

Primer porozitású kőzetek permeabilitásának meghatározása Stoneley-féle hullámterjedési idők alapján

SZABÓ N. P.[@], KALMÁR Cs.

Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

[@]E-mail: norbert.szabo.phd@gmail.com

Az akusztikus teljes hullámkép fúrólukban történő felvételét rutinszerűen alkalmazzák az olajipari gyakorlatban. A P- és S-hullámok hasznos információt szolgáltatnak a porozitásról, a rugalmassági tényezőkről és a nyíróhullám anizotrópia kialakulásán keresztül az in situ kőzetfeszültségi irányokról. A fúrólukban terjedő Stoneley-hullámok elkülönítésével lehetőség nyílik a tároló kőzetek áteresztőképességének meghatározására. A permeabilitást általában a Stoneley-féle intervallum-idő-adatok inverziójával származtatjuk, azonban az utóbbi években az irodalomban megjelentek olyan statisztikus módszerek, melyek a Stoneley-hullám jellemzői és a permeabilitás empirikus kapcsolata meghatározásán keresztül egyszerűbb és gyorsabb megoldást kínálnak. E módszerek közös jellemzője, hogy a porozitás előzetes ismerete nélkül képesek a permeabilitás becslésére. Az irodalomban található esettanulmányok a permeabilitás logaritmusára és a Stoneley-hullám permeabilis formációban mérhető sebességsökkenése között lineáris kapcsolatot feltételeznek, mely gyakran durva közelítést ad. Jelen tanulmányban a lineáris regressziós modell javítására teszünk kísérletet, melynek keretében a Stoneley-hullám lassulása és a permeabilitás között pontosabb illeszkedést biztosító nemlineáris függvénykapcsolatot határozzunk meg. Az eljárást ismert permeabilitás modellen számított szintetikus szelvényadatok felhasználásával a kőzetfizikai paraméterek széles tartományán vizsgáljuk meg. Ezután az exponenciális modellt mezőbeli adatok feldolgozására használjuk fel, miközben a becsült permeabilitás szelvényt magadatokkal hasonlítjuk össze. A korrelációs és illeszkedési mérőszámok a szintetikus tesztelések és a terepi kiértékelés esetén azt mutatják, hogy a nemlineáris modell alkalmazása előnyös, mely elősegítheti a szénhidrogén-készletek pontosabb és megbízhatóbb meghatározását.

Szabó, N. P., Kalmár, Cs.: Permeability estimation in primary porosity rocks using Stoneley-wave transit times

Full waveform sonic logging is routinely applied in the oil industry practice. The P and S waves inform us about the porosity, elastic parameters and the orientation of in situ stresses based on the phenomenon of shear wave anisotropy. The separation of Stoneley waves propagating in the borehole enables to determine the permeability of hydrocarbon reservoirs. Permeability is generally estimated from the inversion processing of Stoneley interval transit-time data. Even so, other kinds of statistical methods have appeared in the literature, which offer quicker and simpler solution with revealing the empirical relationship between the characteristic data of Stoneley waves and permeability. These methods do not require the prior knowledge of porosity. Case studies assume a linear connection between the relative decrease in Stoneley-wave's velocity of porous formations and the natural logarithm of permeability, which usually gives only a rough estimate. In this study, we make efforts to improve the before-mentioned regression model by the determination of a more accurate nonlinear relationship between Stoneley slowness and permeability. The new algorithm is tested over the wide range of petrophysical parameters using an exactly known permeability model and synthetic well logs. Then the exponential model is applied to the processing of real well-logging data, where the estimated permeability log is compared to laboratory data measured on core samples. The quality checks of synthetic and field results show that the application of the nonlinear model is highly recommended, which may have significant impact on a more accurate and reliable estimation of hydrocarbon reserves.

Beérkezett: 2013. november 28.; *elfogadva:* 2013. december 23.

Bevezetés

Az akusztikus fúróluk-szelvényezés általánosan elterjedt porozitáskövető módszer a szénhidrogén-kutatásban. A refraktált P-hullám beérkezéséből a kőzetmátrix és a pórus-

teret telítő fluidumok akusztikus intervallumideje ismeretében meghatározható az elsődleges porozitás (Raymer és társai 1980). A sűrűség- és a neutronporozitás-szelvénnel együttes alkalmazásban repedezett kőzetek másodlagos porozitása is becsülhető (Ellis és Singer 2007). A teljes hullám-

kép nyitott lyukbeli alkalmazása – a porozitás meghatározásán túl – további lehetőségeket rejt magában. A nyíró és felületi hullámterjedési idők felhasználásával kimutathatók a kőzetben a természetes vagy mesterséges folyamatok által indukált repedések jelenléte és orientációja, a fűrőlyuk környezetében ható feszültségtér nagysága és anizotrópiája, valamint a kőzetek rugalmassági paraméterei és áteresztőképessége. A fenti jellemzők kulcsfontosságúak a hidraulikus rétegrepesztés tervezésében, a fluidumok beáramlási képének és a szénhidrogén-készlet meghatározásában, mellyel a kitermelési eljárás optimalizálható (Badri és társai 2000). Az akusztikus hullámok kialakulását és szénhidrogén-iparban történő alkalmazási lehetőségeit Haldorsen és társai (2006) foglalták össze.

A kőzetek áteresztőképességének (permeabilitás) direkt (fűrőbeli) meghatározása a nukleáris mágnesesrezonancia-(NMR) szelvényezéssel lehetséges, azonban ez a módszer igen költséges, ezért a hazai gyakorlatban még nem terjedt el (Coates és társai 1999). Az NMR-szelvény alkalmazása a jövőben ígéretes lehet, mivel az effektív porozitáson túl lehetőséget teremt a pórusméret-eloszlás és a pórusteret telítő fluidumok viszkozitásának a meghatározására. Ez utóbbi mennyiség kapcsolatban van a fluidummobilitással (permeabilitás/viszkozitás arány), mely a porózus-permeabilis formációkban terjedő akusztikus hullámok modellezésének egyik alapparamétere. A közvetett (in situ) permeabilitásszámítási módszerek a kőzetek porozitásának és kötött víztelítettségének meghatározásán alapulnak. A rendelkezésre álló adatfeldolgozási eljárásokat értékelve azt tapasztaljuk, hogy minden módszernek megvannak a gyengeségei, ugyanis a származtatott értékek gyakran ellentmondásban állnak a fűrőmagok alapján meghatározott permeabilitással, valamint az áteresztőképesség becslési bizonytalansága elérheti az egy (másfél) nagyságrendet. Ezért kiemelt jelentőséggel bírhat egy-egy új (független) módszer bevezetése, melynek a meglévő eljárásokkal való együttes alkalmazása javíthatja a permeabilitásbecslés pontosságát és megbízhatóságát.

A Stoneley-hullámok az iszaposzlop és a kőzetformáció határfelületén terjedő felületi hullámok, melyek sebessége a frekvencia függvényében kismértékben változik. A gerjesztésük monopól adóval is lehetséges, mely a hullámenergiát minden irányban azonos intenzitással bocsátja ki. Az érzékelés ún. 'array' típusú szondával történik, mely akár több monopól adót és egy vevőcsoportot tartalmaz. A hagyományos lyukkompenzált eszközökhöz képest a monopól vevők kisebb távolságra helyezkednek el egymástól, amivel nagyobb vertikális felbontóképesség érhető el. Ugyanakkor a szonda kialakításának köszönhetően a nagyobb adó-vevő távolság miatt az egyes hullámösszetevők elkülönítése könnyebb, és a csatornák együttes feldolgozásával nagyobb jel/zaj viszony érhető el. A detektált Stoneley-spektrum alacsony frekvenciájú összetevője a legérzékenyebb az elsődleges porozitású tárolók permeabilitására.

A Stoneley-hullámok tárolóértékelésre történő felhasználására számos kísérlet irányult. A porózus közegben érvényes mozgásegyenletet Biot (1955) dolgozta ki, amellyel

a Stoneley-féle hullámjelenség kapcsolatba hozható a homogén izotróp közeg porozitásával és permeabilitásával, rugalmasan viselkedő kőzetmátrix és viszkozus pórusfolyadék esetén. A Stoneley-hullám csillapodásának és a formáció permeabilitásának kapcsolatát Rosenbaum (1974) jósolta meg elméleti úton. A diszperzív hullám alacsony frekvenciás határesetét White (1983), valamint Mathieu és Toksöz (1984) vizsgálták. Williams és társai (1984) kvantitatív összefüggést találtak a permeabilitás és a Stoneley-hullám csillapodása között. A Biot-elméleten alapuló egyszerűsített modelleket Schmitt és társai (1988), valamint Chang és társai (1988) fejlesztették ki, melyeket laboratóriumi mérések is megerősítettek (Winkler és társai 1989). Tang és társai (1994) a Biot–Rosenbaum-modell alapján kifejlesztette a Stoneley-féle hullámterjedési adatok inverziós technikáját, mely jelenleg is standard módszernek számít az akusztikus permeabilitás meghatározásában. Ennek keretében több frekvencián (0,2 és 0,8 kHz között) a Stoneley-féle lassúság- és csillapodásadatok együttes inverziójával becsülik meg a fluidummobilitást.

