



Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
Geofizikai Intézeti Tanszék



Kőzetfizikai modellezés permeabilitás meghatározása céljából Stoneley hullámterjedési idők felhasználásával

Készítette: Kalmár Csilla

Műszaki Földtudományi Kar
Földtudományi mérnöki mesterszak, Geofizikus-mérnöki szakirány
2. évfolyam

Témavezetők:

Dr. Szabó Norbert Péter

Műszaki Földtudományi Kar, Geofizikai Intézeti Tanszék

Miskolc, 2013. november 1.

Eredetiségi nyilatkozat

"Alulírott Kalmár Csilla, a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem."

Miskolc, 2013. november 1.

.....
Kalmár Csilla

A konzulens nyilatkozata

"Alulírott Dr. Szabó Norbert Péter, a Miskolci Egyetem Geofizikai Intézeti Tanszék egyetemi docense, a TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem."

Egyéb megjegyzések, ajánlás:

Alulírott, Kalmár Csilla témavezetője a beadott dolgozatot a nemzetközi kutatások tekintetében időszerűnek és újszerűnek tartom. Az alkalmazott módszer a modern mélyfúrási geofizikai szelvényértelmezést nagymértékben segítheti, mely a készletszámítások és egyéb napi szinten elvégezhető ipari feladatok megoldásában pontosságbeli növekedést hozhat. A téma számos továbbfejlesztési lehetőséget rejt magában, melynek a későbbiekben való publikálása is elképzelhető.

Miskolc, 2013. november 1.

.....
Dr. Szabó Norbert Péter

Tartalomjegyzék

1.Bevezetés.....	5
2.Akusztikus hullámok a fúrólyukban	6
2.1Direkt hullámok.....	6
2.2Testhullámok.....	7
2.3Felületi hullámok.....	8
3.Akusztikus mérések.....	9
3.1Monopól eszközök	11
3.1.1Hagyományos akusztikus eszközök.....	11
3.1.2Monopól array eszközök	11
3.2Dipól források.....	12
3.3Multipól array eszközök	13
3.4Kereszt dipól eszközök	13
3.5Akusztikus lyukfalleképezés	14
4.Teljes hullámkép.....	14
4.1Stoneley hullám.....	16
5.Permeabilitás meghatározása Stoneley hullámokból.....	19
5.1Buffin munkássága	20
5.2Bala munkássága	23
5.2.1Bala eredményei	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
5.2.2Bala következtetései	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
6.Modellezési vizsgálatok	26
7.Vizsgálatok szintetikus modelleken	30
7.1Rétegenként homogén modell.....	31
7.2 Inhomogén modell	34
8.Vizsgálatok terepi adatokon	39
8.1A terület rétegtani leírása	39
8.2 Terepi eredmények	41
9.Összefoglalás	43
10.Köszönetnyilvánítás.....	45
11.Mellékletek	47
11.1Modell 1 programkódja.....	47
11.2Modell 2 programkódja.....	49

11.3Válaszfüggvények	55
11.4 Modell3 programkódjai.....	56
12.Irodalomjegyzék	45

1. Bevezetés

Az akusztikus teljes hullámkép fúrólukban történő felvétele ma már általánosan elterjedt módszer a hazai és nemzetközi mélyfúrási geofizikai szénhidrogén-kutatásban, mely alkalmas a kőzetek repedezettségének, anizotrópiájának és áteresztőképességének a meghatározására (Ellis és Singer, 2007). Ez utóbbi paraméter igen fontos a szénhidrogén-készletek megfelelő becslése szempontjából. Mivel a permeabilitás az egyik legnehezebben meghatározható paraméter, ezért a standard módszereken túl nagy jelentősége van az újabb (független) módszerek alkalmazásának. A rendelkezésre álló adatfeldolgozási eljárásokat értékelve, azt tapasztaljuk, hogy minden módszernek megvannak a gyengeségei, ui. gyakran a származtatott értékek ellentmondásban állnak a fúrómagok alapján meghatározott permeabilitással. Az áteresztőképesség becslési pontossága elérheti az egy (másfél) nagyságrendet is. A Stoneley hullám elkülönítésével lehetővé válik a tárolókőzetek in-situ áteresztőképességének a meghatározása, mellyel növelhetjük a kőzetfizikai értelmezés pontosságát és megbízhatóságát.

A permeabilitás akusztikus mérésekből történő meghatározására standard módszernek a Stoneley beérkezési időadatok inverzióját tekinthetjük (Tang és társai, 1990). Azonban, az utóbbi években olyan nagyszámú eredmények is születtek, melyek egyszerűsített, empirikus megfigyeléseken alapuló algoritmust használnak fel (Buffin, 1996; Bala, 2010). Ezek közös jellemzője, hogy az ún. Stoneley-index és a permeabilitás kapcsolatát nagyszámú terepi mérésre alapozott statisztikus módszerrel határozzák meg. Azonban, ezek a formulák nem függetlenek a kutatási területtől. Vizsgálataim során célul tűztem ki, hogy az empirikus függvények kőzetfizikai modelltől való függését megvizsgáljam és jól használható összefüggést adjak a Stoneley-index és az általánosan elfogadott Timur formulából becsült permeabilitás között.

A TDK dolgozatban áttekintettem az akusztikus szelvényezési módszert és a klasszikus permeabilitás becslés elvi alapjait, melynek irodalmi áttekintését többek között Balan és társai (1995) adták meg. Majd rámutatok a Stoneley-index és a permeabilitás nemlineáris kapcsolatára. A regressziós függvénykapcsolatot egzakt kőzetfizikai modellek alapján adom meg. A direkt modellezés során felhasználok a természetes-gamma intenzitás szelvényt, mellyel az agyagtartalmat becsülöm meg. A gamma-gamma (sűrűség) és az akusztikus (nyíróhullám terjedési idő) szelvény meghatározásával elméleti Stoneley intervallum-időket számítok impermeábilis kőzetek esetére. A számított Stoneley beérkezésekhez zaj hozzáadásával kvázi-mért Stoneley adatokat számítok, melyekkel

Stoneley-index szelvényt állítok elő. Ez a mennyiség a porozitástól és a kötött víztelítettségétől függő (Timur formulával számított) permeabilitással egyenes arányosságot mutat. A kapott eredményt a kőzetfizikai paraméterek (porozitás, agyagtartalom, maradék víztelítettség) széles tartományán megvizsgálom a fenti szintetikus modellek esetén. A módszer tesztelését terepi adatokon is elvégezem, melynek keretében összehasonlítom a Stoneley indexből származtatott permeabilitást magadatokon kapott mérési eredményekkel.

2. Akusztikus hullámok a fúrólyukban

Az akusztikus szondák fúrólyukban történő alkalmazása az 1960-as évektől kezdődött. Jelenleg modern több adót és vevők sorozatát, valamint irányfüggő méréseket megvalósító szondákat alkalmaznak. Ezen szondákkal mérhető szónikus hullámoknak három fő típusát különböztetjük meg, a direkt hullámokat, a testhullámokat illetve a felületi hullámokat (Halliburton, 2012).

2.1 Direkt hullámok

A direkt hullámok az adó és a vevő között közvetlenül terjednek. Terjedésükben a kőzetformáció nem játszik szerepet, ezért nincs információtartalmuk arra vonatkozóan. A mélyfúrási geofizikában két típusát különböztetik meg, az iszaphullámot, illetve az eszköz működése által generált hullámot (Halliburton, 2012). Az iszaphullám az adóból a vevőbe közvetlenül az iszaposzlopon keresztül terjed a fúróiszapnak megfelelő nyomáshullám sebességgel. A teljes hullámképen a Stoneley hullámtól csak nehezen különíthető el. A másik típus a szonda testen keresztül egyenesen a vevő felé terjed. A hullám sebessége függ, a szelvényező eszköz agyagától, és a felület kiképzésétől is. Kis terjedési idő jellemzi, aminek következtében interferálhat a kompressziós hullámmal. Ez a probléma megelőzhető, amennyiben a szondák burkolatán réseket alakítunk ki, kis távolságokra egymástól. Ennek következtében megnövekszik a távolság, amit a terjedő hullámnak a burkolat anyagában meg kell tennie a vevő eléréséig, így a beérkezés később következik be. Ez a megoldás biztosítja, hogy egy olyan hullámé legyen az első beérkezés, amely fúróiszapban keletkezik, a kőzetformációban terjedő refraktált hullám hatására, és nem az eszköz burkolata mentén terjed (Hursán, 2005).

2.2 Testhullámok

Azokat a hullámokat nevezzük testhullámoknak, melyek határfelület nélküli vagy legalábbis attól távol lévő folytonos izotróp rugalmas közegben terjednek. Rugalmas közegben a rezgésállapot megszűnte után a közeg eredeti állapotát veszi fel. A longitudinális hullám olyan mozgást ír le, amelynél a terjedés irányában sűrűsödés és ritkulás váltakozik. Így a kompressziós hullám jellemzője, hogy a hullámmozgásban részt vevő (hullámot közvetítő) elemi részek rezgési iránya megegyezik a hullám terjedés irányával. Ezt a hullámtípust más elnevezéssel primer (P) hullámnak hívják (Pethő és Vass, 2011). A rugalmas hullámok és a kőzetfizikai mennyiségek kapcsolatát különböző kőzetfizikai modellekkel vizsgálhatjuk (Dobróka, 1991).

A longitudinális hullám egyaránt terjed szilárd-, folyadék- és gáz halmazállapotú közegben. Ez a leggyorsabb hullámtípus, melyet a vevők első beérkezésként érzékelnek. A kompressziós hullám az iszapban terjedő nyomáshullám refrakciója révén alakul ki, és ennek hatását úgy szintén az iszapban terjedő nyomáshullámon keresztül detektálhatjuk a kőzettől egészen a vevőig. Terjedési sebességét az alábbi egyenlet adja meg:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad (1)$$

Az (1) összefüggés szerint a rugalmas hullámok terjedési sebességét a Lamé állandók (λ és μ) és a tömegsűrűség (ρ) határozza meg. A longitudinális hullám gyorsabban terjed, mint a transzverzális hullám, mivel a Lamé állandók pozitív értékek.

A transzverzális hullámra jellemző, hogy a közeg elemi részeinek rezgési iránya merőleges a hullám terjedés irányára és térfogatváltozás nincs. Más elnevezéssel szekunder (S)-, nyíró hullámnak is nevezik. Csak szilárd közegben terjed és sebessége kisebb, mint a longitudinális hullámé. A nyíróhullám sebessége:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (2)$$

A nyíró hullámoknak két típusát különböztetjük meg attól függően, hogy az S hullám terjedése során a részecskék a függőleges (SV hullám) vagy a vízszintes (SH hullám) síkban végeznek rezgést (Pethő és Vass, 2011).

Az akusztikus adóból kompressziós hullám az iszapon keresztül a lyukfalig terjed. A határfelületen azonban a beérkező hullámenergia a közegek tulajdonságaitól függően különböző mértékben megoszolva többféle hullámtípus formájában terjed tovább. Kompressziós-, nyíró-, és felületi hullámok keletkeznek. A mozgásba hozott lyukfalról a különböző hullámtípusok energiájának egy része átadódik az iszapnak, amiben kompressziós hullámként szállítódik a vevő felé. A különböző beérkezések az egyes hullámtípusokról informálnak (Spisák, 2013).

2.3 Felületi hullámok

A felületi hullámok az eltérő akusztikus tulajdonságú közegek határfelülete mentén terjednek. A mélyfúrási geofizikában négy féle típust különböztünk meg. Ezek közé tartoznak a Stoneley-, hajlító, Rayleigh és a Love hullámok (Halliburton, 2012).

A Stoneley hullámok a lyukfal és a közethatár felületén terjedő gyengén diszperzív hullámok. Alacsony frekvenciás gerjesztéssel állíthatók elő ($f < 3\text{kHz}$). Az iszaphullámnál kisebb sebesség jellemző rá:

$$V_{\text{St}} \approx 0.9 V_f, \quad (3)$$

ahol V_f az iszaphullám sebességét jelöli.

A hajlító vagy flexurális hullám a fúrólyuk mentén terjed dipól-forrással történő gerjesztés eredményeként. Ezek az adók radiálisan aszimmetrikus longitudinális hullámot gerjesztenek a fúrólyukban. A hullám neve onnan ered, hogy az adók az egyik irányban nyomásnövekedést, míg másik irányban nyomás csökkenést okoznak, melynek következtében a fúrólyuk fala a hullámterjedés irányában merőlegesen elhajlik az egyik irányba (Halliburton, 2012). Az elemi részecskék rezgési iránya merőleges a hullám terjedési irányára a tranzverzális hullámokhoz hasonlóan, ezen kívül alacsony frekvencián a sebességük is hasonló. A hajlító hullámok a fúrólyuk falán haladva kapcsolatba lépnek a közetformációval, ezért információt hordoznak a közetek mechanikai tulajdonságairól. A hajlító hullámok a nyíró hullámokkal ellentétben diszperzívek, ami azt jelenti, hogy a lassúságuk a frekvenciával változik. Ennek oka a lyukfal jelenléte.

A szabad felszín közelében kétféle felületi hullám, a Rayleigh és a Love hullámok figyelhetők meg. A Rayleigh-hullám esetén a közeg pontjai a hullám terjedési irányában

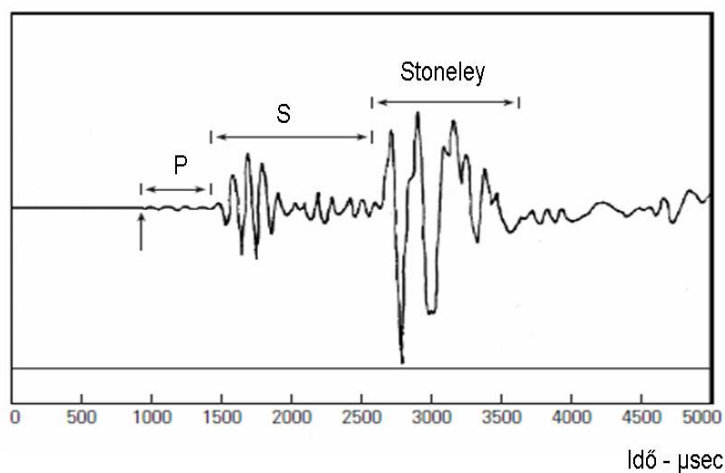
lévő vertikális síkban, ellipszis pályán végzik rezgésüket, a forrás felé mintegy visszafelé forogva. Egy SV és egy P hullám szuperpozíciójaként kezelhetők, ahol a részecskék kitérése megközelítőleg másfélszer nagyobb, mint horizontálisan. A Love hullám esetén a részecskék a vízszintes síkban, a hullám terjedési irányára merőlegesen rezegnek. Kialakulásuknak kedvez, ha a felszíni laza réteg alatt egy keményebb kőzet található (Pethő és Vass, 2011).

3.Akusztikus mérések

A rugalmas hullámok terjedésén alapuló mérési módszerek használatosak a mélyfúrási geofizikában is. Az akusztikus módszerek eredményei fontos szerepet játszanak a szeizmikus modellalkotásban, a szeizmikus és mélyfúrási információk összekötésében és az inverzióban is. A szeizmikus hullámok terjedési sebessége a kőzetekben néhány km/s. A szeizmikában használt frekvencia tartománnyal szemben, a mélyfúrási geofizikában nagyobb frekvencia szükséges a szükséges mélységfelbontás eléréséhez (20-25kHz) (Balázs, 2013). Az akusztikus (vagy szónikus) szelvényezés során a fúrólyukban keltett rugalmas hullámok kőzetekben áthaladó terjedési sebességét és energiáját vizsgáljuk. Az akusztikus szondák legfontosabb elemei a szondába lejuttatott elektromos energiát mechanikai rezgésekké átalakító adók és a kőzeteken áthaladó rugalmas hullámok hatását elektromos jellé alakító vevők (Hursán, 2005).

A szondában elhelyezett impulzusadó rendszeres időközönként (10-50ms) kibocsát egy 10-30kHz frekvenciájú szinuszos hullámcsomagot. Az így létrejött impulzusok longitudinális hullámokat hoznak létre a szondát körülvevő öblítő folyadékban. A fúrólyuk falához érkező refrakciót és reflexiót szenvednek, ami abból ered, hogy a kőzet akusztikus tulajdonságai az öblítő iszaptól eltérnek. A refrakció során, a fúrólyuk-kőzet határfelületen v_p sebességgel longitudinális hullámok, míg a kőzetben transzverzális hullámok terjednek, v_s sebességgel (Balázs, 2013). Ha az adótól bizonyos távolságra (2-2.5m) elhelyezett vevővel észleljük a beérkező hullámokat, akkor a teljes hullámképen különböző komponenseket láthatunk. Valamely csatorna teljes hullámképes felvételén optimális esetben három jól elkülönülő hullámcsomag figyelhető meg (1. ábra), a primer (P), a nyíró (S) és a felületi hullám (Stoneley- és iszaphullám). Mivel az akusztikus szelvényezésben a rugalmas energia terjedésekor harmonikus és impulzusfolyamatok egyaránt fellépnek, ezek

kombinációja révén rugalmas hullámcsomagok jönnek létre, amelynek sajátos spektrális összetétele van.



1. ábra: Fúrólukban rögzített jellegzetes akusztikus hullámkép (Ferenczy és Kiss, 1989)

A hullám modusok, hullámcsomagok sebesség szerint elkülönülve érkeznek. A jelkibocsátás után bizonyos idő elteltével a vevő észleli az első beérkezést, ami a legnagyobb sebességű longitudinális hullám beérkezésének ideje (Ferenczy és Kiss, 1989). A kibocsátott hullámcsomag egy adott középfrekvenciával jellemezhető (1-15kHz). Az egyes hullámcsomagok időtartama 0.1-0.5ms-ban vannak meghatározva. A két szomszédos hullámcsomag kibocsátása közötti időtartamban a vevők segítségével történik a beérkezések mérése. Az intervallumterjedési idő mérése több szelvényező eszközzel is megvalósítható a fúrólukban.

Az akusztikus karotázs eszközökkel felvett akusztikus hullámok az energiaforrástól, a megtett úttól, és a formáció és a fúróluk tulajdonságaitól függenek. Két szomszédos vevőben érzékelt beérkezési időkülönbség (intervallumidő) azonban már csak a közet sebességétől függ, melynek mérése a porozitás meghatározás alapja (Ferenczy és Kiss, 1989), mely a kvantitatív karotázs értelmezés egyik alapszere. A kábeles szelvényezésben a forrás két elsődleges típusai, a monopól és dipól források (Haldorsen és társai, 2006).

3.1 Monopól eszközök

A monopól adó minden irányba egyenlő mértékben bocsátja ki az energiát, míg a dipól adó egy kiválasztott irányba bocsát ki jelet. A monopól adótól a gömbi hullámfront egy rövid távolságot tesz meg a fúróluk folyadékon keresztül, amíg el nem éri a fúróluk falát. Az energia egy része visszaszóródik a fúrólukba, míg a másik része a formációban terjedő hullámokat generál. A hullámterjedés iránya mindig merőleges a hullámfrontra. A monopól vevő a radiális elmozdulásokra érzékeny (Haldorsen és társai, 2006).

