



Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
Geofizikai Tanszék



Litokarbonátok fácieselemzése

Készítette: **Halmágyi Anett**

Földtudományi mérnök mesterszakos hallgató

Konzulensek:

Dr. Szabó Norbert Péter
Egyetemi docens
ME, Geofizikai Tanszék

Dr. Tóth József
Geológiai és Geofizikai
Adatmanagement vezető
MOL Csoport

Dr. Vass Péter Tamás
Tároló értékelési szakértő
MOL Csoport

Miskolc
2014

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	1
2. Fácieselemzésre alkalmazott geofizikai szelvények.....	2
2.1. Litológiai szelvények.....	2
2.1.1. Természetes gamma szelvényezés	2
2.1.2. Lyukátmérő szelvényezés	4
2.2. Porozitáskövető szelvények	5
2.2.1. Neutron porozitás szelvényezés	5
2.2.2. Akusztikus szelvényezés	6
2.3. Fajlagos ellenállás szelvényezés	8
3. Karbonátos üledékképződési környezet.....	10
4. Az elektrofácies analízis	12
4.1. Elektrofácies vizuális azonosítása.....	13
4.2. Elektrofáciesek automatikus azonosítása	15
4.2.1. Klaszteranalízis	15
5. A területen végzett vizsgálatok	19
5.1. Rendelkezésre álló adatok	19
5.1.1. Geológiai környezet	19
5.2. Vizsgálati eredmények	21
6. Következtetések.....	27
Irodalomjegyzék.....	29
Ábrajegyzék	30
Mellékletek	32

1. Bevezetés

A szénhidrogének iránti igény és emellett korlátozottan rendelkezésre álló mennyiségük miatt, az ipari termelés számára elengedhetetlenné vált a földtani modellek egyre pontosabb meghatározása, ennek következtében új technológiákat kell alkalmazni, ami gazdasági szempontból ugyan megnöveli a költségeket, de nagymértékben csökkenti a kockázatot, ami egy fűrés esetén nem elhanyagolható szempont.

A modell optimalizálásának fontos egységét képezi a fáciesek pontos meghatározása, segítségükkel következtetni tudunk az üledékképződési környezetre. Az üledéksor leírása karotázs szelvények segítségével történik, amelyek nélkülözhetetlenek a minél pontosabb geológiai modell meghatározásához, ugyanis ezeket a paramétereket közvetlenül mérni tudjuk, és elő tudunk állítani olyan modellt, amely kapcsolatba hozható a geológiai fáciesekkel.

A karbonátos tárolók jelentősé abban rejlik, hogy a világ ismert kőolaj készletének kb. 60 %-a karbonátos tároló-kőzetekben található valamint a kőolaj és a földgáz kb. 30-40 %-a karbonátos kőzetek szerves anyagából képződött. A karbonátos anyakőzetek felhalmozódása történhetett tavi környezetben, mélytengeri medencében és gyakran sekélytengeri platformon (Hetényi és Sajó, 2004).

A dolgozatom célja az elméleti ismeretek összefoglalást követően, egy külföldi felső triász-jura korú karbonátos üledékes környezet újraértelmezése korszerű szoftverek segítségével. Nem-hierarchikus klaszter analízis segítségével elektrofáciesek azonosítása. Előzetes földtani ismeretek segítségével geológiai fáciesekké való átalakítása.

2. Fácieselemzésre alkalmazott geofizikai szelvények

2.1. Litológiai szelvények

Azok a szelvények sorolhatók ebbe a csoportba, melyek segítik a permeábilis és az impermeábilis rétegek elkülönítését, valamint érzékenyek a kőzetösszetételre. A geofizikai eljárások közül litológiai szelvények közé sorolható a természetes potenciál, a természetes gamma és a lyukátmérő szelvényezés. A karbonátok fácieselemzése során az általam elemzett szelvények között a természetes potenciál szelvényezés nem szerepelt, így ezt a dolgozatomban nem ismertetem.

2.1.1. Természetes gamma szelvényezés

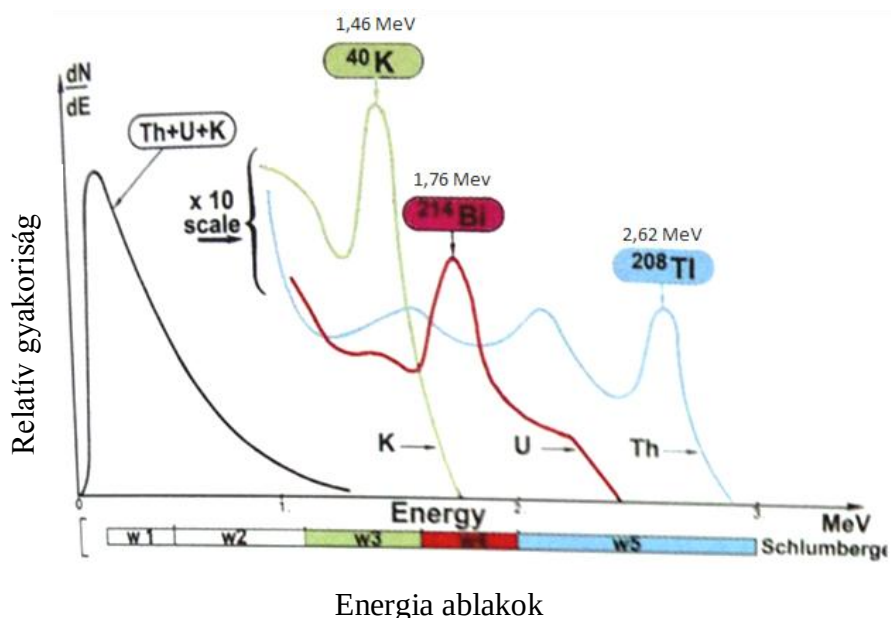
A kőzetek radioaktivitásaért jórészt a ^{40}K izotóp és a ^{232}Th valamint az ^{238}U bomlási sora felelős, a különböző bomlások után gerjesztett állapotban maradt atommag gamma fotonokat bocsát ki, geofizikai szempontból ezek mérhetőek, mert a radioaktív sugárzások közül a gamma fotonok áthatoló képessége kellően nagy (Balázs, 2013).

1. táblázat: A ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U relatív előfordulása a földkéregben
„Ferenczy és Kiss (1993) nyomán”

Relatív előfordulás a Föld kérgében (ppm)	
^{40}K	2,5
^{232}Th	3
^{238}U	12

A szénhidrogén kutatásban az alábbi ásványokkal és kőzetekkel találkozunk a három elem tekintetében: A *kálium* evaporitok kálisóiban (szilvin, karnallit, stb.), földpátokban (ortoklász, mikroklin), agyagásványok közül is elsősorban a csillámokban (biotit, muszkovit), vulkáni kőzetek közül a savanyú magmás kőzetekben (gránit, riolit), és metamorf kőzetekben fordul elő jelentős mennyiségben. A *tórium* törmelékes eredetű agyagásványok és kőzetalkotó ásványok hidrát burkában, illetve átalakult vulkáni kőzetekben (pl. bentonit) dúsul fel. Egyes nehézásványok (cirkon) kristályrácsába beépülve helyettesítő elemként van jelen. Az *urán* gyakran megtalálható nagy szerves anyag tartalmú kőzetekben (bitumenes agyagpalák, szenes márgák), továbbá a jó adszorpciós képességgel rendelkező ásványok felületén megkötött vízben (Ferenczy és Kiss, 1993).

A természetes gamma sugárzás detektálása kétféle módon történhet, integrális vagy spektrális módon. Integrális mérés során a kőzetből származó összes sugárzást mérjük, míg spektrális mérés az egyes radioaktív elemek ún. energiaablakokon keresztül történő megfigyeléséből áll.



1. ábra: A természetes gamma sugárzás spektruma (Serra, 2004)

A fácieselemzéshez elsősorban az integrális természetes gamma mérések eredményeit használják. Az integrális mérés során kapott szelvényt litológiai tagolásra is használható, különösen homok-agyag összletekben. A homokra ugyanis alacsony ezzel szemben az agyagokra magas GR értékek jellemzőek. A réteghatárok a görbe inflexiós pontjánál jelölhetők ki. Az integrális természetes gamma szelvény jól használható fúrások közötti réteggörbe elvégzésére, valamint a görbealakok alapján fácies analízis is végezhető (Ferenczy és Kiss, 1993).

Mennyiségi értelmezés az agyagtartalomra vonatkozóan végezhető. Ehhez első lépésben a gamma index számítása szükséges, amelyet az alábbi formula alapján számolhatunk.

$$I_{\gamma} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (2.1)$$

A lineáris közelítés ($V_{sh} \leq I_{\gamma}$) általában túlbecsüli az agyagtartalmat, nemlineáris közelítésben a Larionov formula alkalmazható. A 2.2 egyenlet a harmadidőszaki, míg a 2.3 egyenlet ezeknél idősebb kőzetek agyagtartalmának meghatározására alkalmas.

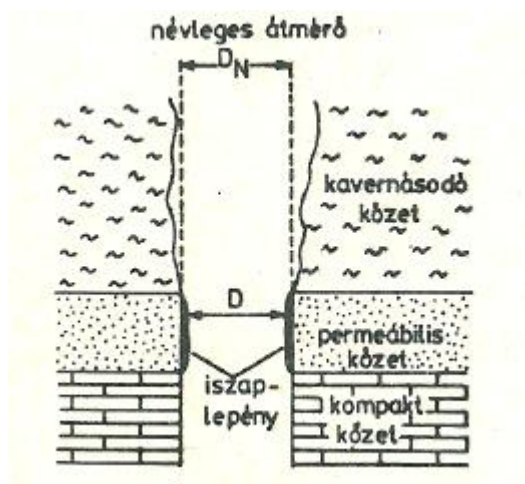
$$V_{sh} = 0,083(2^{3,7 \cdot I_{\gamma}} - 1) \quad (2.2)$$

$$V_{sh} = 0,33(2^{2 \cdot I_{\gamma}} - 1) \quad (2.3)$$

A spektrális természetes gamma szelvényezés során, ahogy azt fentebb említettem meghatározott energiaablakokon történik a mérés. A K, U, Th bomlási sorok meghatározott, diszkrét energiájú gammasugárzást bocsátanak ki. A mérés során azonban folytonos spektrum fog előállni. Ennek oka egyrészt a detektor kristályban és a formációban végbemenő párkeltés, valamint, hogy a kibocsátás helyétől a detektorig haladó gamma fotonok útközben Compton-szóródást szenvednek, és csökkent energiával haladnak tovább (Serra, 1984).

2.1.2. Lyukátmérő szelvényezés

A lyukátmérő mérésével a fúróluk falának egyenetlenségeit tudjuk kimutatni. A fúrési műveletek során a kőzetek különbözőképpen viselkedhetnek, mely a lyukátmérő változásaiban is megnyilvánul. A néveleges lyukátmérőhöz képest, a kőzettől függően a fúróluk átmérője a következőképpen alakulhat (2. ábra):



2. ábra: A fúróluk átmérőjének alakulása (Ferenczy és Kiss, 1993)

A fúróluk átmérője a néveleges átmérővel egyezik meg (D_N); konszolidált, kemény általában impermeábilis kőzetek (pl. mészkő). A fúróluk átmérője nagyobb a néveleges átmérőnél; gyengén konszolidált, ún. kavernásodásra hajlamos kőzetek (agyagok, márgák) A fúróluk átmérője kisebb a néveleges átmérőnél; permeábilis kőzeteknél az iszap filtrációja következtében kialakuló iszaplepény miatt.