A bonyolult inverziós eljárásokon kívül léteznek olyan közelítő eljárások is, melyek nagyszámú terepi mérésre alapozott empirikus összefüggések alapján – mért és elméleti úton számított Stoneley-lassúságok arányából (Stoneley-index) – becsülik meg a permeabilitást. Buffin (1996) egy 'crossplot' technikán alapuló eljárást közölt, melyet egy ausztrál szénhidrogén-kutatófűrőben mért adatrendszeren alkalmazva jó egyezést talált a becsült és magadatokon mért permeabilitások között. Bala (2010) ugyanezt a statisztikus módszert sikeresen alkalmazta lengyelországi miocén gáztároló rétegek vizsgálatára. A módszer előnye, hogy nem igényli a porozitás előzetes számítását, azonban hátrányaként említhető, hogy a két szerző által alkalmazott lineáris vagy szakaszosan lineáris közelítés nem túl szoros korrelációs kapcsolatot mutat a Stoneley-index és a permeabilitás között. Mivel a módszert eddig még csak terepi adatok feldolgozásából nyert tapasztalatok alapján vizsgálták, szükségesnek láttuk szintetikus modellek bevonásával is tesztelni azt. Ennek keretében ismert permeabilitásmodellből indulunk ki, majd a modellen számított szintetikus szelvényadatok feldolgozása révén megvizsgáljuk, hogy a becslés hogyan rekonstruálja az egzakt permeabilitásértékeket. A tanulmányban bemutatjuk, hogy a Stoneley-index és permeabilitás kapcsolatának korrelációs együtthatója javítható abban az esetben, ha a két változó kapcsolatát nemlineárisnak tételezzük fel. A statisztikus eljárást a releváns kőzetfizikai paraméterek széles tartományán vizsgáljuk meg homogén rétegekből álló és inhomogén szintetikus modellek alkalmazásával. A szintetikus vizsgálatok eredményeként adódó nemlineáris regressziós modellt felhasználva egy mezőbeli adatsor kiértékelését is bemutatjuk.

Stoneley-hullámok viselkedése porózus közegben

A fluidumok áramlását porózus-permeabilis kőzetekben Darcy törvénye írja le:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{K}{\eta} \nabla p, \quad (1)$$

ahol K [m²] a permeabilitás, η [Pa·s] a viszkozitás, $\mathbf{u}$ [m] a fluidum relatív elmozdulásának vektora és p [Pa] a pórusnyomás. Ha a kőzetmátrixot összenyomhatatlannak tekintjük, akkor a pórusokat kitöltő (ideális) folyadék térfogati alakváltozása kielégíti a Hooke-törvényt:

$$-\nabla \mathbf{u} = \frac{\Phi}{B_f} p, \quad (2)$$

ahol Φ [v/v] a porozitás és B_f [Pa] a pórusfolyadék összenyomhatósági tényezője (az alkalmazott nyomás és a térfogati alakváltozás hányadosa). Az $\mathbf{u}$ mennyiség (1) és (2) egyenletekből történő kiküszöbölésével az alábbi diffúziós egyenletet kapjuk

$$\frac{\partial p}{\partial t} = C_0 \nabla^2 p, \quad (3)$$

ahol $C_0 = KB_f/\eta\Phi$ a diffúziós együttható. Rugalmasan viselkedő porózus közegben Biot (1962) vezette le a feszültség- és alakváltozás kapcsolatát, melynek alapján a (3) egyenletben szereplő diffúziós koefficiens számítása módosításra szorul:

$$C = \frac{C_0}{1 + \frac{B_f}{\Phi B} \left[(1 - \alpha)(\alpha - \Phi) + \frac{\alpha^2}{1 + (4\mu/3B)} \right]}, \quad (4)$$

ahol B a száraz kőzet (váz) összenyomhatósági tényezője és μ [Pa] a nyírási modulus. (A száraz, ill. fluidummal telített kőzet porozitását azonosnak feltételezzük.) Az α rugalmassági paramétert a Biot–Gassmann-egyenlet definiálja:

$$B_c = B + \alpha^2 M = B + \left(1 - \frac{B}{B_s} \right)^2 \left(\frac{\Phi}{B_f} + \frac{\alpha - \Phi}{B_s} \right)^{-1}, \quad (5)$$

ahol B_c a porózus (vízzel vagy szénhidrogénnel telített) kőzet összenyomhatósági tényezője és B_s ugyanaz a kőzet-szemcsék (mátrix) esetén.

A gyengén diszperzív Stoneley-hullám a teljes hullámkép leglassúbb és legnagyobb amplitúdójú összetevője, melynek vizsgálati frekvenciatartománya általában 0–10 kHz (a csúcsfrekvencia 0,5 kHz körül helyezkedik el), mely alacsony frekvenciás határesetben csőhullám formájában terjed a fűrőlyukban. A csőhullám sebessége impermeábilis formációban ($v_{St}^{(imp)}$)

$$v_{St}^{(imp)} = \frac{v_m}{\sqrt{1 + \frac{B_m}{\mu}}}, \quad (6)$$

ahol v_m [m/s] az akusztikus hullám terjedési sebessége a fűrőiszapban, és B_m az iszap összenyomhatósági tényezője. Porózus-permeábilis kőzetben a csőhullámok elmozdítják a fluidumrészecskéket a kőzetmátrixhoz képest, ami a hullám energiájának egy részét felemészti. A jelenséget az akusztikus hullámok csillapodása és lassulása kíséri. Kisfrekvenciás esetben a hullámsebesség komplex mennyiséggé válik:

$v = [B^*/\rho_m]$ ahol B^* az iszap komplex összenyomhatósági tényezője és ρ_m annak sűrűsége. Nyomás hatására mind az a sugarú fűrőlyuk, mind pedig a pórusfolyadék radiális elmozdulást szenved. A (3) diffúziós egyenlet alapján az iszapnyomás harmonikus időfüggése mellett permeábilis formációban a csőhullám sebességét ($v_{St}^{(p)}$) az alábbi összefüggés adja meg (Norris 1989):

$$v_{St}^{(p)} = v_{St}^{(imp)} \left[1 - \Phi \frac{\mu}{\mu + B_m} \frac{B_m}{B_f} \sqrt{\frac{C_0}{C}} \sqrt{\frac{iC_0}{a^2 \omega}} \right], \quad (7)$$

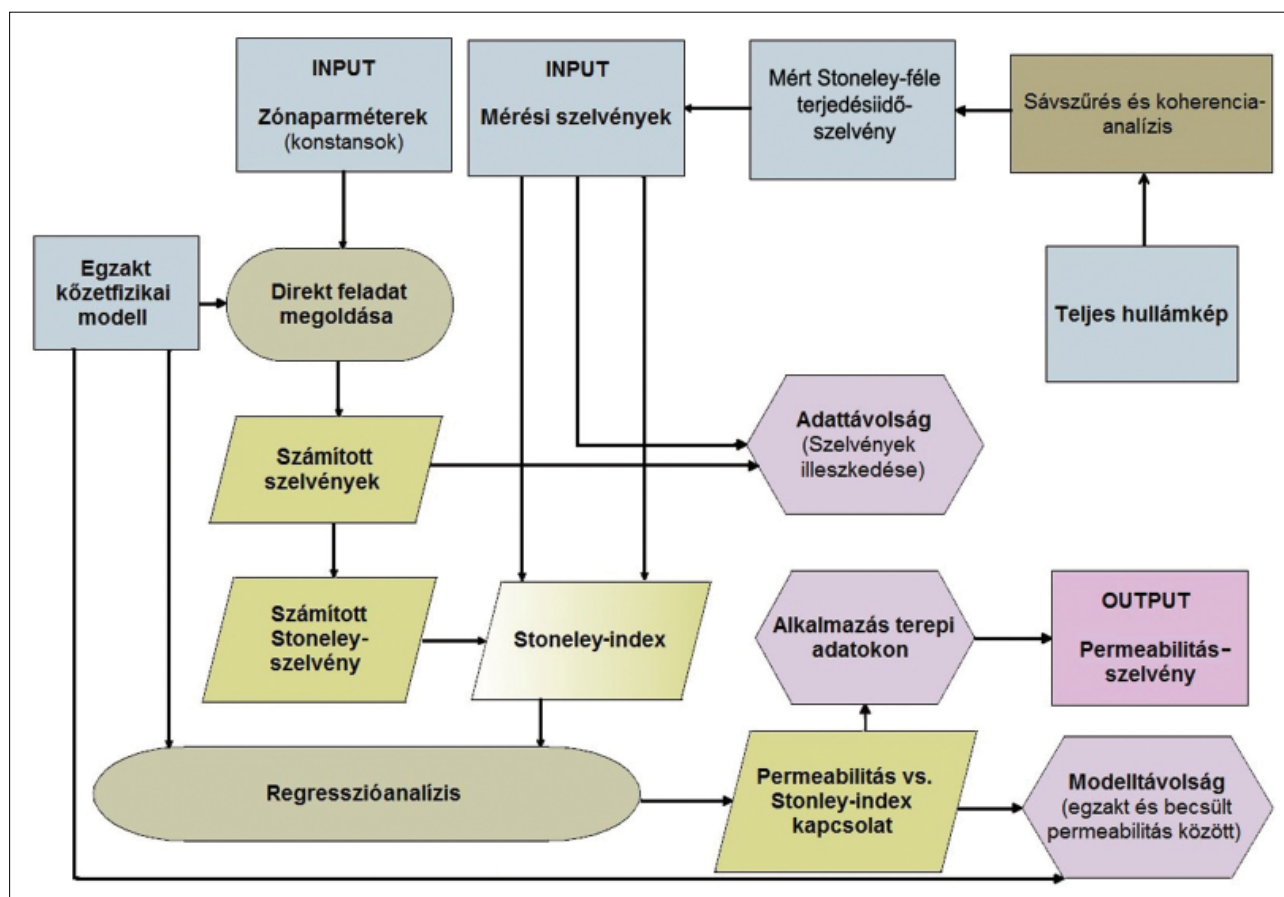
ahol ω [Hz] a nyomáshullám körfrekvenciája (i a képzetes egység). Mivel a diffúziós együttható permeabilitás- és porozitásfüggő mennyiség, így a (7) egyenlet szerint a terjedési sebesség permeábilis formációban $v_{St}^{(imp)}$ -ről $v_{St}^{(p)}$ -re csökken. Az egyenlet képzetes része a hullám csillapodását írja le, melynek mértéke a porozitással és a permeabilitással nő, azonban a fűrőlyuk átmérőjével csökken. A fenti elméleti összefüggést labormérések is igazolták. Winkler és társai (1989) homogén, nagy tisztaságú Berea homokkő, valamint mesterséges eljárással gyártott mintákon végeztek megfigyeléseket 0–100 kHz frekvenciatartományban. A Stoneley-hullám diszperziós tulajdonságait Brie és társai (2000) modellszámításokkal vizsgálták és megállapították, hogy növekvő fluidummobilitás mellett jelentős mértékben nő a fázissebesség és a csillapodás a frekvencia függvényében. Kimutatták, hogy a kis frekvenciák tartományában a permeabilitásváltozásra nagyobb mértékben a terjedési sebesség reagál, míg nagyfrekvenciás esetben arra a csillapodás a legérzékenyebb. Ennek alapján kijelölhető egy olyan optimális frekvencia, melynek környezetében mindkét mérés hatékonyan alkalmazható. A fenti elmélet képezi az alapját azoknak a módszereknek, melyek a Stoneley-féle intervallumidők alapján határozzák meg a permeabilitást.