3.1.1 Hagyományos monopól eszközök

Az első eszközök még két vevőt használtak, és értékelhető eredményt csak központosított szondahelyzet és egyenletes lyukfal esetén adtak. A vevők távolsága általában két láb. Ha a távolabbi vevőn érzékelt terjedési időből levonjuk a közelin érzékeltet, olyan terjedési idő értéket kapunk, amely csak a közet rugalmas tulajdonságaitól függ, a fúrófolyadékban terjedő longitudinális hullám sebességétől nem. A lyukkompensált akusztikus szondát (Borehole Compensated, BHC) az excentrikus (ferde) szondahelyzet és az eltérő lyukátmérők miatt hozták létre. Ha több adót alkalmazunk, a mért akusztikus intervallumidőket átlagoljuk. A korai eszközöknél még a transzverzális sebesség meghatározása nem volt lehetséges a kis sebességű (pl. gáztároló) formációknál. A longitudinális és transzverzális hullámok jobb elkülönítése érdekében hosszú szondákat alkalmaztak, ez viszont nagymértékben rontotta a vertikális felbontóképességet. Ezen túl az eszköz analóg jele zajjal terhelt, így az analóg monopól eszközöket a kompressziós hullám terjedési sebességének mérésére alkalmazták.

3.1.2 Monopól „array” eszközök

Az informatika, valamint a digitális technika fejlődésével a mélyfúrási geofizikában alkalmazott konvencionális (két adóval és két vevővel rendelkező) lyukeszközöket napjainkra felváltották az úgynevezett „array” típusú szondák, amelyeknél minimum négy vevő található. Az akusztikus „array” eszközök monopól érzékelők egymástól relatíve kis távolságra elhelyezett vevők sorozatát tartalmazzák (Ellis és Singer, 2007). A vevők nagy száma miatt az adatfeldolgozás során az egyes vevők jelei között jó korreláció érhető el. A korrelációs módszer lehetővé teszi a későbbi beérkezések nagy pontosságú kijelölését, amelyek

összegzésével jelentősen növelhető az azonos mélységpontban kapott információ jel/zaj viszonya. A vevők távolsága általában fél láb, így a vertikális felbontóképessége is elég nagy. A szondán az adókat és a vevőket aszimmetrikusan helyezik el, ezért nagyobb adó-vevő távolság érhető el, így a longitudinális és tranzverzális hullámok szétválasztása könnyebb. A nagy adó-vevő távolság miatt nagy sebességű formációk esetén nem csak egyszerű első beérkezés mérésre, hanem teljes hullámkép mérésre is alkalmas. Nagy sebességű formációban jól elkülöníthető longitudinális, transzverzális és Stoneley hullámok érkeznek vissza a vevőbe. Kis sebességű formációkban csak a longitudinális és Stoneley hullámok beérkezéseit tudjuk kijelölni. Ennek oka, hogy a kis sebességű formáció esetén, mivel a közetek sebessége az izsapsebességnél kisebb, és a hullám a beesési merőlegeshez törik, nem alakulhat ki refraktált hullám, csak reflektált hullám. A monopól „array” eszközök alkalmazása a longitudinális és transzverzális hullámok mérésén kívül még további alkalmazásokra is lehetőséget biztosít (pl. a közetek rugalmas állandóinak meghatározása). A jel már a szondában digitalizálásra kerül a növekvő adatmennyiség miatt (Spisák, 2013).

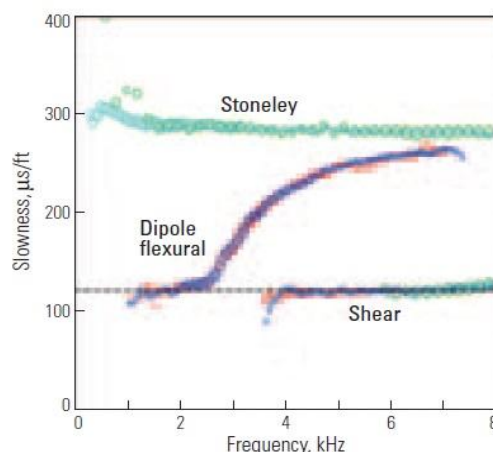
3.2 Dipól-források

Eddig, azokra a hullámokra fókuszáltunk, amiket monopól forrásokkal keltettünk, de néhány alkalmazás más típusú forrást igényel. A dipól-adók nagy előnye, hogy ezek segítségével kis sebességű formációk esetén is mérhetővé válik a nyíróhullám intervallumterjedési ideje.

A dipól-források elsődlegesen hajlító (flexurális) hullámokat gerjesztenek, kompressziós és nyíró hullámokkal együtt. A hajlító hullám mozgását a fűrólyuk mentén úgy képzelhetjük el, hogy ahhoz hasonló, mint ha úgy másznánk fára, hogy közbe valaki a földön állva rázná a fa törzsét. A hasonlóság jobban működne, ha a fa törzse a tetején rögzítve lenne és a fa konstans átmérővel rendelkezne. Általában, az eszköz, ami hajlító hullámot akar keltetni, két dipólus forrást fog tartalmazni, amik derékszögben helyezkednek el a Descartes koordináta-rendszer x és y tengelyei mentén. A dipólus adók külön-külön küldik a jelet. Először, az X irányú dipól küld jelet és a hajlító hullámformát rögzítik, majd az Y irányú dipólus küld jelet és egy külön mérést vesznek fel.

A hajlító hullámok sebességének mérése lehetővé teszi lassú formációkban a nyíróhullám sebesség meghatározását. A dipól-vevők csak a hajlító hullámokra érzékenyek, a radiálisan szimmetrikus longitudinális, transzverzális és Stoneley hullámokra nem. A hajlító hullámok a fűrólyuk falán haladva kapcsolatba lépnek a

kőzetformációval, ezért információt hordoznak a kőzetek mechanikai tulajdonságairól. Azt a grafikont, ami a hajlító hullám lassúságát a frekvencia függvényében ábrázolja, diszperziós görbének nevezzük (2. ábra). A diszperziós görbék jellemzik a hullám lassúságát a különböző frekvencia értékeknél, izotróp formációkban. A dipól-források által gerjesztett hajlító hullámok ebben a formációban nagy diszperziót mutatnak. Alacsony frekvenciás határesetben a hajlító hullámok lassúsága a nyíró hullámok lassúságához tart (Haldorsen és társai, 2006).



2. ábra: Akusztikus mérések diszperziós görbéi (Haldorsen és társai, 2006)

3.3 Multipól „array” eszközök

A multipól eszközök monopól és dipól adókat és vevőket is egyaránt tartalmazhatnak. A multipól vevőkkel konszolidálatlan formációkban is lehetővé válik a longitudinális és tranzverzális hullámok mérése. A sok vevő miatt a hullámképek elemzése során elvégezhető korrelációs adatfeldolgozás pontosabb és megbízhatóbb. Az egyes hullám módusok időbeli eltolódása a hullámkép sorozaton pontosabban megadható keresztkorrelációs technikával vagy más hasonlósági kritériumon alapuló módszer segítségével. Továbbá a korrelációs technikával kimutatható az adott módusok diszperziója is (Haldorsen és társai, 2006).

3.4 Kereszt dipól eszközök

Ezeknél az eszközöknél, az adók és a vevők kereszt irányban helyezkednek el a szondán. Ez az elhelyezés teszi lehetővé az egymásra merőleges hullámképek felvételét,

ezáltal segítségével a kőzetformáció anizotrópiája is kimutatható. A kereszt-dipól szondák teljes hullámkép felvételére is alkalmasak, és a nagy adó vevő távolságok miatt jobban elkülönülnek a hullámtípusok.

A kereszt-dipól eszközökkel meghatározhatók az in-situ kőzetfeszültségi irányok, kimutatható a kőzetformáció anizotrópiája, feltérképezhető a formáció repedezettsége, a fúrás által indukált repedések és a fűrőlyuk ovalitása (breakout jelenségek). Ezeken kívül, a kereszt-dipól eszközök képesek a kőzetformáció mechanikai tulajdonságainak irányfüggésére vonatkozó információt is szolgáltatni (Haldorsen és társai, 2006).

3.5 Akusztikus lyukfalleképezés

A képalkotó szonda, a kőzetek akusztikus válaszát használja fel a képalkotásra. Ennél a módszernél a szondában található egy motor, ami nagy fordulatszámmal forgatja meg az adó-vevő rendszert, miközben ultraszónikus impulzusokat bocsát ki és fogad. Ezáltal a lyukfal vagy a bélésű változásairól néhány mm-es felbontással szolgáltat képet. A lyukfalról reflektált akusztikus hullám amplitúdóját és beérkezési idejét méri. Egy körbefordulás alatt több mint 200-szor regisztrálja az amplitúdót és a terjedési időt (Kiss, 2013). A szonda vízszintes felbontóképessége kb. 2.5mm, míg függőleges felbontóképessége kb. 4.5 mm (Pethő és Vass, 2006). Az akusztikus képalkotó eszközök közül az egyik legismertebb a Baker Hughes terméke, a CBIL („Circumferential Borehole Imaging Log”). Az adóegység másodpercenként 1500 impulzust bocsát ki 250kHz-es frekvenciával. Ez a szonda másodpercenként 6 fordulatot megtéve, fordulatonként 250 mérést regisztrál, miközben spirálisan tapogatja le a lyukfalat. Teljes, 360°-os fűrőlyuk leképezést tesz lehetővé. A CBIL különösen alkalmas a törések és vetők elemzésére (Baker Hughes, 2003).

4. Az akusztikus teljes hullámkép

A korábbi akusztikus mérőberendezések csak a longitudinális hullámot tudják regisztrálni. A modernebb szondák a teljes akusztikus hullámkép rögzítésére is alkalmasak (Baker Atlas, 2001). A korszerű akusztikus eszközök, a gyors A/D konverzió és adatátvitel, valamint a nagy kapacitású adattárak segítségével képesek, az adótól különböző távolságra lévő vevők segítségével, több csatornán rögzíteni a hullámképet.

Ahhoz, hogy az egyes csatornákon az információszerzés szempontjából lényeges hullámok megfelelő módon rögzítve legyenek, a felvétel kezdetét, a mintavételi időközt és a felvétel hosszát körültekintően kell megválasztani.

Kétdimenziós közelítésben, amikor a hullámfront a fúróiszapban találkozik a fúrólyuk falával, három új hullámfrontot hoz létre. Az első a reflektált hullámfront, ami visszafordul a fúrólyuk közepe felé V_m sebességgel. A kompressziós, és nyíró hullámok áthaladnak vagy refraktálódnak a határfelületen, V_p és V_s sebességgel terjednek a formációban. A legegyszerűbb esetben a kemény vagy gyors formációkba tehát a következő érvényesül: $V_p > V_s > V_m$. Az elsőként beérkező kis amplitúdóval jellemezhető hullámcsomag, a formációban terjedő refraktált kompressziós hullám által a fúrólyuk folyadékban létrehozott, síkhullámot közelítő hullámfront beérkezésének az eredménye. Ez a hullámfront „sodorvonalhoz” hasonlóan kapcsolódik a formációbeli P hullámfronthoz, és a sebessége is azonos azzal (v_p). A fúrólyuk falával bezárt szöge, a kritikus szög, az iszapbeli kompressziós hullámsebesség (v_m), és a formációbeli kompressziós hullámsebesség viszonyával áll kapcsolatban. A kompressziós hullám terjedésekor a rugalmas közeg részecskéi a hullámterjedés irányába mozdulnak el. A második hullámcsomag, a formációban terjedő refraktált nyírási, vagy S hullám fúrólyukbeli sodorvonalának a beérkezése, sokkal nagyobb amplitúdóval jelentkezik. Sebessége a nyírási hullámsebességgel egyezik meg (v_s). A hullámfront szöge, kritikus szöge, itt is a sebességek viszonyától függ, a rugalmas közeg részecskéinek mozgása a terjedés irányára merőlegesen történik. A refraktált hullámok energiájának egy része tehát visszasugárzódik az iszapba, s ennek köszönhető a detektálásuk (Haldorsen és társai, 2006). A kompressziós és a nyírási hullámok beérkezését követi a hullámképen a Stoneley hullám. A hullámcsomagban jelentkező felületi hullám amplitúdók jelentős mértékben meghaladják az előző hullámtípusok amplitúdóit (Spisák, 2013).

A teljes hullámképhez olyan szondát használnak, amelynek egyik része méri a szonda mellett áramló fúrófolyadék futási idejét, másik része 8db széles sávú kerámia vevőt tartalmaz, míg harmadik része különböző hosszúságú szónikus futási időmérő egység. Ezen kívül tartalmaz még természetes gamma detektort és lyukátmérő karokat is. A teljes hullámképből meghatározható az egyes hullámtípusok sebessége és amplitúdója, beleértve a Stoneley hullámot is (Csókás, 1993). Az analízis fix időablak fedéses eltolásával koherencia vizsgálat alapján történik. A teljes hullámképből meghatározhatók a rugalmassági és szilárdsági állandók illetve az eredeti repedezettség is. Kis sebességű (lágú) formációkban a nyírási hullám sebességét is lehet mérni. Gáztároló zónákat nagyon

alacsony Poisson hányadosok indikálnak konszolidált kőzetek esetén, pl. sós vízzel telített homokkőre $\nu=0.4$, ugyanarra gáztelítetten $\nu=0.1$. A szondával a cementezés minősége is ellenőrizhető.

4.1 Stoneley hullám

A Stoneley hullám olyan felületi hullám, amely a szilárd fúrólukfal és a fúróluk folyadék közötti határfelület jelenlétének köszönhetően lép fel. A folyadékban haladó kompressziós-, és a szilárd közegben haladó nyírási hullám kölcsönhatásának az eredménye (Spisák, 2013). A Stoneley hullám hossza mindig kisebb a fúróluk átmérőjénél, sebessége pedig a folyadékbeli kompressziós hullámsebességnél, és a szilárd közegbeli nyírási hullám sebességénél is. A Stoneley hullám esetében a rugalmas energia nagyobb része a fúróluk folyadékhoz kapcsolódik, de a környezeti feltételektől függő mértékben az energia egy része a formációhoz kapcsolódik. Ez által információt szolgáltat a formáció kőzefizikai sajátosságairól. Szilárd közegben a részecskék mozgása elliptikus (szimmetrikus a fúróluk tengelye körül), és ellentétes a hullám haladási irányával (Vass, 1999).

A Stoneley hullámok csak kismértékben diszperzívek, mivel a sebesség nem változik jelentősen a frekvencia függvényében. Ha a frekvencia zérus felé tart, átalakul, csőhullámmá (vezetett hullám) válik (Haldorsen és társai, 2006). A sebessége ekkor:

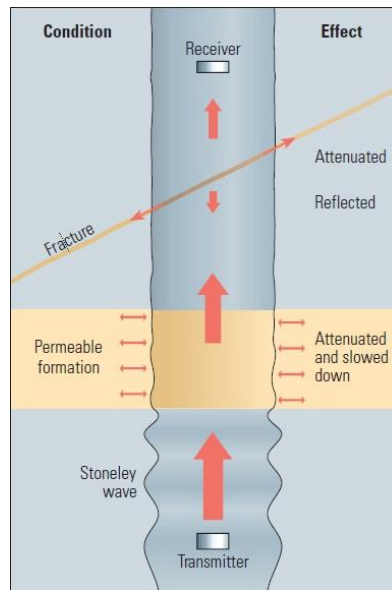
$$v_{cs} = \frac{v_f}{\sqrt{1 + (\rho_f / \rho_b) \cdot (v_f / v_s)^2}}, \quad (4)$$

ahol ρ_f a folyadék sűrűsége, ρ_b pedig a formáció sűrűsége, v_f a folyadék akusztikus sebessége, v_s a transzverzális hullám sebessége a formációban.

A Stoneley hullámok amplitúdójának csillapodása a határfelületről való távolsággal is frekvenciafüggést mutat. A részecske elmozdulás amplitúdója exponenciálisan csökken a lyukfaltól számított sugárirányú távolsággal, a formációban illetve a fúrólukban is. Magas frekvencián az amplitúdó hirtelen lecsökken a fúróluk falától számított távolsággal. Tehát a szonda vevőjénél a Stoneley hullám amplitúdója, a lyukátmérő növekedésével csökken. A szokásos szelvényezési frekvenciáknál $v_s > v_f > v_{st}$, azonban igen laza közegekben a sebesség sorrend $v_f > v_{st} > v_s$ lehet. Ilyen esetben a Stoneley hullám nem lesz valódi csatorna hullám, hanem erősen csillapított hullámként jelentkezik a formációba. A Stoneley hullámok amplitúdójára általában hat az abszorpció és a diszperzió jelensége.

A diszperzió eredményeként az impulzus jel a távolsággal „megbomlik”. Azonban kis frekvencián ezeknek a tényezőknek nagyon kicsi a hatásuk, így a Stoneley hullámok a fúrólyuk mentén nagy távolságra tudnak terjedni. Alacsony frekvencián – vagy olyan hullámhosszakon melyek mértéke összehasonlítható a fúrólyuk átmérőjével – a Stoneley hullámok amplitúdója nagyon kicsit csökken a fúrólyuktól számított távolsággal. Elég alacsony frekvencián, az amplitúdó közel konstans a fúrólyuk egyik oldalától a másikig, létrehozva azt, amit csőhullámnak nevezünk.

A Stoneley hullámok terjedési sajátosságai kis, és nagy frekvencián eltérést mutatnak. A kis frekvenciás Stoneley hullámokra az angolszász szakirodalom a már említett csőhullám megnevezést használja. A két frekvencia tartományt az ún. kritikus frekvencia értéke választja el egymástól. A kritikus frekvencia értékét alapvetően a porozitás, a fluidum viszkozitása, a formáció permeabilitása és a fluidumbeli akusztikus hullámsebesség határozza meg. A Stoneley hullámok frekvenciája általában az 1.5kHz és 2,5kHz közötti frekvencia tartományba esik, ami jóval a kritikus frekvencia érték alatt van. Ennek következtében, a kisfrekvenciás hullámterjedési modell alkalmazható. A kemény vagy gyors formációkban ($v_p > v_s > v_f$) a három alapvető hullámtípus a vevőtől nagyobb távolságra is jól megfigyelhető. A lágy, vagy lassú formációk esetében ($v_f > v_s$) a nyírási fejhullám nem hoz létre a kritikus szög alatt refrakciót a fúrólyuk falánál (Vass, 1999). Az alacsony frekvenciájú Stoneley hullámok érzékenyek a formáció permeabilitására. Ha a hullám repedésekkel találkozik, a folyadék vibrálni kezd a szilárd részhez képest, ezáltal viszkózus szóródást okozva ezekben a zónákban, gyengítve és csillapítva a hullámot. Nyílt repedésekben, a Stoneley hullámok reflektálódnak is és csillapodnak is. A 3. ábrán a fúrólyuk közepén lévő piros nyilak szimbolizálják a hullám amplitúdóját.



3. ábra: Stoneley hullámok fúrólukbeli terjedése (Haldorsen és társai, 2006)

A frekvencia függvényében a Stoneley hullám energia szintjében is történik csökkenés, illetve a sebesség is változik. A Stoneley hullám diszperziós adatai széles frekvencia tartományban felhasználhatók a formációk permeabilitásának becslésére. A nyílt repedések is okozhatják a Stoneley-hullámok reflektálódását az adó irányába. A reflektált és a beesési energia aránya összefüggésben van a repedés nyílásával (apertúra) vagy nyitottságával. Ez a technika jól működik a repedések detektálására, kemény formációk esetén (Kosim, 2002). Az összes fent említett hullám szimmetrikusan terjed a fúrólukban felfelé és lefelé, és a monopól vevőkkel- általában hidrofonokkal detektálhatjuk őket. A hidrofonok érzékenyek a fúróluk folyadékban történő nyomásváltozásra és körsugárzó válaszuk van, ami azt jelenti, hogy bármely irányból bekövetkező nyomásváltozásra ugyanolyan választ adnak [2].

