

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA



DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**KIS ÁTERESZTŐKÉPESSÉGŰ TÁROLÓK TULAJDONSÁGAINAK
VIZSGÁLATA**

Írta:

REMECZKI FERENC

Tudományos vezető:

DR. JOBBIK ANITA

tudományos főmunkatárs

PhD. földtudományok

Miskolci Egyetem

Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet

Miskolc

2022.

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az elmúlt két évtizedben, különösen az utóbbi tíz év tekintetében, jelentős figyelmet kaptak a nem hagyományos szénhidrogén rezervoárok kiaknázásának lehetőségeit kutató projektek, ipari beruházások. Számos neves hazai- és nemzetközi egyetem, valamint kutatóintézet foglalkozik a fenntartható fejlődés, energiaellátásbiztonság részeként olyan módszerek, működési mechanizmusok feltérképezésével, amelyek képesek leírni az egyedi rendszerek kőzetfizikai- és mechanikai jellemzőit.

A palagázkészletek jelentik a világ egyik legbősegebb földgázforrását, nagyrészt kihasználatlanok, a legtöbb kontinensen megtalálhatók. Az erőforrások kiaknázását célzó fejlesztések Észak-Amerikában kezdődtek, túlnyomórészt az Egyesült Államokban, ami a gáz- és olajtermelés fellendüléséhez vezetett. Annak ellenére, hogy jelentős fejlődést sikerült elérni a tárolók tekintetében termelési szempontból, viselkedésük és jellemzőik még mindig kevésbé ismertek. A hidraulikus repesztési műveletek alkalmazhatósága, az áramlási mechanizmus leírása a kőzetmátrixban és a repedésekben, valamint a rövid – hosszú távú termeltethetőség még mindig nyitott kérdések.

Az átteresztőképesség az egyik legfontosabb termeltetést szabályozó paraméter. A kőzet e tulajdonsága a fluidum vezetőképesség mértéke. A paramétert laboratóriumi vizsgálatokkal, szelvényekkel, korrelációkkal határozzák meg konvencionális tárolók esetében. A kiemelkedően kis permeabilitású kőzetekben azonban az átteresztőképesség mérése rendkívül nagy kihívást jelent és nem követi a hagyományos kőzeteknél már megszokott fizikai törvényeket. *Klinkenberg (1941)* módosított Darcy egyenlete alapján gázos átteresztőképesség mérések sorozatából becsülhető a porózus közeg úgynevezett abszolút permeabilitása. Azonban a permeabilitás nyomástól való függése a tömött rendszerek esetében sokkal összetettebb, így a Klinkenberg-féle korreláció – ahogyan az az előbbieken említésre került – téves eredmények ad (*Ziarani és Aguilera, 2012; Moghadam és Chalaturnyk, 2015*).

A „shale”-ek permeabilitásával kapcsolatban számos jelentős kutatást látott napvilágot mind eleméleti mind analitikai szempontból (*Moghadam és Chalaturnyk, 2014; Sakhaee-Pour és Bryant, 2012; Javadpour és szerzőtársai, 2007; Ziarani és Aguilera, 2012; Roy és szerzőtársai., 2003*). *Moghadam és Chalaturnyk (2014)* a null sebességgradiens megváltoztatását javasolta az eredeti Klinkenberg-egyenlet mintegy kibővítéséként, amennyiben az áramlás a „slip” tartományba esik. A javasolt egyenlet várhatóan képes megbecsülni a gázos átteresztőképességet a „slip” és korai tranziens áramlási rendszerekben palák esetén. *Ziarani és Aguilera (2012)* egy másodrendű Knudsen-korrelációt vizsgáltak a

