E-mail: gfpan@uni-miskolc.hu

A refrakciós időadatok inverziójára a gyakorlatban többféle módszer ismeretes. Jelen dolgozatban a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kidolgozott refrakciós inverziós eljárást mutatjuk be, melynek során a vizsgált földtani szerkezetek számítandó paramétereit megfelelően választott folytonos bázisfüggvények szerinti sorfejtés alkalmazásával becsüljük. Refrakciós módszer nem csupán a longitudinális hullámok esetén (robbantás, kalapácsütés) alkalmazható, hanem horizontálisan poláros (SH) transzverzális hullámok keltésével is. A méréshez megfelelően választott poláros hullámforrás mellett szintén megfelelően telepített horizontális geofonok is szükségesek, melyek elfogadható zajszint mellett képesek a transzverzális hullámok detektálására. Jelen dolgozatban összefoglaljuk a refrakciós sorfejtéses inverzió terén elért legújabb eredményeket, valamint a sorfejtéses inverziós módszer alkalmazását mutatjuk be terepi mérések horizontálisan poláros transzverzális (SH) hullámbeérkezéseinek példáján.

Paripás, A. N., Ormos, T.: Series expansion based inversion of refracted SH wave first arrivals

Several methods are known in practice for the inversion of refraction seismic time data. The paper presents a refraction inversion algorithm developed in the Department of Geophysics, University of Miskolc. That estimates the parameters of the investigated geological structure with series expansion using properly chosen basis functions. Refraction method can be used not only in case of longitudinal waves (explosion, hammer strike) but in case of horizontally polarized (SH) transversal waves, too. For such a measurement besides the adequately chosen wave source, properly installed horizontal geophones are also required which are able to detect transversal waves at acceptable levels of noise. The paper summarizes the latest results of series expansion based refraction inversion method and presents its application by an example of field measurements observing horizontally polarized transversal (SH) wave arrivals.

Beérkezett: 2012. február 27.; *elfogadva:* 2012. március 1.

Bevezetés

Felszín közeli kutatási célokra széles körben elterjedt módszer a refrakciós első beérkezések detektálásán alapuló szeizmikus eljárás. Az ilyen módon mért adatok kiértékelésére a legnagyobb népszerűségnek az inverziós technikák örvendenek. Az első beérkezések 2D kinematikus refrakciós inverziójában ma a tomográfiai módszereket elterjedten alkalmazzák, melyek során a földtani szerkezetet megfelelően megválasztott rácshálózattal diszkrétizálják, s a paramétereket a rácspontokban számítják (Palmer 2010, Stefani 1995, Törös 2006, Zhang, Toksöz 1998, Zhu et al. 1992). A refrakciós tomográfiai módszerek azonban nem képesek a földtani modellek geometriai információit felhasználni, ezért rétegzett szerkezetek esetén – főként, ha a rétegek egyértelműen, élesen válnak el egymástól – sokszor túl nagy

gépigényű számításokat igényelnek kevésbé megbízható eredmények mellett.

A refrakciós kiértékelő módszerek másik klasszikus csoportját olyan eljárások alkotják, melyek a földtani szerkezetet rétegekkel közelítik (Palmer 1981, Polcz 1993). A laterálisan változó földtani szerkezetek leírását többféle módszerrel is megoldották (Lankston 1989, Xie et al. 1997). E klasszikus eljárások közös jellemzője, hogy amíg a réteghatárok meghatározása kétdimenziós, addig a terjedési sebességek laterális változásai csak konstans sebességgel jellemzett szelvényszakaszok formájában állíthatók elő. A módszerek alkalmazásának előfeltétele az, hogy a szelvény mentén folytonosan álljanak rendelkezésünkre első beérkezések. E feltételt a fedőágak mérésével tudjuk teljesíteni, amihez azonban – különösen több réteg esetén – a forrásokat a szelvény mentén gyakran nagyon sűrűn kell telepítenünk.

A dolgozatban bemutatott és vizsgált refrakciós sorfejtéses inverziós módszerrel mind a réteghatárok lefutását, mind a rétegbeli hullámterjedési sebességek laterális változását becsülni lehet – többretegű modell esetében is –, valamint akkor is, ha a refrakciós beérkezések menetidő függvényei „szakadásosak”. A módszer alkalmazása során a modell paramétereit (rétegvastagságok, sebességek) megfelelően megválasztott bázisfüggvények szerinti sorfejtéssel adjuk meg (Dobróka 1994). A sorfejtéssel – amely egyben a modell diszkretizációját is jelenti – a modell fizikai és geometriai jellemzői helyett a sorfejtési együtthatók lesznek a meghatározandó ismeretlenek. A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén korábbi geoelektromos, GP-, mélyfúrési és szeizmikus mérések inverziója során szerzett tapasztalatok azt mutatják, hogy kétdimenziós esetben megfelelő felbontású és megbízhatóságú eredmények érhetők el a sorfejtéses inverziós módszerrel (Dobróka et al. 2009, Dobróka, Szabó 2011, Gyulai et al. 2010, Ormos, Dobróka 2007, Turai et al. 2010).

A jelen dolgozatban a módszer alkalmazását longitudinális és horizontálisan poláros transzverzális (SH) hullámbeérkezések példáján mutatjuk be. Ennek gyakorlati jelentősége a longitudinális és transzverzális hullámsebességek arányának a közegre vonatkoztatott meghatározása mellett a rugalmassági állandók megadásában rejlik. E közetfizikai jellemzők ismerete a hidrogeológiai, mérnök-geofizikai, geotechnikai gyakorlatban jelentősek többek között a közetek állékonyságának, terhelhetőségének megállapításában, felszín közeli szerkezeti tulajdonságok meghatározásában, a felszín alatti vízszint kimutatásában, valamint földrengésveszélyes területek minősítésében (Brocher 2005, Tezcan et al. 2006, Völgyesi 2002).