A teljes hullámkép szelvényezés egyik legígéretesebb alkalmazása, az in-situ permeabilitás relatív és abszolút változásának becslése a fúrólukkal harántolt formációban. A teljes hullámkép szelvényezés olyan módszer, melynek segítségével becsülni lehet az in-situ permeabilitást a hagyományos szelvényező eszközöket alkalmazva. A teljes hullámkép szelvényezés alapján történő permeabilitás becslés a hullámképnek a Stoneley-hullám összetevőjét állítja a középpontba. A Stoneley hullám energiájának nagyobb része a fúróluk folyadékoszlopában terjed, de a hullám energiájának egy része a formációhoz kapcsolódik. A kemény vagy gyors formációkban a Stoneley hullámok a folyadékbeli hullámsebességnél (v_f) valamivel kisebb sebességgel

terjednek. A puha, vagy lassú formációkban a Stoneley hullámok erősebben kötődnek a formációhoz és általában a formációnyírási hullám sebességénél kisebb sebességgel terjednek. A permeabilis formációkban végzett megfigyelések azt mutatják, hogy a Stoneley hullám sebesség és csillapodás érzékeny a permeabilitás változásokra.

5. Permeabilitás meghatározása Stoneley hullámokból

A teljes hullámkép szelvényezés esetén a permeabilitás meghatározásának lehetősége azon alapszik, hogy a magmintákon mért permeabilitás értéke, és a Stoneley hullám csillapodás és lassúság alakulása között jelentős mértékű korrelációt mutatható ki. A megfigyelések arra utalnak, hogy a formációban a permeabilitás növekedésével együtt megnő a Stoneley hullám csillapodásának mértéke, és a lassúság értéke. A Stoneley hullám csillapodását jellemző adatok jelentős érzékenységet mutatnak a permeabilitás értékek széles tartományban bekövetkező változásokra (0.1-3000mD). A megfigyelések mögött az a fizikai jelenség áll, hogy a Stoneley hullám nyomásimpulzusai fluidum áramlást gerjesztenek a fúrólukból a formáció felé. Az áramlást egyebek mellett a formáció permeabilitás, a pórus fluidum összenyomhatósága és a formáció szilárdsága szabja meg. A fluidum áramlás viszont visszahat a Stoneley hullámra, megnövelve a csillapodását és lassúságát. Ezekre a mennyiségekre azonban olyan környezeti paraméterek is hatással vannak (pl. lyukátmérő), amelyek közvetlenül nem kapcsolódnak a rétegek áteresztőképességéhez. A nyírási hullám sebességének lecsökkenésével a Stoneley hullám formációhoz csatolódásának mértéke megnő, és ennek megfelelően a formáció közetfizikai paramétereire vonatkozó érzékenysége is megnő. Kemény vagy gyors formációkban a Stoneley hullám jellemzőit majdnem teljesen a fúróluk folyadék tulajdonságai határozzák meg, így az viszonylag érzéketlen a formáció sajátosságaira. A Stoneley hullám sebességére és csillapodására hatással vannak még a formáció nyírási hullám sebességének és csillapodásának változásai is. A permeabilitásnak a Stoneley hullám viselkedése alapján történő becslésében a permeabilitással kapcsolatban álló és ahhoz nem kapcsolódó, de a Stoneley hullám sajátosságait befolyásoló hatások elkülönítése jelenti a nagy kihívást.

Amint a Stoneley hullám egy felszín alatti formáción áthalad, a fúróluk fala deformálódik a nyomászavar hatására. Ha a formáció kemény, ez a deformáció kicsi, és a Stoneley hullám sebessége csak kissé csökken le fúróluk folyadékbeli hullámterjedési sebességéhez képest. Ha azonban a formáció nagyon lágy, a deformáció nagyobb, és a

Stoneley hullám sebesség jelentős mértékben lecsökken a fűrőlyuk folyadékbeli hullámterjedési sebességéhez képest. Ha a formáció egyben áteresztőképese is, akkor az áthaladó Stoneley hullám nem csak deformálja a formáció szilárd részét, hanem megmozgatja a fluidumot is a formációban. Ennek eredményeként a formáció akusztikus szempontból még lágyabbnak mutatkozik, mint az impermeábilis közet esetében, és a Stoneley hullám sebesség, még inkább lecsökken.

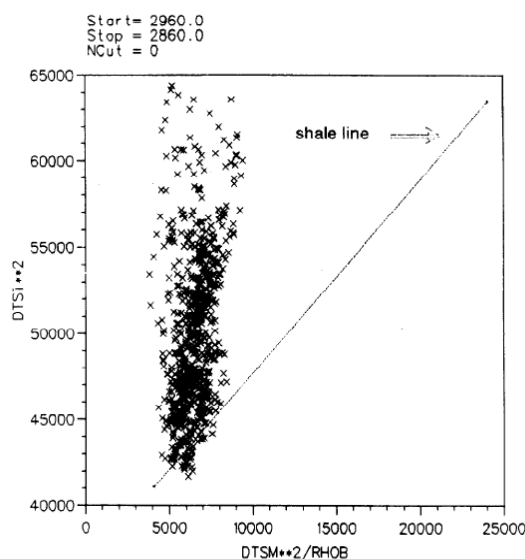
A Stoneley hullámoknak a formáció permeabilitására vonatkozó érzékenységet Rosenbaum (1974) jósolta meg elméleti úton, bár ő a nagyobb frekvenciák szükségességét hangsúlyozta a teljes hullámképes szelvényezésen alapuló permeabilitás becslésben (Vass, 1999). A Stoneley hullámokból történő permeabilitás becslés teljes hullámkép szelvényezés alapján történik. Az utóbbi években, azok a publikációk kerültek túlsúlyba, amelyekben egyszerűsített algoritmust használnak a permeabilitás becslésére, azaz különbséget keresnek a számított és mért Stoneley hullám görbék között. A gyakorlat azonban azt mutatja, hogy a származtatott értékek csak kvalitatív kritériumot szolgáltatnak a permeábilis zónák definiálására és ez magvizsgálatokra alapozott specifikációt igényelt. Az iszaplepleny kialakulását okozhatja, pl. a fűrőiszap, mely a fűrőlyuk falára rakódott le, vagy behatol a hidrosztatikus nyomás következtében a porózus közegbe. A fúrás folyamán a közet szilárd részecskéi behatolhatnak a fűrőlyuk falának pórusaiba, és létrehozhatnak ott egy vékony akadályt ($<0.5\text{mm}$), mely akadály 100-20,000-szer kisebb permeabilitással rendelkezik, mint a környező közeg. Léteznek olyan modellek is, melyek figyelembe veszik az iszaplepleny hatását, ha a permeabilitást Stoneley hullámokból becsüljük meg (Uspenskaya és társai, 2011).

5.1 Buffin eredményei

A. Buffin (1996) tanulmánya bemutatja, hogy a mag adatokon mért permeabilitás és a teljes akusztikus hullámkép Stoneley komponenséből számolt permeabilitás index között jó korreláció van. Az ismeretes, hogy a mért Stoneley lassúság érzékeny a permeabilitásra, míg a számított Stoneley lassúság nem feltételez permeabilitást, ezért a kettő közötti arány általában a permeabilitást jelzi. Az a technika, ami a szintetikus Stoneley lassúságot adja, egy egyszerű crossplot technikán alapul, mely a Stoneley hullám terjedési idejét ábrázolja az impermeábilis közetekre vonatkozó nyíróhullám terjedési idő és a sűrűség függvényében. Itt a származtatott Stoneley- (permeabilitás) index számításánál azt is

figyelembe kell venni, hogy a Stoneley hullámokat a lyukméret, az iszap lassúság, a formáció- és eszközjellemzők is befolyásolják. Az esettanulmány értékeli és terepi adatokon is alkalmazza az egyszerű Stoneley korrelációs technikát.

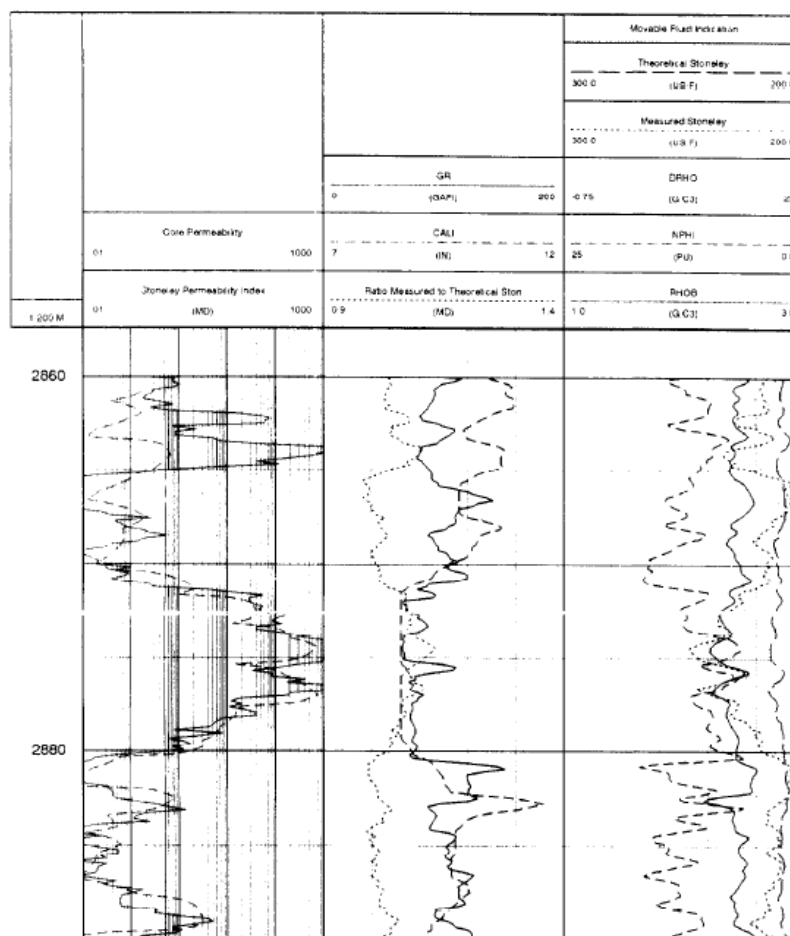
A Buffin munkájában bemutatott Pretty Hill Formáció (Ausztrália) tároló-rétegei olyan permeabilitásokat mutatnak, amelyek mind a vékony függőleges, mind a rövid területek függvényében változnak. Feltételezve, hogy néhány magadat rendelkezésre áll, a Stoneley hullámokból származtatott (mért) lassúságok használhatók a tárolón belüli permeabilitás becslésére, mely nagy segítséget jelent a szimulációs modellek megalkotásában. Az „array” típusú szónikus adatokból történő permeabilitás index becslése a nulla permeabilitású alapvonaltól (agyagvonal) való eltérések azonosításán alapul. Így, a következőkben összefoglalt számítási lépéseket hajtották végre. Első lépésben létrehozunk egy cross-plottot, ami a Stoneley hullám terjedési idejének $(\Delta T_{\text{Stoneley}})^2$ és a nyíró hullám terjedési idejének $((\Delta T_{\text{Shear}})^2 / \rho_b)$ kapcsolatát ábrázolja (4. ábra).



4. ábra: Mért Stoneley- és nyíróhullám lassúság crossplot (Buffin, 1996)

Második lépésben az agyagvonalat azonosítjuk, ami a nulla permeabilitású pontokra legjobban illeszkedő egyenes (4. ábra). Az agyagvonalat arra használják, hogy meghatározzák a kapcsolatot az akusztikus Stoneley terjedési idő $(\Delta T_{\text{Stoneley}})^2$ és a nyíró hullám terjedési ideje között $((\Delta T_{\text{Shear}})^2 / \rho_b)$ és így kiszámítsák a szintetikus Stoneley

akusztikus terjedési időt ($\Delta T_{\text{Stoneley}}$) impermeábilis közegre vonatkozóan. A permeabilitás index kiszámítható, a mért Stoneley ($\Delta T_{\text{Stoneley(mért)}}$) és a számított Stoneley ($\Delta T_{\text{Stoneley(számitott)}}$) terjedési idők arányaként. A magadatokat ellenőrzésképpen használják, ahol a mag permeabilitását szelvénytípusú ábrázolják a mért és a számított Stoneley lassúságok ($\Delta T_{\text{Stoneley(mért)}}/(\Delta T_{\text{Stoneley(számitott)}}$) arányának függvényében. Ez utóbbi arányt Stoneley indexnek nevezzük. A permeabilitás meghatározása a Stoneley index és a magadatokból származtatott permeabilitás kapcsolatán alapul. Az 5. ábrán az Otway Medence Pretty Hill formációja esetén láthatjuk a permeabilitás becslés eredményét. Az első sávon a mag és a Stoneley-indexből számított permeabilitás szelvényeket látjuk, a második a természetes gamma intenzitás, lyukátmérő és Stoneley index szelvényeket mutatja. Látható, hogy a Stoneley index egyenes arányosságot mutat a permeabilitás logaritmusával. A legutolsó sáv a számított és mért Stoneley lassúságot, a neutron porozitást és a sűrűség szelvényt mutatja a gáztároló zónában.



5. ábra: Permeabilitás meghatározása Stoneley időadatokból (Buffin, 1996)

5.2 Bala eredményei

A teljes akusztikus hullámkép alapján Buffinhoz hasonló módszert alkalmazott M. J. Bala (1996) az in-situ permeabilitás meghatározására. A Stoneley hullám indexet és a laboratóriumi permeabilitás kapcsolatát szakszonként lineáris függvénykapcsolattal írta le. Ez a módszer a porozitás ismerete nélkül adja meg a permeabilitást. Jó eredményeket ért el a lengyelországi miocén homokos-agyagos vékonyan rétegzett anizotróp formációkban, ahol a számításait végezte. A kutatást miocén kőzetek szelvényezési és labor adatai felhasználásával végezték el, amelyek a Kárpátok előmélyedésében található T4-es fúrásból, 876-1464.7m-es mélységből származnak. A szarmata körü homokkő-iszapkő-agyagkő vékonyan rétegzett formáció bizonyos mélységeken az elektromos és rugalmas tulajdonságok anizotrópiáját mutatta, amelyek nagymértékben befolyásolták a szelvény- és a laboratóriumi adatokat. A teljes akusztikus hullámkép, amelyeket a lengyelországi Geofizika Krakow Vállalat rögzített LSS eszközzel (Halliburton gyártmányú), fél láb mélységközzel, és további standard szelvények, beleértve a sűrűség szelvényt a közetsűrűséggel (RHOB) rendelkezésre álltak. A laboratóriumi adatokat Lengyelországban (Krakow) az Olaj és Gáz Intézetben álltak rendelkezésre. A bemenő adatokat az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat: Bala (2010) által felhasznált laboratóriumi adatok

	Permeabilitás K_lab [mD]	Porozitás Φ_lab [%]
min	0.01	2.50
max	2267.83	27.50
számtani átlag	291.49	21.00
mértani átlag	47.37	19.56
medián	127.82	22.75

A mért Stoneley hullám terjedési idejét ($DTST^{(m)}$) és a számított Stoneley hullám terjedési idejét ($DTST^{(cal)}$) a teljes akusztikus szelvényekből határozták meg az (5) képlet alapján, azt feltételezve, hogy a formáció nem permeábilis

$$DTST^{cal} = \sqrt{(\rho_f / \rho_b) \cdot DTS^2 + DTF^2}, \quad (5)$$

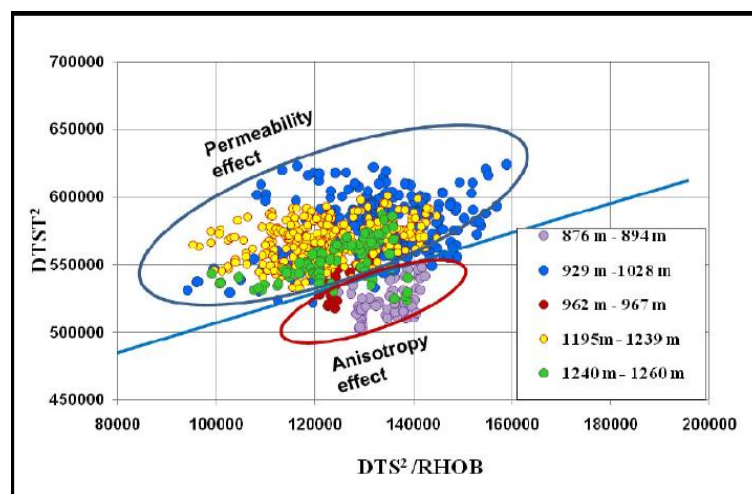
ahol ρ_f az iszapfiltrátum sűrűsége, ρ_b a kőzet térfogatsűrűsége, DTS a nyíró hullám formációban vett terjedési ideje (lassúsága), DTF a primer hullám terjedési ideje (lassúsága) az iszapban. Az (5) formula leírja a kapcsolatot a számított Stoneley hullám

számított $(DTST^{cal})^2$ és a nyíró hullám terjedési ideje (DTS^2 / ρ_{HOB}) között. Az impermeábilis kőzeteknél megfigyelhető, hogy a határvonal a legalacsonyabb Stoneley terjedési időnél ($DTST$) jelentkezik. Az agyagvonal egyenletének a meredeksége a fluidum-sűrűség, a tengelymetszete pedig a fluidumban terjedő primer hullám lassúság négyzete. A Stoneley hullám lassúság értékei permeabilis kőzetek esetén nagyobbak az (5) formulával kapottaknál. A Stoneley hullám indexet, I_{St} Buffin után (1996) a (6) képlet alapján számoljuk

$$I_{St} = \frac{DTST^{(m)}}{DTST^{(cal)}} \quad (6)$$

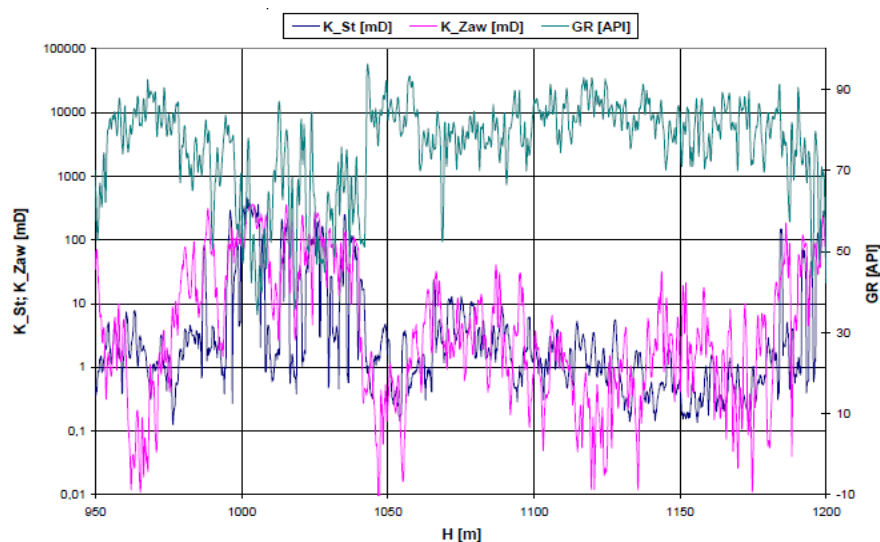
A fenti arány összefüggésben áll a labormérésekből kapott permeabilitással (K_{lab}). A Stoneley hullámokból történő permeabilitás becslés alapja a két mennyiség helyi kapcsolatának meghatározása.