gázos áteresztőképesség kiszámításának céljából és arra a következtetésre jutottak, hogy a Klinkenberg-féle korreláció alul becsüli a csúszóáramlás miatti permeabilitás-növekedést. *Rahmanian és szerzőtársai (2013)* azt feltételezték, hogy a palákban történő áramlás viszkózus és szabad molekuláris áramlási komponensből áll. *Singh és szerzőtársai (2014)* szintén javasoltak egy egyenletet, melynek célja a látszólagos áteresztőképesség meghatározása a Darcy és Knudsen áramlás alapján. Ezek, a látszólagos permeabilitás meghatározását célzó egyenletek, számtalan olyan (jellemzően empirikus) paraméteren alapulnak, amelyek meghatározásához szükséges a laboratóriumi mérések elvégzése. Alkalmazásuk ezért nehézségekbe ütközik, ugyanis előfordul, hogy egyes paramétereket nem lehet közvetlenül laboratóriumban mérni. Ezenkívül a látszólagos permeabilitás Knudsen-számhoz való viszonyításához pórustorok átmérő értékekre is szükség van, amelyek sokszor nem állnak rendelkezésre, valamint a vizsgálati körülmények, például az átlagos effektív feszültség függvényében változnak. A módszerek között semmilyen konzisztencia nem fedezhető fel és előfordul, hogy nagyságrendi különbségek adódnak a mért permeabilitás értékek között. (*Gasparik M. és szerzőtársai, 2015; Rushing és szerzőtársai, 2004; Sinha szerzőtársai, 2012; Clarkson és szerzőtársai, 2012*).

A fent említettekben kiderül, hogy a terület rendkívül komplex problémákat vett fel, jelentősége – tudományos szempontból – semmiképpen sem kérdőjelezhető meg. Az általam megtervezett tudományos program a kis áteresztőképességű, illetve rossz kihozatali tényezővel rendelkező hazai márga és tömött homokkő előfordulások, szénhidrogén rezervoárok vizsgálatának majd vizsgálati eredményeinek felhasználásával az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézetben rendelkezésre álló mérési technológia matematikai modell alapú bővítését, pontosítását, valamint a permeabilitás mérésre alkalmatlan kőzetek eredményeinek pótlását tűzte ki célul. Az eredmény nagyban hozzájárul a Kutatóintézet és más laboratóriumi tevékenységet folytató szervezetek munkájának megkönnyítéséhez a nem-konvencionális kutatási területeken.

A releváns szakirodalom, illetve ipari dokumentációk és termelési adatok áttekintése a hazai ipari tapasztalatok figyelembevételével egyedi vizsgálati program elvégzését tette szükségessé. Az új hipotézisek és a fejleszteni kívánt modellek gyakorlati adaptációjakor különösen nagy figyelmet kell fordítani azok validációjára a már létező, rendelkezésre álló eszközök segítségével. A fenti módszerek előnyös tulajdonságait kihasználva végeztem el a vizsgálatokat, a következő fejezetben szereplő mérések értelmezését, a módszerfejlesztéseket és jutottam általuk új tudományos eredményekhez.

II. ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK ÉS ÉRTELMEZÉSEK

Az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet eszközparkja több olyan műszerrel rendelkezik, amely alkalmas a kőzetek petrofizikai paramétereinek meghatározására. A Kutatóintézet műszerezettsége képes mind az alapvető, mind a speciális (pl. relatív permeabilitás) paraméterek mérésére széles intervallumban. Fontos megjegyezni, hogy jelen dolgozatban bemutatott kutatásom számos esetben komoly kihívást jelentett. Porozitás mérésekhez a Quantachrome Ultrapyc-1200e héliumos poroziméter valamint a Pascal 140 és 440 higany besajtolásos műszerek (HPMI - High Pressure Mercury Injection) kerültek alkalmazásra. A héliumos porozitás mérés esetén indirekt módon számítható a porozitás érték a mért szilárd térfogat és/vagy sűrűség értékből, amelyhez szükség van a minták előzetes tömegmérésére. A HPMI műszer programjába integrált egyenletek alapvetően a mért térfogatértékekből származtatják az eredményeket, ez esetben nincs szükség külön számítások elvégzésére, az eszköz kész eredményeket ad. A higany besajtolásos mérés segítségével számos más paraméter is meghatározásra került, mint a fajlagos felület, a látszólagos sűrűség, a kummulatív térfogat, valamint a pórustorok sugarak mérete és eloszlása, melyek jelentős részét képezték az elemzések elvégzésének.

Az áteresztőképesség széleskörű és pontos meghatározásához a Kutatóintézet saját fejlesztésű, az API RP 40 (*American Petroleum Institute, 1998*) szabványnak megfelelő úgynevezett N₂ gázos permeaméter, egy szintén az említett szabvány alapján összeállított nyomáslecsengéses elven működő műszer (PPD – Pressure Pulse Decay), valamint a Core LaboratoriesTM által fejlesztett és forgalmazott Ultra-Perm 610TM és Nano-PermTM gázos permeaméterek kerültek alkalmazásra a mérési programban.