Permeabilitás meghatározása nemlineáris modell alapján

Buffin (1996) egy keresztmetszeti ábrázolta az alacsony frekvencián mért Stoneley-féle intervallumidők ($\Delta t_{St}^{(m)}$) négyzetét és a mért kőzetsűrűsége ($\rho_b^{(m)}$) normált nyíróhullám-intervallumidők ($\Delta t_s^{(m)}$) négyzetét. Ezen a diagramon az impermeábilis formációk egy egyenes mentén helyezkednek el, melyet agyagvonalnak nevezünk. Az egyenes megadja a Stoneley-hullám lassúságának számított (elméleti) értékét ($\Delta t_{St}^{(sz)}$), mely a lyukátmérő és az egyéb környezeti hatásokat (fűrőiszap, iszaplepeny) nem veszi figyelembe:

$$\Delta t_{St}^{(sz)} = \sqrt{\frac{\rho_{mf}}{\rho_b} \Delta t_s^2 + \Delta t_{mf}^2}, \quad (8)$$

ahol ρ_{mf} és Δt_{mf} az iszapfiltrátum térfogatsűrűsége és akusztikus intervallum ideje. A (8) egyenlet alapján az agyagvonalat definiáló egyenes meredeksége ρ_{mf} és ordinátatengely metszete Δt_{mf}^2 . Az agyagvonalhoz képest a nagyobb Stoneley-féle intervallumidők (lassúságok) irányában megjelenő mérési pontok a keresztmetszeti permeábilis for-



1. ábra | A permeabilitás meghatározásának statisztikus elvű algoritmus
Figure 1 | Statistical algorithm for permeability prediction

mációt jeleznek. A terepi megfigyelések alapján megállapították, hogy primer porozitású formációk permeabilitása az agyagvonaltól való eltérés nagyságával egyenesen arányos. A Stoneley-féle hullámsebesség csökkenésének mértékét az impermeábilis formációhoz képest a Stoneley-indexszel fejezzük ki, melyet a mért és számított lassúságok hányadosaként definiálunk:

$$I_{\text{St}} = \frac{\Delta t_{\text{St}}^{(\text{m})}}{\Delta t_{\text{St}}^{(\text{sz})}}. \quad (9)$$

Az irodalomban található közelítő eljárások a permeabilitás és a Stoneley-index lineáris kapcsolatát feltételezik, ahol a regressziós együtthatók függenek a litológiától, porozitástól és a rétegtartalomtól. Mind a szerzők terepi eredményei, mind pedig saját modellszámításaink azt mutatják, hogy a fenti kapcsolat nemlineáris, mely különösen a kis permeabilitások tartományában szignifikáns.

Az 1. ábrán az általunk javasolt modellezési eljárás lépései láthatók, mellyel a Stoneley-index és a permeabilitás kapcsolatát határozhatjuk meg. A statisztikus eljárás bemenő adatait a mért fürőlyukszelvények képezik: természetes gamma-intenzitás (GR [API]), gamma-gamma sűrűség (ρ_b [g/cm³]), nyíróhullám-intervallumidő (Δt_s [μs/m]) és Stoneley-féle intervallumidő (Δt_{SI} [μs/m]). A szelvényadatok kapcsolatba hozhatók a közetfizikai modell paramétere-

ível. E modellparaméterek egy része a mélységgel gyorsan változik, mások pedig egy-egy zónán belül konstansnak tekinthetők. Az előbbieket a tárolók kiértékelése során pont-ról-pontra ismernünk kell. A porozitást (Φ [v/v]), kiséper zóna víztelítettségét (S_{xo} [v/v]), agyagtartalmat (V_{sh} [v/v]), homoktartalmat (V_{sd} [v/v]) és a permeabilitást (K [mD]) a tárolóparaméterek körébe soroljuk, melyeket egyedileg vagy inverziós módszerrel határozhatjuk meg. Az utóbbi csoportot képező zónaparamétereket előzetes ismeretek (laboradatok, irodalom) alapján adhatjuk meg, melyek a következők: iszapfiltrátum longitudinális hullám lassúsága (Δt_{mf}), az iszapfiltrátum sűrűsége (ρ_{mf}), az agyag longitudinális hullámlassúsága (Δt_{sh}), az agyag sűrűsége (ρ_{sh}), a homok longitudinális hullámlassúsága (Δt_{sd}), a homok sűrűsége (ρ_{sd}), a szénhidrogén P-hullámlassúsága (Δt_{hc}), a szénhidrogén sűrűsége (ρ_{hc}), a homok (GR_{sd}) és az agyag természetes gamma-intenzitása (GR_{sh}). A szelvényadatok és a modellparaméterek kapcsolatát leíró függvényeket elméleti szonda-válaszfüggvényeknek nevezzük. A direkt feladat megoldása során az alábbi válaszegyenleteket használtuk a fűrőlyukszelvények számíthatására:

$$\rho_b^{(sz)} = \Phi \left[\rho_{mf} S_{xo} + (1 - S_{xo}) \rho_{hc} \right] + V_{sh} \rho_{sh} + V_{sd} \rho_{sd}, \quad (10)$$

$$\text{GR}^{(\text{sz})} = \text{GR}_{sd} + \frac{1}{\rho_{\text{(sz)}}}(V_{sh}\text{GR}_{sh}\rho_{sh} + V_{sd}\text{GR}_{sd}\rho_{sd}), \quad (11)$$

$$\Delta t_S^{(sz)} = \sqrt{3} \{ \Phi [\Delta t_{mf} S_{xo} + (1 - S_{xo}) \Delta t_{hc}] + V_{sh} \Delta t_{sh} + V_{sd} \Delta t_{sd} \}, \quad (12)$$

$$\Phi + V_{sh} + V_{sd} = 1. \quad (13)$$

Az elvi Stoneley-féle intervallumidőket (8) alapján számíthatjuk. A (13) az egységnyi közettérfogatra felírt anyagmérleg-egyenletet jelenti. A mért és számított Stoneley-féle intervallumidők alapján Stoneley-indexet képezhetünk, melyet regressziós eljárás keretében kapcsolatba hozhatunk más (független) forrásból származó permeabilitás értékekkel. Tapasztalataink alapján a regressziós függvény:

$$\ln(K) = a - b e^{-c I_{St}^{\kappa}}, \quad (14)$$

ahol a , b , c regressziós együtthatók, és κ alkalmasan skálázott kitevő. A regresszióval becsült permeabilitást ($K^{(st)}$) terepi mérések esetén összehasonlíthatjuk más módszerrel meghatározott permeabilitásadatokkal vagy szintetikus vizsgálatok esetén az egzakt permeabilitás- ($K^{(e)}$) értékekkel. Az eredmények illeszkedését a modell távolsággal mérhetjük:

$$D_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (K_i^{(st)} - K_i^{(e)})^2} \cdot 100 [\%], \quad (15)$$

ahol N a mélységpontok száma. Hasonló mennyiséget definiálhatunk a mért és a meghatározott modellen számított adatok távolságának jellemzésére, melyet adattávolságnak nevezünk. A Stoneley-index és a permeabilitás kapcsolatának a szorosságát hagyományosan a Pearson-féle (lineáris) korrelációs együtthatóval (r) jellemezhetjük. Azonban a (14) modell megbízhatóságának a jellemzésére alkalmasabb a rangkorrelációs együttható, mely nemlineáris függvénykapcsolat esetén realisabb becslést ad, és kevésbé befolyásolja a kiugró adatok (Spearman 1904). E mennyiség számítására az alábbi közelítő formulát használtuk:

$$R = 1 - \frac{6 \sum_{n=1}^N \delta_n^2}{N(N^2 - 1)}, \quad (16)$$

ahol δ_n a két változó n -edik adatai rangjának a különbsége. A korrelációs együttható 1 körüli értéke a modell és az adatok szoros (nemlineáris) kapcsolatára utal.

Vizsgálatok szintetikus adatok felhasználásával

A szintetikus modellvizsgálatok során azt feltételezzük, hogy ismerjük a közzetfizikai modell paramétereit (porozitás, víztelítettség, permeabilitás stb.). Ekkor a (8), ill. a (10)–(13) szonda-válaszegyenletek segítségével szintetikus fűrőlyukszelvényeket generálhatunk. A válaszegyenletekben szereplő zónaparaméterek értékeit az 1. táblázatban adtuk meg. Az adatokhoz különböző mértékű véletlen zajt keverve kvázi mért szelvényeket képezhetünk, melyeket feldolgozva megvizsgálhatjuk, hogy a statisztikus eljárás milyen pontosan rekonstruálja az egzakt modell paramétereit. Ez a kísérlet a vizsgált módszer teljesítményét értékeli, azaz jellemzi annak pontosságát, stabilitását, robusztusságát, és megmutatja a zajérzékenységet. A tesztelesek során a Stoneley-indexet egzakt permeabilitásértékekkel hasonlítjuk össze, melyeket az alábbi, általánosan elfogadott formula alapján vettük fel (Timur 1968):

$$K = 0,136 \frac{\Phi^{4,4}}{S_{w,irr}^2}, \quad (17)$$

ahol $S_{w,irr}$ [v/v] a kötött víztelítettség. A válaszegyenletekben szereplő homoktartalmat a (13) egyenletből (determinisztikusan) számítjuk. A szintetikus vizsgálatokat rétegenként homogén, majd inhomogén modellen is elvégezzük különböző hibájú szelvényadatok felhasználásával.