Bala (2010) számításai számára a nyíró hullám terjedési idejét, lassúságát (DTS), és a Stoneley hullám terjedési idejét, lassúságát ($DTST_{int}$) a szarmata formáció értelmezett részében koherencia számítással határozták meg a GeoWin karotázs értelmező rendszer segítségével (Jarzyna és társai, 2002). A 6. ábra a mért Stoneley hullám terjedési ideje és a nyíró hullám terjedési ideje közötti kapcsolatot mutatja be. A formáció sűrűség értékei (ρ_{HOB}), a gamma-gamma szelvényből származnak, a formáció $DTF=630\mu s/m$, és $\rho_f=1g/cm^3$ feltételezett értékei mellett.



2. ábra: Szénhidrogén-kutató fúrásban a mért Stoneley- és nyíróhullám lassúságának kapcsolata (Bala, 2010)

Az impermeabilis kőzetek elméleti (agyag) vonala az 6. ábrán látható (kék vonal), mely az (5) képlet alapján számítható. Az áteresztőképes kőzetekhez kapcsolódó pontok a vonal fölött helyezkednek el, míg az anizotróp formációhoz kapcsolódóak a vonal alatt találhatók. A szerző megvizsgálta a kapcsolatot a labormérésekből származó permeabilitás logaritmus és a Stoneley hullám index között. Kölcsönös kapcsolatot állapított meg a mennyiségek között melyet regressziós egyenessel közelített. A kis permeabilitás tartományban a kapcsolat nemlineárisává válik, ezért két tartományt határozott meg. Az első a magas permeabilitású ($>1\text{mD}$) és alacsony természetes gamma értékű mintákat tartalmazza. A második, az 1mD alatti permeabilitású mintákat és 60 API -nál magasabb természetes gamma intenzitásokat tartalmazza. A kis és nagy permeabilitás tartományán két egyenessel közelítette a Stoneley index és a permeabilitás kapcsolatát ($R=0.90$ korrelációs együtthatót elérve). Ezt az összefüggést összehasonlították a Zawisza egyenletből kapott permeabilitással (Zawisza, 1993). A két képlet alapján számított permeabilitás hasonló értékei csak azokon a szakaszokon figyelhetők meg, ahol labor adatok is jelen vannak. Az általa definiált permeabilitás számított értékei magasabbak, mint azok, amiket a Zawisza egyenletből határoztak meg. A Zawisza egyenlet egy tapasztalati kapcsolat, amit a permeabilitás, porozitás, agyagosság, a kötött víz telítettség laboratóriumi mérése alapján kapunk. Az eredmények jobb egyezést mutattak azokban a rétegekben, ahol alacsonyabb az agyagosság (alacsony GR) és rosszabbat azokban, ahol magasabb gamma és alacsony permeabilitás volt (7. ábra).



7. ábra: Becsült permeabilitás szelvények a Stoneley index (K_{St}) és Zawisza formula alapján (Bala, 2010)

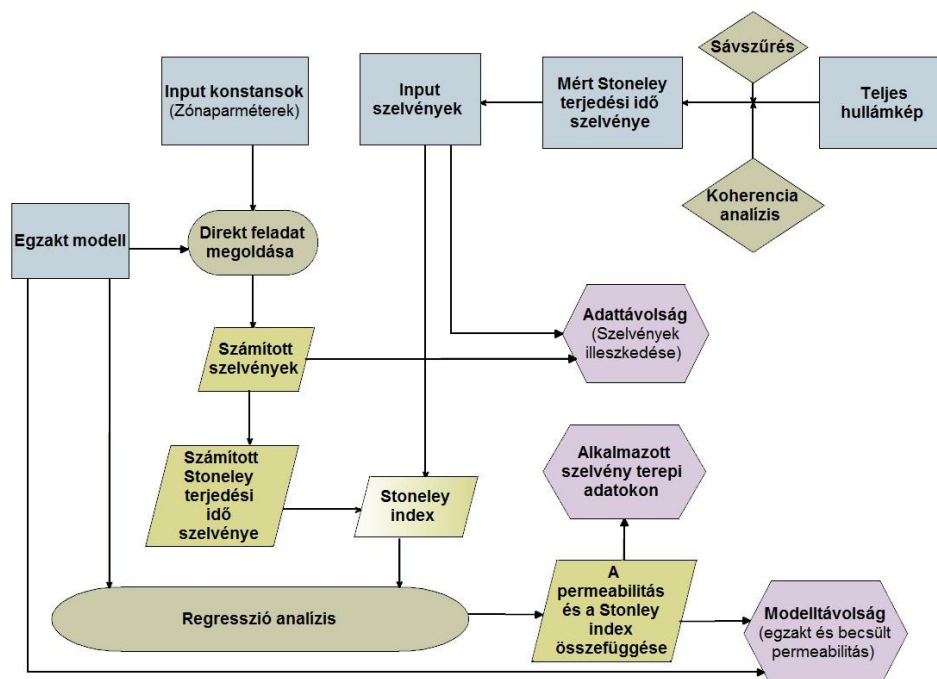
Bala az alábbi következtetéseket vont le. A bemutatott közelítés hatékony és gyors módszere lehet a szelvények alapján történő permeabilitás meghatározásának. A teljes akusztikus hullámkép, sűrűség-szelvény és a gamma szelvény egy elegendő adatmennyiséggel rendelkező értelmezést biztosít a permeabilitás kiszámításához. Ehhez elengedhetetlen, hogy rendelkezünk alkalmazható formulákkal, annak érdekében, hogy kalibráljuk a szelvényadatokat a labor eredményekkel, melyeket az elemzett fúrás szomszédságába lévő más fúrásokból származó adatok alapján határoztak meg. A bemutatott tanulmányban nem határozták meg az eredmények bizonytalanságát, csak összehasonlították a becsült Stoneley permeabilitást a Zawisza formula alapján számított permeabilitással, ami megerősíti annak tényét, hogy egy hatékony módszert találtak a permeabilitás meghatározására. Mindkét tárgyalt módszer, a Zawisza formula és a bemutatott megközelítést is kalibrálni kell labor adatokkal. A bemutatott módszer porozitásmentes, ami azt jelenti, hogy további előnye, hogy lehetőséget biztosít a különböző módszerekkel számított permeabilitás értékek összehasonlítására. A köztük lévő különbségek további információkat szolgáltatnak a formációról, többek között az anizotrópiát.

6. Modellezési vizsgálatok

Megállapíthatjuk, hogy a szakirodalomban illetve a gyakorlatban eddig terepi adatokra alapozott helyi összefüggést találtak a kutatók a Stoneley index és a permeabilitás között. Továbbá lineáris közelítéssel vagy szakaszonként lineáris közelítéssel dolgoznak. Bala és Buffin munkássága alapján egy alapjaiban hasonló, de mégis új módszert alkalmaztam a permeabilitás meghatározására, mely nemlineáris kapcsolatot feltételez ismert közetfizikai modell esetén a Stoneley index és a permeabilitás között.

Az általam kifejlesztett módszer folyamatábrája a 8. ábrán látható, amely jól szemlélteti a munkafolyamat főbb lépéseit. A bemenő mért karotázs szelvények, a sűrűség (RHOB), a természetes gamma intenzitás (GR), az akusztikus nyíróhullám terjedési idő (Δt_s), az akusztikus Stoneley terjedési idő (Δt_{stm}) adatok képezik. A szelvényeket ismert modellen a direkt feladat keretében elvi értékekkel közelíthetjük. Az ehhez szükséges szelvény konstansok (zónaparaméterek) is input adatokként vannak jelen, melyeket előzetes ismeretek alapján adhatjuk meg. A zónaparaméterek, az iszapfiltrátum longitudinális lassúsága (Δt_{mf}), az iszapfiltrátum sűrűsége (ρ_{mf}), az agyag P-hullám

lassúsága (Δt_{sh}), az agyag sűrűsége (ρ_{sh}), a homok longitudinális hullám lassúsága sebessége (Δt_{sd}), a homok sűrűsége (ρ_{sd}), a szénhidrogén P-hullám lassúsága (Δt_{hc}), a szénhidrogén sűrűsége (ρ_{hc}) illetve a homok (GR_{sd}) és az agyag gamma szelvényei (GR_{sh}). Ezek mellett szükséges még a teljes hullámkép, amiből a Stoneley intervallum időszelvényt (mint karotázs szelvényt) „semblance” analízis segítségével kapjuk. A teljes hullámképből először el kell távolítani a primer és szekunder hullámokat. Ehhez a feladathoz sávszűrőt használunk. A szűrés mellett koherencia analízist is végzünk. Ezen műveletek elvégzése után előáll a mért Stoneley lassúság szelvény.



8. ábra: Modellezési vizsgálatok folyamatábrája

A előremodellezés (direkt feladat) során felhasználtam a természetes-gamma intenzitás szelvényt, mellyel az agyagtartalmat becsültem meg (Larionov, 1969). A gamma-gamma (sűrűség) és az akusztikus (nyíróhullám terjedési idő) szelvény meghatározásával elméleti Stoneley intervallum időket számítottam impermeábilis közetek esetére. Ezekkel az input adatokkal direkt feladat megoldást hajtottam végre, amihez egy egzakt modell volt segítségemre, a porozitás (POR), kisépért zóna víztelítettsége (S_{x0}), agyagtartalom (V_{sh}), homoktartalom (V_{sd}) ismert értékeivel. A homoktartalmat az agyagtartalom, porozitás ismeretében a

$$V_{sd} = 1 - \text{POR} - V_{sh} \quad (7)$$

anyagmérleg egyenlet segítségével határoztam meg. Az adatok és a modellparaméterek kapcsolatát leíró összefüggések a válaszfüggvények. A válaszfüggvények ismeretében a modellen elvégeztem a direkt feladat megoldását annak érdekében, hogy elvi adatokat számíthassak. A sűrűség (gamma-gamma) szelvény válaszegyenlete:

$$\text{RHOCAL} = \text{POR} \cdot ((\text{RHOMF} \cdot \text{SXO}) + (1 - \text{SXO}) \cdot \text{RHOHC}) + \text{VSH} \cdot \text{RHOSH} + \text{VSD} \cdot \text{RHOSD} \quad (8)$$

A természetes gamma szelvény válaszegyenlete:

$$\text{GRCAL} = \text{GRSD} + ((\text{VSH} \cdot \text{GRSH} \cdot \text{RHOSH} + \text{VSD} \cdot \text{GRSD} \cdot \text{RHOSD}) / \text{RHOCAL}) \quad (9)$$

Az akusztikus nyíró hullám terjedési idő válaszegyenlete:

$$\text{ATSCAL} = \text{SQRT}(3) \cdot \text{POR} \cdot ((\text{ATMF} \cdot \text{SXO}) + (1 - \text{SXO}) \cdot \text{ATHC}) + \text{VSH} \cdot \text{ATSH} + \text{VSD} \cdot \text{ATSD} \quad (10)$$

Akusztikus Stoneley terjedési idő válaszegyenlete:

$$\text{ATSTCAL} = \text{SQRT}(((\text{RHOMF} / \text{RHOCAL}) \cdot \text{ATSCAL} \cdot \text{ATSCAL}) + (\text{ATMF} \cdot \text{ATMF})) \quad (11)$$

A direkt feladat megoldásának eredményeként számított szelvényeket kaptam, amelyek segítségével a számított Stoneley hullám terjedési idejét előállítottam. A számított Stoneley beérkezésekhez zaj hozzáadásával kvázi-mért Stoneley adatokat számítottam. A mért és a számított Stoneley hullámok terjedési idejéből az (6) képlet alapján előállítottam a Stoneley indexet. Az egzakt közetfizikai modell alapján egy regressziós függvénykapcsolatot adtam meg. Az egyváltozós regressziós vizsgálat célja, hogy az x és y mért mennyiségek kapcsolatát leíró $y=f(x)$ nemlineáris regressziós függvényt megtaláljuk (x =Stoneley index, y =permeabilitás). A mérési adatokra legjobban illeszkedő görbét a mért és a számított adatok egyedi eltéréseinek minimális értékeinél kapjuk. Az munkám során végrehajtott regresszió a legkisebb négyzetek módszere szerint történt

$$E = \sum_{i=1}^n (\text{PERM}_i^{(m)} - \text{PERM}_i^{(sz)})^2 = \sum_{i=1}^n [(\text{PERM}_i^{(m)} - f(I_{St,i}, a, b, c, d))]^2 = \min, \quad (12)$$

ahol a PERM értékeket a Timur formulával az egzakt porozitás és kötött víztelítettség értékek függvényében számítottam, a (17) képlet alapján (Timur, 1968). A modell matematikai jellemzésére modellparamétereket vezetünk be. A modellt leíró M darab függvényegyüttható paraméter egy M dimenziós oszlopvektorba, a paramétervektorba rendezhető

$$\vec{m} = [a, b, c, d]^T \quad (13)$$

Az ismeretlen együtthatók meghatározása érdekében $N > M$ számú permeabilitás adatot vontunk be az eljárásba. A túlhatározott inverz feladatot a Gauss-féle legkisebb négyzetek módszerével oldottam meg. A regressziós számításokat a MatLab programban a „polyfit” függvény segítségével hajtottam végre. A Stoneley index és az egzakt modellek regressziós analízise alapján történik a permeabilitás becslése. Ennek eredményeként egy regressziós függést kapunk, a permeabilitás és a Stoneley index között, egy helyi összefüggést. Az a,b,c,d konstansok megadásával számíthatunk modelltávolságot, az egzaktul ismert permeabilitás ($PERM^{(egz)}$) és a becsült Stoneley permeabilitás ($PERM^{(St)}$) között

$$D_m = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (PERM_i^{(St)} - PERM_i^{(egz)})^2} \quad (14)$$

A helyi összefüggést terepi szelvényadatokon is lehet alkalmazni. A modelltávolság mellett adattávolságot is számolhatunk, ami a mért szelvények és az egzakt modellparaméterekkel (válaszegyenletek felhasználásával) számított szelvények illeszkedését adja meg. Az adattávolság és a modelltávolság mellett a harmadik minősítő paraméter a rang korreláció, mellyel a Stoneley index és a permeabilitás kapcsolatának szorosságát mérhetjük. Nem lineáris függvénykapcsolat esetén a rang korreláció a legalkalmasabb a korreláció szorosságának jellemzésére, mivel kevésbé befolyásolják a kiugró értékű adatpárok. Két valószínűségi változó (x,y) közötti nemlineáris kapcsolatot jellemző mérőszám a rang korrelációs együttható, melynek formulája (Spearman, 1904)

$$\rho_n = \frac{\sum_{k=1}^n (rank(x_k) - \overline{rank(x)}) \cdot (rank(y_k) - \overline{rank(y)})}{\sigma_{rank(x)} \cdot \sigma_{rank(y)}} \quad (15)$$

ahol ρ_n a rang korrelációs együttható, $\sigma_{\text{rank}(x)}$ és $\sigma_{\text{rank}(y)}$ az x és y rang korreláció változóinak szórása. A terepi vizsgálat esetében elvégeztem a lineáris korreláció vizsgálatát is. A lineáris korrelációs (vagy Pearson-féle) együttható értékét a következő módon határozzuk meg

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (16)$$

ahol az $\bar{x}$ és az $\bar{y}$ x_i értékek, az y_i értékek átlagát jelölik. Az r értéke dimenzió nélküli szám és a $[-1, 1]$ intervallumban helyezkedik el, ahol -1 esetén negatív (fordított arányosság), $+1$ érték esetén (egyenest arányosság) pozitív (teljes) korrelációról beszélünk. Ha az $r = 0$, akkor a vizsgált két változó kapcsolatát korrelálatlannak nevezzük. A korrelációs értékeket $r = 0.7$ felett mondjuk erős kapcsolatnak, de az r értéknek valós tartalmat a szakmai megfontolások adják meg. Lehetnek olyan vizsgálatok, amelyben kisebb értékeknek is jelentősége lehet (Szabó, 2012).

7. Vizsgálatok szintetikus modelleken

A modellszámítások elvégzése céljából létrehoztam egy üledékes szintetikus modellt, amelyben 5 homogén réteget különítettem el (Modell-1). Az egyes rétegeket és jellemzőiket a 2. táblázatban foglaltam össze.

2. táblázat: Szintetikus modell (Modell-1) paraméterei

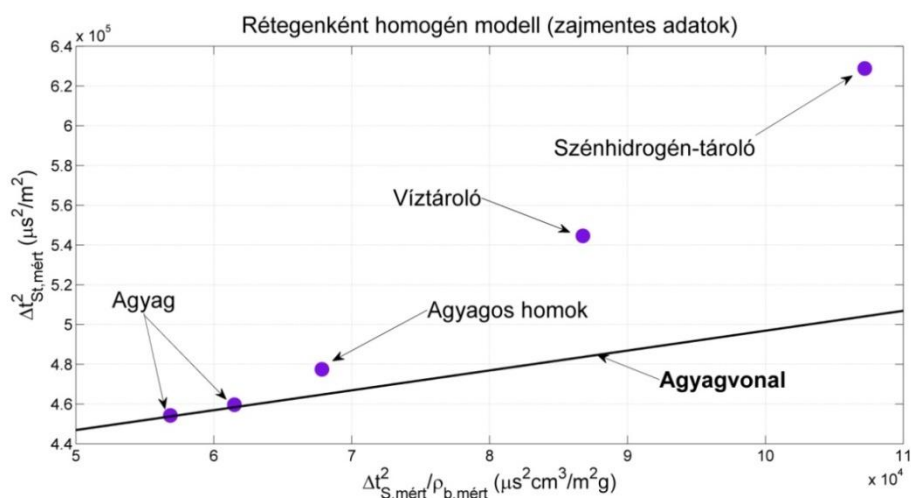
Rétegszám	Rétegsor	Rétegvastagság (m)	POR	SXO	VSH	SWIRR	DTS (μs/m)
1.réteg	agyag	5	0.15	1.0	0.5	0.2	691
2.réteg	víztároló	5	0.23	1.0	0.3	0.2	738
3.réteg	agyagos homok	3	0.07	1.0	0.8	0.2	674
4.réteg	szénhidrogén tároló	7	0.25	0.7	0.1	0.2	793
5.réteg	agyag	5	0.1	1.0	0.7	0.2	678

A modell paramétereit valóságként választottam meg. A porozitást (POR) a rétegsornak megfelelően állítottam be, a porozitás széles tartományát foglalja magába. A kisépért zóna víztelítettsége (SXO) a szénhidrogén tároló kivételével, mindenhol egzaktnak

1. A kötött víztelítettséget (SWIRR) 20%-on rögzítettem, mivel értéke általában lassabban változik. Minden réteghez megadtam egy mért Stoneley terjedési idő értéket (DTS), a táblázat alapján jól látszik, hogy agyagban megnő a hullám lassúsága, tehát csillapodik, míg a szénhidrogén tárolóban csökken a lassúság, megnő a hullám sebessége. A szelvényezési távolságot (mérési pontok távolságát) 0.1-re állítottam.

7.1 Rétegenként homogén modell

Először Modell-1 esetén homogén rétegekre vizsgáltam a regressziós modellt, zajmentes adatok esetén. A számítások programfejlesztést igényeltek, melynek eredménye a 12.1 mellékletben található. Bala (2010) munkájához hasonlóan, dolgozatomban én is vizsgáltam a mért Stoneley lassúságának és a nyíró hullámok lassúságának kapcsolatát. Meghatároztam és berajzoltam az agyagvonalat is, ami azt az értéket jelzi, ahol a mért és számított Stoneley értéke megegyezik.