Kutatásaim elsősorban a tömött homokkő és márga kőzetekre fókuszáltak. A mintacsoportok kiválasztása és a mérési program összeállítása alapvetően a kutatás helyszínén rendelkezésre álló kőzetmintákra épült, valamint azok hozzáférhetőségén alapult.

A mérési program kezdetén meghatározásra került 194 darab nem-hagyományos kőzetminta héliummal mért porozitása, illetve 176 minta vonatkozásában a hagyományos N₂ permeaméteren nitrogénnel mért úgynevezett bemérési áteresztőképesség értékek. Várakozásaimnak megfelelően, melyet az előzetes mérések is alátámasztottak, a rendelkezésre álló hagyományos eszközök a porozitás meghatározására alkalmasak voltak, a permeabilitás tudományos kutatást megalapozó pontosságú meghatározására azonban a kutatási program kezdetén meglévő eszközpark csak igen korlátozottan volt igénybe vehető.

A mérési program összeállítása során törekedtem arra, hogy lehetőség szerint maximalizáljam az információszerzést, illetve azzal párhuzamosan optimalizáljam a sérüléssel/roncsolással járó mérések okozta mintamegsemmisülések számát. A tömött homokkövek 62 darabos mintacsoportjából 47 minta vonatkozásában volt lehetőség PPD mérést is elvégezni.

A HPMI mérési eredmények feldolgozásaiból számos igen szemléletes és gyorsan áttekinthető értelmezést készítettem. Minden HPMI méréssel vizsgált mintának elkészítettem a pórustorok méret eloszlásgörbéjét, a higany besajtolás százalékos arányának függvényében ábrázolt pórustorok sugár eloszlás görbéket és a kapilláris nyomásgörbéket. Félgrafikus úton meghatározásra kerültek a küszöbnyomás értékek.

Az alapadatok előállítását követően vizsgáltam azok összefüggéseit annak érdekében, hogy általánosítható megállapításokat lehessen megfogalmazni a vizsgált formációk (Szolnoki és Endrődi) petrofizikai tulajdonságaira vonatkozóan. Ismert, hogy a porozitás és permeabilitás összefüggése hosszú ideje és folyamatosan kutatott területe a petrofizikának. Kiindulva abból, hogy az áteresztőképesség nagyságrendi értékét, tömött homokkövek esetén, a nagyobb pórusok jelenléte és eloszlása befolyásolja a leginkább, vizsgáltam a pórustéreloszlásokat. Arra a következtetésre jutottam, hogy nem a porozitás abszolút értékével, hanem annak valamely jellemző hányadával érdemes a permeabilitás kapcsolatát keresni. A korrelációk keresése során nagyon erős kapcsolatot tártam fel a 0,2 mikrométernél nagyobb sugarú pórusok alkotta térfogat és a permeabilitás között.

Javadpour és szerzőtársai (2007, 2009) elméleti megközelítését adaptálva létrehoztam a szintetikus modell mintatest fogalmát, amellyel az volt a célom, hogy a mért adatok értelmezésében megjelenő diszkrepanciákat magyarázni, illetve eliminálni továbbá a hiányzó méréseket pótolni lehessen. Szimulációs eredményeim alapján elmondható, hogy a kapilláriskötegekből épített szintetikus mintákkal végzett szimulációk a pórustorok sugár eloszlás korrekciója nélkül is nagyon jó egyezést mutatnak a mérési eredményekkel.

Yu-Liang Su és szerzőtársai (2020) vízfilmgyűrű elméletének adaptálásával kidolgoztam a kapilláris csököteg „letisztított” és méréssel validált szintetikus modellmintatestjének alkalmazhatóságát leíró modellt a tapadóvíztelítettség meghatározására. A gyakorlatban könnyen alkalmazható erős kapcsolatokat írtam le az általam bevezetett úgynevezett redukált porozitás, illetve a Szolnoki tömött homokkövek vonatkozásában a küszöbnyomás és a 0,2 mikrométeres kritikus sugárhoz tartozó tapadóvíz telítettségek között.

Mérési adatokkal alátámasztottam, hogy a kapilláris csőköteg modell nagyon jól leírja a szabványos „plug” méretű minta mérés közbeni viselkedését. Összefüggést írtam fel a minta látszólagos és Darcy permeabilitásának meghatározására valamit elmondható, hogy a modellezés körültekintő alkalmazásával a repedéssel rendelkező és így nagyon eltérő mért eredményeket szolgáltatató sztenderd, plug méretű minták permeabilitása meghatározható.