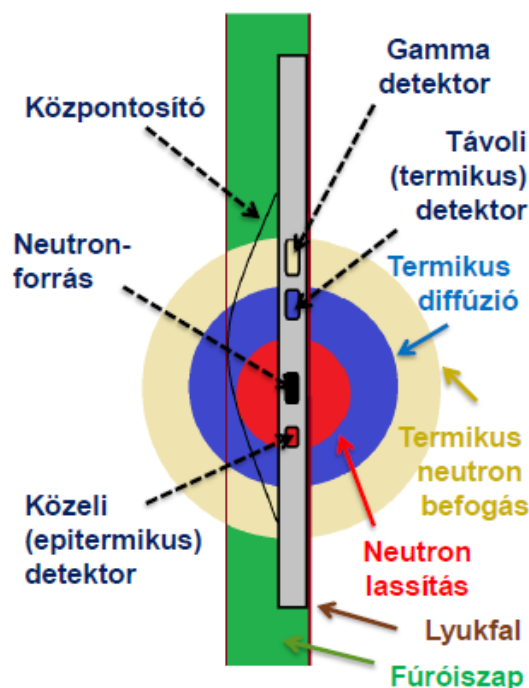
A szelvényértelmezés során az iszaplepény detektálása alapján segítséget nyújt a porózus, permeábilis és impermeábilis képződmények minőségi elkülönítésére, az iszaplepény vastagságának meghatározására, a fúróluk és az iszaplepény korrekciók meghatározása más mélyfúrési geofizikai módszerek számára, repedezett kőzetek esetében a nagyobb repedések, üregek kimutatása (Ferenczy és Kiss, 1993).

2.2. Porozitáskövető szelvények

Általában háromféle porozitás-követő módszert alkalmazunk: neutron szelvényezés, gamma-gamma szelvényezés és akusztikus szelvényezés. Mindhárom geofizikai eljárás a kőzetek porozitására érzékeny. Fő feladatukat képezik a tárolók porozitásának meghatározása, de emellett (a kőzetmátrix és a rétegtartalom is befolyásolja a mért szelvényeket) a litológiai összetétel és a szénhidrogén típusának megállapítását is lehetővé teszik. A három módszer közül dolgozatomban a neutron módszerrel és az akusztikus módszerrel foglalkozom részletesebben.

2.2.1. Neutron porozitás szelvényezés

Általában kémiai neutronforrásokat (Am-Be, Pu-Be) alkalmaznak. A kisugárzott neutronok, ütközve a kőzetben lévő elemek atommagjaival, energiájukat fokozatosan elvesztik, majd különféle atommagok által elnyelődve eltűnnek a kőzetből. A neutronok három fázisra osztható: gyors, lelassulási és befogadási fázis: a gyors neutronok a formációt alkotó anyagok nukleonjaival ütközve rugalmas szóródást szenvednek, ennek során a neutron átadja energiájának egy részét a meglökött atommagnak. A legnagyobb energiaveszteség akkor lép fel, amikor a neutron tömege közelítően megegyezik az atommag tömegével, a neutron legintenzívebb lassulása ezért hidrogén atommaggal történő ütközésnél következik be (egy ütközésnél az energiaveszteség H esetén 50%-os is lehet, Ca-nál 4%-os, Si-nál 6%-os). A neutronok a többszöri ütközésnél következtében ún. termikus sebességre (2200 m/s) lassulnak le, mely kb. 0.025 eV energiának (termikus energia) felel meg. A termikus neutronok kőzetbeli mozgása nem jár további energiaveszteséggel, viszont különféle elemek atommagjai által elnyelődnek (termikus neutron befogás) (3. ábra). A termikus neutron befogása a befogó atommag instabillá válását eredményezi, melyet egy gamma foton kisugárzása követ (Ferenczy és Kiss, 1993).



3. ábra: Különböző energiájú neutronok érzékelése (Szabó, 2014)

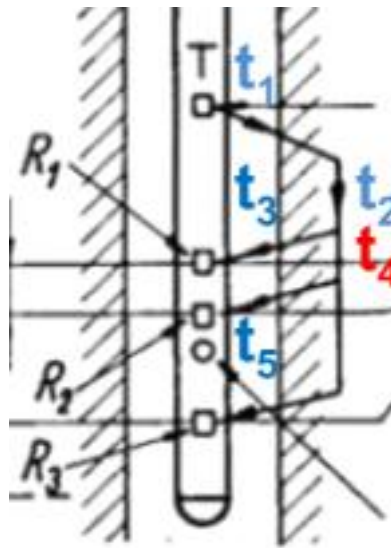
A gyors neutronok atommaggal ütközve nemcsak rugalmasan, de rugalmatlanul is szóródhatnak, ekkor a neutronok energiájának egy része az atommag gerjesztésére fordítódik. Az atommag alapállapotba karakterisztikus gamma sugárzás kibocsátásával kerül vissza. Rugalmatlan szóródás csak nagy energiáknál jöhet létre. A szondák kalibrálása különböző porozitású mészkövekből, homokkövekből és dolomitokból álló modell-kutakban történik, a szelvény látszólagos mészkő-porozitást ad, ettől eltérő litológia esetén korrekciót kell alkalmazni.

Szelvényértelmezés során az alábbi feladatok megoldására alkalmazzák a neutron módszereket: porozitás meghatározása, gáztárolók minőségi kimutatására, sűrűség-szelvénnel kombinálva a szénhidrogén sűrűség meghatározása, más porozitás-követő módszerekkel kombinálva a litológiai összetétel meghatározása, agyagtartalom meghatározása (Ferenczy és Kiss, 1993).

2.2.2. Akusztikus szelvényezés

Az akusztikus szelvényezés során a kőzeteken áthaladó rugalmas hullámok terjedési idejét mérjük: a szondában elhelyezett impulzusadó másodpercenként több tíz szinuszos impulzus csomagot bocsát ki, melynek frekvenciája 10-30 kHz. A keletkezett impulzusok longitudinális hullámokat hoznak létre a szondát körülvevő folyadékban, amelyek a fúrólyuk

falához érkezte, a közeteknek az fűróiszaptól eltérő akusztikus tulajdonságai miatt, refrakciót és reflexiót szenvednek. A refraktált longitudinális hullám a fűrólyuk-közet határfelületen v_p sebességgel terjed. A refrakció során a közetben transzverzális hullámok is terjednek v_s sebességgel. A longitudinális hullámok frontja megelőzi a transzverzálisokét. Ha az adótól bizonyos távolságra elhelyezett vevőtől észleljük az odaérkező hullámokat, akkor először az ún. első beérkezést láthatjuk, másodszor a nagyobb amplitúdójú transzverzális hullámokat, majd az öblítő folyadékban terjedő hullámokat és az előbbiektől eltérő frekvenciájú felületi hullámokat (Ferenczy és Kiss, 1993).



$$t_{R_1} = t_1 + t_2 + t_3 \quad \text{és} \quad t_{R_2} = t_1 + t_2 + t_4 + t_5$$

$$\Delta t = t_{R_2} - t_{R_1} = t_4$$

4. ábra: Az akusztikus terjedési idő elve (Szabó, 2014)

A 4. ábra az akusztikus terjedési idő elvét szemlélteti melynek során az adóból (T) kilépő hullám a TA+AB+BR1 távolság befutása után érkezik az R1-gyel jelzett vevőbe, míg a TA+AB+BC+CR2 út megtétele után éri el R2-t. Belátható, hogy ha csak egy adó és egy vevő van, akkor a szonda helyzetének, azaz az adó és a vevő lyukfaltól való távolságának, valamint a fűróiszap és a közet akusztikus sebességének pontos ismerete nélkül mind a T_{R_1} mint a T_{R_2} értéke bizonytalan.

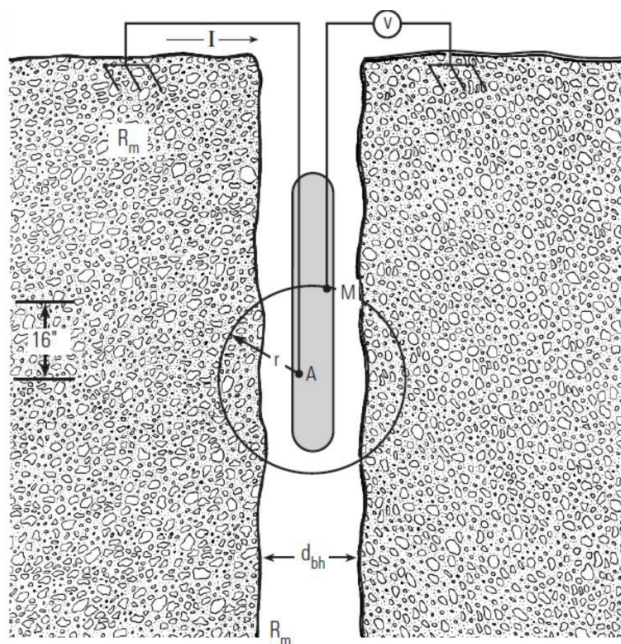
A korszerű akusztikus mérőeszközök lyukkompensált rendszerek, amelyek igyekeznek kiküszöbölni a fűrólyuk méretváltozásából és a ferde szondahelyzetből adódó hibákat: az egyik megoldás, amelyek két impulzus adót és mindkét adóhoz két-két vevőt helyeznek el, a szelvényezés során két akusztikus terjedési időt (AT) mérnek, és ezek átlaga adja a mért

értéket. A másik megoldás, amelyben két impulzus adó és csak két vevő van elhelyezve a szondában, de egyik időpillanatban az egyik adó van működésben a két vevővel, a másikban pedig a másik adó, a terjedési idő itt is a kettő átlaga.

Az akusztikus terjedési időt több tényező együttesen befolyásolja, s ezek közvetlenül a közetek rugalmas tulajdonságaival hozhatók kapcsolatba, közvetve pedig a közetmátrixra, a porozitásra és a pórustartalomra, valamint a közet textúrájára vonatkozóan nyerhetők információk, a nyomást és a hőmérsékletet figyelembe véve (Ferenczy és Kiss, 1993).

2.3. Fajlagos ellenállás szelvényezés

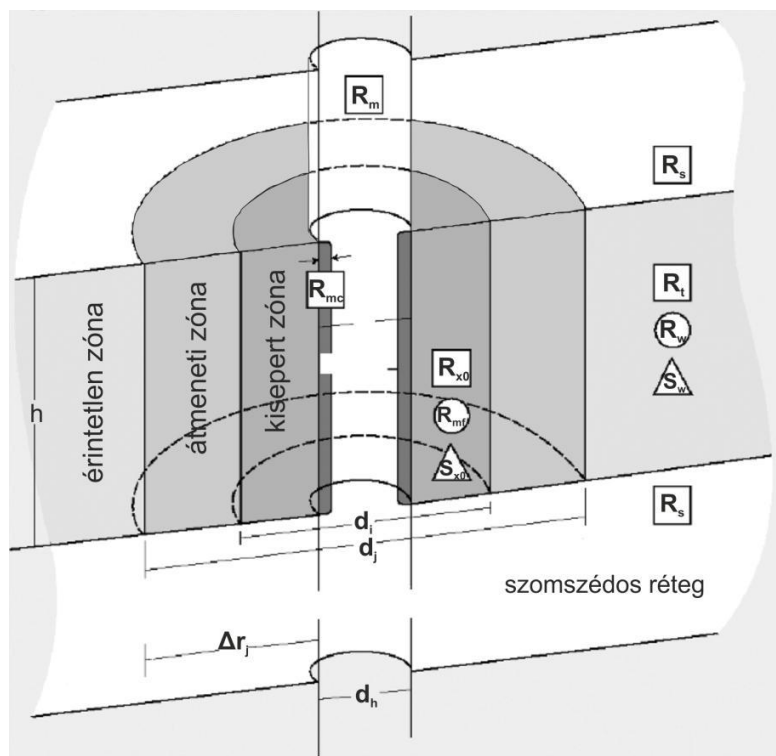
A fajlagos ellenállásmérések szelvényértelmezés szempontjából a szaturációs módszerek közé tartoznak. A fajlagos ellenállás mérésére különböző módszerek terjedtek el, melyeknek az alapja ugyan az, vagyis egy vagy több adóval jeleket bocsátunk a közetekbe és az adótól valamilyen távolságra elhelyezett vevővel mérjük a képződmények elektromos válaszát (5. ábra).