9. ábra: A mért Stoneley- és a nyíró hullám lassúság közötti kapcsolat homogén modell esetén

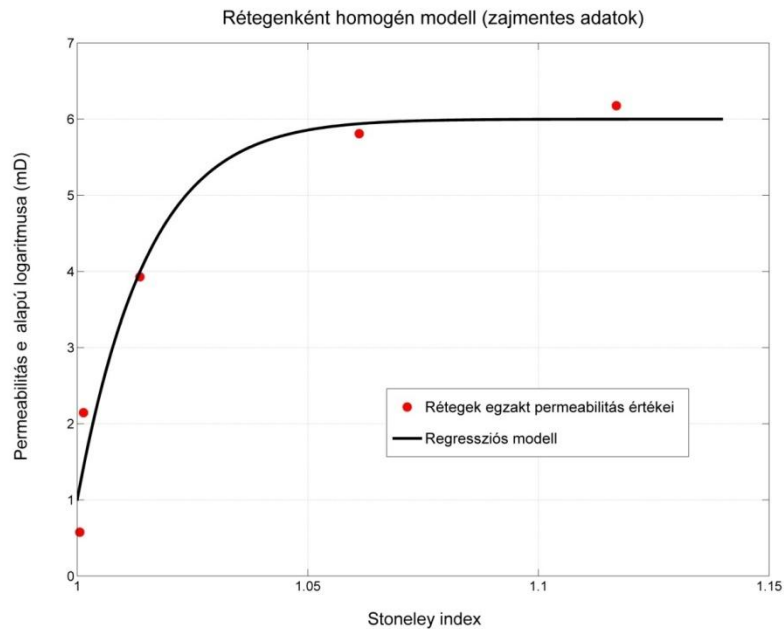
A Timur formula empirikus összefüggést ad a permeabilitás meghatározására. A Timur permeabilitás számítási módja:

$$k = 0.136 \cdot \frac{\Phi^{4.4}}{\text{SWIRR}^2}, \quad (17)$$

ahol (k) a permeabilitás, az ($SWIRR$) a kötött víztelítettség, a (ϕ) a porozitás. A számított Stoneley beérkezésekhez a permeabilitás növekedésével arányosan megnövelt Stoneley intervallumidőkből kvázi-mért Stoneley adatokat generáltam (1-15% növekményt az irodalom alapján), melyekkel Stoneley-index szelvényt állítottam elő, a (6)-os képlet alapján. A Stoneley index a számított permeabilitással zajmentes homogén modell esetén jó korrelációt mutat és az alábbi regressziós összefüggésre vezet

$$\ln(PERM) = 854.8 \cdot (1 - 8300e^{-16.5 \cdot I_{St}^4}) - 848.8, \quad (18)$$

mely a permeabilitás természetes alapú logaritmus és a Stoneley index exponenciális (nemlineáris) kapcsolatát mutatja. A 10. ábrán szereplő regressziós görbe a (18)-as formula alapján meghatározott permeabilitást mutatja. Mivel a Stoneley index (I_{St}) kis tartományban változik, a permeabilitás pedig gyorsan változik, ezért adott esetben, a képletben szereplő 4. hatványt, megnövelhetjük 6-ra, 10-re is. A homogén modell vizsgálata során a 4. kitevőt megfelelőnek találtam. További lehetőségünk egy általánosabb modellben, hogyha még tovább akarjuk finomítani, bevezethetünk még egy új konstans is.

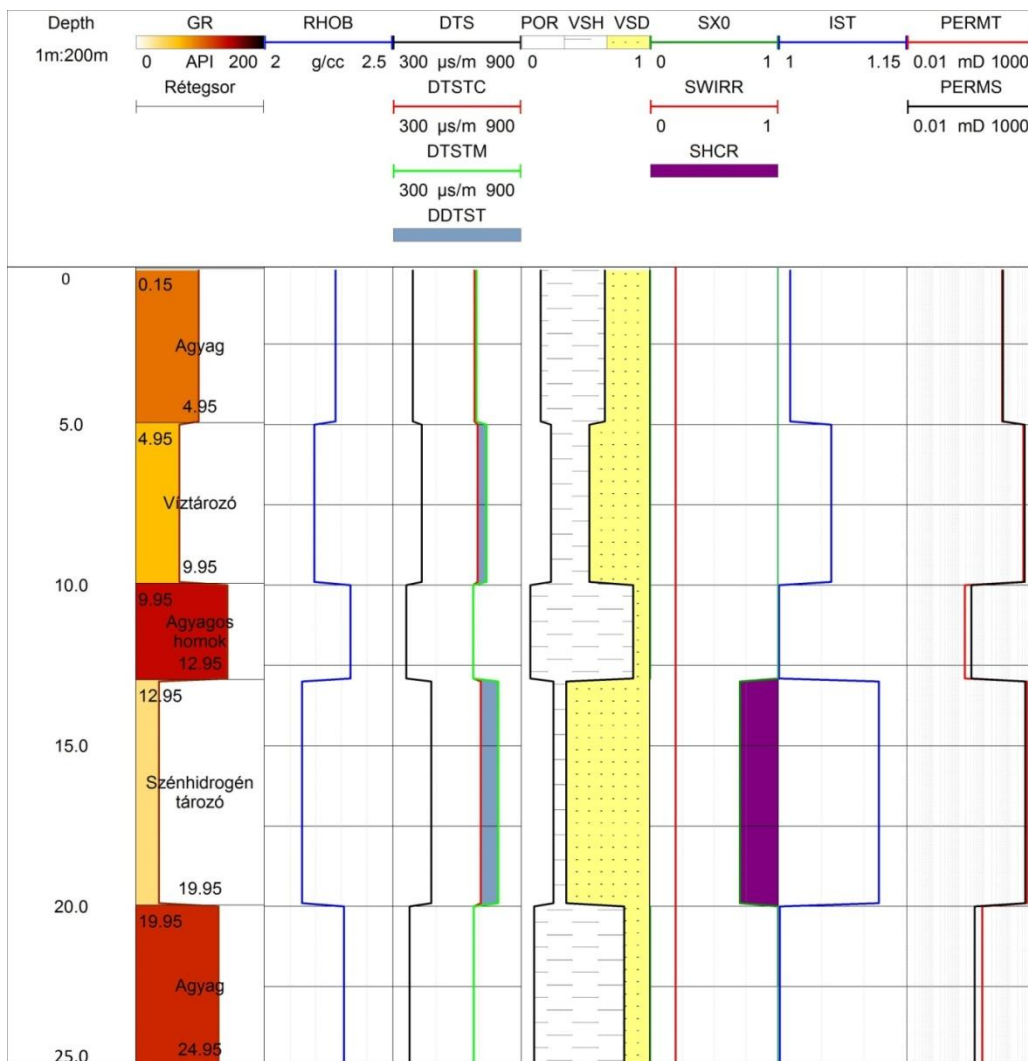


10. ábra Regressziós modell homogén rétegek esetén

Az Advanced Logging Technology cég WellCad szoftverje segítségével ábrázoltam az eredményül kapott szelvényeket. A 11. ábrán szerepel a természetes gamma (GR) szelvény, ami egyértelműen jelzi a különböző rétegekben az agyagosság mértékét és ahol minimuma van, ott nagy permeabilitás jellemző. A közetsűrűséget (RHOB) is ábrázoltam, a szelvény alapján jól látszik, hogy értéke a tárolókban a gáz kis sűrűsége miatt lecsökken, míg az agyagban megnövekszik. A POR-VSH-VSD a kőzetösszetételt mutatja. A kötött víztelítettséget konstansnak feltételeztük a zónában. A mért és számított Stoneley hullámok különbségét (DDTST) is ábrázoltam, amit a szelvényen a kék színezés jelez. Látható, hogy az agyag rétegekben a számított és a mért Stoneley szelvény ugyanazt az értéket mutatja, míg a tárolókban megnő a mért Stoneley lassúság értéke. A maradék víztelítettséget állandónak adtuk meg, így abban nem jelentkezik változás. Mivel a kisépért zónában iszapfiltrátum és maradék szénhidrogén van jelen, így a

$$SHCR = 1 - SXO, \quad (19)$$

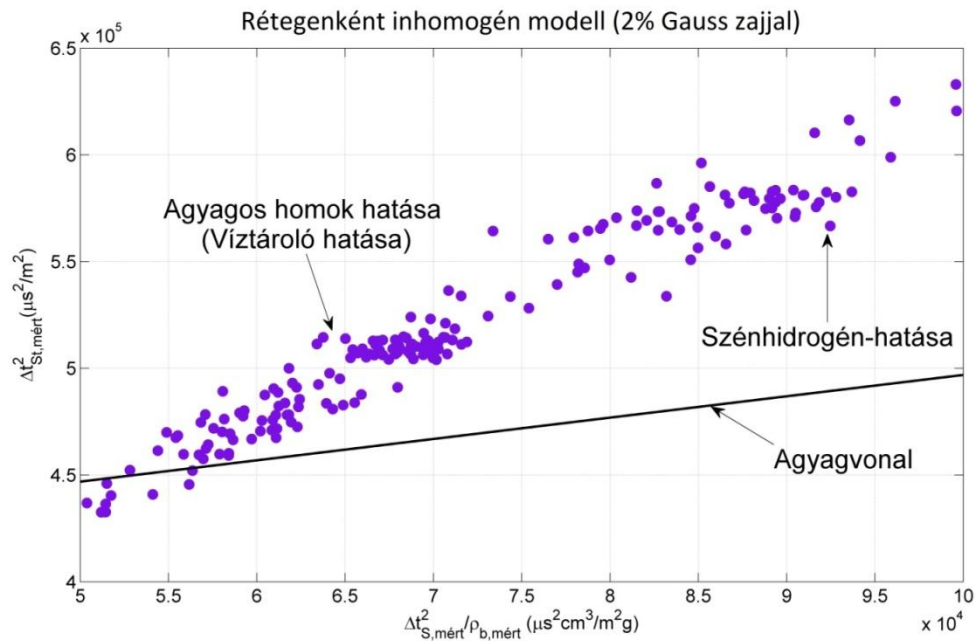
képlet alapján meghatároztam a maradék szénhidrogén telítettség értékét, amit lila színnel jelöltem a 11. ábrán. Az utolsó szelvényen együtt ábrázom a Timur formula (17) alapján meghatározott permeabilitást (PERMT) a Stoneley hullámokból meghatározott permeabilitással (PERMS). A Timur formula alapján meghatározott permeabilitás és a Stoneley hullámok segítségével meghatározott permeabilitás értékek meggyőző egyezést mutatnak. A Stoneley index és a permeabilitások értékei ez alapján, a szelvény alapján is látszik, hogy jól korrelálnak egymással.



11. ábra Permeabilitás számítás eredménye Modell-1 esetén

7.2 Inhomogén modell

A 14. ábrán látható rétegenként inhomogén modell esetén is megvizsgáltam a nemlineáris regressziós kapcsolat érvényességét. A számítások programfejlesztést igényeltek, melynek eredménye a 12.2 mellékletben található. A 12. ábrán 2%-os Gauss eloszlásból származó zajjal terhelt szelvények feldolgozásának eredményét láthatjuk. A mért Stoneley lassúságának és a nyíró hullámok lassúságának kapcsolata hasonló, mint a 9. ábrán. Az agyagvonal felett elhelyezkedő pontok helyzete szóródása jelzi a szénhidrogénhatást, illetve a víztároló hatását. Ahol a mért és számított Stoneley értéke megegyezik, ott definiálható az agyagvonal, ezt a 12. ábrán is berajzoltam.

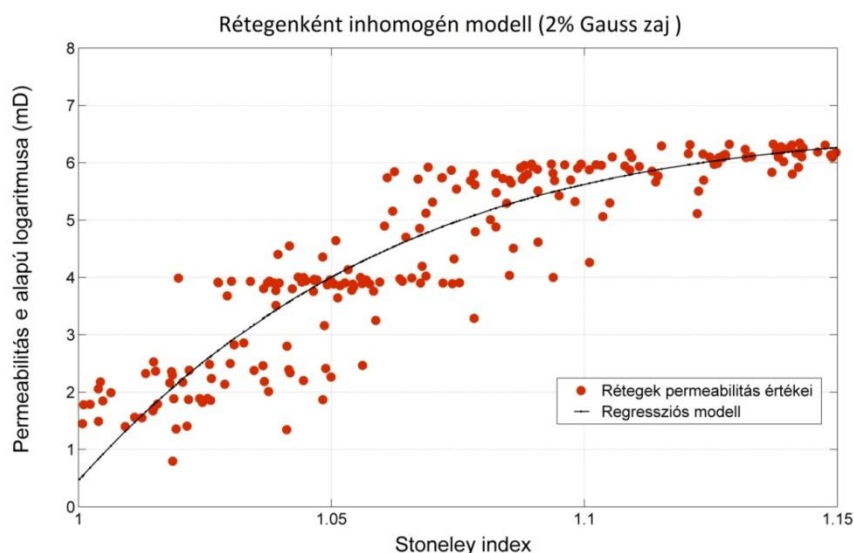


12. ábra: mért Stoneley- és a nyíró hullám lassúság közötti kapcsolat inhomogén modell és 2%-os Gauss zajjal terhelt adatok esetén

Modell-2 esetén is korrelációs kapcsolatot kerestem a Timur formula (17) szerint meghatározott permeabilitás logaritmusára és a Stoneley index között. Ahogy a 13. ábrán is jól látszik, a rétegek permeabilitás értékeire inhomogén esetben is jól illeszkedik az exponenciális regressziós függvény, így tehát elmondható, hogy jól korrelálnak egymással. A Stoneley index alapján, Modell-2-re a permeabilitást

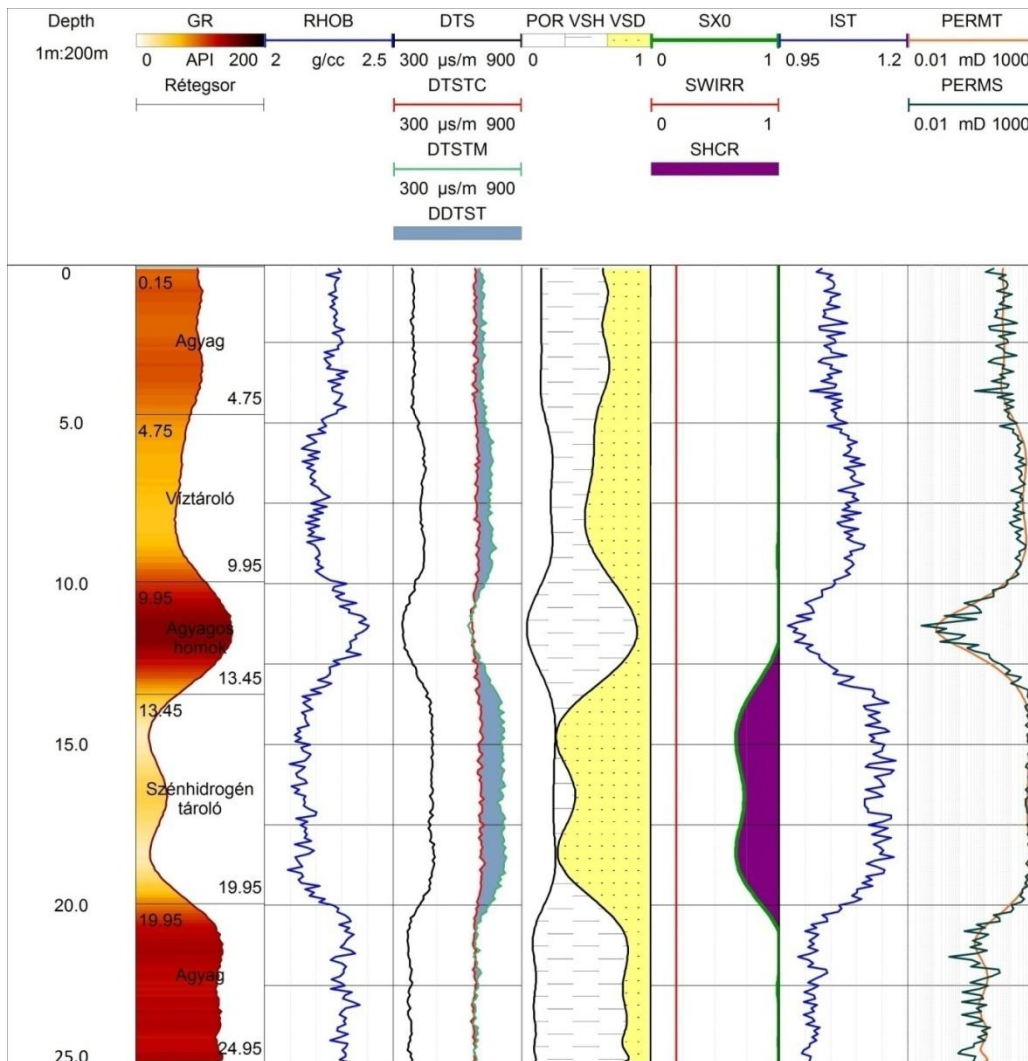
$$\text{PERM} = 8.158 \cdot (1 - (29.2e^{-3.716I_{St}^4}) - 1.527, \quad (18)$$

képlet alapján számítottam. A 13. ábrán szereplő regressziós görbe a (18)-as formula alapján meghatározott permeabilitást adja.



13. ábra: Regressziós modell inhomogén esetben

Inhomogén esetben is az Advanced Logging Technology cég Wellcad szoftverje segítségével ábrázoltam az eredményül kapott szelvényeket. A 14. ábrán szerepel a természetes gamma (GR) szelvény, ami egyértelműen jelzi a különböző rétegekben az agyagosság mértékét. Ez a szelvény ugyanúgy viselkedik, mint homogén esetben, ahol minimuma van, ott nagy permeabilitás jellemző. A közetsűrűség (RHOB) szelvényén is jól látszik, hogy értéke a tárolókban lecsökken, az agyagban pedig megnövekszik. A POR-VSH-VSD a kőzetösszetételt mutatja. A kötött víztelítettséget konstansnak feltételeztük a zónában. A mért és számított Stoneley hullámok különbségét (DDTST) is ábrázoltam, amit a szelvényen a kék színezés jelez. A 14. ábrán megfigyelhető, hogy az agyag rétegekben a számított és a mért Stoneley szelvény ugyanazt az értéket mutatja, míg a tárolókban megnő a mért Stoneley lassúság értéke. A DDTST tulajdonképpen a Stoneley indexnek (I_{st}) felel meg. A maradék víztelítettséget állandónak adtuk meg, így abban nem jelentkezik változás. A maradék szénhidrogén értékét (SHCR), amit lila színnel jelöltem, a (22) képlet szerint határoztam meg. Az utolsó szelvényen együtt ábrázom a Timur formula (17) alapján meghatározott permeabilitást a Stoneley hullámok alapján meghatározott permeabilitással. A Timur formula alapján meghatározott permeabilitás (PERMT) és a Stoneley hullámok segítségével meghatározott permeabilitás (PERMS) értékek meggyőző egyezést mutatnak. A Stoneley index és a permeabilitások értékei jól korrelálnak egymással.



14. ábra: Permeabilitás számítás eredménye Modell-2 esetén

Modell-2 esetében a zajok változtatásával vizsgáltam két minősítő paramétert (modelltávolságot, rang korrelációt) illetve az együtthatók alakulását. Mivel a rang korreláció a legalkalmasabb a korreláció szorosságának jellemzésére, így ennek a paraméternek az értéke meglehetősen fontos információt szolgáltat. A rang korrelációt a (19) formula alapján számoljuk. Modell-2 esetében növeltem a zajt 0-10%-ig, és a változtatás mértékében figyeltem a minősítő paraméterek és a korrelációs együtthatók alakulását. A (19)-es képlet alapján kiszámított modelltávolságok 9%-os zaj estén már meglehetősen nagy értéket vesznek fel, míg a (20) képlet alapján számított rang korreláció hasonló értékeket vesz föl különböző nagyságú zajok hozzáadása mellett is.