Vizsgálatok homogén rétegekből felépített modellen

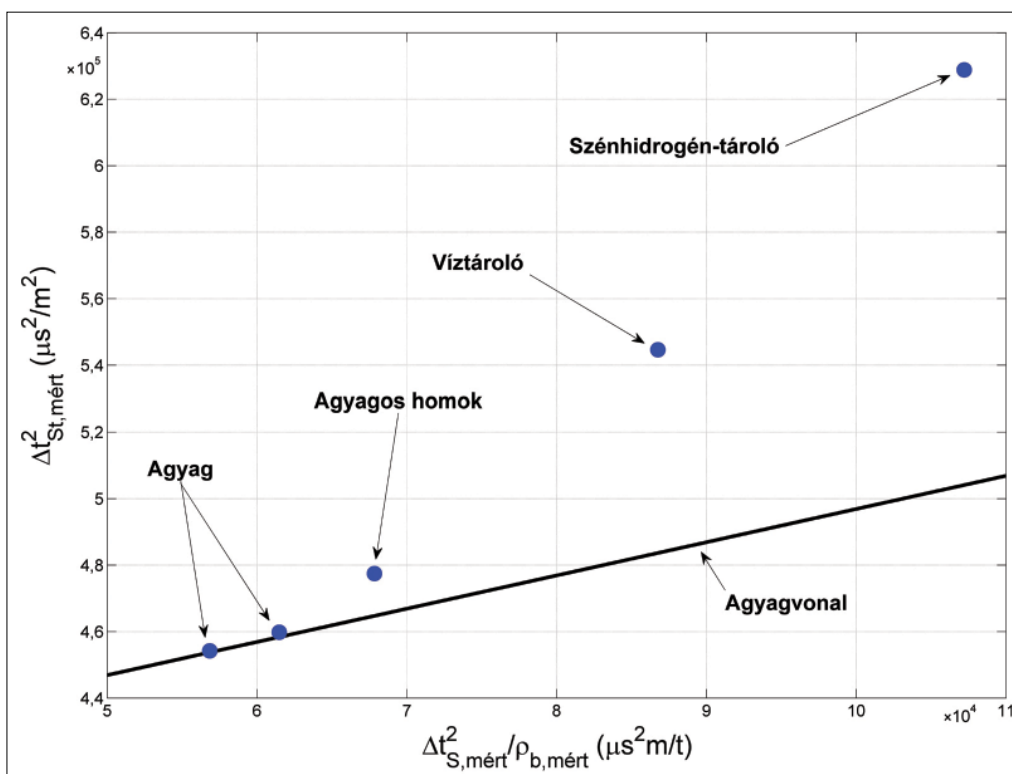
A szintetikus teszthez egy 5 réteges üledékes modellt választottunk, melynek paraméterei a 2. táblázatban találhatók. A rétegsor tetején agyagos homok, majd egy kisebb

1. táblázat | Az alkalmazott elméleti szonda válaszegyenletek zónaparaméterei

ρ_{mf} (g/cm ³)	ρ_{sd} (g/cm ³)	ρ_{sh} (g/cm ³)	ρ_{hc} (g/cm ³)	GR _{sd} (API)	GR _{sh} (API)	Δt_{mf} (μs/m)	Δt_{sd} (μs/m)	Δt_{sh} (μs/m)	Δt_{hc} (μs/m)
1,0	2,65	2,4	0,15	10	160	630	184	330	1050

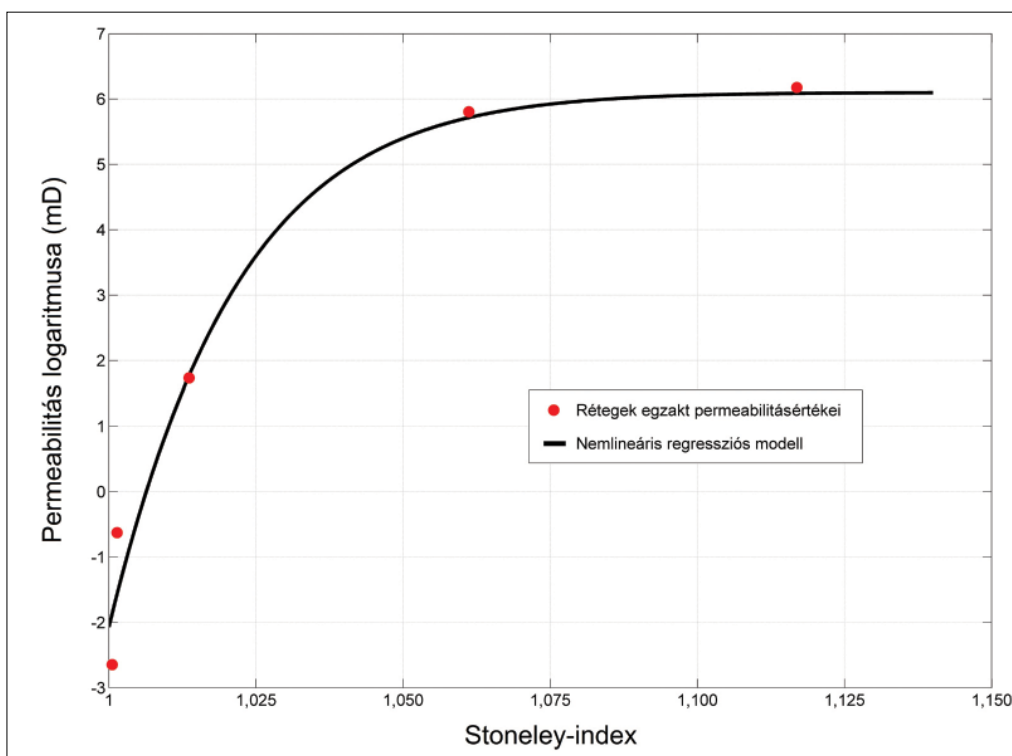
2. táblázat | A homogén rétegekből álló modell közzetfizikai paraméterei

Mélység (m)	Φ (v/v)	S_{xo} (v/v)	V_{sh} (v/v)	$S_{w,irr}$ (v/v)	Δt_{st} (μs/m)	K (mD)
0–4,9	0,15	1,0	0,5	0,6	691	5,65
5–9,9	0,23	1,0	0,3	0,2	738	333
10–12,9	0,07	1,0	0,8	1,0	674	0,07
13–19,9	0,25	0,7	0,1	0,2	793	481
20–24,9	0,10	1,0	0,7	0,8	678	0,53



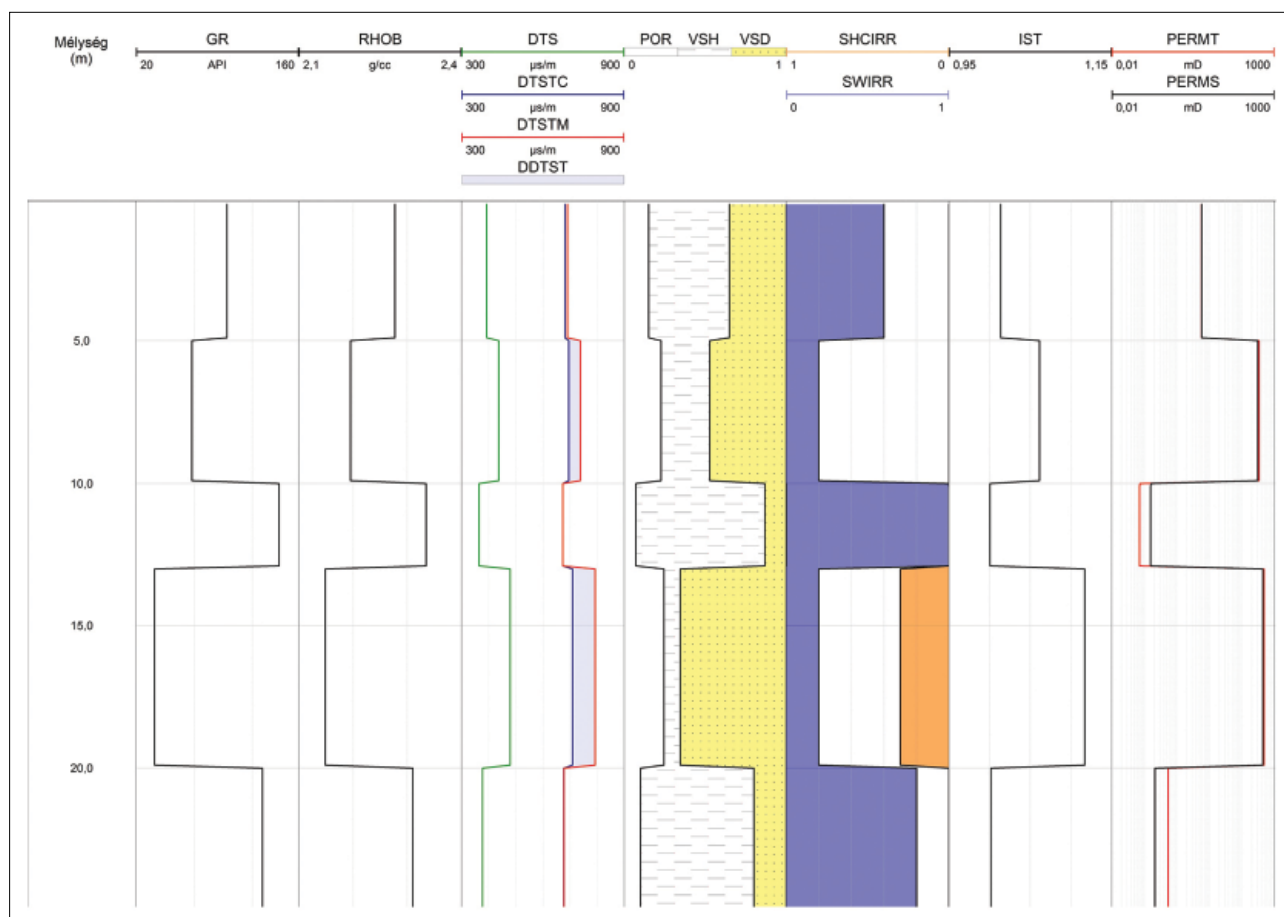
2. ábra Mért Stoneley-hullám és nyíróhullám-lassúság keresztábrája rétegenként homogén közzetfizikai modell- és hibátlan fúrólukszelvény-adatok esetén