5. ábra: Hagyományos rövid normál fajlagos ellenállásmérő szonda (Ellis és Singer, 2007)

A tároló közetek valódi fajlagos ellenállásának (R_t) meghatározásához különböző vizsgálati mélységű fajlagos ellenállás szelvényeket vehetünk fel: mélybehatolású: 90 cm felett, közepes behatolású: 45-90 cm, sekélybehatolású: 15-45 cm és ún. mikroszelvények: 2-15 cm. Az alkalmazott forrás alapján megkülönböztetünk egyenáramú és váltóáramú (indukciós) fajlagos ellenállás mérő módszereket. Az alkalmazott szondák hossza alapján megkülönböztethetünk mikro és makro szelvényezési eljárásokat (eszközöket). Mindkét

csoporton belül megkülönböztethetünk hagyományos, irányított áramterű és gömbi fókuszálású módszereket (eszközöket). A hosszú szondák esetében a mért értéket az R_{x0} és az R_t egyaránt befolyásolja, a mikroszondák által mért szelvényeken csak a kisépért zóna hatása jelentkezik (6. ábra). Egyes típusai (indukciós mérések, laterolog) a legnagyobb behatolási mélységet elérni képes karotázs módszerek közé tartoznak (Ferenczy és Kiss, 1993).



6. ábra: A fúrólyuk környezetében kialakuló gyűrűs tér ellenállás- és telítettségviszonyai

(Ellis és Singer, 2007)

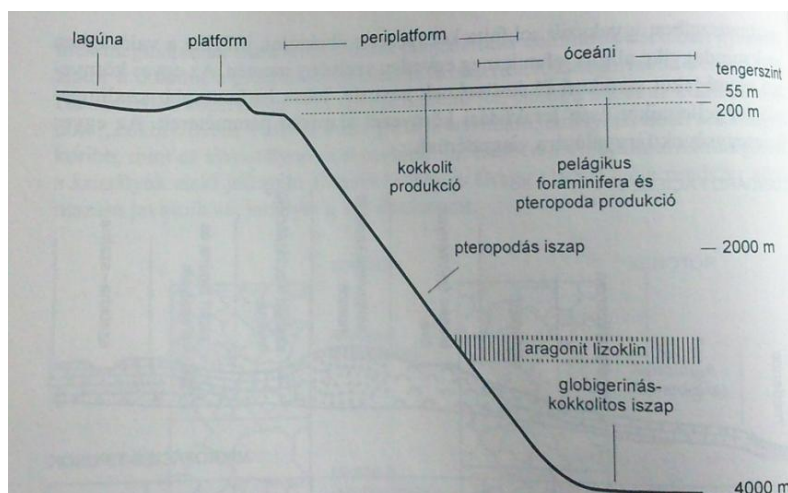
Felhasználhatók permeábilis zónák kimutatására, valamint porozitás becslésre is, de messze a legfontosabb funkciójuk a tároló kőzetek telítettségi viszonyainak a meghatározása, mely igen fontos feladat a szénhidrogén-kutatásban.

3. Karbonátos üledékképződési környezet

A karbonát szedimentológia a karbonátos üledékek és kőzetek, illetve kőzettestek jellegeivel, képződésük körülményeivel foglalkozik. Magában foglalja a karbonátos kőzetek összetételének, szerkezetének, szövetének vizsgálatát, de elsősorban a keletkezési folyamatok kiderítését célozza meg.

A karbonát szedimentológia az 1950-es években alakult ki. Természetesen ennek kialakulását megelőzően is foglalkoztak a karbonátos kőzetek leírásával és képződési körülményeik értelmezésével. A karbonátos kőzettan alapjait az angol Sorby (1879) rakta le, majd a francia Cayeux (1935) folytatta. A szöveti és mikrofácies vizsgálatokat az osztrák Sander (1936) munkái alapozták meg. A mai értelemben vett karbonát szedimentológia kezdetét a céltudatosan és rendszeresen végzett geológiai megfigyelések jelentik. A legnagyobb áttörés Illing (1954) nevéhez fűződik, aki a Bahamai-platform üledékes fáciesének leírásával megalapozta a karbonátos kőzetek genetikai értelmezésének modern szemléletét és szinte az ő megfigyeléseire támaszkodott a Folk (1959) és Dunham (1962) genetikai alapú szöveti rendszer (Haas, 1998).

Karbonátos kőzetek keletkeznek tavi, sőt folyóvízi környezetben is, azonban a geológiai gyakorlat szempontjából kétségtelenül a tengeri környezetben képződött karbonátok a legfontosabbak. A tengeri karbonát lerakódási környezet két alaptípusát különíthetjük el egymástól a sekély- és a mélytengeri környezeteket. A sekély- és a mélytengeri tartományt összekötő lejtők kifejlődési jellegei a két típus közötti átmeneti jellegeket mutatnak, de számos egyedi sajátossággal is rendelkeznek (7. ábra) (Haas 1998).



7. ábra: A tengeri karbonátos üledékképződés környezeti egységei (Haas 1998)

A sekélytengeri karbonátok környezeti üledékképződési jegyeit alapvetően a karbonát-termelő bentosz szervezetek határozzák meg. Az egész rendszert „karbonát üzemnek” is szokták nevezni. Ez a rendszer azonban rendkívül érzékeny egyes környezeti paraméterek megváltozására, látszólag kis változás is jelentős karbonát produkció csökkenéséhez vezethet. Korábban a sekélytengeri karbonátok szedimentológiája szinte kizárólag a meleg tengerekben képződött üledékekre, illetve kőzetekre korlátozódott. Ennek oka egyrészt az volt, hogy karbonátos kőzetek legnagyobb tömegbe kétségtelenül a meleg tengerekben képződött, mára azonban nagyszámú adat áll rendelkezésünkre a nem-trópusi selfeken képződő karbonátokról is (Rao, 1996).

A mélytengeri karbonát forrása egyrészt a sekély környezetben termelődött üledék, másrészt a pelágikus szervezetek mészváza. A mészüledék felhalmozódásban azonban a mélytengeri karbonátoldódás és az áramlatok is jelentős szerepet játszanak.

4. Az elektrofácies analízis

Az elektrofácies-analízis célja az üledékes rétegsor különböző részekre bontása oly módon, hogy a létrejövő egységek szelvényválasz együttese (elektrofáciesei) kapcsolatba hozhatóak legyenek a geológiai fáciesekkel. A művelet két fő részét az elektrofáciesek azonosítása, majd azok fáciesekké való átalakítása képezi. Mindezek előtt szükséges a fácies és az elektrofácies fogalmának tisztázása.

A fácies fogalmát a svájci Gressly vezette be 1838-ban, ő kapcsolt először határozott környezeti értelmezést az általa vizsgált kőzetek litológiai és őslénytani jellegeihez. Azóta számos fácies definíció született (Moore 1949, Teichert 1958, Krumbein és Sloss 1963, Selley 1970). A definíciókban közös az a megállapítás, hogy a keletkezési környezet meghatározza a kőzet főbb jellegeit és faunáját, megszabja annak arculatát (lat. *facies* ~ *arc*). A fácies szó több jelentéssel bír. Genetikai értelemben a kőzet keletkezési környezetét, körülményeit jellemző sajátosságok összessége. Más megközelítésben beszélhetünk lito- vagy biofáciesről, utalva a kőzet ásványi összetételére, szemcsenagyságára és üledékszerkezeti bélyegeire, illetve ősmaradvány-tartalmára (Balogh, 1991; Serra, 2003).

Az egyidős, de különböző fácieseket egymás heteropikus fácieseknek, a különböző korú, de azonos fácieseket egymás izopikus fácieseknek nevezzük. Az üledéksorokban a fáciesek horizontálisan és vertikálisan is változnak, hiszen az üledékképződés feltételei térben és időben is folyamatosan változtak a földtörténet során. Ezt a kontinuitást fejezi ki a – hallei professzor által megfogalmazott, majd róla elnevezett – Walther-féle fácies-törvény, mely kimondja, hogy konkordáns rétegsorban csak olyan fáciesek települhetnek egymásra, melyek egy időben közvetlenül egymás mellett is megtalálhatók (Báldi, 1978; Serra 2003).

Az elektrofácies fogalmának bevezetése Serra és Abott nevéhez kapcsolható: „Az elektrofácies a karotázs szelvényválaszok olyan együttese, amely jellemez egy réteget, lehetővé téve a tőle különböző egyéb rétegek elkülönítését” (Serra és Abott, 1980). Mint látható, a fácies és az elektrofácies definíciója jelentős mértékben eltér egymástól, rávilágítva ezzel arra a különbségre, ami a geológiai és a geofizikai vizsgálati módszerek között fennáll.

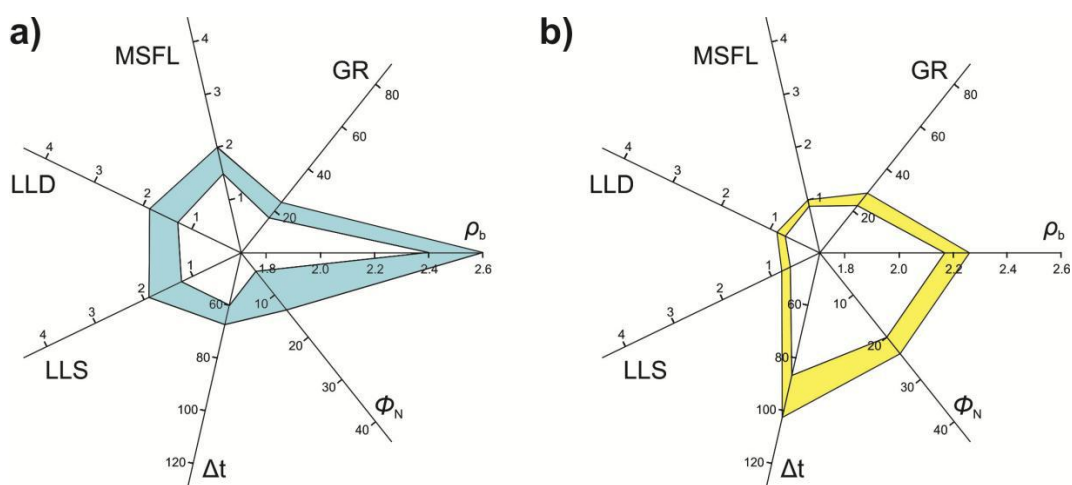
A fácies definíciókban az üledékek olyan tulajdonságai szerepelnek, mint a kémiai és ásványos összetétel, szöveti jelleg, szerkezet, szín, flóra, fauna. Ezeknek egy jó része olyan tulajdonság (flóra, fauna, szín, stb.), melyekre a geofizikai módszerek egyáltalán nem érzékenyek. Bár a karotázs szelvények is egyfajta leképezését adják egy adott geológiai objektumnak, nyilvánvaló, hogy a fácies és az elektrofácies közötti kapcsolat nem lesz mindig egyértelmű. Ráadásul az egyes szelvények egyszerre több fizikai paramétertől függenek,

még hozzá eltérő mértékben. Szükséges tisztázni ezért, hogy a különböző szelvénytípusok milyen mértékben érzékenyek azokra a tulajdonságokra, amik a fáciesek azonosítása szempontjából fontosak (Elek, 1988).

Alapvetően négy olyan jellemzőre lehet következtetni a karotázs segítségével, amelyek a fáciesek azonosításában kiemelt jelentőségűek: az ásványos összetételre, a szövetre (textúrára), a szerkezetre, valamint a fluidum tartalomra. Az első három jellemző alapvető fontosságú a fáciesek azonosításában, hiszen ezek közvetlenül vizsgálhatók a fűrőmagokon, illetve a felszíni kibúvásokban. Így ezek fontos részét képezik a szedimentológusok által meghatározott fácies definícióknak. Ez azonban nem igaz a fluidum tartalomra, aminek a hatását az in-situ körülmények között végzett karotázs mérések mindig tükrözik. Így hatásuk nem eliminálható az elektrofácies definícióból, ami az egész koncepció gyenge pontját is jelenthetné. Bizonyos üledékképződési környezetek felismerésében azonban a pórusfolyadék is fontos tényezőnek bizonyulhat: az édesvíz jelenléte folyóvízi, vagy tavi, a brakkvíz jelenléte partszegélyi, a sósvíz megjelenése pedig tengeri környezetre enged következtetni (Serra, 2003).