A márga és mészmárga típusú kőzetek esetén is előállítottam a HPMI mérésből származó pórustorok sugár eloszlásgörbékből a szintetikus mintatesteket. Elvégezve a szimulációkat egy különös jelenséget figyeltem meg. Ellentétben a homokkövek szimulációs kísérleteivel, ahol adott esetben minimális korrekciókat kellett alkalmazni, a márga minták mért és illesztés nélkül számított tömegáramai rendkívül nagy mértékben tértek el egymástól. A mérési eredmények és a szimulációk értelmezése további bizonyítékkal szolgáltak és megerősítették azt a feltételezésemet, miszerint mind kis méretű, mind a plug méretű márga minták jelentős felületi és akár az egész mintára kiterjedő (mikrorepedés) sérüléseket szenvednek/szenvedek részben a tárolás részben a mintakialakítás során.

Tekintettel arra, hogy a Nano-PermTM eszközzel mért térfogatáram és permeabilitás értékek a validált modellben az illesztés során csak erős korrekcióval állíthatók elő, arra a következtetésre jutottam, hogy ez a bizonyos mért permeabilitás egy eredő átteresztőképesség, amely a sértetlen belső „mag” és a felületi sérülések által jóval kedvezőbb permeabilitású „kéreg” eredő permeabilitásának az eredménye.

III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. tézis

Nem-hagyományos kőzetminták átteresztőképességének meghatározása nagy nyomású higany besajtolásos (HPMI) mérés eredményeinek felhasználásával

Az általam javasolt összefüggések alkalmazásával a Szolnoki Formáció tömött homokköveinek abszolút permeabilitása, HPMI mérési adatok birtokában, gyakorlati szempontoknak megfelelő pontossággal meghatározható (Szabó N.P. és szerzőtársai, 2021).

A Szolnoki Homokkő Formációból származó jellemzően kedvezőtlen petrofizikai tulajdonságú kőzetminták poroperm kapcsolatainak vizsgálata során arra a következtetésre jutottam, hogy a nem-hagyományos homokkövek vonatkozásában nem tárható fel a porozitás abszolút értéke és az abszolút permeabilitás között megfelelően megalapozott függvénykapcsolat.

Mérési eredményekkel alátámasztott kapcsolatot mutattam ki a legjellemzőbb pórutorok sugár (MFPR) és az abszolút permeabilitás korrelációjára, melyet az alábbi összefüggés ír le:

$$k_{abs} = 25,746 MFPR + 0,4959 \quad R^2 = 0,7313$$

Erős kapcsolatot tártam fel a HPMI mérésből számítható 15%-os higanytelítettséghez tartozó pórutorok sugár (r_{15}) és az abszolút permeabilitás tízes alapú logaritmusá között, melyet a következő összefüggés ír le:

$$\log k_{abs} = 2,8361 r_{15} - 0,206 \quad R^2 = 0,848$$

Nagyon erős kapcsolatot tártam fel a 0,2 mikrométernél nagyobb sugarú pórusok alkotta pórustérfogot (redukált porozitás: $\phi_{R0,2}$) és az abszolút permeabilitás között, melyet a következő összefüggés ír le:

$$k_{abs} = 1,3571 e^{0,3345 \phi_{R0,2}} \quad R^2 = 0,8959$$

2. tézis

Szintetikus modell mintatest kialakítása petrofizikai tulajdonságokból porózus közegben kialakuló gázáramlás vizsgálatára

Kőzetmintákon elvégzett térfogatárammérésekkel igazoltam, hogy az általam javasolt kapillárisokból épített szintetikus minta szimulációk eredményei nagyon jó egyezést mutatnak a mért térfogatáramokkal (Remeczki F. 2020b).

A nem-hagyományos szénhidrogén rezervoárokból származó kőzetminták, kis méretű (small size) mintatestjein végzett rutin (RCA – Routine Core Analysis) mérésekből származó információk alapján, a kinetikus gázelmélet alkalmazásával, továbbá az általam javasolt érvényességi feltételek mellett létrehozható petrofizikai tulajdonságokból álló, szintetikus sztenderd (plug size) mintatest alkalmas a kőzetben kialakuló anyagtranszport (gáz) folyamatok vizsgálatára.