Figure 2 The crossplot of measured Stoneley slowness and shear wave slowness in case of layer-wise homogeneous petrophysical model and noiseless well-logging data



3. ábra A permeabilitás természetes alapú logaritmus és Stoneley-index regressziós kapcsolata rétegenként homogén közzetfizikai modell esetén

Figure 3 The regression relationship between the natural logarithm of permeability and Stoneley-index in case of layer-wise homogeneous petrophysical model



4. ábra | Szintetikus fúrólukszelvények és a permeabilitásbecslés eredménye rétegenként homogén kőzetfizikai modell esetén
Figure 4 | Synthetic well logs and the result of permeability estimation in case of layer-wise homogeneous petrophysical model

agyagtartalmú víztároló réteg található. A harmadik réteg agyag, mely elválasztja a fenti víztárolót az alatta fekvő gáz-tároló rétegtől. A rétegsort legalul agyag zárja. A permeabilitás értéktartománya a rétegsorban 5 nagyságrendet fog át. A kötött víztelítettség aránya a tárolókban a kis agyagtartalom miatt kicsi, mintegy 20%, míg az impermeábilis rétegekben 80–100%. A rétegekben számított Stoneley-lassúságokat a permeabilitással arányosan megnövelve kvázi mért Stoneley-féle intervallumidőket adtunk meg. A növekményt irodalmi értékek alapján választottuk meg (0–15%). Az adatokhoz ebben az esetben nem adtunk véletlen zajt.

A kvázi mért Stoneley- és nyíróhullám-lassúságok keresztdiagramja a 2. ábrán látható. Az agyagvonal az impermeábilis rétegeket mutatja, melynek egyenlete:

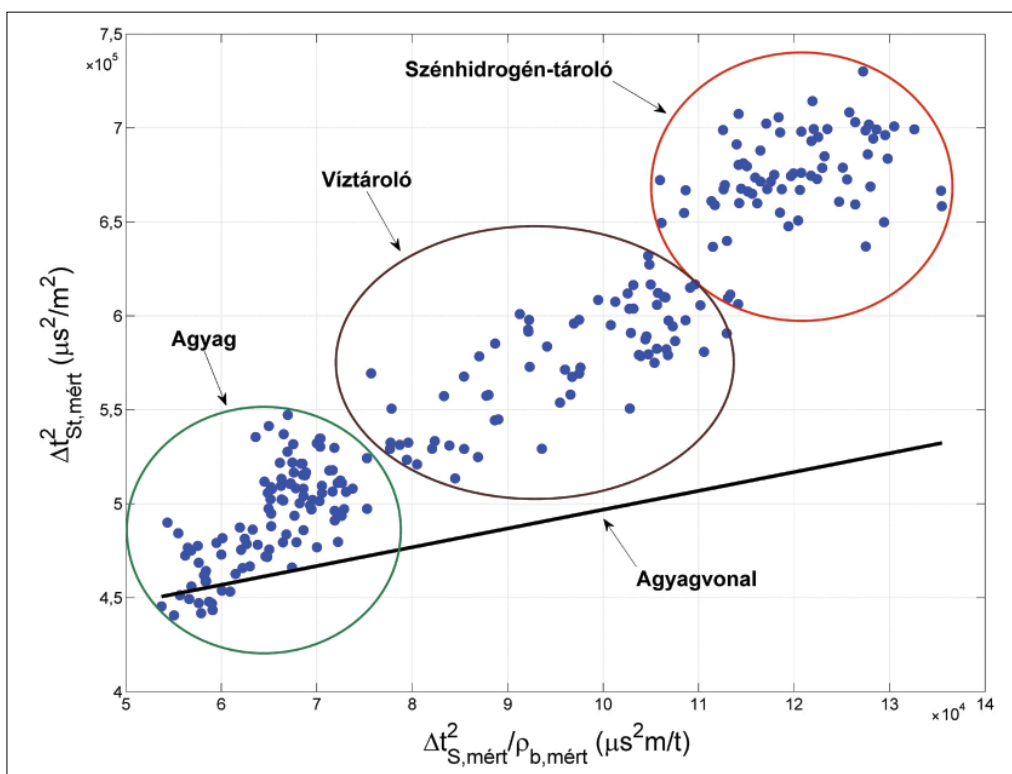
$$\Delta t_{St}^2 = (\Delta t_s^2 / \rho_b) + 396900. \quad (18)$$

A víz- és szénhidrogén-tárolók a növekvő intervallumidők tartományában jelennek meg. A Stoneley-index a permeabilitással zajmentes esetben a (14) regressziós összefüggésre vezet, ahol $a = 6$, $b = 7,28 \cdot 10^5$, $c = 11,4$ (3. ábra). Mivel a Stoneley-index a permeabilitáshoz képest nagyságrendekkel kisebb mértékben változik, ezért (14) egyenletben $\kappa = 4$ -et választottunk. A 4. ábra bemutatja az alkalmazott fúrólukszelvényeket (GR – természetes gamma-intenzitás, RHOB – közetsűrűség, DTS – nyíróhullám-lassúság,

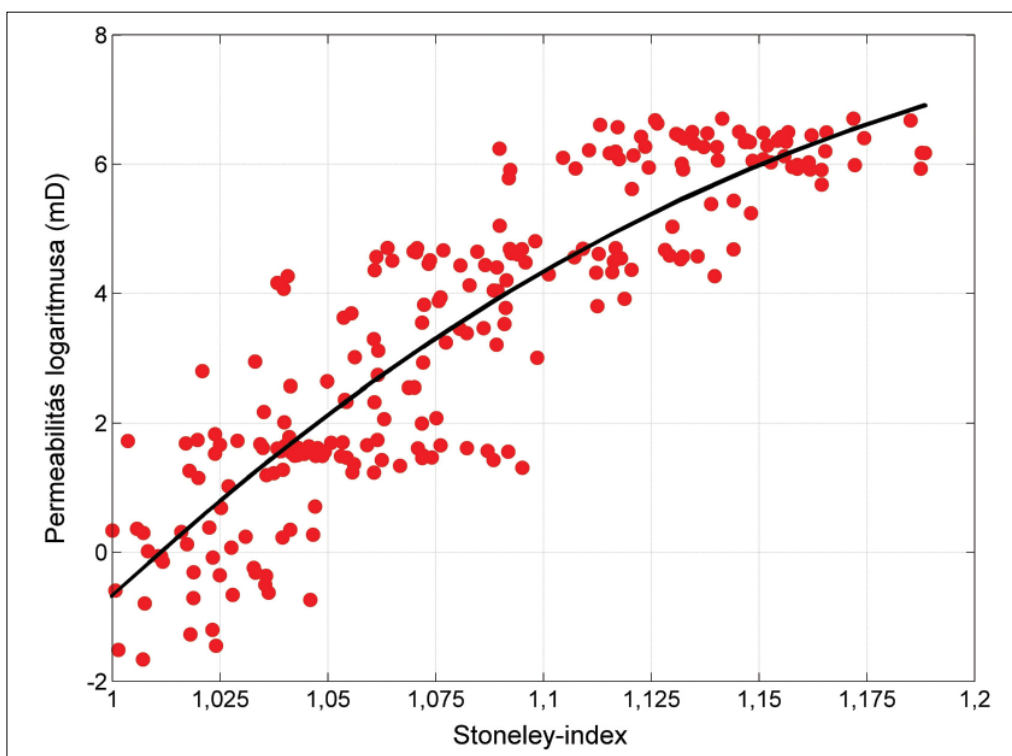
DTSTC – számított Stoneley-lassúság, DTSTM – mért Stoneley-lassúság, DDTST – mért és számított Stoneley-lassúságok különbsége), a kőzetösszetételt (POR – porozitás, VSH – agyagtartalom, VSD – homoktartalom), a rétegtartalmat (SHCIRR = 1 – SX0 – maradék szénhidrogén-telítettség, SWIRR – kötött víztelítettség) és a Stoneley-indexet (IST) a relatív mélység függvényében. Az utolsó 'track'-en a Timur permeabilitás (PERMT) és az általunk javasolt nemlineáris regressziós függvény által becsült permeabilitás (PERMS) szerepel. A permeabilitásértékek meggyőző egyezést mutatnak, a (15) formula alapján számított modelltérbeli távolság 3.2%. A permeabilitás erős korrelációban áll a Stoneley-indexszel, mivel a (16) szerint számított rang korrelációértéke 0,99. Megállapíthatjuk, hogy az ismert permeabilitásértékeket a regressziós modell jól közelíti.