4.1. Elektrofácies vizuális azonosítása

Az elektrofáciesek vizuális azonosítására célszerű az összes rendelkezésre álló szelvényt alkalmazni. A vizuális azonosításhoz sorolhatók még a crossplot (keresztplot) technikák, valamint egyéb grafikus módszereket is, melyek a szem kiváló alakfelismerő képességét használják ki. Egyik grafikus lehetőség az egyes rétegek elkülönítésére az ún. pókháló-diagram (8. ábra) készítése.

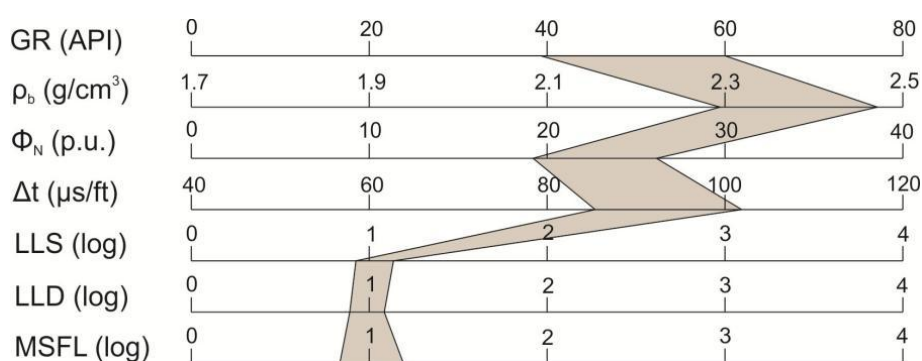


8. ábra: Mészkő (a) és homokkő (b) pókhálódiagramjai (Serra és Abott, 1980).

A tengelyeken szereplő rövidítések a következő szelvénytípusokat jelölik: GR – természetes gamma, ρ_b – közsűrűség, Φ_N – neutron porozitás, Δt – akusztikus terjedési idő, LL_S – sekély behatolású laterolog, LL_d – mély behatolású laterolog, MSFL – fókuszált mikro-ellenállás. Az ellenállás szelvények tengelyei logaritmikus léptékűek.

Egy soktengelyű koordináta-rendszerben ábrázoljuk az adott rétegre jellemző szelvényérték tartományokat, melyeket összekötve karakteres görbék adódnak. Amennyiben sikerül pókhálódiagram-etalonokat definiálni, akkor lehetővé válik egyes rétegtani egységek előre megadott csoportokba való besorolása (Elek, 1988; Serra 2003).

További osztályozási lehetőséget jelent még az ún. létradiagramok használata is.



9. ábra: Példa létradiagramra (Serra, 2003).

Hasonló funkcióval rendelkeznek, mint a pókháló-diagramok, csak itt a tengelyek egymással párhuzamosan vannak ábrázolva (9. ábra). Serra és Abott (1980) húsz elektrofációs létradiagramját készítette el, melynek segítségével már igen részletes csoportosítás vált lehetővé.

4.2. Elektrofáciesek automatikus azonosítása

Az utóbbi időben számos matematikai eljárást vezettek be a fácies azonosítás automatizálása céljából. Ezek többnyire többváltozós statisztikai és regressziós módszerek, úgymint a főkomponens analízis, a nem-paraméteres regresszió, a klaszteranalízis, a mesterséges intelligencián alapuló eljárások (pl. neurális hálózatok), vagy a döntési fák alkalmazása (Kumar és Kishore, 2006).

Az első lépés minden esetben a rétegeknek az elkülönítése. Amennyiben M db szelvénnnyel rendelkezünk, úgy minden egyes mélységponthoz egy M elemű vektor tartozik. Kiindulásként tehát annyi rétegünk van, ahány mélységpontból származnak adataink. Mivel a cél nagyobb egységek elkülönítése, az egymáshoz hasonlóknak tekinthető rétegeket addig vonjuk össze, amíg a kívánt felbontást el nem érjük. Előzetes ismeretek (karotázs és magfúrás, furadék) alapján előre definiálnunk kell adott sugarú környezettel rendelkező helyvektorokat (elektrofáciesek), melyek egy-egy ideális fáciesnek feleltethetők meg. Ezt követően a feladat eldönteni, hogy az adott mélységponthoz tartozó vektorunk melyik etalonhoz hasonlít a legjobban (Elek, 1988).

A rendelkezésre álló adatokon klaszter analízis hajtottam végre, melynek segítségével megállapítottam az elektro-fácieseket.

4.2.1. Klaszteranalízis

A nem felügyelt alakfelismerés (klaszter analízis, hazai szakirodalomban csoport- vagy fürtelemzés) az objektumokat próbálja csoportba rendezni. A csoportosítás alapját valamilyen távolságdefiníció képezi. Ez azt jelenti, hogy ha két objektum távolsága kicsi, akkor hasonlóknak tekinthetők, így azonos csoportba soroljuk őket. Nagy távolság esetén az objektumok eltérőek, így nem tartoznak bele ugyanabba a csoportba. Fontos megjegyezni, hogy a klaszterelemző eljárások nem rezisztensek (kiugró adatokra érzékenyek), így pl. az eltérő nagyságrendű adatok torzíthatják a becslést (Szabó, 2012).

A távolság fogalom meghatározása és megválasztása alapvető az eredmény szempontjából. Mielőtt rátérnénk a távolság fogalom meghatározására, definiáljuk a csoportok jellemző tulajdonságait. Az *átmérő* a csoport két legtávolabbi elemének a távolságát adja meg. A *súlypontvektor* a klaszter középpontjához húzott helyvektor, mely a csoport helyét adja meg a térben. A *sugár* a csoport súlypontja és legtávolabbi elemének a távolsága.

A *centroidot*, azaz a K -adik csoport c_K súlypontját a csoport elemeinek számtani átlagaként értelmezzük

$$c_K = \frac{1}{n_K} \sum_{i=1}^{n_K} x_i^{(K)}, \quad (4.1)$$

ahol n_K a csoport elemszáma. Kétváltozós probléma esetén az adatokat az $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, ill. az $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ vektorban tároljuk. A csoportképzés alapja az objektumok elhelyezkedése a síkon, ahol a pontok egymáshoz való helyzetét a távolsággal is jellemezhetjük. Kettőnél több mérési változó esetén, az objektum az n dimenziós adattér egy pontja, melyet n számú független mérési változó határoz meg. A csoportosítást e pontok alapján történik. Többféle távolságot definiálhatunk:

Eukleidészi távolság: két vektor (x és y) különbségének az L_2 -normája

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}. \quad (4.2)$$

Minkowski-távolság: ebben az esetben is a különbségvektor L_p -normájával egyezik meg

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p}. \quad (4.3)$$

City-block (Manhattan) távolság: a különbségvektor L_1 -normájaként számítható.

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|. \quad (4.4)$$

Ezek a távolság definíciók abban az esetben használhatók, ha azt feltételezzük, hogy az x és y változók függetlenek egymástól. Abban az esetben, ha a változók korreláltak, akkor célszerű a

Mahalanobis-távolságot alkalmazni

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sqrt{(\vec{x} - \vec{y})^T \text{cov}^{-1} (\vec{x} - \vec{y})}. \quad (4.5)$$

A (4.5) kifejezésben a kovariancia mátrix (főátlójában a szórásnégyzetekkel) inverze, normálási tényezőként jelenik meg. A normálást súlyozásként foghatjuk fel, mellyel a korreláltság hatását kívánjuk csökkenteni. Abban az esetben, amikor a kovariancia-mátrix egységmátrix (a változók függetlenek), akkor a Mahalanobis-távolság az Euklideszi távolságot adja vissza. A fenti távolság definíció alkalmazása akkor előnyös, amikor a változók nagyságrendje és dimenziója különböző. Ekkor ui. a távolságok nem összemérhetők. A klaszterelemek páronkénti távolság értékeit egy $n \times n$ -es mátrixba rendezhetjük (ahol n a mintaelem szám). Az így kialakított mennyiséget távolságmátrixnak nevezzük

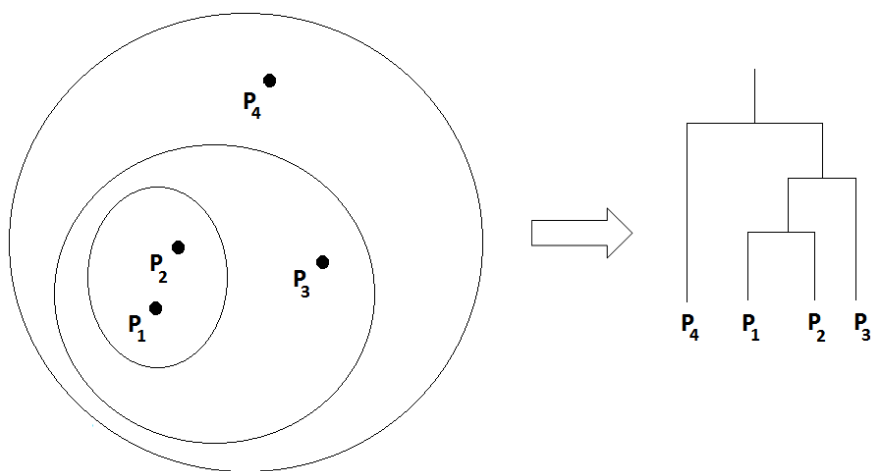
$$\text{cov}(\underline{x})^{-1} = \begin{bmatrix} \delta_{d1}^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & \delta_{d2}^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & \delta_{dn}^{-2} \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

A klaszterelemzés során arra törekszünk, hogy a csoporton belüli elemek között a távolság minimális, de a csoportok közötti távolság maximális legyen. A klaszterelemző eljárásokat két csoportra osztjuk: hierarchikus és nem hierarchikus eljárásokra. A hierarchikus klaszterezés előnye hogy nem kell ismernünk a létrehozandó klaszterek számát, hátránya, hogy időigényes, csak kis mintaelem esetén használhatjuk (Szabó, 2012).

A hierarchikus agglomeratív eljárás esetén a kezdeti fázisban az elemszámmal megegyező számú (n számú egyelemű) klaszterünk van. Első lépésben kiszámítjuk a távolságmátrixot, majd a két egymáshoz legközelebb álló klasztert egyesítjük. Ennek következtében eggyel csökken a klaszterek száma. A korábban egyesített klaszterek együtt maradnak, így módon minden lépésben eggyel csökken a klaszterek száma. A távolságmátrixot is minden lépésben újra kell számítani. Az eljárás végén egy klaszter marad, amely az összes elemet tartalmazza.

A klaszterek közötti hasonlóságot különböző kritériumok alapján értelmezhetjük. A csoportok egyesítését követően különböző módon értelmezhetjük a klaszterek közötti hasonlóságot. Egyszerű lánc módszer (*Simple Linkage*) alkalmazása esetén a csoportok legközelebbi elemeinek a távolságát vizsgáljuk. Ezzel ellentétben a teljes lánc módszernél (*Complete Linkage*) a legtávolabbi elemek távolságát számítjuk. A csoportátlag módszernél (*Average Linkage*) a két csoport összes eleme közötti távolságok átlagát tekintjük alapul. A súlypont módszernél (*Centroid Linkage*) a csoportok súlypontjainak (centroidok) távolságát vizsgáljuk. Végül a Ward-módszerrel (*Ward Linkage*) a csoporton belüli ($x_i - c_g$) eltérések négyzetösszegét (szórás) minimalizáljuk (ahol c_g a g -edik csoport súlypontja és $i=1,2,\dots,n$).