A 2D refrakciós direktfeladat

Az inverz feladat megoldásához első lépésben a direktfeladat megoldását kell megadnunk. A refrakciós időadatok inverzióját elsőként Bernabini és szerzőtársai (1988) oldották meg függvényközelítéssel úgy, hogy a laterálisan állandó sebességgel jellemzett többretegű szerkezet refraktáló felületeit negyedfokú hatványfüggvénnyel közelítették (diszkretizálták), az együtthatók inverziós becslésével oldották meg az inverz feladatot. Később többen is alkalmazták a sorfejtéses diszkretizációt refrakciós kinematikai inverzió során (Zanzi 1990), együttes inverzió esetében is (de Nardis et al. 2005). Azonban ahhoz, hogy a természetben előforduló rétegzett földtani szerkezeteket képesek legyünk a lehető legmegbízhatóbban leírni, olyan inverziós módszert szükséges létrehozni, mellyel a rétegvastagságok és rétegbeli terjedési sebességek laterális változásai egyszerre, ugyanazon algoritmusban „kezelhetők”. A rétegvastagságok laterális változásainak sorfejtéssel történő leírását elsőként Dobróka (1994) alkalmazta. A sorfejtéses eljárást szeizmikus adatrendszerekre Ormos (2002) adaptálta a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén, mely lehetővé teszi, hogy a modell paramétereit a tulajdonságainak leginkább

megfelelő – akár különböző – függvénytípusok szerinti sorfejtéssel közelíthessük az inverziós eljárás során.

A direktfeladat a refrakció terminológiájában az első beérkezések kiszámítását jelenti a forrás és a geofonok távolságának, valamint a modellparaméterek függvényében (Ormos, Dobróka 2007). A feladat megoldásakor feltételezzük, hogy a kutatandó szerkezet rétegekkel közelíthető. Ennek megoldására a 2D *ray tracing* (sugárkövetéses) módszert dolgoztak ki, mely az alábbi feladat megoldását takarja:

$$T_i(x) = T_i(x_s, z_s, x_g, z_g, \mathbf{p}(x)), \quad (1)$$

ahol x_s és z_s a forrás, x_g és z_g a geofon szelvény menti (x) és vertikális irányú (z) koordinátáit, $\mathbf{p}(x)$ pedig a modellparaméterek vektorát jelenti, amely modellparamétereket a sorfejtési együtthatók kiszámítása útján adjuk meg:

$$p_i(x) = \sum_{j=1}^{J_i} C_{ij} \cdot \Psi_{ij}(x), \quad (2)$$

ahol i a paraméterszámot, J_i az i -ik geofizikai paraméter sorfejtéséhez szükséges tagok számát, C_{ij} az i -ik paraméter j -ik sorfejtési együtthatóját, valamint $\Psi_{ij}(x)$ az i -ik paraméter j -ik bázisfüggvényét jelöli. A C_{ij} sorfejtési együtthatók a szelvény menti x távolságtól függetlenek, így értékük az inverziós módszerrel közelíthető.

A direktfeladat megoldásakor a sugárutkövetés (*ray tracing*) módszerét alkalmaztuk, amelynek során a sorfejtési együtthatókból kiindulva számítjuk a hullám beérkezési idejét. Az algoritmus közelítéseket használ, amelyek a direktfeladat megoldását egyszerűsítik, és a számítási időt jelentősen csökkentik. Feltételezzük a nagyfrekvenciás esetet (sugár közelítés), melynek folytán a modell paramétereit a hullámhosszhoz viszonyítva lassan változhatnak. Így a korlátozott felbontóképesség miatt a réteghatárok görbületi sugarainak nagyobbak kell lenniük a felület mélységénél. Továbbá csupán azokat a hullámokat vesszük figyelembe a számítás során, melyek a réteghatárok mentén terjednek (fejhullámok), ezzel elhanyagoljuk a „bemerülési” effektust. Végezetül a rétegeken belüli sugárutakat egyenesekkel közelítjük, változó sebesség mellett is. Ez a közelítés annál jobb, minél kisebb mértékű a laterális sebességváltozás és minél nagyobb a rétegek közti sebességkontraszt. A jelentős sebességkontraszt vélelmezése gyakorlati szempontból egyébként is lényeges, hiszen kis kontrasztok esetében csak nagyon nagy forrástávolságnál jelentkezne a refraktált hullámok első beérkezésekként (Ormos, Daragó 2005, Ormos, Dobróka 2007).

A fenti közelítésekkel leírt algoritmus gyors számítást eredményez, amely az inverz feladat megoldása során gyakorlati jelentőséggel bír. (Például 1500 mért adat és 40 ismeretlen esetén 100 iterációs lépést csupán néhány percig számít egy átlagos teljesítményű asztali számítógép.)

A 2D refrakciós inverz feladat megoldása

A direktfeladatból is következően az inverz feladat megoldását a C_{ij} sorfejtési együtthatók becslése jelenti. Az inverz

feladat klasszikus megoldását alkalmaztuk, melynek során a sorfejtési együtthatókból számított terjedési idők és a mérési adatok eltérésvektorának valamely normáját minimalizálva jutunk megoldásra. A felvázolt optimalizációs feladatot többféle módszerrel oldhatjuk meg.