A szintetikus mintatest egy kapilláris csőkegéből álló modell, amelyben a HPMI mérés pórutorok méret eloszlás görbéje adja meg a kapillárisok átmérőjét és méreteloszlását, illetve az adott kapilláris átmérőhöz tartozó kötegben lévő kapilláris csövecskék számát.

<p>A modellezés bemenő adatai</p>	<p>Minta adatai: HPMI porozitás, HPMI pórutorok sugár eloszlás és relatív térfogaszázalék. Méréshez használt gáz: molekula átmérő, moláris tömeg, a gáz dinamikai viszkozitása és sűrűsége mérési körülményeken. A hasonlósági kritériumoknak megfelelő sztenderd méretű minta effektív permeabilitás mérésből az átlagnyomás, a nyomáskülönbség és az adott nyomáskülönbséghez tartozó térfogatáram, a minta hossza és átmérője.</p>
-----------------------------------	---

A modellezés végeredményei	Kapilláriskötegenként: Knudsen-szám által definiált áramlási rendszer típusa és a térfogatáram
----------------------------	--

3. tézis

Tapadóvíz telítettség meghatározása szintetikus mintatest alkalmazásával

Megállapítottam, hogy a modellel vizsgálható a tapadóvíztelítettség érzékenysége a kritikus pórustorok sugár értékére, továbbá a tapadóvíztelítettség nyomás- és hőmérsékletfüggése. Ehhez megalkottam a modellminta tapadóvíz telítettségének meghatározására alkalmas összefüggést (Remeczki F., 2020d; Remeczki F., 2021a).

A szintetikus minta modellt alkalmazva, az egyenértékű kapillárisok átmérő szerinti növekvő sorozatának vonatkozásában egy kitüntetett pórustorok-sugarat (kritikus pórustorok sugár: r_c) olyan maximum értéknek véve, amely sugár alatti kapillárisok teljesen víztelítettek; továbbá a kritikus sugárnál nagyobb kapillárisok vonatkozásában a tapadóvíz jelenlétét az azok falán kialakuló vízfilm-gyűrűkkel (δ) figyelembe véve, a modellminta tapadóvíz telítettsége (S_{wi}) az alábbi összefüggéssel számítható:

$$S_{wi} = 1 - \frac{\sum_{j=c}^n (r_j - \delta_{j-c+1})^2 \pi L N_{Cj}}{\sum_{j=1}^n r_j^2 \pi L N_{Cj}}$$

4. tézis

HPMI adatokra épülő petrofizikai jellemző becslése

A redukált porozitás ($\phi_{R0,2}$) vagy a kapilláris nyomásgörbéből félgrafikus úton meghatározott küszöbnyomás (p_{th}) ismeretében a tömött homokkövek tapadóvíz telítettsége gyakorlati szempontoknak megfelelő pontossággal számítható az általam megalkotott képletek segítségével.

A hagyományos módszerek (RCA) és az új szintetikus modell hibrid alkalmazásával közelítő függvényt vezettem be az általam definiált redukált porozitás értékek ($\phi_{R0,2}$) és a 0,2 mikrométeres kritikus sugárhoz tartozó tapadóvíz telítettségek ($S_{wi0,2}$) között, melyet az alábbi összefüggés ír le:

$$S_{wi0,2} = -5,7908 \phi_{R0,2} + 94,453 \quad R^2 = 0,9493$$

Az összefüggés alkalmazásával mind a Szolnoki Homokkő, mind az Abonyi Formációba tartozó aleurolit minták tapadóvíz telítettsége gyakorlati szempontoknak megfelelő pontossággal meghatározható, melyhez elegendő a kis méretű mintatesteken elvégzett HPMI mérés adatainak rendelkezésre állása.

Függvényt vezettem be a Szolnoki tömött homokkövek küszöbnyomásainak (p_{th}) és a 0,2 mikrométeres kritikus sugárhoz tartozó tapadóvíz telítettségek ($S_{wi0,2}$) között, melyet az alábbi összefüggés ír le:

$$S_{wi0,2} = 0,0071 p_{th}^2 + 0,8809 p_{th} + 50,806 \quad R^2 = 0,9076$$

5. tézis

Szintetikus mintatest áteresztőképességének meghatározása

Az általam javasolt új szintetikus minta modell eljárással az eltérő sugarú kapilláris csövekben meghatározható mind a látszólagos (k_{app}), mind a Darcy féle (k_D) permeabilitás. A szintetikus modell kapilláris kötegeire alkalmazva a számítási módszert meghatározhatók az általam súlyozott permeabilitásnak nevezett értékek a szintetikus minta minden pórustorok sugarához. Mérési eredményekkel történő igazolással bizonyítottam, hogy a kapilláris csövenként meghatározott permeabilitások párhuzamos kapcsolásával a minta látszólagos és Darcy permeabilitásának meghatározására érvényesek a következő összefüggések: (Remeczki F és szerzőtársai, 2020; Remeczki F. és Horváth G., 2021)