A távolságok számításával párhuzamosan az algoritmusok elkezdik a dendrogramok (fastruktúra) készítését úgy, hogy ha veszünk egy A és B objektumot, akkor ezek egy meghatározott távolság alapján egymáshoz kapcsolják, ekkor keletkezik egy ebből a két objektumból álló közös objektum, amihez legközelebb eső pont kikeresésével és csoportba való bevonásával folytatódik az eljárás egészen addig, amíg el nem fogynak az objektumok. A csoportok képzése a többszintű módszerekben összevonó, azaz az eljárás lépésekben csökkenti a csoportok számát úgy, hogy induláskor minden elemet külön csoportnak tekint, és az egyes lépésekben azt a két objektumot vonja össze, amelyek a legközelebb vannak egymáshoz (10. ábra). Ezek az úgynevezett összevonó csoportelemzési módszerek. Léteznek felosztó eljárások is, melyek fordítva járnak el, vagyis induláskor minden elemet egy csoportba sorolnak és az egyes lépésekben az anyacsoportot egyre kisebbekre osztják fel.



10. ábra: A hierarchikus klaszterezés sémája és a dendrogram

5. A területen végzett vizsgálatok

5.1. Rendelkezésre álló adatok

Feladatomban egy felső triász-jura korú karbonátos üledékes környezet értelmezése klaszter elemzéssel ill. az eredmények összevetése kőzetminta mérésekkel. A vizsgált területéről egy darab fúrás adataival dolgoztam és végeztem el a feldolgozást és értelmezését. A legtöbb fúrásban magmintavétel is történt, így az alapszelvények mellett magleírások is a rendelkezésemre álltak. A MOL Csoport tulajdonát képező adatokat és ezek értelmezését pontos hely- és mélység megjelölés nélkül szemléltetem.

Az fúráshoz rendelkezésre álltak lyukbőség (CAL), kompenzált neutron porozitás (CN), akusztikus intervallumidő (DT), spektrális természetes gamma intenzitás (GRKT) és integrális természetes gamma intenzitás (GRTO), mély, sekély és kisbehatolású látszólagos fajlagos ellenállás (LLD, LLS, MSFL), gamma-gamma sűrűség (DEN), fotoelektromos abszorpciós index (PE), valamint térfogati elektromos elnyelési index (ZDN) szelvények. A fúrólukokban tíz centiméterenként történt a mintavételezés, így méterenként egy-egy szelvényhez tíz adat tartozik.

A görbealakok vizuális elemzéséhez, valamint szelvényábrázoláshoz az ALT Inc. *WellCAD* mélyfúrási geofizikai szelvényértelmező szoftvert használtam. A *MathWorks MATLAB®* rendszerében statisztikai számításokat hajtottam végre (klaszteranalízis), valamint crossplot-okat készítettem. Ebben a fejezetben a vizsgálati eredményeket szeretném bemutatni az értékelésére egy külön fejezetben fogok kitérni.

5.1.1. Geológiai környezet

Mielőtt rátérnék a vizsgálatok eredményekre, röviden ismertetni szeretném a MOL Csoport által meghatározott litológiai jellemzőket az általam kijelölt 300 m-es szakaszon. Ezen a szakaszon két formáció különíthető el egymástól.

Formáció I. (xx35-xy40m) Kora Kréta (Felső Kréta):

Ez a formációra ezen a rövid szakaszon elsősorban mészkőből, márgából és aleurolitból áll. A mészkő egy törtfehér, halvány barna, szürke, mérsékelten kemény, helyenként lágy (világosabb), agyagpala, mikrites kőzet. Ez általában erősen pirites. Ritkán bizonyos kővületek (zöld alga, ehinodermata, puhatestűek, fenéklakó foraminiferák) is előfordulnak. A márga egy zöld, szürkészöld, közepesen kemény, helyenként lágy, meszes kőzet, ami erősen pirites és gyakran iszapos. Az iszapok tartalmaz dolomit kristályokat és alárendelt

sziliciklasztokat. A aleurolit egy sárgásbarna, világosbarna, közepesen kemény, durva szemcsés, jól rendezett kőzet, amely karbonáttal cementálódott. (MOL Csoport, 2014).

A formáció környezete és diagenezise az alábbi. Nagyon nehéz egy teljes és pontos diagenetikus folyamat kidolgozása a kőzettöredékekből, a korlátozott információk miatt. Kőzettani vizsgálatok alapján a következő a diagenetikus folyamat írható le: A mikrites mészkő egy mély belső selfben települt, ami átvált egy agyagos, iszapos márgába a külső self környezetben. A lerakódás után a tengeri környezetben az egész kőzet megkövesedett (mudstone / wackestone texturált mészkő, nagyon korai diagenesis). Később a mészkő egy mélyebb környezetbe tömörödött (fizikai és kémiai tömörödés), ami a bioklasztok hasadásához, felbomlásához és kialakult formákhoz vezetett. Ezek a formák később drúzás kalcit páttal cementálódtak. A mészkő erősen stylolitic, amelyek támogatják a radioaktív diagenezist. A tektonikus események miatt a mészkövek több alkalommal eltörték (többszörös törés generáció), ezek a törések kalcit páttal voltak cementálva. A márga / agyagmárga a mélyebb környezetben települt. A sziliciklaszt valószínűleg a lerakódás alatt szállítódott ide. A tömörödés következtében, a szerves anyag laminákba került. A kőzetek karbonizálódása valószínűleg az utolsó diagenetikus folyamat volt (Ca_2 + és Mg_2 + gazdag fluidum). A diagenetikus nyomás megszűnése folyamán az agyagásványok előidéztek a Mg_2 + felszabadulását, ami a dolomitosodáshoz vezetett. A pirit a kőzetben valószínűleg a tömörítés során alakult ki. A pirit a környezet oxigénhiányát jelzi (oxidáló folyamat az anaerob baktériumok által szulfátok segítségével), mint a szervesanyag-tartalom. A fossziliákra támaszkodva (orbitolinids, Choffatella sp., Bivalvia, echinodermata, zöld alga) a I. formáció egy sekély víz képződési környezetben rakódott le. Azonban a kőzettani jellemzők (agyagos, iszapos karbonát kőzetek), arra utalnak, hogy a formáció egy mély belső self, külső self képződési környezetben rakódott le. A rétegtani elhelyezkedése és az állatvilág jelzi a kora kréta kort (MOL Csoport, 2014).

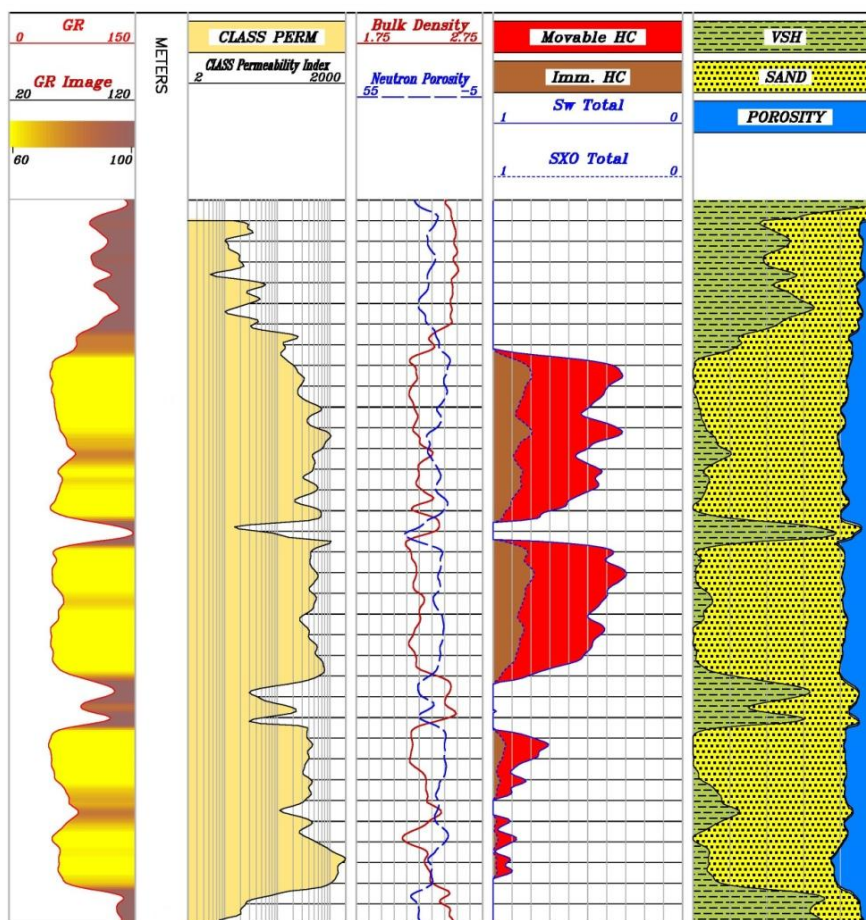
Formáció II. Késő Kréta (Alsó Kréta):

Ez a formációra ezen a rövid szakaszon dolomitból áll vékony mészkő rétegekkel. A dolomit barna, halványbarna színű közepesen kemény, durva, közepes kristályos, porózuskőzet, amely gyakran szénhidrogénnel impregnált. A kőzet sík és masszív szerkezetű továbbá hipidiomorf és idiomorf kristályok alkotják. A mészkő szürke, sápadt szürke, közepesen kemény, mudstone kőzet, ami gyakran szénhidrogénnel impregnált. Néhány közülük átkristályosított kövületeket tartalmaz (tengerfenéki foraminiferák) a textúrája wackestone (MOL Csoport, 2014).

A formáció környezete és diagenezise az alábbi. A dolomit legnagyobb valószínűség mudstone / wackestone szerkezetű mészkő volt, amely később teljesen és / vagy részlegesen dolomitosodott (extenzív dolomitosodás). A dolomit főleg síkbeli dolomitokból áll. A dolomit típusok (síkbeli szerkezet) felszín közelében vagy sekély mélységben alakultak ki. A dolomitosodás után a dolomit összetöredezett. A repedések másodlagos, tiszta dolomittal cementálódtak és/vagy lokálisan szénhidrogénnel voltak tele. A dolomitos mészkőben a mikrites mátrix dolomitosodott. Egy alternatíva, lehet, hogy több volt a mesterséges hely a mátrixban, a kristály méret különbségek miatt. A mészkő egy sekély tengeri, külső platform képződési környezetből települt ide a kora kréta korban. A formáció rétegtani elhelyezkedése és a nagyon kevés fauna jelzi ezt az állítást (MOL Csoport, 2014).