A választott eljárás a linearizált L_2 norma szerinti optimalizálást valósítja meg, amelyet csillapított legkisebb négyzetek módszerének (LSQ) nevezünk. Az (1) egyenletben vázolt nemlineáris feladatot numerikusan (könnyebben) megoldható, közelítő lineáris egyenletrendszerre kell visszavezetni, melynek iteratív úton való megoldásával jutunk az eredményhez, azaz a sorfejtési együtthatók becsült értékeihez. Ahhoz, hogy megbízható eredményt kaphassunk, az inverz problémának túlhatározottnak kell lennie, azaz számottevően több mérési adat (beérkezési idő) szükséges, mint a meghatározandó ismeretlenek (sorfejtési együtthatók) száma. Ez a feltétel esetünkben általában mindig teljesül, hiszen a több száz mérési adat „áll szemben” a néhány-szor tíz meghatározandó együtthatóval (Ormos, Dobróka 2007).

Az iteratív megoldás eredményeként becsült sorfejtési együtthatókból a függvények folytonossága miatt a modell paraméterei – így a rétegvastagság- és rétegbeli terjedési sebességértékek – a szelvény mentén bárhol számíthatók. A linearizált csillapított legkisebb négyzetek módszerének megfelelő inverz feladat az alábbi lineáris egyenletrendszer megoldásához vezet:

$$\mathbf{c} = (\mathcal{G}^T \mathcal{G} + \lambda \mathcal{I})^{-1} \mathcal{G}^T \mathbf{t}, \quad (3)$$

ahol $\mathbf{c}$ az együtthatók (C_{ij} -ből átsorszámozással kapott) korrekció vektorát (annak az előző iterációhoz viszonyított korrekcióját), $\mathcal{G}$ a terjedési időknek a C_{ij} együtthatók szerinti parciális differenciálhányadosainak (Jacobi-) mátrixát, a λ skalár a csillapító faktort, $\mathcal{I}$ az egység mátrixot, $\mathbf{t}$ pedig a mért és a (becsült együtthatókból) számított első beérkezési idők különbségeinek vektorát jelöli.

A bemutatott refrakciós sorfejtéses inverz feladat megoldásának folyamatábráját az 1. ábra mutatja.

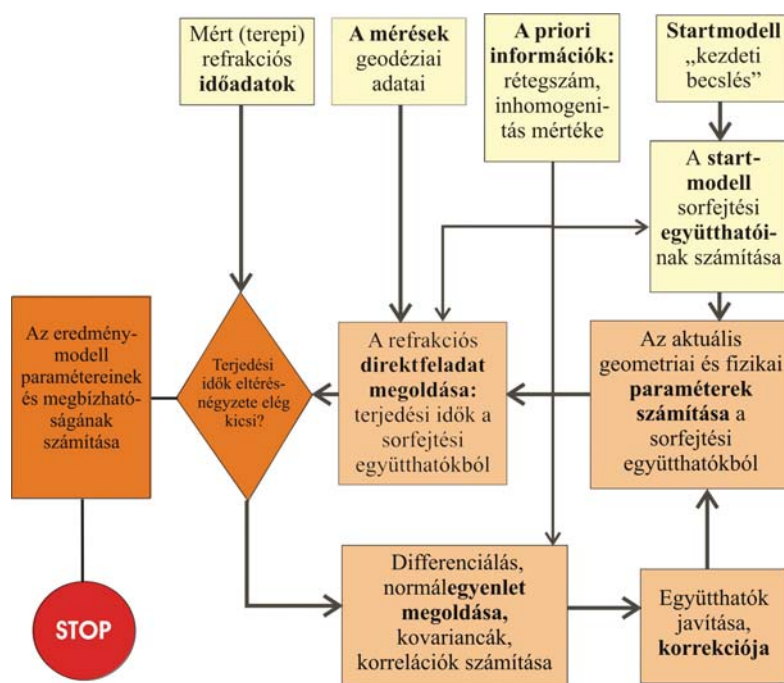
Az inverzió eredményeként előálló együtthatók kovarianciamátrixa is kiszámítható, mely lehetővé teszi a modellparaméterek megbízhatóságának – a közelítő lineáris hibaterjedési elv szerinti – megadását bárhol a szelvény mentén. Az inverzióval kapott eredményeket a gyakorlat számára szemléletesen a relatív adattérbeli eltéréssel (D) és (szintetikus adatok esetén) a relatív modelltérbeli eltéréssel (d) is minősíthetjük. A relatív adattérbeli eltérése a mért és az inverzió eredményeül kapott modellre számított időadatok eltéréseinek négyzetes középértékét értjük (Paripás, Ormos 2011a). Az inverzió eredményét akkor

fogadjuk el, ha ez az érték minimális. A módszer megfelelő működésének ellenőrzésére és vizsgálatára ismert modelleken mért (pl. analóg modellek) vagy számított (szintetikus) időadatokat alkalmazunk. Ezekben az esetekben lehetőségünk nyílik a valódi és a becsült modellparaméterek illeszkedését is vizsgálnunk a teljes modellen. A relatív modelltérbeli eltérésen a modellparaméter-eltérések négyzetes középértékét értjük lokálisan vagy a teljes szelvényre vonatkozóan (Paripás, Ormos 2011a). A modelltávolság értékének kiszámítása leginkább a többértelműség kérdéskörének vizsgálatakor volt hasznunkra.

A refrakciós sorfejtéses inverzió vizsgálatának újabb eredményei

A direktfeladat (*ray tracing*) megoldása során alkalmazott egyszerűsítéseknek és közelítéseknek az inverzió eredményére gyakorolt hatásának megismerése előfeltétele a gyakorlati alkalmazásnak. Ennek érdekében különböző modelleken számolt szintetikus futási idők felhasználásával vizsgáltuk az inverziós algoritmus működését.