3. táblázat: Modell-2 estén, zaj változtatása mellett kapott regressziós eredmények

Zaj [%]	Modell távolság(%)	Rang korreláció	„a” együttható	„b” együttható	„c” együttható	„d” együttható
0	2.15	0.99	13.96	51.64	4.66	-7.88
1	5.30	0.98	11.75	17.81	3.55	-5.45
2	7.59	0.98	3.34	13.31	2.14	3.45
3	10.08	0.98	4.06	5.64	1.75	2.36
4	10.11	0.98	3.88	3.71	1.43	2.45
5	10.97	0.98	2.24	4.52	1.18	3.95
6	11.72	0.98	3.04	2.00	0.87	2.79
7	11.87	0.98	2.70	1.65	0.68	3.05
8	11.89	0.98	4.32	4.90	3.91	0.02
9	12.21	0.98	2.81	1.40	0.83	2.46
10	12.36	0.98	2.06	1.17	0.48	3.05

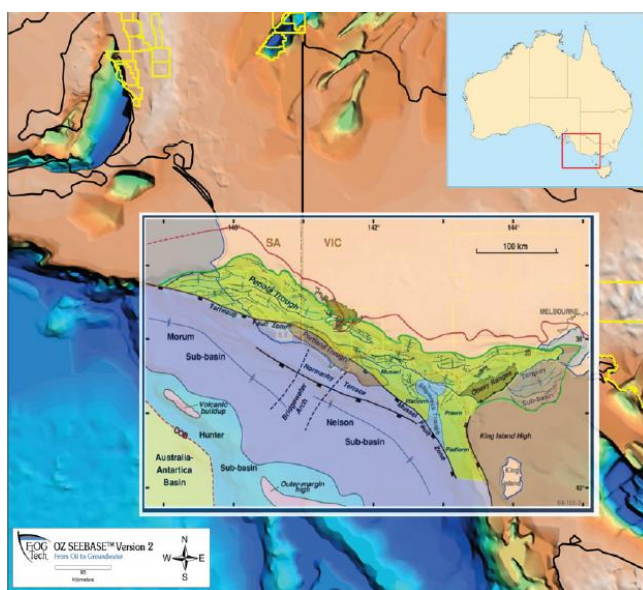
A Timur formula szerint a permeabilitás a porozitástól és a kötött víztelítettségtől függ. A modell eleve a porozitás nagy tartományát magában foglalja, azonban az általában a mélységgel lassabban változó kötött víztelítettséget (mint zónaparamétert) konstansnak tekintettük, ezért ezt Modell-2 esetében 5%-os zaj mellett külön vizsgáltam a kötött víztelítettség értékeinek 5-40% közötti tartományában. Az a,b,c,d korrelációs együtthatók elég közeliak és a rang korreláció is pontosan ugyanazokat az értékeket adja vissza a kötött víztelítettségek változtatása mellett. A modell távolságok értéke is csak kismértékben változik, az adott közetfizikai paraméter változtatásával. Ezzel a nemlineáris modell érvényességét a porozitás és kötött víztelítettség tartományban bizonyítottam.

4. táblázat: Modell-2 esetén, a kötött víztelítettség változtatásával kapott eredmények

Kötött víz telítettség (%)	Modell távolság (%)	Rang korreláció	„a” együttható	„b” együttható	„c” együttható	„d” együttható
5	10.77	0.98	5.09	1.95	1.25	4.20
10	10.97	0.98	3.33	3.04	1.18	4.69
15	11.13	0.98	3.53	2.62	1.14	3.57
20	11.31	0.98	3.12	2.59	1.04	3.42
25	11.17	0.98	2.13	3.80	1.05	3.89
30	10.96	0.98	3.42	3.58	1.35	2.35
35	11.11	0.98	3.03	3.23	1.23	2.20
40	11.22	0.98	2.90	3.14	1.22	2.05

8. Vizsgálatok terepi adatokon

A szintetikus modelleken kipróbált módszer tesztelését terepi adatokon is elvégeztem, melynek keretében összehasonlítottam a Stoneley eljárással kapott permeabilitás szelvényeket magadatokon mért laboratóriumi permeabilitás értékekkel. A számítások programfejlesztést igényeltek, melynek eredménye a 12.3 mellékletben található. A Buffin (1996) által felhasznált mintaterületet választottam a módszerem igazolásához. Az Otway medence (15. ábra) az egyik legaktívabban kutatott és feltárt mezozoós medence, ami Dél-Ausztrália kontinensperemén helyezkedik el, és ami az Antarktis és az Ausztrál lemez riftesedése következtében jött létre. Több mint 500km a kiterjedése nyugat-északnyugat irányba és egyike azoknak a kiterjedt, átmeneti medencéknek, amelyek az Ausztrál kontinens pereme mentén találhatók. Az Otway medence a jura-kréta medencék egész sorát tartalmazza, amik harmadidőszaki takaróval fedettek (Gambier Basin). Északi határát a kora paleozoikumi metamorf és magmás kőzetek kibúvása jelzi, és az üledékek a nyílttengertől 160km-ig figyelhetők meg. Északon és északnyugaton, az Otway medence határait a kréta üledék határaival azonosítják.

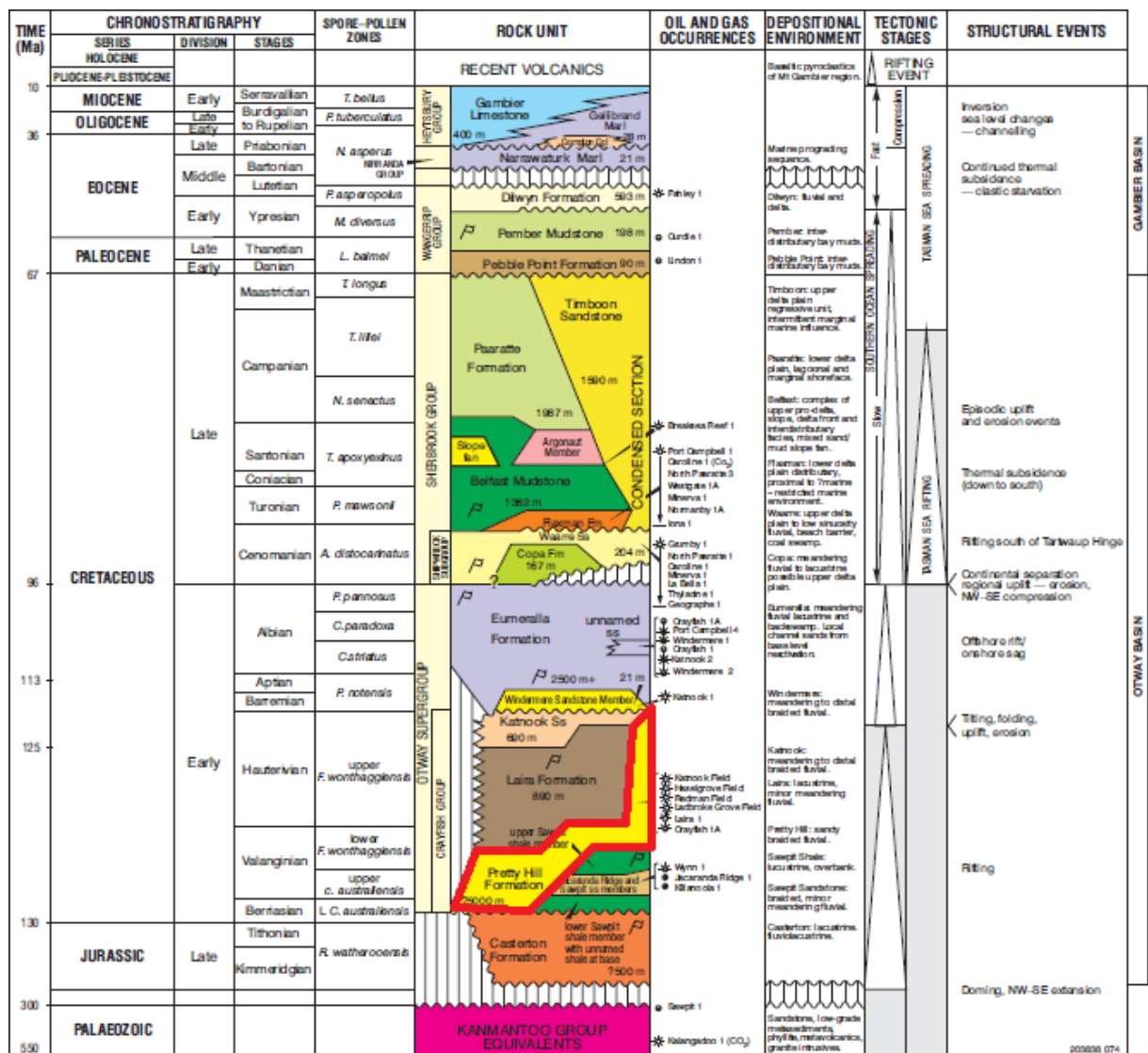


15. ábra: Az Otway medence földrajzi elhelyezkedése (Jorand et al., 2009)

8.1 A terület rétegtani leírása

A legrégebbi egység a Casterton formáció, a vulkanikus és agyagpala egység, ami a Penola Árok északi szárnyán található kútban és Victoriában jelenik meg illetve

előfordulhat a Robe és Penola árkok mélyebb, fúrás nélküli részein. Dél Ausztráliában a legrégebbi ismert sorozat a Crayfish Group, ami kitölti az árkok felét. Az első egység az alsó-kréta korú Pretty Hill Formáció, amit a 16. ábrán vastag piros vonaltípus jelöl, a fonatos fluviális homokkő, ami az árok mélyebb részein fordul elő. Ezt fluviolakusztis agyagpalák és aleurolitok (Laira Formáció) követik, amiket viszont eltakar a fonatos fluviális Katnook homokkő. A Katnook homokkő északnyugatra megvastagszik, lényegében, mint a Laira formáció homokos kifejlődése. Az extrém északi szegélyen, mind a Katnook Homokkő, mind a Pretty Hill Formáció hiányoznak és a Crayfish Group csak a palás Laira Formációból áll. A Crayfish Groupot diszkordánsan eltakarja az Eumeralla formáció.



16. ábra: Az Otway medence litológiai egységei [1]

Az Otway medence számos szénhidrogén-tárolót foglal magába, amik általában jó porozitással és permeabilissal rendelkeznek, és uralkodóan folyami homokkőben találhatók. A Pretty Hill homokkő feltárja az Otway medence sorozatában levő legjelentősebb tároló egységek tipikus tulajdonságait. A Pretty Hill üledékes környezete miatt a Pretty Hill homokkő tárolót gyakori fáciesváltozások jellemzik. A tároló finomdurva szemű, tiszta homokkőből áll, de ásványtanilag széles tartományban változik. A főbb termelő gáztároló a Dél-Ausztrál szektorban Otway medencéjében a Pretty Hill formáció, aminek a porozitása Katnook területén meghaladja a 25%-ot, a permeabilitása az 1000 mD-t, és a teszt szerint 451,000 m³ gázt ad naponta. A tároló permeabilitása nem csökken a mélység növekedésével, habár csak a Pretty Hill Formáció felső része a jó minőségű általában [1].

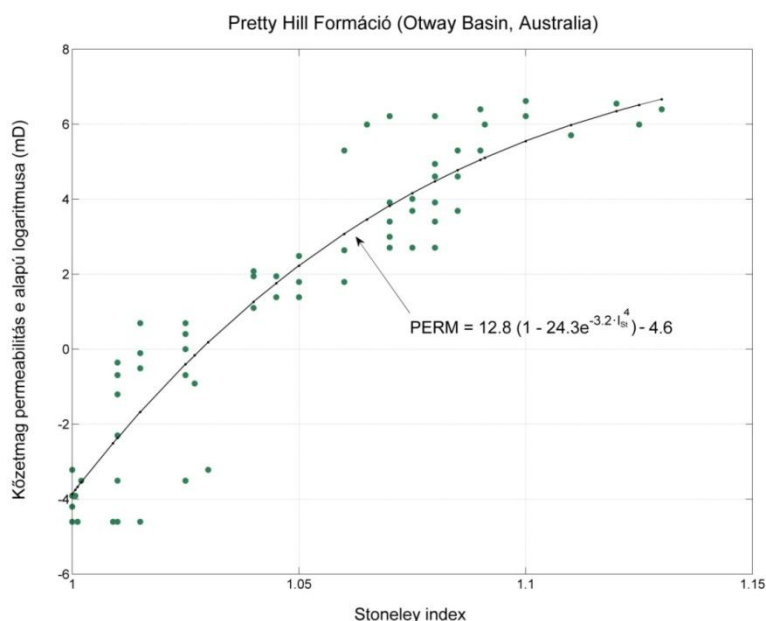
8.2 A módszer terepi alkalmazása

Modell-3 esetében is jól használható összefüggést találtam a Stoneley-index és az általánosan elfogadott Timur formulából becsült permeabilitás között. A számításokhoz bedigitalizáltam Buffin (1996) által felhasznált karotázs szelvényeket és permeabilitás magadatokat. A Stoneley index és a mag-permeabilitás adatok regressziója eredményeként a permeabilitást az Ausztrál területen

$$\text{PERM} = 12.8 \cdot (1 - 24.3e^{-3.2 \cdot 10^4 \cdot I_{\text{St}}}) - 4.6, \quad (23)$$

képlet alapján becsültem meg. A 17. ábrán szereplő görbe a (23) formula alapján meghatározott permeabilitást adja. Magadatok nagyon sűrűn helyezkednek el, kb. 20 cm-enként. A formula segítségével a magmintavétel helyein, ill. az azok közötti mélységekben végeztem becslést a Stoneley index felhasználásával. A magadatokat és az általam számított adatok között három minősítő paramétert, modelltávolságot, rang korrelációt és lineáris korrelációt számítottam. Az 5. táblázat foglalja össze a minősítő paraméterek és a kapott korrelációs együtthatók értékeit. A (18) képlet alapján kiszámolt modelltávolság értéke 6.9% lett. Ez egy szórás jellegű mennyiségként definiálható, mivel van egy független módszerrel kapott eredményem, illetve az általam meghatározott, aminek a regressziós függvénnyel való illeszkedését vizsgálom. A (19) formula szerint kiszámolt rang korreláció értéke 0.98, míg a (20) képlet szerinti lineáris korreláció értéke 0.78 lett. A rang korreláció alapján szoros korreláció figyelhető meg az adatok között. Az eredmények

alapján megállapítható, hogy jó egyezés figyelhető meg a becsült permeabilitás és a magadatok között.



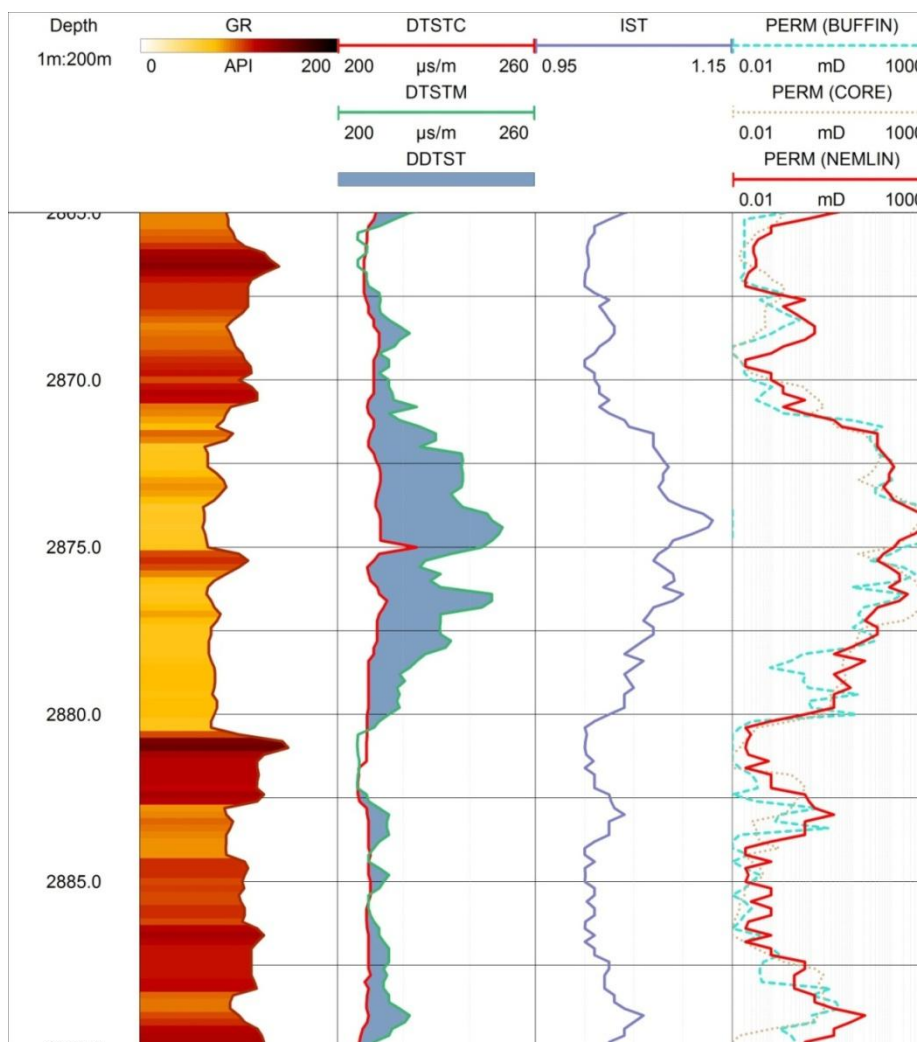
17. ábra: Pretty Hill formáció nemlineáris permeabilitás modellje

Modelltávolság	Rang korreláció	Lineáris korreláció	„a” együttható	„b” együttható	„c” együttható	„d” együttható
6.96%	0.98	0.78	12.81	24.29	3.248	-4.581

1. táblázat

Modell-3 esetében is a WellCad szoftver segítségével szelvényeken ábrázoltam az eredményül kapott adatokat. Az első szelvényként itt is a mélység (DEPTH) szelvény szerepel, majd a második helyen a gamma (GR) szelvény. Adataimat a 2865-2890m-es mélységtartományban jelenítettem meg. A következő szelvényen, egy szelvényen ábrázoltam a számított és mért Stoneley-t ábrázoltam. A Shading (árnyék) funkcióval bejelöltem a számított és mért Stoneley különbségét (DDTST) is, amit kék színnel jelöltem. A kék sávok azokat a zónákat mutatják meg, ahol a mért Stoneley lassúság értékek meghaladják a számított Stoneley lassúság értékeket, azaz permeabilis kőzetek helyezkednek el. Ez valójában a Stoneley indexet (IST) adja, amit a következő szelvényen külön is ábrázoltam. Az utolsó szelvényem, együtt ábrázoltam a mag permeabilitás adatokat (pontosított vonal), amit a pontosított vonal jelöl, illetve az általam meghatározott Stoneley hullámokból számított permeabilitást (piros görbe), amit a piros folytonos vonal

jelöl. Az összehasonlíthatóság kedvéért megjelenítettem a Buffin (1996) által kapott permeabilitást is (kék szaggatott vonal), a szaggatott vonal segítségével. Látható, hogy szépen korrelálnak az értékek, ami az új módszer helytállóságát bizonyítja.