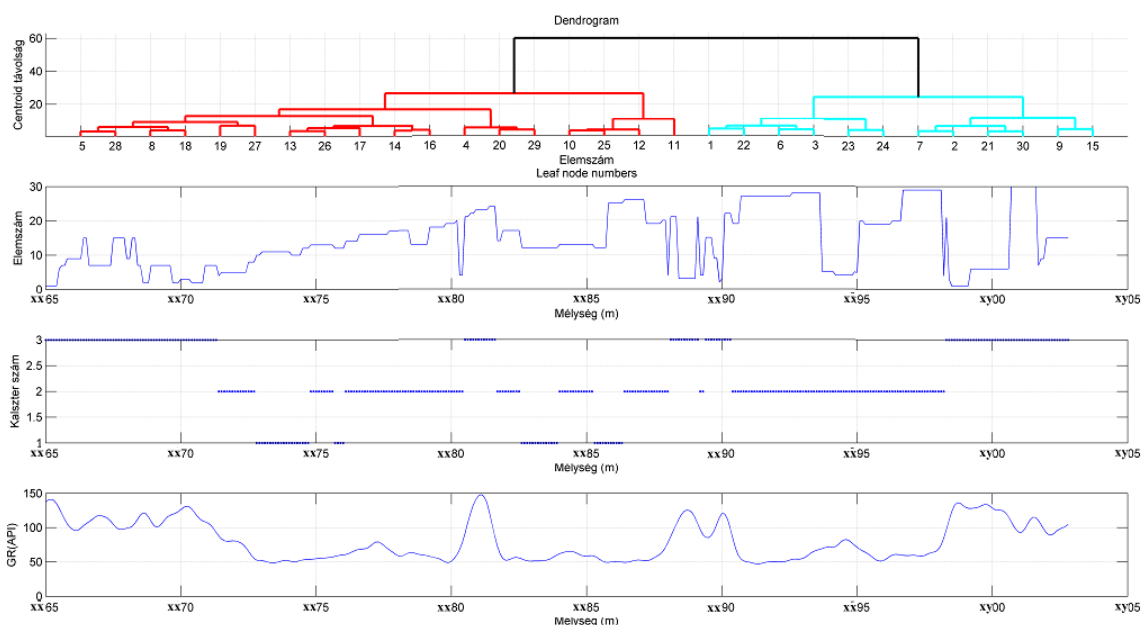
5.2. Vizsgálati eredmények

A klaszter analízis jól alkalmazható agyagos homokkövek esetében, ezt szemlélteti a 11. ábra. Az ábrán sötétzöld szín az agyag, kék a póruster, a sárga a homok részarányát jelöli az egységnyi közettérfogaton belül. A CLASS elnevezés a Clay Classification Analysis modulra utal, ami az Express geofizikai értelmezési programcsomagon belül egy külön karotázs kiértékelési módszer. Ez az ábra az eredményeimtől független eredményeket mutat be, csupán azt szemlélteti, hogy ez a módszer megfelelően elkülöníti az agyag és homok fácieseket, ebből kiindulva alkalmaztam a saját eredményeim szemléltetésére.



11. ábra: Agyagos homokkövek ábrázolása WellCAD segítségével

A 12. ábra a centroid távolságot az elemszám függvényében, az elemszámot, a klaszterek számát és a GR szelvényt a mélység függvényében szemlélteti. Az ábra első képe az úgynevezett dendrogram, mely esetében három nagy csoport (agyag, homok, kettő közötti átmenet) különíthető el. A második kép az elemszámot a mélység függvényében ábrázolja. A harmadik képen a három klaszter mélység szerinti váltakozása figyelhető meg. A negyedik és egybe utolsó ábrán az úgynevezett GR látható a mélység függvényében. A GR szelvény ábrázolva jól elkülöníthető egymástól az agyag és a homok térbeli eloszlása. A nagy kitérések a homok, míg a kisebbek az agyag jelenlétére utalnak.



12. ábra: A klaszter analízis eredménye homokos agyagok esetében

A fenti teszt után a módszert kipróbáltam karbonátos rétegsorban felvett szelvényeken. Ennek eredményeit az alábbiakban tárgyalom. A 2. táblázatban a rendelkezésre álló szelvény adatok Pearson-féle (lineáris) korrelációs együtthatóinak mátrixa. A táblázatból jól leolvasható az, hogy a bemenő szelvények túlnyomóan kis vagy közepes mértékben korrelálnak egymással. A klaszteranalízis eredményére elsősorban a litológiai szelvények gyakorolnak erős hatást.

2. táblázat: A szelvények korrelációs mátrixa

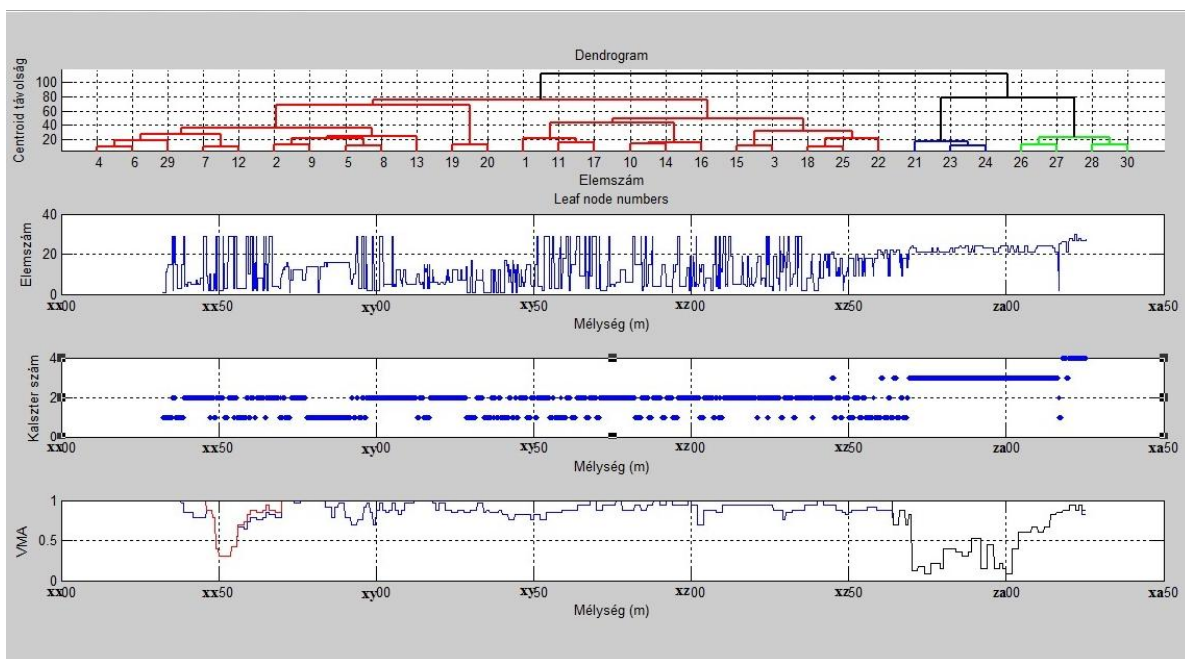
	CAL	CN	DT	GRKT	GRT0	LLD	LLS	MSFL	PE	ZDN
CAL	1.0000	0.4333	0.1855	0.4443	0.2946	0.2309	-0.4592	-0.0541	0.2588	0.1717
CN	0.4333	1.0000	0.6015	0.5197	0.4934	0.1081	-0.1935	-0.2236	-0.3778	-0.4396
DT	0.1855	0.6015	1.0000	0.5549	0.4163	-0.1337	-0.3280	-0.1549	-0.1079	-0.1258
GRKT	0.4443	0.5197	0.5549	1.0000	0.7510	-0.1902	-0.4837	-0.1605	0.2319	0.1974
GRT0	0.2946	0.4934	0.4163	0.7510	1.0000	0.0807	-0.0514	-0.1193	-0.0593	-0.0835
LLD	0.2309	0.1081	-0.1337	-0.1902	0.0807	1.0000	0.3694	-0.0069	-0.1690	-0.2197
LLS	-0.4592	-0.1935	-0.3280	-0.4837	-0.0514	0.3694	1.0000	0.1504	-0.2729	-0.2483
MSFL	-0.0541	-0.2236	-0.1549	-0.1605	-0.1193	-0.0069	0.1504	1.0000	0.1451	0.1536
PE	0.2588	-0.3778	-0.1079	0.2319	-0.0593	-0.1690	-0.2729	0.1451	1.0000	0.9879
ZDN	0.1717	-0.4396	-0.1258	0.1974	-0.0835	-0.2197	-0.2483	0.1536	0.9879	1.0000

A rendelkezésre álló adatok segítségével MathWorks *MATLAB*® rendszerében statisztikai számításokat hajtottam végre (klaszter analízis), melynek programozási menetét mellékletben szemléltetem (1. melléklet).

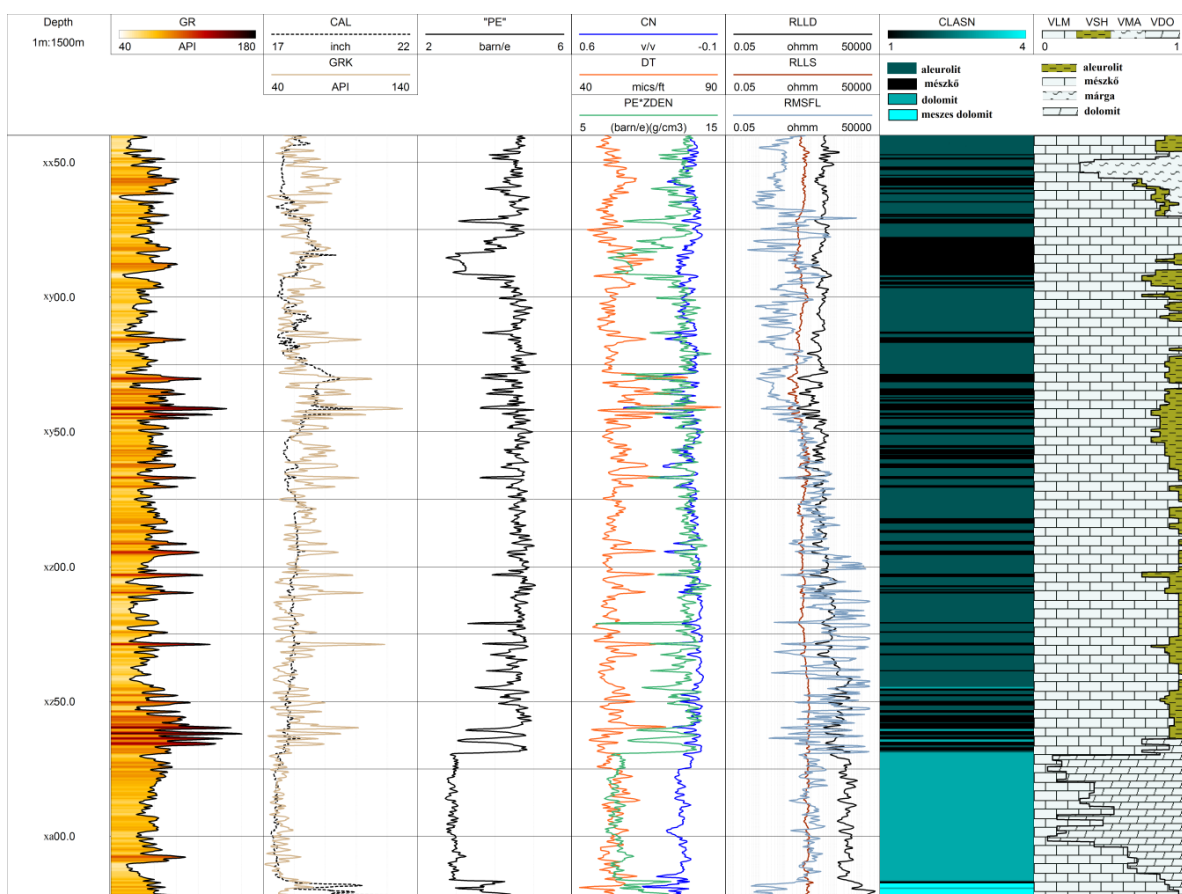
A klaszteranalízis során, ahogy azt a mellékletben feltüntetett program struktúrája is mutatja, a rendelkezésre álló tíz mérési szelvény közül hét szelvény adatait használtam fel. A hiányzó szelvények a korrigált neutron szelvény, amely litológiai meghatározásra alkalmas,

ebben az esetben viszont nagy homogenitást mutatott, nem különültek el jól az elektrofáciesek, ugyanez volt megfigyelhető az akusztikus és a mikrolaterolog szelvény esetében is. A távolság kiválasztásánál az „seuclidean” távolság bizonyult a legjobbnak, mely az Euklideszi távolság súlyozott formája. A következő lépés a klaszterek közötti hasonlóság megállapítása volt, mely esetében a Ward-módszer bizonyult a legjobban, ami a csoporton belüli eltérések négyzetösszegét (szórás) minimalizálja. Végül a klaszter csoport megállapítása következett. Kísérleteket végeztem 3., 4. és 5. klaszter csoport megválasztásával és arra a következtetésre jutottam, hogy 4. klaszter csoportot kell megválasztanom, mert a 3. klaszter nagy homogenitást mutatott, 5. klaszter esetében pedig nagyon elkülönültek egymástól a csoportok. A kőzetfuradék vizsgálatok is négy fáciest különítettek el. Ezt követően elvégeztem a klaszter analízist és az alábbi eredményt kaptam.