A szintetikus időadatokat egy az általunk alkalmazott algoritmustól teljesen eltérő elven alapuló, az eikonalegyenlet véges differenciákkal való közelítését megvalósító eljárással számítottuk (Vidale 1988). E módszer a forrás és geofon közti valamennyi lehetséges hullámutat, valamint a diffrakciót is figyelembe veszi az elsőnek beérkező hullámok terjedési idejének számítása során. A felhasznált algoritmus a



1. ábra

Figure 1

A refrakciós sorfejtéses inverz feladat megoldásának folyamatábrája

The flow chart of the solution of series expansion based refraction inverse problem

ReflexW szeizmikus adatfeldolgozó programcsomag moduljaként (Sandmeier 2006) a ME Geofizikai Tanszéken rendelkezésre áll. Valamennyi szintetikus vizsgálatunk esetében ezt az utat követtük.

Megvizsgáltuk, hogy laterálisan különböző „változékonyságú” modellek hogyan képezhetők le a kifejlesztett refrakciós sorfejtéses inverziós algoritmussal. Ennek eredményeként megállapítottuk: amellett, hogy a szelvény szélein bizonytalanság tapasztalható – aminek oka az, hogy a szelvény széleihez közel eső szakaszokról a hullámterjedési törvények miatt nem kaphatunk refraktált beérkezéseket (Ormos, Dobróka 2007) –, a „laterálisan lassan” és folytonosan változó szerkezeteket pontosan és nagy megbízhatósággal képes leképezni a módszer (Paripás, Ormos 2012).

Olyan modellek esetében, amelyekben a modellparaméterek – a rétegvastagságok és/vagy a rétegbeli terjedési sebességek – laterálisan „gyorsan” vagy nagymértékben változékonyak, várakozásunknak megfelelően az inverzió kisebb pontossággal és megbízhatósággal képes a modellt visszaadni (Paripás, Ormos 2010). A módszert teszteltük háromréteges vetőt modellező földtani struktúra esetén is. Annak ellenére, hogy a sorfejtéses inverzió folytonos függvényekkel közelíti a modellparamétereket, és ezért törésszerű földtani szerkezetek leírására elvben nem alkalmazható, mégis a gyakorlat számára még éppen hasznosítható megoldásokra jutottunk (Paripás, Ormos 2010, Paripás, Ormos 2012).

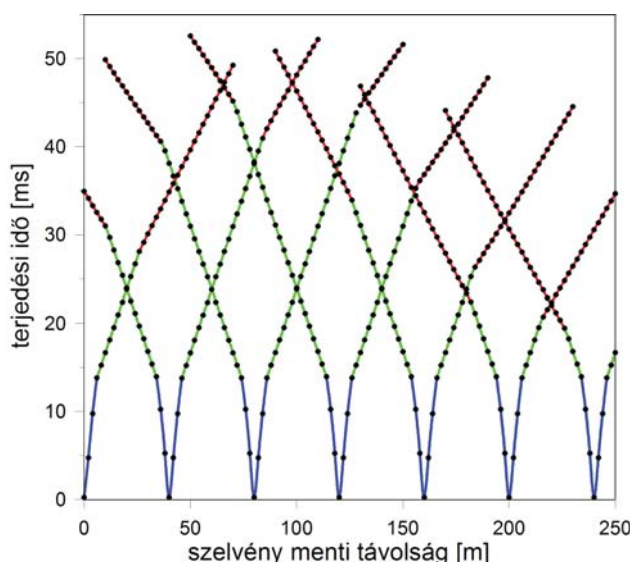
A sorfejtéses refrakciós inverziós algoritmussal egyszerre kettőnél több réteg paramétereinek egyidejű, egyazon eljárásban való meghatározására van lehetőség úgy, hogy valamennyi paraméter (rétegvastagság és sebesség) laterális változása megengedett. Ez a lehetőség a többértelműség kérdését vetette fel, amelyet korábban a mérések megterve-

zésének viszonylatában vizsgáltak (Ackermann et al. 1986, Palmer 2001). Ez a probléma azért nem gyakori a refrakciós kiértékelésben, mert a széles körben elterjedt, rétegekkel közelítő kiértékelési módszerekkel általában egyszerre csak kétréteges esetet (egy réteghatár jelenléte) értékelnek ki. Többértelmű földtani modell esetében kétréteges kiértékelések sorozatára vezetnek vissza a megoldást.

A többértelműségi problémát háromréteges modelleken vizsgáltuk, és azt találtuk, hogy pontosabb és megbízhatóbb eredményeket kapunk, ha egy réteg paramétereinek leírásakor eltérő diszkrétizálási paramétereket alkalmazunk (Paripás, Ormos 2011b). Amikor ugyanis a háromréteges szerkezet második rétegének vastagságát és rétegbeli terjedési sebességét különböző bázisfüggvény szerint fejtve sorba vagy jelentősen eltérő számú sorfejtési együtthatóval írtuk le, eredményeink pontosabbak és megbízhatóbbak lettek. Emellett a geoelektromos sorfejtéses inverzió vizsgálata során kifejlesztett módszer alkalmazása, az optimális együtthatószám meghatározása is szükséges (Gyulai et al. 2010, Paripás, Ormos 2011a, Paripás, Ormos 2012).