17. ábra: Permeabilitás számítás eredménye Modell-3 (terepi adatok) esetén

9. Összefoglalás

A 80-as évektől kezdték el használni a teljes hullámképen alapuló akusztikus szelvényezéseket a permeabilitás meghatározására. A dolgozatban egy irodalomban meglévő módszert fejlesztettem tovább, mely a nukleáris és akusztikus szelvényekből permeabilitás meghatározására alkalmas. A terepi adatok, a laboratóriumi adatok arra utalnak, hogy a Stoneley hullám beérkezések a teljes hullámképes akusztikus

szelvényezésben felhasználhatók az in-situ permeabilitás változások becslésére. A Stoneley hullám lassúság mérése biztosítja a permeabilis változások mérését. A bemutatott megközelítés hatékony és gyors módszere lehet a szelvények alapján történő permeabilitás meghatározására. A teljes akusztikus hullámkép, sűrűség-szelvény és a gamma szelvény elegendő adatmennyiséggel rendelkező értelmezést biztosítanak a permeabilitás meghatározásához. A módszer nagy előnye, hogy direkt eljáráson alapuló értelmezési eredményt szolgáltat.

TDK dolgozatomban M. J. Bala és A. Buffin munkássága alapján egy alapjaiban hasonló, de mégis új módszert alkalmaztam a permeabilitás meghatározására, amely a gyakran használt lineáris közelítéssel vagy szakaszonként lineáris közelítéssel szemben nemlineáris közelítésen alapul. A regressziós függvénykapcsolatot egzakt közetfizikai modellek alapján adtam meg. A különböző szelvények (gamma-gamma, akusztikus) segítségével elméleti Stoneley intervallum-időket számítottam impermeábilis kőzetek esetére. A számított Stoneley beérkezésekhez zaj hozzáadásával kvázi-mért Stoneley adatokat számítottam, melyekkel Stoneley-index szelvényt állítottam elő. Ez a Timur formulával számított permeabilitással (mely a terepi alkalmazások során általánosan elfogadott formula) egyenes arányosságot mutatott. A kapott eredményt a közetfizikai paraméterek (porozitás, agyagtartalom, maradék víztelítettség) széles tartományán vizsgáltam különböző modellek esetén. A módszert 0%-os zaj mellett, modell1 esetben, 5%-os zaj mellett modell2 esetben illetve terepi adatokon is teszteltem, melynek keretében összehasonlítottam a Stoneley- és a Timur módszerrel kapott permeabilitás szelvényeket. Modell-2 esetén, 5%-os zaj mellett a kötött víztelítettség 5-40% közötti változtatásával vizsgáltam az eredmények alakulását és a modellem helytállóságát. E mellett szintén Modell-2-n vizsgáltam a zajok változtatásával (0-10%) két minősítő paramétert (modelltávolságot, rang korrelációt) illetve az együtthatók alakulását. Az eredmények jó korrelációt mutattak, ezáltal igazolva a modell érvényességét. Mindhárom vizsgált esetben Wellcad szoftver segítségével, szelvényeken ábrázoltam a kapott eredményeket. A bemutatott szelvények jól reprezentálják az eredmények alakulását. Az egyes szelvények meggyőző korrelációt mutattak egymással. A terepi adatok esetében azokon a helyeken végeztem el a számításokat, ahol rendelkezésemre álltak magadatok. A Stoneley módszerrel kapott permeabilitás szelvény a magokkal is jó korrelációt mutatott. A módszer korlátai közt szerepel, hogy az array szónikus eszköz vertikális felbontó képessége mindössze két láb, illetve a lyukátmérő változás és a zajérzékenység is nagyban befolyásolja az eredményeket. Ezen kívül a formulában szereplő együtthatókat az adott

mérési területen meg kell határozni, melyhez magadatokon történő permeabilitás meghatározást, vagy más független szelvényértelmező módszert is szükséges bevonni.

10 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Dr. Szabó Norbert Péternek áldozatos és segítőkész munkájáért, mellyel hozzájárult TDK dolgozatom elkészítéséhez.

12 Irodalomjegyzék

Könyvek, kéziratok:

- Baker Atlas (2001): Wave training manual, Wester Atlas International
- Balázs L. (2013): Mélyfúrási geofizika, Egyetemi jegyzet
- Dr. Csókás J. (1993): Mélyfúrási Geofizika, Nemzeti Tankönyvkiadó, Kézirat, Budapest.
- Dr. Dobróka Mihály, 1991: Fejezetek az elméleti fizikából. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Dr. Ferenczy L., Dr. Kiss B. (1989): Szénhidrogén tárolók mélyfúrási geofizikai értelmezése I. kézirat, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest,110-125.oldal
- D.V.Ellis, J.M. Singer (2007): Well logging for earth scientists, 2nd Edition, Springer,533-562.oldal
- Hursán L.(2005): Mélyfúrási geofizikai oktatási segédlet
- Kiss A. (2013): Repedésrendszerek irányítottságának meghatározása fúrólyuk leképezési módszerek alkalmazásával, Diplomamunka
- Kosim(2002): Bestimmung der in—situ Permeabilitätszahl aus den Eigenschaften der Stoneleywelle
- L. A.Uspenskaya, G.A. Kalmykov, and A.A. Belomestnykh(2012): Evaluation of Formation Permeability from Borehole Stoneley Wave With Lithogical Composition
- Larionov, V.V. (1969), Radiometry of Boreholes, NEDRA, Moscow.
- Pethő G., Vass P. (2011): Geofizika alapjai (oktatási segédlet)
- Spisák S.(2013): Kőzetfeszültség irányok meghatározása akusztikus fúrólyukszelvé-nyek alapján, Diplomamunka

- Szabó N.P. (2012): mélyfúrási geofizikai kollégium előadásanyag
- Vass P.(1999): A fluidumtárolók permeabilitásának meghatározása mélyfúrási geofizikai módszerekkel, Diplomamunka

Folyóiratban megjelent cikkek, tanulmányok:

- Buffin (1996): Permeability From Waveform Sonic Data In The Otway Basin, SPWLA 37th Annual Logging Symposium, June 16-19,1996
- Balan, B., Mohaghegh, S., Ameri, S., 1995: State-Of-The-Art in Permeability Determination From Well Log Data: Part 1- A Comparative Study, Model Development. SPE 30978, pp. 1-10.
- M.J. Bala (2010): Can We Determine Permeability with the Stoneley Wave Slowness from Acoustic Full Waveform. EAGE Proceedings, pp. 1-5.
- Tang, X.M., C.H. Cheng, and M.N. Toksöz, 1990, Stoneley wave propagation in a fluid filled borehole with a vertical fracture, Geophysics, 56, pp. 447-460.
- A. Timur, 1968: AN INVESTIGATION OF PERMEABILITY, POROSITY, AND RESIDUAL WATER SATURATION RELATIONSHIPS. SPWLA 9th Annual Logging Symposium, pp. 1-18.
- C. Spearman, 1904: The Proof and Measurement of Association between Two Things. The American Journal of Psychology, Vol. 15, No. 1 (Jan., 1904), pp. 72-101.

Előadások:

- Jorand-A. Krassay- L. Hall-S. Hostetler- T. Loutit (2009): Assessment of Otway Basin Hot Sedimentary Aquifer systems for geothermal and water uses, Australian Geothermal Energy Conference 2009
- Jarzyna J., Bala M., Cichy A., Gadek W., Gasior I., Karczewski J., Marzencki K., Stadtmüller M., Twaróg W., Zorski T., 2002. GeoWin®- System for processing and interpretation of well logging. Proc. of the 8th Conference and Exhibition of EEGS-European Section. Aveiro. Portugal, Sept. 8-12, (CD only)
- Halliburton (2012): tréning anyag

Internetes hivatkozások:

- [1] http://www.pir.sa.gov.au/data/assets/pdf_file/0011/34112/prospectivity_otway.pdf
utolsó letöltés: 2013. 11.01.
- [2] <http://www.spec2000.net/01-index.htm> utolsó letöltés: 2013. 11. 01.
- [3] <http://www.bakerhughes.com/> utolsó letöltés: 2013.11.01.

11 Mellékletek

11.1 Modell 1 programkódja

```
clc;
clear;
zaj=0;
%
%          POR    SX0    VSH    SWIRR    DTS (mics/m)
%
MEGZ = [ .15    1    0.5    0.2    691;          % ismert homogén modell
        .23    1    0.3    0.2    738;
        .07    1    0.8    0.2    674;
        .25    .7    0.1    0.2    793;
        .1     1    0.7    0.2    678];

%
h = [5 5 3 7 5];          % rétegvastagságok
dz = .1;                  % mérési pontok távolsága
hint = h(1)+h(2)+h(3)+h(4)+h(5);
%
D(:,1)=[0:0.1:24.9]';    % mélység (m)
Seg1=[];
Seg2=[];
for i=1:hint/dz
    if i>=1 & i<=h(1)/dz
        D(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ(1,:),zaj);
        D(i,6)=MEGZ(1,5)*(1+normrnd(0,zaj/100)); % quasi mért atst
        D(i,7)=D(i,6)/D(i,5); % Stoneley index
        D(i,8)=(.136*(100*MEGZ(1,1))^4.4)/(MEGZ(1,4)*100)^2; %permeabilitás
        D(i,9)=MEGZ(1,1); % porozitás
        D(i,10)=MEGZ(1,4); % kötött víztelítettség
        D(i,11)=MEGZ(1,2); % sx0
        D(i,12)=MEGZ(1,3); % vsh
        if i==h(1)/dz
            Seg1(1,1)=D(i,7);
            Seg2(1,1)=log(D(i,8)); % exp(PERM)
        end
    end
    if i>(h(1)+dz)/dz & i<=((h(1)+h(2))/dz)
        D(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ(2,:),zaj);
        D(i,6)=MEGZ(2,5)*(1+normrnd(0,zaj/100)); % quasi mért atst
        D(i,7)=D(i,6)/D(i,5); % Stoneley index
        D(i,8)=(.136*(100*MEGZ(2,1))^4.4)/(MEGZ(2,4)*100)^2; %permeabilitás
        D(i,9)=MEGZ(2,1); % porozitás
        D(i,10)=MEGZ(2,4); %kötött víztelítettség
        D(i,11)=MEGZ(2,2); % sx0
        D(i,12)=MEGZ(2,3); % vsh
        if i==((h(1)+h(2))/dz)
            Seg1(2)=D(i,7);
            Seg2(2)=log(D(i,8)); % exp(PERM)
        end
    end
    if i>(h(1)+h(2)+dz)/dz & i<=((h(1)+h(2)+h(3))/dz)
        D(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ(3,:),zaj);
        D(i,6)=MEGZ(3,5)*(1+normrnd(0,zaj/100)); % quasi mért atst
```

```

D(i,7)=D(i,6)/D(i,5); % Stoneley index
D(i,8)=(.136*(100*MEGZ(3,1))^4.4)/(MEGZ(3,4)*100)^2; %permeabilitás
D(i,9)=MEGZ(3,1); % porozitás
D(i,10)=MEGZ(3,4); %kötött víztelítettség
D(i,11)=MEGZ(3,2); % sx0
D(i,12)=MEGZ(3,3); % vsh
if i==(h(1)+h(2)+h(3))/dz
    Seg1(3)=D(i,7);
    Seg2(3)=log(D(i,8)); % exp(PERM)
end
end
if i>(h(1)+h(2)+h(3))/dz & i<=((h(1)+h(2)+h(3)+h(4))/dz)
    D(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ(4,:),zaj);
    D(i,6)=MEGZ(4,5)*(1+normrnd(0,zaj/100)); % quasi mért atst
    D(i,7)=D(i,6)/D(i,5); % Stoneley index
    D(i,8)=(.136*(100*MEGZ(4,1))^4.4)/(MEGZ(4,4)*100)^2; %permeabilitás
    D(i,9)=MEGZ(4,1); % porozitás
    D(i,10)=MEGZ(4,4); %kötött víztelítettség
    D(i,11)=MEGZ(4,2); % sx0
    D(i,12)=MEGZ(4,3); % vsh
    if i==(h(1)+h(2)+h(3)+h(4))/dz
        Seg1(4)=D(i,7);
        Seg2(4)=log(D(i,8)); % exp(PERM)
    end
end
end
if i>(h(1)+h(2)+h(3)+h(4))/dz & i<=((h(1)+h(2)+h(3)+h(4)+h(5))/dz)
    D(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ(5,:),zaj);
    D(i,6)=MEGZ(5,5)*(1+normrnd(0,zaj/100)); % quasi mért atst
    D(i,7)=D(i,6)/D(i,5); % Stoneley index
    D(i,8)=(.136*(100*MEGZ(5,1))^4.4)/(MEGZ(5,4)*100)^2; %permeabilitás
    D(i,9)=MEGZ(5,1); % porozitás
    D(i,10)=MEGZ(5,4); % kötött víztelítettség
    D(i,11)=MEGZ(5,2); % sx0
    D(i,12)=MEGZ(5,3); % vsh
    if i==(h(1)+h(2)+h(3)+h(4)+h(5))/dz
        Seg1(5)=D(i,7);
        Seg2(5)=log(D(i,8)); % exp(PERM)
    end
end
end
%
figure(1);
for i=1:length(D)
    x(i)=(D(i,4)*D(i,4))/D(i,3);
    y(i)=D(i,6)*D(i,6);
end
plot(x','y','.');
xlabel('ATS2/RHOB');
ylabel('ATSTM2');
grid on;
hold on;
x2=linspace(0.5e5,1.1e5,length(D));
for i=1:length(D)
    yegyen(i)=x2(i)+396900;
end
plot(x2,yegyen);
title('Rétegenként homogén modell (zaj nélkül)');
%D,
%axis([0.5e+5,1.0e+5,4e5,7.4e5]);
%
figure(2);
plot(D(:,1),D(:,7));
xlabel('Depth');
ylabel('IST');
grid on;
figure(3);
plot(D(:,1),D(:,8));
xlabel('Depth');
ylabel('ln(PERM)');
grid on;
figure(4);
plot(D(:,7),log(D(:,8)),'.');
xlabel('IST');
ylabel('ln(PERM)');
grid on;
hold on;
s = fitoptions('Method','NonlinearLeastSquares','Robust','on',...

```

```

        'Lower', [-1000000 -1000000 -1000000 -1000000 ],...
        'Upper', [ 1000000 1000000 1000000 1000000],...
        'Startpoint', [ 1 1 1 1]);
f = fitttype('a*(1-b*exp(-c*x^4))+d','options',s);
[egyen,gof] = fit(Seg1',Seg2',f);
Permy=egyen(Seg1');
% corrcoef(Seg1,Seg2),      rang korreláció
%hold on;
%plot(Seg1,Permy,'k. ');
hold on;
a =      784      ;
b = 8.905e+004      ;
c =      16.44      ;
d =      -778      ;

X=linspace(1,1.14,250)';
for i=1:length(D)
    Permsz(i,1)=a*(1-b*exp(-c*X(i,1)^4))+d;
end
plot(X(:,1),Permsz,'k');
%
figure(5);
plot(D(:,1),D(:,4));
hold on;
plot(D(:,1),D(:,5),'r');
hold on;
plot(D(:,1),D(:,6),'g');
xlabel('Depth');
ylabel('DTS és DTSTCAL');
grid on;
%
egyen,
%
for i=1:length(D)
    PermS(i,1)=a*(1-b*exp(-c*D(i,7)^4))+d;
end
figure(6);
plot(D(:,1),log(D(:,8)));
xlabel('Depth');
ylabel('ln(PERM)');
grid on;
hold on;
plot(D(:,1),PermS,'r');
%
Modtav=100*(norm(PermS-log(D(:,8)),2)/length(PermS)),
%
SHCIRR=1-D(:,11);
VSD=1-D(:,9)-D(:,12);
%
fnum=fopen('ered.txt','w+');
fprintf(fnum,'DEPTH    POR    VSH    VSD    SX0    SHCIRR    GR    RHOB    DTS    DTSTC
DTSTM    IST    lnPERMT    lnPERMS    \n');
for i=1:length(D)
    fprintf(fnum,' %6.4f
',D(i,1),D(i,9),D(i,12),VSD(i,1),D(i,11),SHCIRR(i,1),D(i,2),D(i,3),D(i,4),D(i,5),D(i,6),D(i
,7),log(D(i,8)),PermS(i,1));
    fprintf(fnum,'\n');
end
fclose(fnum);
%
seg=0;
n=length(PermS);
for i=1:n
    d(i)=(PermS(i,1)-log(D(i,8)));
    seg=seg+(d(i)*d(i));
end
rang_korr=1-(6*seg/((n^3)-n))-0.01,
corrcoef(PermS(:,1),log(D(:,8))),
%

```

11.2 Modell 2 programkódja

```

1,
clc;
clear;
zaj=5;
%
%          POR    SX0    VSH    SWIRR    DTS(mics/m)
%
MEGZ      = [ .15    1      0.5      0.2      691;          % ismert inhomogén
modell
            .23    1      0.3      0.2      738;
            .07    1      0.8      0.2      674;
            .25    .7     0.1      0.2      793;
            .1     1      0.7      0.2      678];

%
h          = [5 5 3 7 5];          % rétegvastagságok
dz         = .1;                  % mérési pontok
távolsága
hint       = h(1)+h(2)+h(3)+h(4)+h(5);
%
D(:,1)=[0:0.1:24.9]';          % mélység (m)
Seg1=[];
Seg2=[];
for i=1:hint/dz
    if i>=1 & i<=h(1)/dz
        D(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ(1,:),zaj);
        D(i,6)=MEGZ(1,5)*(1+normrnd(0,zaj/100));          % quasi mért atst
        D(i,7)=D(i,6)/D(i,5);          % Stoneley index
        D(i,8)=(.136*(100*MEGZ(1,1))^4.4)/(MEGZ(1,4)*100)^2;
%permeabilitás
        D(i,9)=MEGZ(1,1);          % porozitás
        D(i,10)=MEGZ(1,4);          % kötött
víztelítettség
        D(i,11)=MEGZ(1,2);          % sx0
        D(i,12)=MEGZ(1,3);          % vsh
        if i==h(1)/dz
            Seg1(1,1)=D(i,7);
            Seg2(1,1)=log(D(i,8));
        end
    end
    if i>(h(1)+dz)/dz & i<=((h(1)+h(2))/dz)
        D(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ(2,:),zaj);
        D(i,6)=MEGZ(2,5)*(1+normrnd(0,zaj/100));          % quasi mért
atst
        D(i,7)=D(i,6)/D(i,5);          % Stoneley
index
        D(i,8)=(.136*(100*MEGZ(2,1))^4.4)/(MEGZ(2,4)*100)^2;
%permeabilitás
        D(i,9)=MEGZ(2,1);          % porozitás
        D(i,10)=MEGZ(2,4);          % kötött
víztelítettség
        D(i,11)=MEGZ(2,2);          % sx0
        D(i,12)=MEGZ(2,3);          % vsh
        if i==((h(1)+h(2))/dz)
            Seg1(2)=D(i,7);
            Seg2(2)=log(D(i,8));
        end
    end
    if i>(h(1)+h(2)+dz)/dz & i<=((h(1)+h(2)+h(3))/dz)
        D(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ(3,:),zaj);
        D(i,6)=MEGZ(3,5)*(1+normrnd(0,zaj/100));          % quasi mért
atst