$$k_{appminta} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_{appj} r_j^2 N c_j \pi)}{\sum_{j=1}^n r_j^2 N c_j \pi}$$
$$k_{Dminta} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_{Dj} r_j^2 N c_j \pi)}{\sum_{j=1}^n r_j^2 N c_j \pi}$$

6. tézis

Márga kőzetek áteresztőképességének újszerű megközelítése – Kéreg-modell

Márga kőzetek áteresztőképességének újszerű megközelítésére megalkottam a Kéreg-modellt. Az így létrehozott szintetikus minta modell alkalmas a jelenség vizsgálatára, a sérült „kéreg” egyenértékű kapilláris köteggel történő jellemzéséhez szükséges illesztés elvégzésére valamint a sértetlen „mag”-ban kialakuló gázáramlás jellemzőinek (áramlás típusa, térfogatáram és permeabilitás) meghatározására (Remeczki F., 2020a, 2020c, 2021b).

Megállapítottam, hogy a márga minták esetén a sztenderd plug méretű minták mérési eredményei és a HPMI mérésből származó pórustorok sugár eloszlásból készített szintetikus mintán elvégzett szimulációk eredményei, az azonos mérési körülmények ellenére mind térfogatáramokban, mind permeabilitás értékekben nagyságrendi eltéréseket mutatnak.

Megállapítottam, hogy az Endródi Márga minták esetén a HPMI mérésből származó pórustorok sugár eloszlás nem reprezentatív a nagyobb, sztenderd méretű mintára nézve, továbbá, hogy a mért áteresztőképességek nem az adott pórustorok sugár eloszlású pórusteret jellemzik.

Arra a következtetésre jutottam, hogy az Endródi Márga típusú kőzeteknél a szintetikus modellmintán végzett szimulációk során szükséges a modell mintatest úgynevezett sérült zónájának eltávolítása és egy bizonyos egyenértékű kapilláris bevezetése, ily módon előállítható az eredeti mintatest mérési körülményeken tapasztalt viselkedése.

Az Endródi Márga típusú kőzetek permeabilitásának vonatkozásában javaslatot tettem egy új elméleti megközelítésre, amely szerint a sztenderd méretű valós kőzetmintán mért permeabilitást nem tekinthető reprezentatív értéknek a minta teljes térfogatára és ily módon a vizsgált kőzettípusra sem. A sztenderd méretű mintatest mért permeabilitására a sértetlen belső „mag” és a felületi sérülések miatt megváltozott áteresztőképességű „köpeny” permeabilitásának eredőjeként kell tekinteni. A szintetikus minta modell alkalmas a jelenség vizsgálatára, a sérült „kéreg” egyenértékű kapilláris köteggel történő jellemzéséhez szükséges illesztés elvégzésére valamint a sértetlen „mag”-ban kialakuló gázáramlás jellemzőinek (áramlás típusa, térfogatáram és permeabilitás) meghatározására.

V. AZ EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTÁSA

A formációs-specifikus poroperm összefüggések alkalmazásával a kőzet permeabilitásának mérés nélküli, gyorsabb és költséghatékonyabb becsléshez jutunk. A szintetikus modellminta alkalmazásával mérés nélkül, könnyen és megbízhatóan számítható a kőzet tapadóvíz telítettsége, különböző p , T , Δp és r_c mellett.

Az értekezésben bemutatott szintetikus modell mintatesttel végzett számítási példák és eredmények alapján megállapítható, hogy az új minta modell bevezetése a laboratóriumi gyakorlatba hatékonyan elősegíti a mérési eredmények értelmezését és jól alkalmazhatók a nem-hagyományos rezervoárokból származó kőzetminták viselkedésének mélyebb megértésére. Lehetőséget biztosít továbbá arra is, hogy ezzel az újabb vizsgálattal olyan kőzetminták esetén is meghatározható legyen a permeabilitás (az alkalmazhatósági feltételeknek megfelelően), amelyek sérültek vagy olyan kis méretűek, hogy azokból szabványos permeaméterben mérhető mintatest nem alakítható ki.