Vizsgálatok inhomogén modellen

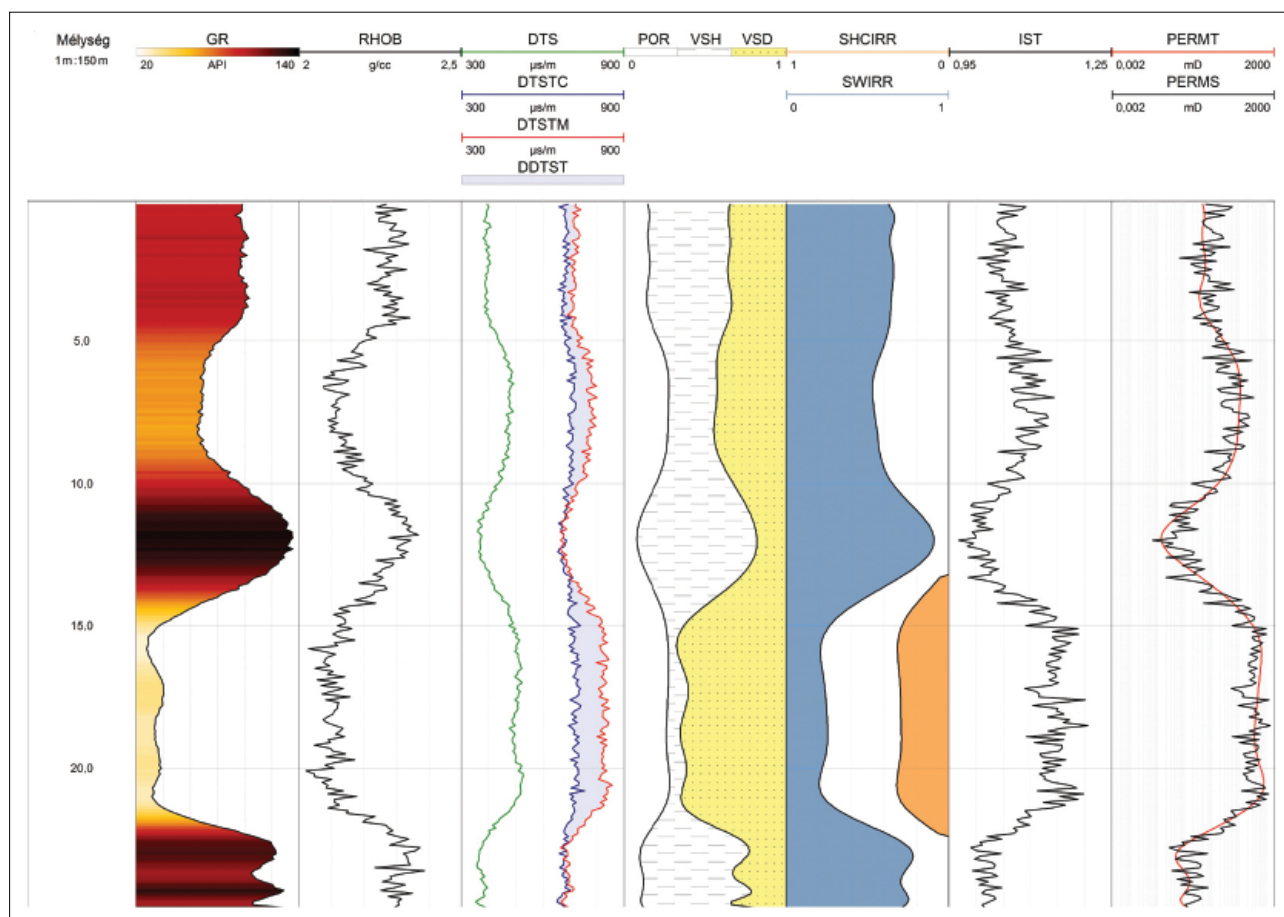
Valódi formációk esetén a kőzetfizikai paraméterek a rétegen belül is változnak, ezért a kőzetfizikai paraméterek mélységfüggését 18–22-ed fokú polinommal közelítettük. A direkt feladat megoldásával szintetikus szelvényadatokat generáltunk, melyekhez különböző mértékű Gauss-eloszlásból származó zajt adtunk. A 2%-os zajszinthez tartozó



5. ábra Mért Stoneley-hullám és nyíróhullám-lassúság keresztábrája inhomogén köztetfizikai modell esetén
Figure 5 The crossplot of measured Stoneley slowness and shear wave slowness in case of inhomogeneous petrophysical model



6. ábra A permeabilitás természetes alapú logaritmusa és Stoneley-index regressziós kapcsolata inhomogén köztetfizikai modell esetén
Figure 6 The regression relationship between the natural logarithm of permeability and Stoneley-index in case of inhomogeneous petrophysical model



7. ábra Szintetikus fúrólukszelvények és a permeabilitásbecslés eredménye inhomogén kőzetfizikai modell esetén

Figure 7 Synthetic well logs and the result of permeability estimation in case of inhomogeneous petrophysical model

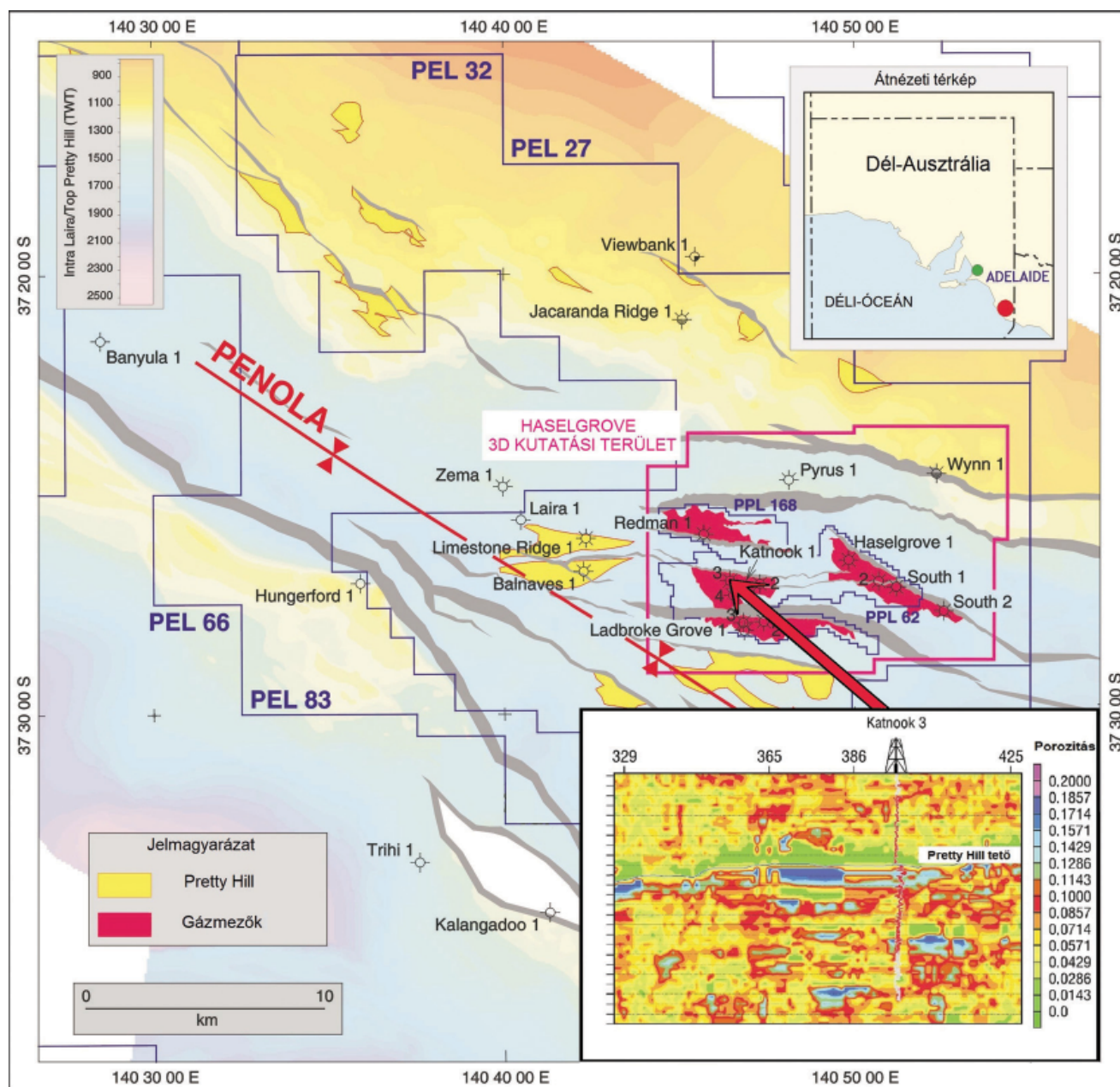
esetben a kvázi mért Stoneley- és nyíróhullám-lassúság kapcsolatát az 5. ábrán szemléltetjük. Látható, hogy növekvő permeabilitás esetén a pontok egyre inkább eltávolodnak az agyagvonalától. (Az agyagvonal egyenlete meg egyezik a homogén esettel, mivel a zónaparaméterek értékét nem változtattuk.) Míg homogén esetben egy-egy pont képvisel egy réteget, addig inhomogén esetben egy pont egy mélységpontnak felel meg a keresztmetszeten. Utóbbi esetben a zaj jelenléte és az inhomogenitás miatt a pontok jobban szóródnak. A (14) modelleget inhomogén esetben is érvényesnek bizonyult (6. ábra), ahol $a = 8,78$, $b = 48,22$, $c = 1,63$. A 7. ábrán a permeabilitásbecslés eredményét láthatjuk. Az adatokat terhelő zaj mértékével arányos hiba mellett tudjuk a permeabilitásszelvényt előállítani. A 2%-os

zaj jelenléte esetén az egzakt és a becsült permeabilitásszelvények távolsága 6,9%-nak adódott, azonban a nemlineáris kapcsolat erősségét mérő rangkorrelációs együttható (0,98) továbbra is szoros kapcsolatot jelez.