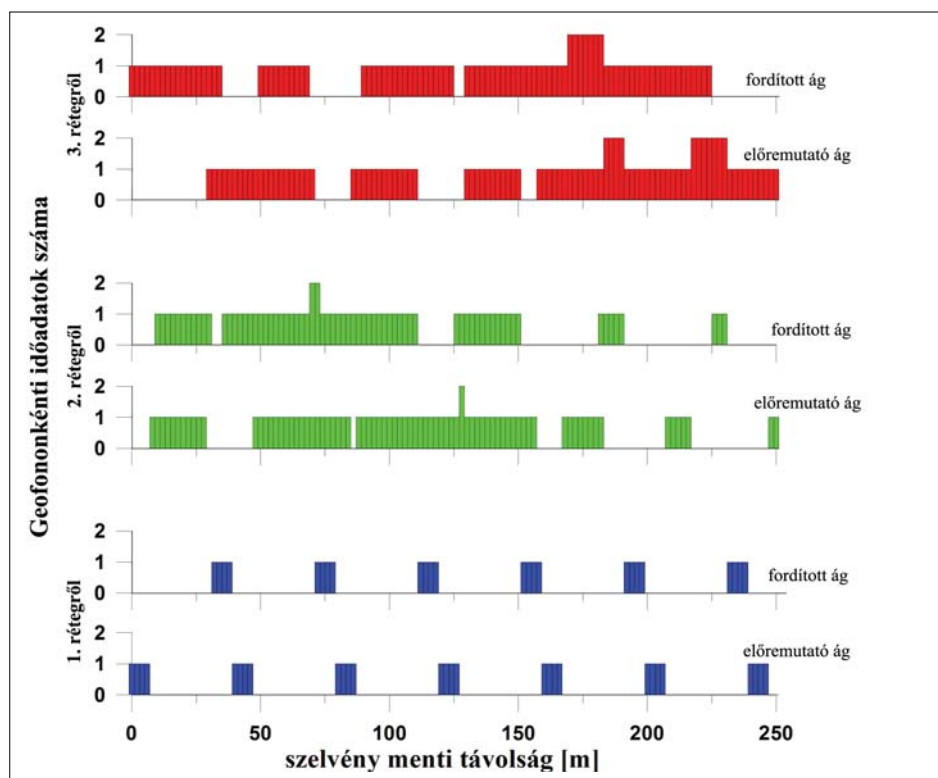
A sorfejtéses refrakciós módszer elvénél fogva egyben egyfajta interpolációs funkciót is ellát. A gyakorlatban elterjedt refrakciós kiértékelési módszerek többsége nem alkalmazható abban az esetben, amikor a mért menetidőfüggvények „szakadásosak”, azaz nem áll rendelkezésünkre első beérkezés folytonosan valamennyi rétegről a szelvény mentén. Ez főként többértelmű esetben fontos gyakorlati probléma, a közbenső rétegekre vonatkozóan. Ezt az esetet vizsgáltuk meg szintetikus adatok segítségével.

Egy laterálisan „lassan” változó háromréteges modellel választottunk (Paripás, Ormos 2010), amelyen 40 m-enként helyeztünk el összesen 7 hullámforrást, valamint 2 m-es közzel összesen 126 geofont. A számított szintetikus menetidőábrák ebben az esetben olyan rövidek, hogy azok „fedőágakat” nem alkotnak, azaz egyáltalán nem vagy csupán rövid szakaszokon fedik egymást (2. ábra). Szemléletesen is meggyőződhetünk erről, ha a felszínre vonatkozó lefedettséget ábrázoljuk; azaz az egyes réteghatárokhöz rendelt első beérkezések számát geofononként és rétegenként ábrázoljuk (3. ábra). Az előre mutató és a fordított ágakat külön-külön mutatjuk be. Jól látható, hogy adott rétegről származó egynél több beérkezésből geofononként kevésszer fordul elő, azaz fedőágak gyakorlatilag nincsenek a „mért” adatrendszerben. Ilyen adatokból ún. egyesített menetidőgörbe nem szerkeszthető, ezért a gyakorlatban széles körben elterjedt módszerek – hullámfrontok módszere, reciprok módszer, GRM-módszerek (Polcz 1993) – nem alkalmazhatók. A sorfejtéses inverziót az alábbi beállításokkal hajtottuk végre: a rétegvastagságokat 5 és 13 együtthatóból álló sorfejtéssel, míg a rétegbeli terjedési sebességeket 5 tagú sorokkal közelítettük, így 407 adat ismeretében 33 ismeretlen becslése volt szükséges. 100 iteráció után az átlagos becslési hiba 1,6%-nak adódott. Az eredményből (4. ábra) jól látszik, hogy ilyen hiányos adatrendszer esetében is jó eredményt kaptunk: $D = 0,8\%$ adatillesztési hibával és $d = 1,9\%$ relatív modelltávolsággal. Kétszer ilyen sűrűn telepített források esetében, amely a fedőágak tekintetében megfelelő



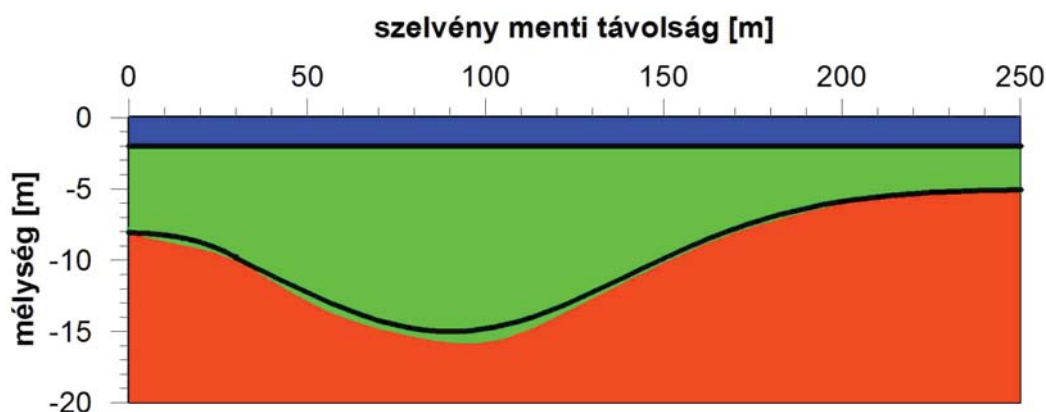
2. ábra Háromréteges szintetikus szerkezet menetidőgörbéi („fedőágak” hiánya)