A hagyományos laboratóriumi gyakorlat és az új tézisek kombinálásával növelhető a mért petrofizikai tulajdonságok megbízhatósága és jelentősen csökkenthető a sérülések vagy mintakialakítás következtében kialakuló károsodások petrofizikai tulajdonságokra gyakorolt hatása. A Kéreg-modell elmélet, amely egy teljes mértékben újszerű megközelítés, számos esetben magyarázatul szolgálhat a hazai nem-hagyományos tárolók termeltethetőségi- és termelés-intenzifikációs kérdéseire és problémáira.

VI. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Elsőként témavezetőmnek, Dr. Jobbik Anitának szeretném megköszönni az áldozatos, hosszú és kitartó segítséget, a precíz szakmai irányítást, mentorálást. Az újszerű szemlélet, amelyet a kutatásaim során tanulhattam meg az ő fáradhatatlan jellemének köszönhetően, végig kíséri majd a szakmai és tudományos pályafutásomat.

Köszönettel tartozom továbbá Dr. Szabó Norbert Péter professzor úrnak a tanácsaiért és útmutatásáért, amely nagyban hozzájárul e kutatómunka létrejöttéhez.

Köszönet illeti az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet munkatársait, Igazgató urat, kutatótársaimat, kollégáimat segítségükért és szakmai tanácsaikért.

Egyúttal köszönetet mondok, hogy a Széchenyi 2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával megvalósuló az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projekt megvalósításában részt vehettem, a projekt támogatása jelentősen segítette kutatásaimat.

Végül köszönöm családomnak, akik végig támogattak és erőt adtak a tanulmányaim és kutatásaim során.

VII. A TÉZISFÜZETBEN SZEREPLŐ HIVATKOZÁSOK LISTÁJA

Clarkson C.R., Jensen J.L., Pedersen P.K. and Freeman M. (2012): Innovative Methods for Flow Unit and Pore Structure Analysis in a Tight Siltstone and Shale Gas Reservoir. *AAPG Bulletin* 96 (2), 355–374.

Ghanizadeh A., Amann-Hildenbrand A., Gasparik M., Gensterblum Y., Krooss B.M. and Littke R. (2013): Experimental study of fluid transport processes in the matrix system of the European organic-rich shales: II. Posidonia Shale (Lower Toarcian, northern Germany). *International Journal of Coal Geology* 123, 20–33.

Javadpour F. (2009): Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone). *Journal of Canadian Petroleum Technology* 48 (8), 16-21.

Javadpour F., Fisher D. and Unsworth M. (2007): Nanoscale Gas Flow in Shale Gas Sediments. *Journal of Canadian Petroleum Technology* 46 (10), 55-61.

Javadpour F., Fisher D. and Unsworth M. (2007): Nanoscale Gas Flow in Shale Gas Sediments. *Journal of Canadian Petroleum Technology* 46 (10), 55-61.

- Klinkenberg L.J (1941): The permeability of porous media to liquids and gases. *API Drilling and Production Practice*, 200–213.
- Moghadam A.A. and Chalaturnyk R. (2014): Expansion of the Klinkenberg's slippage equation to low permeability porous media. *International Journal of Coal Geology* 123, 2–9.
- Moghadam A.A. and Chalaturnyk R. (2015): Analytical and Experimental Investigations of Gas Flow Regimes in Shales Considering the Influence of Mean Effective Stress. *SPE Journal* 21 (2), 557-572.
- Rahmanian M., Aguilera R. and Kantzas A. (2013): A New Unified Diffusion-Viscous-Flow Model Based on Pore-Level Studies of Tight Gas Formations. *SPE Journal* 18 (1), 38–49.
- Roy S., Raju R., Chuang H.F., Cruden B.A. and Meyyappan M. (2003): Modeling gas flow through microchannels and nanopores. *Journal of Applied Physics* 93, 4870–4879.
- Sakhaee-Pour A. and Bryant S. (2012): Gas Permeability of Shale. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 15 (4), 401–409.
- Singh H., Javadpour F., Etehadtavakkol A. and Darabi H. (2014): Nonempirical apparent permeability of shale. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 17 (3), 414–424.
- Sinha S., Braun E. M., Passey Q. R., Leonardi S. A., Wood A. C., Zirkle T. and Kudva R. A. (2012): Advances in Measurement Standards and Flow Properties Measurements for Tight Rocks such as Shales. *2012 SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, Vienna, Austria, 20-22 March*. SPE 152257
- Su Y.L., Fu J.G., Li L., Wang W.D., Zafar A., Zhang M. and Ouyang W.P. (2020): A new model for predicting irreducible water saturation in tight gas reservoirs. *Petroleum Science* 17, 1087-1100.
- Ziarani A.S. and Aguilera R. (2012): Knudsen's permeability correction for tight porous media. *Transport in Porous Media* 91 (1), 239–260.