Látható, hogy inhomogén kőzetfizikai modell mellett már kismértékű hiba is jelentős becslési hibát okoz. Ezért a módszer zajérzékenységét további vizsgálatokkal tanulmányoztuk. Az inhomogén modellen számított adatokat különböző mértékű (1–5%) Gauss-eloszlásból származó zajjal terheltek. A zajszint változtatása mellett három minősítő paraméter (modell-távolság, rangkorreláció, lineáris korreláció) alakulását figyeltük. A 3. táblázatban a futtatási eredmények láthatók, mely tartalmazza a (14) formulára vonatkozó regressziós együtthatók értékét. A rangkorreláció

3. táblázat Regressziós együtthatók különböző Gauss-zajjal terhelte szelvényadatok és inhomogén modell esetén

Zaj (%)	D_m (%)	R	r	a	b	c
1	3,67	0,99	0,97	9,08	61,51	1,79
2	6,86	0,98	0,90	8,77	48,08	1,63
3	9,83	0,98	0,78	9,17	25,28	1,08
4	11,86	0,98	0,66	7,85	17,15	1,00
5	12,09	0,96	0,65	7,90	16,00	0,94



8. ábra A dél-ausztrál szénhidrogén-mező földrajzi elhelyezkedése és a Katnook-3 fúrás környezetének szeizmikus mérésből származtatott porozitás térképe (Boulton és Donley, 2001)

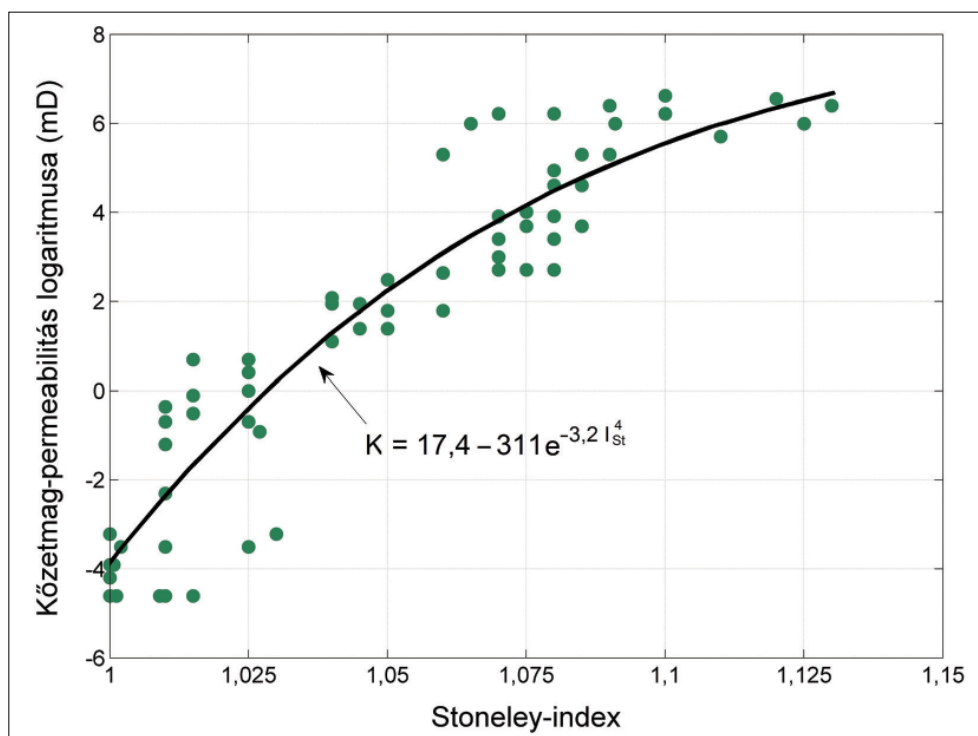
Figure 8 The location of the South Australian hydrocarbon field and the porosity map around Katnook-3 predicted from seismic surveys (Boulton and Donley, 2001)

ciós együttható a legnagyobb mértékű zaj mellett is erős kapcsolatot mutat, azonban a lineáris korreláció mértéke rohamosan csökken. A modell távolság a kezdeti érték 4-szerese 5% zaj esetén. Az együtthatók nagyságrendje és előjele nem változik. Megállapítható, hogy az exponenciális modell zajos adatok esetén is érvényes, azonban a becslés megbízhatóságát a zaj jelentősen befolyásolhatja. Ezt a jelenséget a lineáris közelítésnél is megfigyelhetjük. Emiatt tettünk kísérletet a módszer javítására a nemlineáris modell bevezetésével. A zajérzékenység általában elmondható a többi szelvényezési módszerről is, mely a permeabilitás becslést jelentősen befolyásolja.

A módszer terepi alkalmazása

A szintetikus modellezés eredményeként előállított Stoneley-index vs. permeabilitás összefüggést terepi adatokon is alkalmazhatjuk. Ekkor a mérési szelvények és a becsült közetfizikai paraméterek ismeretében elvégezhetjük a permeabilitás meghatározását (1. ábra). Ebből a célból a Buffin (1996) cikkében szereplő adatsort használtuk fel, mely lehetővé tette a becsült permeabilitásszelvény validálását.

A vizsgált fúrást (Katnook-3) egy dél-ausztrál szénhidrogén-mezőn mélyítették (8. ábra). A kutatási területet magá-



9. ábra Pretty Hill Formáció (Otway-medence, Ausztrália). A magokon mért permeabilitásértékek természetes alapú logaritmusa és a Stoneley-index regressziós kapcsolata a Katnook-3 fúrásban
Figure 9 The regression relationship between the core permeability and Stoneley-index in Katnook-3

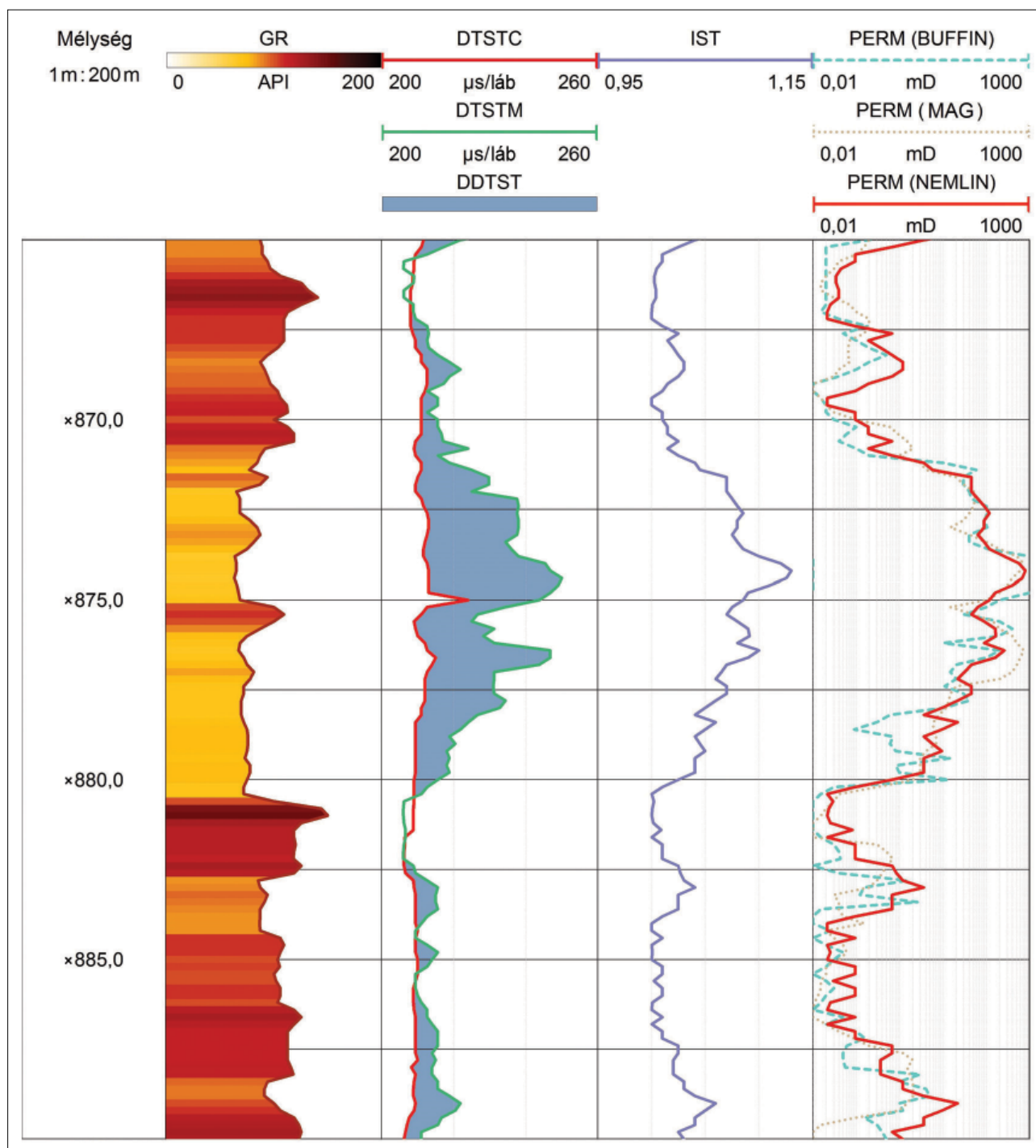
ban foglaló Otway-medence az Antarktisz és az indo-ausztráliai-lemez találkozásának mentén jött létre (riftesedés), melynek kiterjedése Ny-ÉNy irányban mintegy 500 km. A dél-ausztrál kontinens pereme mentén található terület jura–kréta korú medencék sorozatát tartalmazza, amelyek harmadidőszaki takaróval fedettek. Az Otway-medencében számos szénhidrogén-tároló szerkezet található, amelyek általában nagy porozitással és permeabilitással rendelkeznek. Az alsó kréta korú Pretty Hill tárolót gyakori fáciesváltozások jellemzik, mely finom–durva szemű, homokkőből és egyéb ásványi komponensekből áll. A főbb termelő gáztároló az Otway-medencében a Pretty Hill Formáció, amelynek a porozitása Katnook területén meghaladja a 25%-ot, permeabilitása az 1000 mD-t, és a tesztek alapján 451 000 m³ gázt ad naponta. A tároló permeabilitása nem csökken számottevően a mélységgel, bár általában csak a Pretty Hill Formáció felső része alkalmas a termelésre.