Figure 2 Travel-time curves of the three-layered synthetic model (absence of coverage)



3. ábra | Az első beérkezések felszínre vonatkozó lefedettsége rétegenként és geofononként (1. réteg kék színnel, 2. réteg zöld színnel, 3. réteg piros színnel látható)

Figure 3 | The coverage of first arrivals with respect to the layers and geophone positions (1st layer in blue, 2nd layer in green, 3rd layer in red colour)



4. ábra | Az inverzió eredménye. (A célmodell réteghatárai fekete vonalakkal, az inverzió eredményeül kapott rétegek színekké ábrázolva láthatók)

Figure 4 | The result of the inversion. (The layer boundaries of the exact model are shown with black lines and the inversion result is presented in colours)

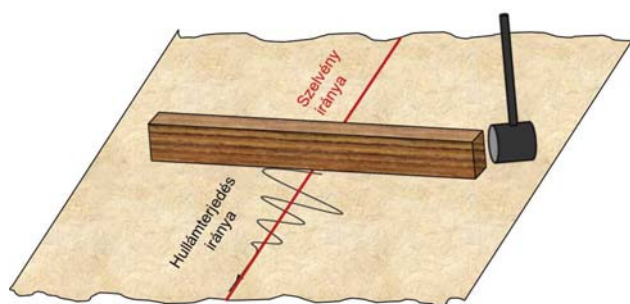
adatrendszer volt, az inverzió eredménye csak kissé volt jobb: $D = 0,8\%$, $d = 1,2\%$. (Paripás, Ormos 2012). A sorfejtéses refrakciós inverzió e tulajdonsága a mérések és kiértékelések gazdaságossága szempontjából jelentős.

Alkalmazás terepi SH mérések kiértékelésére

A fent bemutatott refrakciós inverziós módszert korábban többször sikeresen alkalmazták terepi adatok feldolgozására

is (Ormos, Daragó 2005, Paripás, Ormos 2011b). Az algoritmus alkalmas horizontálisan poláros transzverzális (SH) hullámok első beérkezéseinek kiértékelésére is. Jelen dolgozatban egy kísérleti szeizmikus mérés horizontálisan poláros transzverzális hullám beérkezéseinek feldolgozását és kiértékelését mutatjuk be.

A mérést a Miskolc-Tapolcán folyó Hejő patak mellett végeztük. A területen kis mélységben a felszínközeli laza üledékes homokos, agyagos, helyenként meszes kőzetek találhatók. Az SH hullámok első beérkezéseinek mérését és



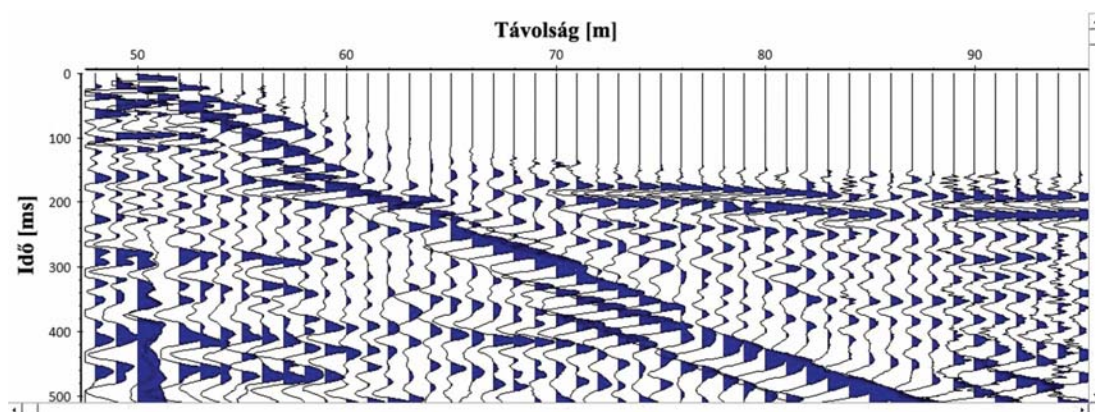
5. ábra | A terepen alkalmazott rezgőkeltetés és a keletkezett hullám terjedésének képe

Figure 5 | Wave generation and the propagating wave at the field measurement

kiértékelését az teszi lehetővé, hogy feltételezzük: a horizontálisan poláros hullámok a vertikálisan poláros hullámokkal ellentétben terjedés közben nem szenvednek kon-

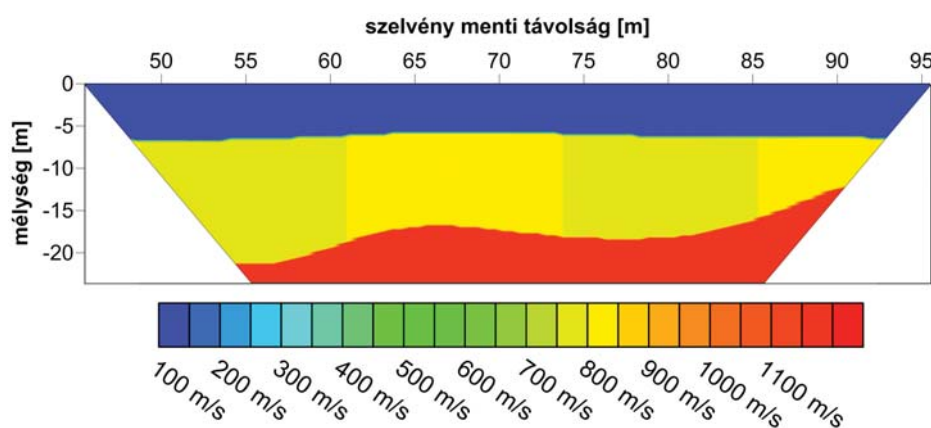
verziót, nem alakulnak át P hullámmá. Előbbi feltételezésünk természetesen közelítés, inhomogén közegekben – mint a vizsgált terület is – mindig fellép a hullámkonverzió, ami esetünkben zajként jelentkezik. A jel/zaj-viszony növelésére horizontálisan polarizált forrást és szenzorokat alkalmaztunk. Az SH hullámok keltését klasszikus módon a talajra szorított mintegy 2 m hosszú fagerenda végére mért kalapácsütésekkel oldottuk meg (Uyanik 2010) (5. ábra). Horizontális geofonként SM7 típusú 30 Hz-es szeizmometert alkalmaztunk. A szeizmogramok rögzítésére a Geofizikai Tanszék Summit II Plus 48 csatornás telemetrikus mérő-adatgyűjtő rendszere szolgált.