A 13. ábra a centroid távolságot az elemszám függvényében, az elemszámot, a klaszterek számát és a furadékminták alapján készített VMA_i (kőzetmátrix térfogat, $i=1,2,3,4$) mennyiségek felbontását a mélység függvényében szemlélteti. Az ábra első képe az úgynevezett dendrogram, mely a csoportosítás hierarchiáját és sorrendjét mutatja. Az eljárás során a kiválasztott távolság az Euklideszi (4.2 formula) és az alkalmazott módszer a Ward-módszer. Az ábráról leolvasható, hogy ezzel a csoportosítással 30 objektum és 4 csoport különíthető el. A második kép az objektumok sorszámát a mélység függvényében ábrázolja. A harmadik képen a négy klaszter számának mélység szerinti váltakozása figyelhető meg. A negyedik és egybe utolsó ábrán az úgynevezett VMA látható a mélység függvényében. A VMA a különböző kőzetek jelenlétét szemlélteti százalékos felbontásban. Az eljárás minden mélységhez rendel egy klaszter számot, melyeket a rendelkezésre álló szelvények adataival és a leolvasott kőzetek százalékos arányával együtt WellCAD segítségével grafikusán is szemléltettem (14. ábra). A 2. mellékletben a 14. ábrát nagyobb felbontásban is feltüntettem. A (3. melléklet) MOL Csoport tulajdonát képező kőzetfuradékok jellemzőit írja le részletesebben.

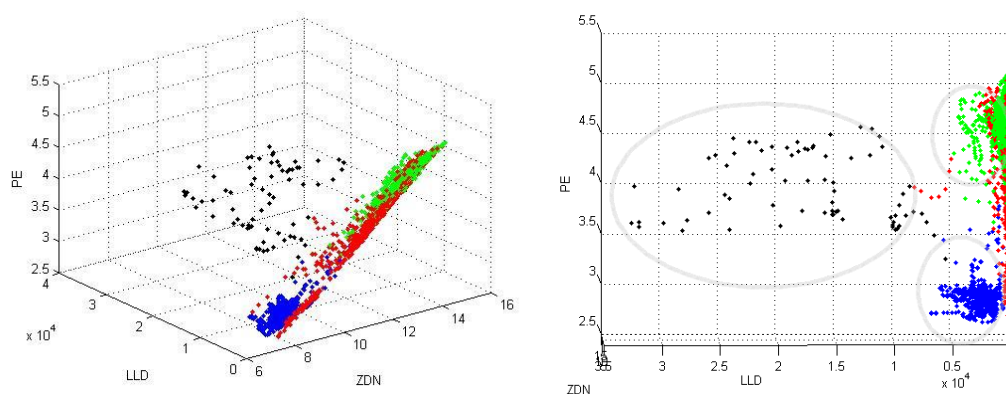


13. ábra: A klaszter analízis eredménye



14. ábra: A bemenő karotázs szelvények, a kőzetek százalékos aránya és klaszter analízis eredményének ábrázolása

A 2. mellékletben szemléltetett ábrán sötét zölddel az agyag, feketével a mészkő és a világos késsel a dolomitot ábrázoltam. Jól látható, kezdetben a mészkő és az aleurolit váltakozása. A legszembeütőbb a dolomit megjelenése a szelvényeken, ami az xx60-tól figyelhető meg. Ebben a mélységben a CAL és spektrális GR szelvény is erős csökkenéssel jellemezhető ezzel szemben a többi szelvényen jóval magasabb értékek láthatók ugyanebben a mélységben. A klaszteranalízis során jól elkülöníthetők egymástól a mészkő és aleurolit rétegek, tisztán látható a dolomit az xx60m mélységtől, sajnos a márga melynek jelenléte a kőzetfuraadékok alapján az xx45-xx70 m mélységintervallumban figyelhető meg, a klaszteranalízis során nem jelenik meg. Az ábra alján még egy csoport elkülöníthető ez pedig a meszes dolomit. A rendelkezésre álló szelvények közül az alábbi crossplot bizonyult a legjobbnak. A 16. ábrából származó LLD és PE crossplot. Az ábrán jól elkülönül egymástól a négy csoport, mely a fáciesek elkülönítésén túl felhasználható pl. az inverz modellezés során a válaszegyenlet konstansok (zónaparaméterek) megadására és az elvi szelvényadatok számítására (direkt feladat megoldása).



15. ábra: A mély behatolású látszólagos fajlagos ellenállás (LLD), fotoelektromos abszorpció index (PE), valamint térfogati elektromos elnyelési index (ZDEN) crossplot különböző látószögben

6. Következtetések

Az elektrofációs analízis széles látókört követel meg a szakemberektől. A sikeres eredmény eléréséhez elengedhetetlen, hogy az elemzés több szakterület szakemberei együttesen végezzék. Feladatom egy felső triász-jura korú karbonátos üledékes környezet független módszerrel történő értelmezése volt. A vizsgált területről egy fúrás adataival dolgoztam és végeztem el a feldolgozását klaszter analízis segítségével. A módszer előnye, hogy gyors és egy nagyobb intervallum összes szelvényét együttesen dolgozza fel. E nagyméretű statisztikai minta elegendő információt nyújt a megbízhatóbb értelmezés számára. Különböző bemenő paramétereket alkalmazva kiválasztottam azt a modellt, ami a legjobb egyezést mutatta a geológiai fáciesekkel. A kapott elektrofácieseket – a terület földtani előismereteit felhasználva – geológiai fáciesekként értelmeztem. A meghatározott fáciesek beilleszthetőnek bizonyultak a medence üledékképződési környezeti modelljébe. A statisztikai úton történő fáciesazonosítás fontos kutatási területet képez a szénhidrogén-kutatásban a tárolók megismerése és jellemzése területén.

A kiválasztott fúrás 300 méteres szakaszán elvégzett elektrofációs analízist hierarchikus klaszter analízis segítségével határoztam meg. Az eredményeket összehasonlítva a kőzetfuradékok mennyiségi eloszlásával arra a következtetésre jutottam, hogy jó egyezést mutatott az mészkő, az aleurolit és a dolomit is, viszont a márgát nem tudtam kimutatni. Ennek oka lehet, hogy a kőzet meszes márga, így a karotázs szelvények alapján végzett statisztikai analízis mészkőnek érzékelhetett. E hátrány nem a módszer gyengesége, sokkal inkább a karotázs mérések érzékenysége, behatolása és zaj mértéke befolyásolja. E hatások minimalizálhatók a szelvények simításával. A módszer alkalmazhatósága agyagos-homokkövekben és karbonátokban bebizonyosodott. Ez alapján javasolható annak kiterjesztése több fúrára a fáciesek térbeli elhelyezkedésének meghatározása céljából.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm konzulensemnek, Dr. Szabó Norbert Péternek, hogy szakmai tapasztalatait, tudását igyekezett átadni nekem és rendkívül hasznos észrevételekkel segítette dolgozatom megírását, irányította munkámat és folyamatosan biztatott. Valamint, hogy a statisztikai vizsgálatok elvégzésénél számos hasznos ötlettel, tanáccsal látott el.

Köszönöm ipari konzulensemnek, Dr. Tóth Józsefnek, a MOL Csoport IMA GGA Petrofizika Osztálya vezetőjének és Dr. Vass Péter Tamás a MOL Csoport Tároló értékelési szakértőjének, hogy befogadnak osztályukra, ahol kitűnő feltételek biztosították szakmai fejlődésemet. Köszönöm, hogy az elméleti rész feldolgozásához fontos szakirodalmakat javasoltak és rendelkezésemre bocsátották azokat. Továbbá köszönöm, hogy értékes tanácsokkal látottak el dolgozatom írása során.

Köszönöm a MOL Csoport IMA GGA Petrofizika Osztálya összes munkatársának, hogy a nyári szakmai gyakorlatom alatt barátságos légkörben volt lehetőségem a tanulásra, munkára, szakmai beszélgetésekre.

Miskolc, 2014.10.27.

Halmágyi Anett
Földtudományi mérnök mesterszak (MSc)
Geofizikusmérnök-szakirány

Irodalomjegyzék

- Balázs L. (2013): Mélyfúrási geofizika. Egyetemi jegyzet, Budapest.
- Báldi T. (1978): A történeti földtan alapjai. Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., Budapest.
- Balogh K. (1991): Szedimentológia III. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Catuneanu (2006): Principles of Sequence Stratigraphy. Elsevier, Amsterdam.
- Elek I. (1988): Az elektrofácies-analízis jelenlegi helyzete I. rész. Magyar Geofizika, 1988. 3.sz.
- Elek I. (1988): Az elektrofácies-analízis jelenlegi helyzete II. rész. Magyar Geofizika, 1988. 4. sz.
- Ellis, D. V. és Singer, J. M. (2007): Well Logging for Earth Scientists. 2nd Edition, Springer, Dordrecht.
- Ferenczy és Kiss (1993): Szénhidrogén-tárolók mélyfúrási geofizikai értelmezése I. Nemzeti Tankönyvkiadó
- Haas J (1998) Karbonátszedimentológia, Eötvös Kiadó, Budapest
- Hetényi M. és Sajgó Cs. (2004): Kőolajképződés karbonátos kőzetben: szerves geokémiai esettanulmány 109-110 évfolyam, 4. szám, In: Magyar Kémiai Folyóirat - Összefoglaló közlemények 183
- Horvai Gy. (szerk.), 2001. Sokváltozós adatelemzés (kemometria). Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
- Schlumberger (1989): Log interpretation principles/applications.
- Serra O. (1984): Fundamentals of well-log interpretation. 1. The acquisition of logging data. Elsevier Science Publishing Company Inc., New York.
- Serra O. és Serra L. (2003): Well Logging and Geology.
- Serra O. és Serra L. (2004): Well Logging: Data Acquisition and Applications
- Somfai A. (1988) Geológiai, geofizikai és mélyfúrási kézikönyv kőolajipari szakemberek számára I. kötet
- Somfai A. (1988) Geológiai, geofizikai és mélyfúrási kézikönyv kőolajipari szakemberek számára II. kötet
- Szabó N. P.: Mélyfúrási geofizika (egyetemi jegyzet)
- Szabó N. P. (2012): Bevezetés a geostatistikába. Elektronikus jegyzet. Miskolci Egyetem, 2012.