VIII. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK ÉS ELŐADÁSOK LISTÁJA

FOLYÓIRATCIKKEK

1. Szabó N.P., Remeczki F., Jobbik A., Kiss K. and Dobróka M. (2021): Interval inversion based well log analysis assisted by petrophysical laboratory measurements for evaluating tight gas formations in Derecske through, Pannonian basin, east Hungary. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 208 (C), 13 p, (Q1) IF= 4.346
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109607>
2. Remeczki F. (2021): Evaluation of calculated connate water saturation values in case of unconventional rock samples. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye* 11 (1), 58-68.
<https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.1.6>
3. Remeczki F. and Horváth G. (2021): Laboratory experiment to investigate permeability change in tight sandstone samples in case of water based formation damage. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye* 11 (1), 50-57.
<https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.1.5>
4. Remeczki F., Szabó N.P. and Dobróka M. (2020): Flow rate and permeability determination in rock samples from unconventional reservoirs - to support geophysical inversion model. *Geosciences and Engineering: A publication of the University of Miskolc* 8 (13), 154-166.
5. Remeczki F. (2020): Matematikai módszer a márga minták kialakítása során keletkező mikrorepedések hatásának eliminálására. *Bányászati és Kohászati Lapok - Bányászat* 153 (2-3), 27-31.

NEMZETKÖZI ÉS HAZAI KONFERENCIÁK KIADVÁNYAI

1. Remeczki F. (2020): Connate water saturation determination with a mathematical method – in case of Hungarian tight gas reservoir samples. IX. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia 2020: Tanulmánykötet, 425-433.

2. Remeczki F. (2020): Petrofizikai vizsgálatok nehézségei márga minták esetén. A 17 éves PEME XX. (E/2.) PhD - Online Konferenciájának előadásai II, 37-43.
3. Remeczki F. (2020): Extensive measurement protocol for porosity determination in case of calcareous marl samples. Doktoranduszok Fóruma: Miskolc, 2019. november 21: Műszaki Földtudományi Kar szekciókiadványa, 12-27.

NEMZETKÖZI ÉS HAZAI KONFERENCIA ELŐADÁSOK

1. Remeczki Ferenc: A délkelet – magyarországi mészmárga formációk rezervoármechanikai tulajdonságainak meghatározása termelés technológiai szempontból, III. Innovatív technológiák a fluidumbányászatban, Miskolci Egyetem, 2018.október 25.
2. Remeczki Ferenc: A method for permeability determination and correction in case of shale reservoir samples, Raw Materials University Day 2020, Miskolci Egyetem (online), 2020. október 20.
3. Remeczki Ferenc, Prof. Dr. Szabó Norbert Péter, Prof. Dr. Dobróka Mihály: Nem-konvencionális tárolókból származó kőzetminták áteresztőképességének meghatározása – geofizikai inverziós modell támogatásához, Geofizikai Inverziós Ankét 2020, Miskolci Egyetem (online), 2020. november 03.
4. Remeczki Ferenc: Petrofizikai vizsgálatok nehézségei márga minták esetén, XX. Jubileumi PEME Konferencia, Budapest (online), 2020. november 12.
5. Remeczki Ferenc: Mathematical method application to determine connate water saturation in unconventional rock samples, Doktoranduszok Fóruma 2020, Miskolci Egyetem (online), 2020. november 19.
6. Remeczki Ferenc, Horváth Gábor: Laboratory experiment to investigate permeability change in tight sandstone samples in case of water based formation damage, Doktoranduszok Fóruma 2020, Miskolci Egyetem (online), 2020. november 19.
7. Remeczki Ferenc: Connate water saturation determination with a mathematical method – in case of Hungarian tight gas reservoir samples, IX. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia, Pécsi Tudományegyetem (online), 2020. november 27-28.