A kísérleti mérések paraméterei: szelvényhossz: 47 m, geofonköz: 1 m, rezgőkeltetés 5 méterenként. Mintavételi idő: 0,25 ms, felvételhossz: 500 ms, összegszám: 5. A mérés folyamán az erős szél és a közúti közlekedés következtében kedvezőtlen jel/zaj-viszonyon az összegzés sem javított számottevően nagyobb összegszám esetén sem. A mért szeizmogramokat a ReflexW programmal dolgoztuk fel és készítettük elő az első beérkezések kiolvasására. A feldolgozás



6. ábra | Terepen mért és feldolgozott szeizmogram képe

Figure 6 | Processed seismogram measured in field



7. ábra | A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kifejlesztett refrakciós sorfejtéses inverzióval kiértékelte, terepen mért adatrendszer

Figure 7 | The evaluation of field data with the refraction inversion method based on series expansion developed in the Dept. of Geophysics, University of Miskolc

során némitást, polaritásváltást, valamint AGC-t alkalmaztunk. Egy tipikus módon feldolgozott szeizmogram képe a 6. ábrán látható. Az első beérkezések kijelölését kézzel végeztük, a magas zajszint miatt az automatikus eljárás nem volt alkalmazható. Az így elkészült menetidőgörbék az indítási idő (*trigger*) 1–2 ms-os nagyságrendű hibái miatt még egy lépésben korrigáltuk, a továbbiakban az így kapott első beérkezésekkel dolgoztunk.

A mért adatokból a fent részletesen tárgyalt sorfejtéses inverziós módszerrel becsültük meg a modell paramétereit. Az inverz feladat megoldását többször is megismételtük, megkeresve az optimális sorfejtési hosszakat és rétegszámot. A legjobb megoldás – legkisebb adatillesztési és becslési hibák mellett – a 7. ábrán látható. Mind a laterálisan változó réteghatárokat és rétegbeli szeizmusos terjedési sebességeket trigonometrikus függvények sorfejtésével (Fourier-sorokkal) közelítettük. Az első és második réteg vastagságát leíró sorfejtés 5 illetve 7 együtthatóból állt, míg a szeizmusos sebességeket 5, 5, 3 tagú sorfejtéssel közelítettük, így a rendelkezésre álló 356 adatból 25 ismeretlent kellett meghatároznunk. A 7. ábrán is jól látható, hogy sebességek tekintetében a vizsgált szelvény laterális irányban nagyon kevésbé változik. Az ábrán a horizontálisan poláros transzverzális szeizmusos hullám terjedési sebességek láthatók, a jelmagyarázatban látható színskálával ábrázolva.

Az inverzió során 50 iterációt végeztük, az eredmény adatillesztési hibájaként (relatív adattérbeli eltérés) $D = 8,5\%$ adódott. Magyarázat erre a mért szelvény szélein jelentkező bizonytalanság, pontatlanság. A módszer a laterálisan lassan változó szerkezet esetén ahhoz viszonyítva, hogy a mérés zajjal terhelt, és az első beérkezések – horizontálisan poláros hullámbeérkezések lévén – nem voltak könnyen kijelölhetők, viszonylag nagy megbízhatóságú eredményt adott, főként a felsőbb rétegek paramétereinek esetén. A paraméterek tekintetében a felsőbb rétegek nagyobb pontossággal, az alsóbb rétegek kisebb pontossággal írhatók le.

Összegzés

A fenti vizsgálatok eredményeként elmondható, hogy a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kifejlesztett sorfejtéses refrakciós inverziós módszer megbízható eredményt ad laterálisan lassan változó földtani szerkezeteken mért SH hullámterjedési időadatok kiértékelése esetén is. Szintetikus megbízhatósági vizsgálatokkal a szerkezetek laterális változékonyságának korlátait mutattuk be; majd az ebben az esetben felmerülő többértelműség problémájára többféle módszert is javasoltunk. Emellett rámutattunk arra is, hogy a módszer akkor is kiválóan alkalmazható, amikor a hagyományos refrakciós kiértékelő módszerek esetében szükséges menetidőgörbék fedőágai egyáltalán nem vagy csupán kis mértékben fedik egymást, azaz a hagyományos értelemben adathiány lép fel. Így költséghatékony mérések után a regisztrált adatokat megbízhatóan ki tudjuk értékelni.