Ábrajegyzék

1. ábra: A természetes gamma sugárzás spektruma (Serra, 2004)	3
2. ábra: A fűrőlyuk átmérőjének alakulása (Ferenczy és Kiss, 1993)	4
3. ábra: Különböző energiájú neutronok érzékelése (Szabó, 2014)	6
4. ábra: Az akusztikus terjedési idő elve (Szabó, 2014)	7
5. ábra: Hagyományos rövid normál fajlagos ellenállásmérő szonda (Ellis és Singer, 2007)....	8
6. ábra: A fűrőlyuk környezetében kialakuló gyűrűs tér ellenállás- és telítettségviszonyai.....	9
(Ellis és Singer, 2007)	9
7. ábra: A tengeri karbonátos üledékképződés környezeti egységei (Haas 1998)	10
8. ábra: Mészkö (a) és homokkö (b) pókhálódigramjai (Serra és Abott, 1980).	13
9. ábra: Példa létradiagramra (Serra, 2003).	14
10. ábra: A hierarchikus klaszterezés sémája és a dendogram	18
11. ábra: Agyagos homokkövek ábrázolása WellCAD segítségével	22
12. ábra: A klaszter analízis eredménye homokos agyagok esetében	23
13. ábra: A klaszter analízis eredménye	25
14. ábra: A bemenő karotázs szelvények, a kőzetek százalékos aránya és klaszter analízis eredményének ábrázolása	25
15. ábra: A mély behatolású látszólagos fajlagos ellenállás (LLD), fotoelektromos abszorpciós index (PE), valamint térfogati elektromos elnyelési index (ZDEN) crossplot különböző látószögben	26

Mellékletek

Mellékletek jegyzéke

1.	MELLÉKLET: KLASZTER ANALÍZIS MATLAB PROGRAMJA.....	33
2.	MELLÉKLET AZ EREDMÉNYEK WELLCAD ÁBRÁJA	35
3.	MELLÉKLET A KŐZETFURADÉKOK JELLEMZŐI MÉLYSÉG SZERINT	36

1. MELLÉKLET: KLASZTER ANALÍZIS MATLAB PROGRAMJA

```

% 1      2      3      4      5      6      7      8      9      10     11
'Depth' 'CAL' 'CNFR' 'DT'  'GRKT' 'GRTO' 'LLD' 'LLS' 'MSFL' 'PE'  'ZDN'      12      13
14      15      16      17%
'CLASN' "VMA1" "VMA2" "VMA3" "VMA4" "VMA"
figure(1);
subplot(4,1,1);
Data=Data(25:length(Data)-25,:);
X = Data(:,[2,5,6,7,8,10,11]);      % szelvények kiválasztása
Y = pdist(X,'seuclidean');          % correlation, seuclidean
Z = linkage(Y,'ward');              % ward cenroid
[H,T] = dendrogram(Z,'colorthreshold','default');
set(H,'LineWidth',2);
xlabel('Elemszám');
ylabel('Centroid távolság');
title('Dendrogram');
c = cluster(Z,'maxclust',4);        % csoportszám megválasztása
grid on;
subplot(4,1,2);
plot(Data(:,1),T);
xlabel('Mélység (m)');
ylabel('Elemszám');
title('Leaf node numbers')
grid on;
subplot(4,1,3);
plot(Data(:,1),c,'.');
xlabel('Mélység (m)');
ylabel('Klaszter szám');
grid on;
subplot(4,1,4);
plot(Data(:,1),Data(:,13));
xlabel('Mélység (m)');
ylabel('VMA');
grid on;
hold on;
plot(Data(:,1),Data(:,13)+Data(:,14),'r');
hold on;
plot(Data(:,1),Data(:,13)+Data(:,14)+Data(:,15),'k');
figure(4);
title('Well-1');
D1=[];
D2=[];
D3=[];
D4=[];
c0=10;
a0=2;
b0=9;
for i=1:length(Data)
    if c(i)==1
        D1=[D1;Data(i,a0),Data(i,b0),Data(i,c0)];
    elseif c(i)==2
        D2=[D2;Data(i,a0),Data(i,b0),Data(i,c0)];
    elseif c(i)==3
        D3=[D3;Data(i,a0),Data(i,b0),Data(i,c0)];
    else
        D4=[D4;Data(i,a0),Data(i,b0),Data(i,c0)];
    end
end
end

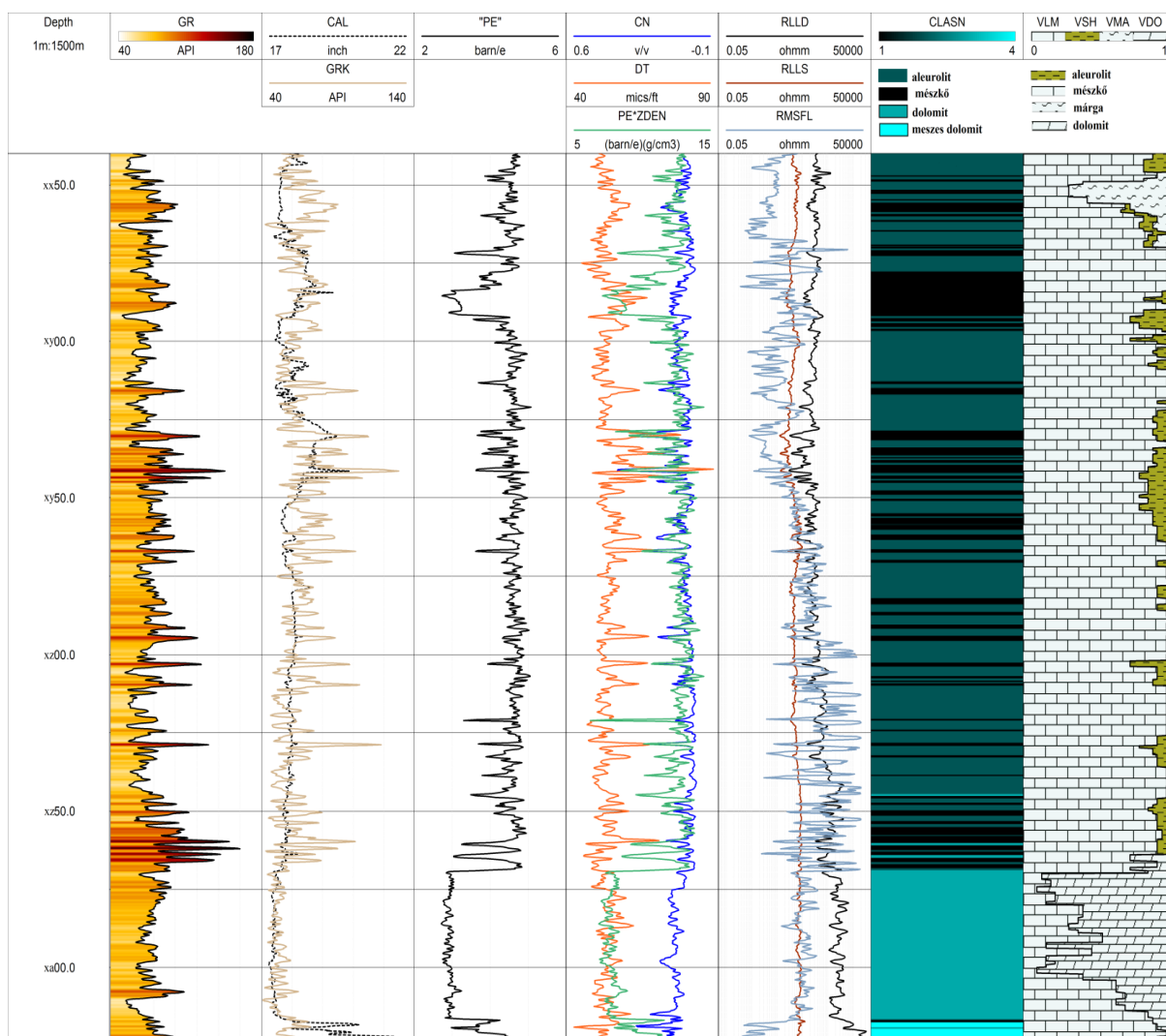
```

```

plot3(D1(:,1),D1(:,2),D1(:,3),'r. ');    % 1. csoport:
hold on;
plot3(D2(:,1),D2(:,2),D2(:,3),'g. ');    % 2. csoport:
hold on;
plot3(D3(:,1),D3(:,2),D3(:,3),'b. ');    % 3. csoport:
hold on;
plot3(D4(:,1),D4(:,2),D4(:,3),'black. '); % 4. csoport:
grid on;
xlabel('CAL');
ylabel('MSFL');
zlabel('PE');

```

2. MELLÉKLET AZ EREDMÉNYEK WELLCAD ÁBRÁJA



3. MELLÉKLET A KÖZETFURADÉKOK JELLEMZŐI MÉLYSÉG SZERINT

<i>Mélység [m]</i>	<i>Geológia</i>	<i>Jellemzői</i>
xx31-xx32	Mészkő agyagkő rétegekkel	<u>Mészkő</u> : kockás-lemezes, nem látható porozitás <u>Agyagkő</u> : lemezes, ritka elterjedése pirit
xx32-xx33	Aleurolit	<u>Aleurolit</u> : lemezes, vékony rétegelt papírszerű szerkezet, gyakori a szerves anyagból álló párhuzamos lemezek, nagyon meszes <u>Mészkő (üreges)</u> : kockás-lemezes, nem látható porozitás <u>Agyagkő (üreges)</u> : lemezes, ritka elterjedése pirit
xx33-xx37	Mészkő	<u>Mészkő</u> : iszapos, kissé agyagos, gazdag kalcit kövületekben (Foraminifera), helyenként pirit figyelhető meg, nincs látható porozitás, nem mutat CH-t
xx37-xx45	Mészkő vékony aleurolit rétegekkel	<u>Mészkő</u> : lemezes-gyengén kockás, helyenként iszapos és agyagos, pirit elterjedés, kalcit-fossziliákkal, nem látható porozitás <u>Aleurolit</u> : kockás-gyengén tömör, néha lemezes, finomszemcsés, meszes, pirit elterjedés
xx45-xx53	Mészkő mészmárga rétegekkel	<u>Mészkő</u> : gyengén kockás-lemezes, helyenként iszapos és agyagos, pirit elterjedés, kalcit-fossziliákkal, nem látható porozitás <u>Mészmárga</u> : vékony lemezes papírszerű szerkezet, néha erősen meszes.
xx53-xx69	Mészkő mészmárgával és aleurolit rétegekkel	<u>Mészkő</u> : gyengén kockás-lemezes, helyenként iszapos és agyagos, pirit elterjedés, helyenként kalcit-fossziliák, nem látható porozitás <u>Mészmárga</u> : vékony lemezes papírszerű szerkezet, néha erősen meszes. <u>Aleurolit</u> : kockás-gyengén kockás, néha lemezes, nagyon finom szemcsés, meszes, kissé agyagos, pirit elterjedés

xx69-xx83	Mészke	<u>Mészke</u> : gyengén kockás-lemezes, helyenként iszapos és agyagos, pirit elterjedés, nem látható porozitás - helyenként lágy, mikrites, meszes szerkezetű, lemezes-gyengén kockás, vékony mikrotörések, helyenként nehéz, ragacsos olaj foltok
xx83-xy09	Mészke aleurolit rétegekkel	<u>Mészke</u> : gyengén kockás-lemezes, helyenként iszapos és agyagos, pirit elterjedés, nem látható porozitás - helyenként lágy, mikrites, meszes szerkezetű, lemezes-gyengén kockás, vékony mikrotörések, helyenként nehéz, ragadós olajfoltok <u>Aleurolit</u> : kockás-gyengén kockás, néha lemezes, nagyon finom szemcsés, meszes, kissé agyagos, pirit elterjedés.
xy09-xy15	Mészke	<u>Mészke</u> gyengén kockás-lemezes, helyenként iszapos és agyagos, nem látható porozitás - helyenként lágy, mikrites, meszes szerkezetű, lemezes-gyengén kockás, vékony mikrotörések, nem látható porozitás
xy15-xz69	Mészke aleurolit rétegekkel	<u>Mészke</u> : gyengén kockás-lemezes, helyenként iszapos és agyagos, pirit elterjedés, nem látható porozitás - helyenként lágy, mikrites, meszes szerkezetű, lemezes-gyengén kockás, nem látható porozitás <u>Aleurolit</u> : kockás-gyengén kockás, néha lemezes, nagyon finom szemcsés, meszes, kissé agyagos, pirit elterjedés
xz69-xz76	Mészke és dolomitos mészkő váltakozás kevés aleurolit csíkkal	<u>Mészke</u> : helyenként mikrites, fekete pettyes, nem látható porozitás <u>Dolomitos mészkő</u> : gyenge látható porozitás <u>Aleurolit</u> : amorf-kockás

xz76-xa17	Dolomitos mészkő vékony mészkővel és meszes dolomit rétegekkel	<u>Dolomitos mészkő:</u> gyengén kockás, gyenge látható porozitás <u>Mészkő:</u> helyenként mikrites, fekete pettyes, nem látható porozitás <u>Meszes dolomit:</u> bőséges dolomit kristályok, szabályos kristályközi porozitás, szilárd bitumen töredékek.
xa17-xa30	Meszes dolomit mészkő rétegekkel	<u>Meszes Dolomit:</u> bőséges dolomit kristályok, szabályos kristályközi porozitás, szilárd bitumen töredékek. <u>Mészkő:</u> amorf, dolomit, nem látható porozitás