```

```

        D(i,7)=D(i,6)/D(i,5); % Stoneley
index
        D(i,8)=(.136*(100*MEGZ(3,1))^4.4)/(MEGZ(3,4)*100)^2;
%permeabilitás
        D(i,9)=MEGZ(3,1); % porozitás
        D(i,10)=MEGZ(3,4); % kötött
víztelítettség
        D(i,11)=MEGZ(3,2); % sx0
        D(i,12)=MEGZ(3,3); % vsh
        if i==(h(1)+h(2)+h(3))/dz
            Seg1(3)=D(i,7);
            Seg2(3)=log(D(i,8));
        end
    end
    if i>(h(1)+h(2)+h(3))/dz & i<=(h(1)+h(2)+h(3)+h(4))/dz
        D(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ(4,:),zaj);
        D(i,6)=MEGZ(4,5)*(1+normrnd(0,zaj/100)); % quasi mért
    atst
        D(i,7)=D(i,6)/D(i,5); % Stoneley
index
        D(i,8)=(.136*(100*MEGZ(4,1))^4.4)/(MEGZ(4,4)*100)^2;
%permeabilitás
        D(i,9)=MEGZ(4,1); % porozitás
        D(i,10)=MEGZ(4,4); % kötött
víztelítettség
        D(i,11)=MEGZ(4,2); % sx0
        D(i,12)=MEGZ(4,3); % vsh
        if i==(h(1)+h(2)+h(3)+h(4))/dz
            Seg1(4)=D(i,7);
            Seg2(4)=log(D(i,8));
        end
    end
    if i>(h(1)+h(2)+h(3)+h(4))/dz & i<=(h(1)+h(2)+h(3)+h(4)+h(5))/dz
        D(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ(5,:),zaj);
        D(i,6)=MEGZ(5,5)*(1+normrnd(0,zaj/100)); % quasi mért atst
        D(i,7)=D(i,6)/D(i,5); % Stoneley index
        D(i,8)=(.136*(100*MEGZ(5,1))^4.4)/(MEGZ(5,4)*100)^2;
%permeabilitás
        D(i,9)=MEGZ(5,1); % porozitás
        D(i,10)=MEGZ(5,4); % kötött
víztelítettség
        D(i,11)=MEGZ(5,2); % sx0
        D(i,12)=MEGZ(5,3); % vsh
        if i==(h(1)+h(2)+h(3)+h(4)+h(5))/dz
            Seg1(5)=D(i,7);
            Seg2(5)=log(D(i,8));
        end
    end
end
%
figure(1);
subplot(2,2,1);
eh=polyfit(D(:,1),D(:,9),26); %26
porert=polyval(eh,D(:,1));
plot(D(:,1),porert,'r');
ylabel('POR');
hold on;
plot(D(:,1),D(:,9),'k');
grid on;
subplot(2,2,2);
eh2=polyfit(D(:,1),D(:,11),20); % 20

```

```

sx0ert=polyval(eh2,D(:,1));
plot(D(:,1),sx0ert,'r');
hold on;
plot(D(:,1),D(:,11),'k');
grid on;
ylabel('Sx0');
subplot(2,2,3);
eh3=polyfit(D(:,1),D(:,12),18); % 18
vshert=polyval(eh3,D(:,1));
plot(D(:,1),vshert,'r');
hold on;
plot(D(:,1),D(:,12),'k');
grid on;
ylabel('Vsh');
subplot(2,2,4);
vsdert=1-porert-vshert;
plot(D(:,1),vsdert,'r');
ylabel('Vsd');
grid on;
%
MEGZ2(:,1)=D(:,1);
MEGZ2(:,2)=porert; % porozitás (inhomogén
rétegek)
MEGZ2(:,3)=sx0ert; % Sx0 (inhomogén
rétegek)
for t=1:length(MEGZ2)
    if MEGZ2(t,3)>1 MEGZ2(t,3)=1; end
end
MEGZ2(:,4)=vshert; % agyagtartalom (inhomogén
rétegek)
MEGZ2(:,5)=D(:,10); % kötött víz (konstans a
zónában)
DATA(:,1)=D(:,1); % mélység
DATA0(:,1)=D(:,1); % mélység
for i=1:length(MEGZ2)
    MEGZ2(i,6)=(0.136*(100*MEGZ2(i,2))^4.4)/((MEGZ2(i,5)*100)^2);
    %permeabilitás (inhomogén rétegek)
    DATA(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ2(i,2:4),zaj);
    % GR, sűrűség, nyíró terj. idő, számított Stoneley terj. idő
    DATA0(i,2:5)=valaszfgv(MEGZ2(i,2:4),0);
    % GR, sűrűség, nyíró terj. idő, számított Stoneley terj. idő
    (zajmentes)
end

for i=1:hint/dz % összes
mélységpont
    if i>=1 & i<=h(1)/dz % első réteg
        DATA(i,6)=DATA(i,5)*1.05*(1+normrnd(0,0)); % mért Stoneley
        DATA0(i,6)=DATA0(i,5)*1.05*(1+normrnd(0,0));
        % mért Stoneley (zajmentes)
        DATA(i,7)=DATA(i,6)/DATA(i,5); % Stoneley-index
    end
    if i>(h(1)+dz)/dz & i<=((h(1)+h(2))/dz) % második réteg
        DATA(i,6)=DATA(i,5)*1.09*(1+normrnd(0,0)); % mért Stoneley
        DATA0(i,6)=DATA0(i,5)*1.09*(1+normrnd(0,0)); % mért Stoneley
        (zajmentes)
        DATA(i,7)=DATA(i,6)/DATA(i,5); % Stoneley
    end
end
index
end
if i>(h(1)+h(2)+dz)/dz & i<=((h(1)+h(2)+h(3))/dz) %harmadik réteg

```

```

        DATA(i,6)=DATA(i,5)*1.01*(1+normrnd(0,0));           % mért
Stoneley
        DATA0(i,6)=DATA0(i,5)*1.01*(1+normrnd(0,0));
        % mért Stoneley (zajmentes)
        DATA(i,7)=DATA(i,6)/DATA(i,5);                       % Stoneley index
    end
    if i>(h(1)+h(2)+h(3))/dz & i<=((h(1)+h(2)+h(3)+h(4))/dz)
        %negyedik réteg
        DATA(i,6)=DATA(i,5)*1.14*(1+normrnd(0,0));
        % mért Stoneley
        DATA0(i,6)=DATA0(i,5)*1.14*(1+normrnd(0,0));
        % mért Stoneley (zajmentes)
        DATA(i,7)=DATA(i,6)/DATA(i,5);                       % Stoneley index
    end
    if i>(h(1)+h(2)+h(3)+h(4))/dz & i<=((h(1)+h(2)+h(3)+h(4)+h(5))/dz)
%ötödik réteg
        DATA(i,6)=DATA(i,5)*1.02*(1+normrnd(0,0));           % mért Stoneley
        DATA0(i,6)=DATA0(i,5)*1.02*(1+normrnd(0,0));         % mért Stoneley
        (zajmentes)
        DATA(i,7)=DATA(i,6)/DATA(i,5);                       % Stoneley index
    end
end
%
eh10=polyfit(DATA(:,1),DATA(:,6),26);
MertSert=polyval(eh10,DATA(:,1));

for i=1:length(MertSert)
    MertSert_zajos(i,1)=MertSert(i,1)*(1+normrnd(0,zaj/100));
end

DATA(:,7)=MertSert_zajos(:,1)./DATA(:,5);
%
figure(2);
for i=1:length(DATA)
    x2(i)=(DATA(i,4)*DATA(i,4))/DATA(i,3);
    y2(i)=MertSert_zajos(i,1)*MertSert_zajos(i,1);
end
plot(x2',y2','.'');
xlabel('ATS2/RHOB');
ylabel('ATSTM2');
grid on;
hold on;
x3=linspace(0.5e5,1.0e5,length(DATA));
for i=1:length(DATA)
    yegyen2(i)=x3(i)+396900;
end
plot(x3,yegyen2);
axis([0.5e+5,1.0e+5,4e5,7.4e5]);
%
figure(3);
plot(DATA(:,7),log(MEGZ2(:,6)),'.'');
xlabel('IST');
ylabel('PERM');
axis([1,1.2,0,10]);
grid on;
s = fitoptions('Method','NonlinearLeastSquares','Robust','on',...
    'Lower',[-1000000 -1000000 -1000000 -1000000 ],...
    'Upper',[ 1000000 1000000 1000000 1000000],...
    'Startpoint',[ 1 1 1 1]);
%f = fitttype('a*x*x+b*x+c','options',s);
f = fitttype('a*(1-b*exp(-c*x^4))+d','options',s);

```

```

[egyen,gof] = fit(DATA(:,7),log(MEGZ2(:,6)),f);
Permy=egyen(DATA(:,7));
% corrcoef(Seg1,Seg2),      rang korreláció
hold on;
plot(DATA(:,7),Permy,'k. ');
figure(4);
plot(DATA(:,1),MEGZ2(:,6),'r');
xlabel('Mélység (m)');
ylabel('PERM (mD)');
%
egyen,
%
hiba=zeros((hint/dz),1);
for j=1:length(DATA)
    hibaseg=0;
    for w=2:6
        hibaseg = hibaseg + ((DATA(j,w)-DATA0(j,w))/DATA0(j,w))^2;
    end
    hiba(j,1)=100*sqrt(hibaseg/5);
    % pontbeli összes adatra vonatkozó hibák vektora a teljes
    intervallumra
end
Adattav=mean(hiba),          % adatrendszer hibája

```

2,

```

a =      3.119 ;
b =      2.593 ;
c =      1.041 ;
d =      3.416 ;

for i=1:length(DATA)
    PermS(i,1)=a*(1-b*exp(-c*DATA(i,7)^4))+d;
end
%
figure(4);
plot(DATA(:,1),log(MEGZ2(:,6)));
xlabel('Depth');
ylabel('ln(PERM)');
grid on;
hold on;
plot(DATA(:,1),PermS,'r');
%
Modtav=100*(norm(PermS-log(MEGZ2(:,6)),2)/length(PermS)),
%
SHCIRR=1-MEGZ2(:,3);
for t=1:length(SHCIRR)
    if SHCIRR(t,1)<0 SHCIRR(t,1)=0; end
    if SHCIRR(t,1)>1 SHCIRR(t,1)=1; end
end
VSD=1-MEGZ2(:,2)-MEGZ2(:,4);
%
fnum=fopen('ered.txt','w+');
fprintf(fnum,'DEPTH    POR    VSH    VSD    SX0    SHCIRR    GR    RHOB
DTS    DTSTC    DTSTM    IST    lnPERMT    lnPERMS    \n');
for i=1:length(D)
    fprintf(fnum,' %6.4f
',DATA(i,1),MEGZ2(i,2),MEGZ2(i,4),VSD(i,1),MEGZ2(i,3),SHCIRR(i,1),DATA(i,
2),DATA(i,3),DATA(i,4),DATA(i,5),MertSert_zajos(i,1),DATA(i,7),log(MEGZ2(
i,6)),PermS(i,1));
    fprintf(fnum,'\n');
end

```

```

fclose(fnum);
%
seg=0;
n=length(PermS);
for i=1:n
    d(i)=(PermS(i,1)-log(MEGZ2(i,6)));
    seg=seg+(d(i)*d(i));
end
rang_korr=1-(6*seg/((n^3)-n))-0.01,
corrcoef(PermS(:,1),log(MEGZ2(:,6))),_

```

11.3 Válaszfüggvények

Karotázs direkt feladat számítása:

```

%*****
%
function d=valaszfgv(m, zaj)
%
por = m(1); % m: modellvektor
sx0 = m(2);
vsh = m(3);
vsd = 1-por-vsh; % anyagmérleg egyenlet
%
%-----
% Sűrűség (gamma-gamma) szelvény:
%-----
%
rhomf = 1; % g/cc
rhosd = 2.65;
rhosh = 2.4;
rhohc = 0.15;
rhocal = por*((rhomf*sx0)+(1-sx0)*rhohc) + vsh*rhosh + vsd*rhosd;
%
%-----
% Természetes gamma szelvény:
%-----
%
grsd = 10; % API
grsh = 160;
grcal = grsd + ((vsh*grsh*rhosh + vsd*grsd*rhosd)/rhocal);
%
%-----
% Akusztikus (nyíró) terjedési idő:
%-----
%
atmf = 630; % mikrosec/m
atsd = 184;
atsh = 330;
athc = 1050; % gáz
atscal = sqrt(3)*por*((atmf*sx0)+(1-sx0)*athc) + vsh*atsh + vsd*atsd;
%
%-----
% Akusztikus (Stoneley) terjedési idő:
% (impermeábilis réteg)
%-----
%
atstcal=sqrt(((rhomf/rhocal)*atscal*atscal)+(atmf*atmf));
%
%-----

```

```

% Egzakt és zajos adatvektor:
%-----
%
degz = [grcal rhocal atscal atstcal];
sigm=zaj*0.01; % szórás (zaj százalékban)
%
for t=1:4
    d(t)=degz(t)*(1+normrnd(0,sigm));
end
return

```

11.4 Modell3 programkódjai

```

clc;
clear all;
DATA=[2860.8000 210.0000 217.1875 93.7500 1.0300 0.3000 0.1500
2861.0000 210.0000 220.3125 93.7500 1.0280 0.2000 0.1000
2861.2000 210.0000 215.6250 91.0000 1.0250 0.1900 0.0400
2861.4000 209.0000 217.1875 87.5000 1.0350 0.7000 0.0500
.
.
.
2890.0000 206.2500 210.9375 123.0000 1.0300 0.5000 0.0100];
%
% DEPTH DTSTC DTSM GR IST PERMSTC PERMc
%
DATA2=DATA(40:110,:);
figure(1);
plot(DATA2(:,5),log(DATA2(:,7)),'.');
s = fitoptions('Method','NonlinearLeastSquares','Robust','on',...
'Lower',[-1000000 -1000000 -1000000 -1000000 ],...
'Upper',[ 1000000 1000000 1000000 1000000],...
'Startpoint',[ 1 1 1 1]);
f = fittype('a*(1-b*exp(-c*x^4))+d','options',s);
[egyen,gof] = fit(DATA2(:,5),log(DATA2(:,7)),f);
Perm_form=egyen(DATA2(:,5));
hold on;
plot(DATA2(:,5),Perm_form,'k.');
```

```

%
a = 12.81 ;
b = 24.29 ;
c = 3.248 ;
d = -4.581 ;
%
for i=1:length(DATA)
    DATA(i,8)=a*(1-b*exp(-c*DATA(i,5)^4))+d;
end
%
egyen,
%
DATA(:,9)=exp(DATA(:,8));
xlabel('Stoneley index');
ylabel('Magon mért permeabilitás');
title('Pretty Hill Formáció (Otway Basin, Australia)');
grid on;
%
Modtav=100*(norm(DATA(40:110,8)-log(DATA(40:110,7)),2)/length(DATA)),
%
seg=0;

```

```

n=length(DATA);
for i=1:n
    d(i)=(DATA(i,8)-log(DATA(i,7)));
    seg=seg+(d(i)*d(i));
end
rang_korr=1-(6*seg/((n^3)-n))-0.01,
corrcoef(DATA(:,8),log(DATA(:,7))),
%
fnum=fopen('ered_terep.txt','w+');
fprintf(fnum, ' DEPTH      DTSTC      DTSM      GR      IST
PERMSTC      PERMC      lnPERME      PERME      \n');
for i=1:length(DATA)
    fprintf(fnum, ' %6.4f ',DATA(i,1:9));
    fprintf(fnum, '\n');
end
fclose(fnum);

```

Diplomamunka kivonat

Az akusztikus teljes hullámkép fúrólukban történő felvétele ma már általánosan elterjedt módszer a hazai és nemzetközi mélyfúrási geofizikai szénhidrogén-kutatásban, mely alkalmas a kőzetek repedezettségének, anizotrópiájának és áteresztőképességének a meghatározására (Ellis és Singer, 2007). Ez utóbbi paraméter igen fontos a szénhidrogén-készletek kitermelési módjának megválasztása szempontjából. Mivel a permeabilitás az egyik legnehezebben meghatározható paraméter, ezért a standard módszereken túl nagy jelentősége van az újabb (független fizikai elven alapuló eljárásokon alapuló) módszerek alkalmazásának. A nukleáris mágneses rezonancia (NMR) szelvényezés segítségével lehetőség van a kőzetek áteresztőképességének direkt meghatározására, azonban ez a módszer igen költséges, így a hazai gyakorlatban még nem el (Coates és társai 1990). A közvetett (in-situ) permeabilitás-számítási módszerek a kőzetek porozitásának és kötött víztelítettségének meghatározásán alapulnak. A rendelkezésre álló adatfeldolgozási eljárásokat értékelve, azt tapasztaljuk, hogy minden módszernek megvannak a gyengeségei, ui. gyakran a származtatott értékek ellentmondásban állnak a fúrómagok alapján meghatározott permeabilitással. Az áteresztőképesség becslési bizonytalansága elérheti az egy (másfél) nagyságrendet is. A Stoneley hullám elkülönítésével lehetővé válik a tárolókőzetek in-situ áteresztőképességének a meghatározása, mellyel növelhetjük a kőzetfizikai értelmezés pontosságát és megbízhatóságát.

A permeabilitás akusztikus mérésekből történő meghatározására standard módszernek a Stoneley hullám beérkezési időadatok inverzióját tekinthetjük (Tang és társai, 1990). Azonban, az utóbbi években olyan nagyszámú eredmények is születtek, melyek egyszerűsített, empirikus megfigyeléseken alapuló algoritmust használnak fel (Buffin, 1996; Bala, 2010). Ezek közös jellemzője, hogy az ún. Stoneley-index és a permeabilitás kapcsolatát nagyszámú terepi mérésre alapozott statisztikus módszerrel határozzák meg. Ezek a formulák azonban nem függetlenek a kutatási területtől. Vizsgálataim során célul tűztem ki, hogy az empirikus függvények kőzetfizikai modelltől való függését megvizsgáljam és jól használható összefüggést adjak a Stoneley-index és az általánosan elfogadott Timur formulából becsült permeabilitás között.

A tavalyi év második felében elkészített TDK dolgozatban (Kalmár, 2013) áttekintettem az akusztikus szelvényezési módszert és a klasszikus permeabilitás becslés elvi alapjait, melynek irodalmi áttekintését többek között Bala és társai (1995) adták meg. Majd rámutattam a Stoneley-index és a permeabilitás nemlineáris kapcsolatára. A

regressziós függvénykapcsolatot egzakt közetfizikai modellek alapján adom meg. A direkt modellezés során felhasználok a természetes-gamma intenzitás szelvényt, mellyel az agyagtartalmat becsülöm meg. A gamma-gamma (sűrűség) és az akusztikus (nyíróhullám terjedési idő) szelvény meghatározásával elméleti Stoneley intervallum-időket számítok impermeábilis kőzetek esetére. A számított Stoneley beérkezésekhez zaj hozzáadásával kvázi-mért (a méréseket szimuláló) Stoneley hullám beérkezési időadatokat számítok, melyekkel Stoneley-index szelvényt állítok elő. Ez a mennyiség a porozitástól és a kötött víztelítettségétől függő (Timur formulával számított) permeabilitással egyenes arányosságot mutat. A kapott eredményt a közetfizikai paraméterek (porozitás, agyagtartalom, maradék víztelítettség) széles tartományán megvizsgálom a fenti szintetikus modellek esetén. A módszer tesztelését terepi adatokon is elvégezem, melynek keretében összehasonlítom a Stoneley indexből származtatott permeabilitást fűrőmagokon mért laboratóriumi adatokkal. A kutatás továbbfejlesztésének lehetőségei:

- Robosztus regressziós módszerek alkalmazása a Stoneley- index (Ist) és a regressziós kapcsolat vizsgálatára.
- Érzékenységi vizsgálatok a frekvenciatartományban
- A különböző szénhidrogén tároló típusokban a terepi módszer tesztelése
- A módszer kipróbálása a világ különböző területein, és az empirikus egyenlet alkalmazása