Az eljárásban felhasználtuk a GR-szelvényt, mellyel az agyagtartalmat számítottuk ki. Az effektív porozitás a sűrűségi-szelvény alapján becsülhető, ami a permeabilitás külső forrásból történő előállításához szükséges. Az akusztikus hullámkép összetevői szelvényyszerűen rendelkezésre álltak (DTS, DTSTC és DTSTM). Ebből Stoneley-indexet (IST) számoltunk. A regressziós függvény meghatározása érdekében a Stoneley-indexet magmintákon mért permeabilitásértékekkel hasonlítottuk össze (9. ábra). Ennek eredményeként a (14) regressziós függvény paraméterei: $a = 17,4$, $b = 311$, $c = 3,2$. A rangkorreláció értéke 0,98, ami szoros korrelációt mutat a Stoneley-index és a magpermeabilitás kö-

zött (lineáris korreláció értéke 0,78). Az alkalmazott fűrőlyuk- és a becsült permeabilitásszelvények a 10. ábrán láthatók, ahol a PERM (MAG) jelöli a magpermeabilitást, PERM (BUFFIN) a Buffin-féle (lineáris) modell által előállított permeabilitást és PERM (NEMLIN) a nemlineáris közelítéssel adódó permeabilitást. A magadatok elég sűrűn álltak rendelkezésre (olykor 0,2 m-enként). Ezekben a pontokban a nemlineáris módszerrel becsült és a laboratóriumban mért permeabilitásértékek modelltávolsága 7%-nak adódott. A lineáris eredmény (Buffin 1996) és a magon mért értékek modelltávolsága 10,1%. A nemlineáris közelítés ~30%-os relatív javulást hozott a magadatokkal való összehasonlítás során. A rosszabb illeszkedést bizonyos szakaszokon a lyukátmérő hirtelen megváltozása is okozhatja, amit a modell nem vesz figyelembe. A terepi és az inhomogén szintetikus esetet összehasonlítva látható, hogy az előbbinél kisebb mértékű az adatok szórása a regressziós modell körül. Azonos korrelációs együtthatók mellett a terepi eredmény „szelídebb”, mint a szintetikus eset. A szintetikus vizsgálatok tehát reális eredményt tükröznek, melynek eredményei mezőbeli körülmények között is jól alkalmazhatók.

Összefoglalás

A tanulmányban a nukleáris és akusztikus szelvényekből történő permeabilitásbecslés lehetőségét mutattuk be. Mind a szintetikus modellvizsgálatok, mind pedig a terepi alkalmazás azt bizonyítja, hogy a Stoneley-hullámbeérkezések



10. ábra Mért fűrőlyukszelvények és a permeabilitásbecslés eredménye a Katnook-3 fűrőásban
Figure 10 Measured well logs and the result of permeability estimation in Katnook-3

alapján a permeabilitás statisztikus (közelítő) eljárással megfelelően származtatható. A módszer előnye a drága magmérésekkel szemben, hogy gyors, direkt eljárásról alapul és folytonos in situ információt szolgáltat a szelvényezett szakasz mentén. Az eljárás vertikális felbontóképességének a szondahossz szab határt, amely az akusztikus eszköznél általában 2 láb. A módszer az irodalomban megtalálható hasonló statisztikus eljárás továbbfejlesztése, mely a Stoneley-index és permeabilitás kapcsolatát nemlineárisnak

feltételezi. Ez a hagyományos lineáris közelítéssel szemben nagyobb korrelációs együtthatót eredményez. E szoros kapcsolatot a terepi eredmények is alátámasztják. A nemlinearitás különösen igaz a kis permeabilitások tartományában. A módszerrel ezért a gyenge áteresztőképességű tárolók kiértékelése során is pontosabb becslést valósíthatunk meg.

A javasolt módszer hátrányaként annak zajérzékenysége említhető, ezért lényeges a szelvények megfelelő előkészí-

tése és az adatfeldolgozás (pl. Stoneley-féle intervallum-idők meghatározása a teljes hullámképből, szelvények környezeti korrekciója). A zajérzékenység javítására robusztus és rezisztens regressziós módszereket ajánlunk, melyek az adatok sűrűségeloszlásától függetlenül, valamint kiugró adatok jelenlétében is reális becslést adnak. A probléma megoldására hatékony eszköz lehet a Steiner-féle iteratív leggyakoribbérték-módszer (Steiner 1997). Ezen túl a bemutatott eljárás alapját képezheti a permeabilitás inverz modellezéssel történő előállításának. A nemlineáris regressziós összefüggés elméleti szonda-válaszfüggvényként fogható fel, mely kapcsolatot teremt a permeabilitás és a permeabilis rétegben mért Stoneley-lassúság között. Abban az esetben, amikor az a , b , c együtthatók ismertek, akkor az egyenlettel a Stoneley-féle lassúságadatok számíthatók a permeabilis rétegben. Az iteratív inverziós eljárás során a permeabilitást addig változtatjuk, míg a mért és számított Stoneley-görbék illeszkedése minimális lesz. Az ekkor előálló permeabilitásszelvényt tekinthetjük az inverz feladat megoldásának. E módszer kipróbálása előtt a nemlineáris választ egyenlet érvényességét még több mérési területen igazolni kell, valamint meg kell vizsgálni a modellegyenlet permeabilitásérzékenységét, ami igazolhatja, hogy a permeabilitás inverziós eljárásán belül meghatározható, valamint rávilághat az esetleges többértelműség problémájára.

Köszönetnyilvánítás

Az első szerző (SzNP) mint a PD109408 sz. Ifjúsági OTKA témavezetője köszönetet mond az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatásáért, egyszersmind köszönetét fejezi ki a Magyar Tudományos Akadémiának a Bolyai János Kutatási Ösztöndíjjal való támogatásért. A szerzők köszönetet mondanak dr. Vass Péternek hasznos javaslataiért, valamint dr. Peter Boultnak (GINKGO ENP GNG) az ausztrál adatok közlésének engedélyéért.

A tanulmány szerzői

Szabó Norbert Péter, Kalmár Csilla

Hivatkozások

Badri M., Sousa S., Klimentos T., 2000: Shear anisotropy applications in production optimization, Western Desert, Egypt. SEG Annual Meeting, Paper 2000-1695, pp. 1–4
 Bala M. J., 2010: Can we determine permeability with the Stoneley wave slowness from acoustic full waveform. 72nd EAGE Conference and Exhibition, P532, pp. 1–5
 Biot M. A., 1955: Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. J. Acoust. Soc. Am. 28(2), 168–178

Biot M. A., 1962: Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. J. Appl. Phys. 33, 1482–1498
 Boulton P. J., Donley J., 2001: Volumetric calculations using 3D seismic calibrated against porosity logs – Pretty Hill formation reservoirs, Onshore Otway Basin. PESA Eastern Australasian Basins Symposium, pp. 425–433
 Brie A., Endo T., Johnson D. L., Pampuri F., 2000: Quantitative formation permeability evaluation from Stoneley waves. SPE Reservoir Eval. and Eng. 3(2), 109–117
 Buffin A., 1996: Permeability from waveform sonic data in the Otway Basin. SPWLA 37th Annual Logging Symposium, Paper 1996-GG, pp. 1–11
 Chang S. K., Liu H. L., Johnson D. L., 1988: Low-frequency tube wave in permeable rocks. Geophysics 53, 519–527
 Coates R., Xiao L., Prammer M. G., 1999: NMR logging principles and applications. Halliburton, Houston
 Ellis D. V., Singer J. M., 2007: Well logging for earth scientists, 2nd Edition. Springer-Verlag, pp. 533–562
 Haldorsen J. B. U., Johnson D. L., Plona T., Sinha B., Valero H. P., Winkler K., 2006: Borehole acoustic waves. Oilfield Review, Spring 2006, 34–43
 Mathieu F., Toksöz M. N., 1984: Determination of fracture permeability using acoustic logs. SAID-SPWLA 9th Europ. Intern. Form. Eval. Trans., Paper 47
 Norris A. N., 1989: Stoneley-wave attenuation and dispersion in permeable formations. Geophysics 54, 330–341
 Raymer L. L., Hunt E. R., Gardner J. S., 1980: An improved sonic transit time-to-porosity transform. SPWLA 21st Annual Logging Symposium, Paper 1980-P, pp. 1–13
 Rosenbaum J. H., 1974: Synthetic microseismograms: Logging in porous formation. Geophysics 39, 14–32
 Schmitt D. P., Bouchon M., Bonnet G., 1988: Full-waveform synthetic acoustic logs in radially semiinfinite saturated porous media. Geophysics 53, 807–823
 Spearman C., 1904: The proof and measurement of association between two things. The American Journal of Psychology 15, 72–101
 Steiner F. (ed.), 1997: Optimum methods in statistics. Academic Press, Budapest.
 Tang X. M., Cheng C. H., 1994: Fast inversion of formation permeability from Stoneley wave logs using a simplified Biot–Rosenbaum model. Earth Resources Laboratory Industry Consortia Annual Report 1994-08, pp. 209–226
 Timur A., 1968: An investigation of permeability, porosity, and residual water saturation relationships. SPWLA 9th Annual Logging Symposium, Paper 1968-J, pp. 1–18
 White J. E., 1983: Underground sound: Application of seismic waves. Elsevier, pp. 239–245
 Williams D. M., Zemanek J., Arigona F. A., Dennis C. L., Caldwell R. L., 1984: The long spaced acoustic logging tool. SPWLA 25th Annual Logging Symposium, Paper 1984-T, pp. 1–16
 Winkler K. W., Liu H. L., Johnson D. L., 1989: Permeability and borehole Stoneley waves: Comparison between experiment and theory. Geophysics 54, 66–75