A dolgozatban bemutattuk a módszer terepi alkalmazását is horizontálisan poláros transzverzális hullámok első beér-

kezéseinek feldolgozásával. Amennyiben a P és SH hullámok terjedési idői együtt is rendelkezésre állnak, a modell paramétereinek együttes refrakciós sorfejtéses inverzióval becsülhetők, amelyekből a rétegek sűrűségének egyidejű ismeretében több, gyakorlati szempontból jelentős köztérfizikai paraméter, rugalmassági állandó számítható.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Hivatkozások

- Ackermann H. D., Pankratz L. W., Dansereau D., 1986: Resolution of ambiguities of seismic refraction traveltime curves. *Geophysics* 51(2), 223–235
- Bernabini M., Brizzolari E., Cardarelli E., 1988: Interpretazione interattiva automatica di prospezioni sismiche a rifrazione. (Interactive automatic interpretation of refraction seismic investigation, in Italian) *Atti del 7° Convegno Annuale del Gruppo Nazionale di Geofisica Della Terra Solida*. Roma, pp. 657–670
- Brocher T., 2005: Empirical Relations between Elastic Wave-speeds and Density in the Earth's Crust. *Bulletin of the Seismological Society of America* 95(6), 2081–2092
- De Nardis R., Cardarelli E., Dobróka M., 2005: Quasi-2D hybrid joint inversion of seismic and geoelectric data. *Geophysical Prospecting* 53, 705–716
- Dobróka M., 1994: Változó rétegvastagságú inhomogén szeizmusos hullámvezetőben terjedő Love-típusú hullámok diszperziós relációja; Az abszorpciós-diszperziós jellemzők inverziója. *Doktori Értekezés Tézisei*, Miskolc.
- Dobróka M., Szabó N. P., Cardarelli E., Vass P., 2009: 2D inversion of borehole logging data for simultaneous determination of rock interfaces and petrophysical parameters. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 44(4), 459–479
- Dobróka M., Szabó N. P., 2011: Interval Inversion of Well-Logging Data for Objective Determination of Textural Parameters. *Acta Geophysica* 59(5), 907–934
- Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M., 2010: A quick 2-D geoelectric inversion method using series expansion. *Journal of Applied Geophysics* 72, 232–241
- Lankston R. W., 1989: The seismic refraction method: A viable tool for mapping shallow targets into the 1990s. *Geophysics* 54(12), 1535–1542
- Ormos T., 2002: Inversion of Refracted Travel-times for Near-surface Investigation. *EAGE 64th Conference and Exhibition, Extended Abstract*, D025
- Ormos T., Daragó A., 2005: Parallel inversion of refracted travel times of P and SH waves using a function approximation. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 40(2), 215–228
- Ormos T., Dobróka M., 2007: Refrakciós szeizmusos adatok inverziós feldolgozása. In: *Mechatronika, Anyagtudomány, Miskolc*, 1(3), 29–38
- Palmer D., 1981: An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *Geophysics* 46(11), 1508–1518
- Palmer D., 2001: Resolving refractor ambiguities with amplitudes. *Geophysics* 66(5), 1590–1593

- Palmer D., 2010: Are refraction attributes more useful than refraction tomography? *First Break* 28, 43–52
- Paripás A. N., Ormos T., 2010: Investigations on Kinematic Refraction Inversion at Different Geological Models. *Near Surface 2010 – 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Zurich, Conference Proceedings, P52
- Paripás A. N., Ormos T., 2011a: Ambiguity question on kinematic multilayer refraction inversion. *Near Surface 2011 – 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Leicester, Conference Proceedings, P13
- Paripás A. N., Ormos T., 2011b: Inversion of first breaks on multilayered media. *6th Congress of Balkan Geophysical Society*, Budapest, Conference Proceedings, A21
- Paripás A. N., Ormos T., 2012: Resolution and ambiguity studies for a series expansion based multilayer refraction inversion method. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 47(2), (megjelenés alatt).
- Polcz I., 1993: Az értelmezési eljárások fejlődése a sekélyrefrakciós kutatásban: a felbontóképesség javítása I. rész. *Magyar Geofizika* 34(3), 115–125
- Sandmeier K. J., 2006: ReflexW Version 4.0 Windows 9x/NT/2000/XP-program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection and transmission data, Karlsruhe
- Stefani J. P., 1995: Turning-ray tomography. *Geophysics* 60, 1917–1929
- Tezcan S. S., Keceli A., Ozdemir Z., 2006: Allowable bearing capacity of shallow foundations based on shear wave velocity. *Geotechnical and Geological Engineering* 24, 203–218
- Törös E., 2006: A szeizmikus módszer geotechnikai alkalmazásainak kritikai vizsgálata. Doktori (PhD) értekezés, Sopron
- Turai E., Dobróka M., Herczeg Á., 2010: Sorfejtéses inverzió III – Gerjesztett polarizációs adatok inverziós feldolgozása. *Magyar Geofizika* 51(2), 88–98
- Uyanik O., 2010: Compressional and shear-wave velocity measurements in unconsolidated top-soil and comparison of the results. *International Journal of the Physical Sciences* 5(7), 1034–1039
- Vidale J., 1988: Finite-difference calculation of travel times. *Bulletin of the Seismological Society of America* 78(6), 2060–2076
- Völgyesi L., 2002: *Geofizika*. Műegyetemi Kiadó, Budapest
- Xie X., Macnae J. C., Palmer D., 1997: Rapid automated determination of shallow velocity-depth structure using first breaks and the generalised reciprocal method. *Exploration Geophysics* 170–177
- Zanzi L., 1990: Inversion of refracted arrivals. A few problems: *Geophysical Prospecting* 38, 339–364
- Zhang J., Toksöz M. N., 1998: Nonlinear refraction traveltimes tomography. *Geophysics* 63, 1726–1737
- Zhu X., Sixta D. P., Andstman B. G., 1992: Tomostatics: turning-ray tomography + static corrections. *The Leading Edge* 11, 15–23