MISKOLCI EGYETEM

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A Doktori Iskola vezetője:

PROF. DR. SZŰCS PÉTER

egyetemi tanár, az MTA levelező tagja

REZERVOÁR ÉS MEDENCEMODELLEZÉSHEZ KAPCSOLÓDÓ GEOFIZIKAI ÉS KŐZETFIZIKAI KUTATÁSOK

című doktori értekezés új tudományos eredményei

Szerző: NAGY ZSOLT

Okleveles geológus

Témavezetők: DR. BARACZA MÁTYÁS KRISZTIÁN

tudományos főmunkatárs, PhD

PROF. DR. SZABÓ NORBERT PÉTER

egyetemi tanár, az MTA doktora

Miskolc, 2023

1. A KUTATÁSI TÉMA BEMUTATÁSA

A pórusnyomás előrejelzés a földtudományok egy különleges alterülete, mely segítségével lehetséges a pórustérben megbecsülni a várható nyomás nagyságát. A szénhidrogén-kutató és -termelő projektek megkövetelik a lehető legpontosabb előrejelzését a pórusnyomásnak a mélyfúrások tervezésének fázisában, a várható kockázatokra való minél pontosabb felkészülés érdekében.

A mélyfúrások mélyítése során a fúrólyukat fúróiszap tölti ki, amely egyrészről a fúrófej kenéséért, másrészről a pórusfluidum fúrólyukból való kiszorításáért felel. Rendkívüli körülmények között, amikor a fúróiszap nyomása kisebb, mint a pórusnyomás, akkor a pórusfluidum be tud lépni a fúrólyukba, vagy a fúrólyuk alakja torzul el a kör alakútól. Azonban, ha a fúróiszap nyomása meghaladja a pórusnyomását, akkor a fúróiszap bejut a pórustérbe, a lyukfalon pedig iszaplepény képződik. Az említett technikai nehézségek esetén számolni kell a fúrási költségek megnövekedésével. Ha a pórusfluidum fúrólyukba való bejutása kontrollálatlan, akkor a kút kitörhet, ezzel emberi élteket veszélyeztetve.

Az említett események a mélyfúrások mélyítése során fellépő fő kockázatok, amelyek elkerülése fontossá teszi a pórusnyomás előrejelzését. A pórusnyomás általában a mélységgel nő, de a növekedés mértéke folyamatosan változik, ez megnehezíti a pórusnyomás előrejelzést. Az előrejelző módszerek nagy része fúrólyuk-geofizikai szelvények vagy reflexiós szeizmikus adatokon alapulnak (Bowers, 1995; Eaton, 1975; Huffman, 2002). Az előrejelző eljárások során a pórusnyomás becslése olyan tapasztalati egyenletekkel történik, melyek az adott fizikai paraméter és a pórusnyomás közötti kapcsolatot írják le.

Swarbrick (2002) eredményei alapján a kompressziós hullám terjedési sebességének mérésén alapuló pórusnyomás becslési eljárások alkalmazhatóságát a következő három tényező korlátozza:

- A sebesség alapú becslési eljárások figyelmen kívül hagyják az oldalirányú transzfer hatását. Regionális elterjedésű porózus tárolóképződményeken belül a pórusnyomás kiegyenlítődik. Ez azt eredményezi, hogy az aljzati magaslatok felett hirtelen pórusnyomás emelkedésre, míg a medencék központi részén mélyült fúrások esetén váratlan pórusnyomás esésekre, iszapveszteségre kell felkészülnünk (Nagy és társai, 2019).

- A lyukgeofizikai és a szeizmikus módszerek a mért adatok és a normál kompakciós trend összevetésén alapulnak. A normál kompakciós trendet a harántolt rétegsor hidrosztatikus nyomásviszonyú, sekély részén határozzák meg. Ugyanakkor, regionális eróziós események után, vagy kőzettani heterogenitás miatt nem lehetséges a normál kompakciós trend azonosítása, így a sebesség alapú pórusnyomás becslési eljárások sem alkalmazhatók.
- A sebesség alapú pórusnyomás becslési eljárások a vissza nem fordítható mechanikai kompakció hatására végbemenő kompakciót veszik csak figyelembe. Azonban a kémiai kompakciós folyamatok (oldódás, kicsapódás, cementálódás, ásványos átalakulások) képesek módosítani a mechanikai kompakció által létrehozott porozitás értékeket. Ez azt jelenti, hogy kémiai kompakció jelenléte esetén a sebesség alapú pórusnyomás becslési eljárások megbízhatatlanok.

A felsorolt korlátozó tényezők kezelésére két praktikus lehetőség is adódik: lehetséges egyszerre több, egymástól független pórusnyomás becslési eljárás alkalmazása és a kapott eredmények összevetése, vagy pedig olyan becslési eljárás alkalmazása, amelyre nincsenek hatással a felsorolt korlátozó tényezők. A medencemodellezés képes modellezni a kőzettestek betemetődését, kompakcióját és a képződött szénhidrogén többfázisú áramlását a geológiai időskálán (Hantschel and Kauerauf, 2009).

A medencemodellezés, mint pórusnyomás becslési eljárás egyik fő előnye, hogy független a többi becslési módszertől. Továbbá a medencemodellezéssel történő pórusnyomás becslés nem igényli normál kompakciós trend meghatározását, minden bemenő paraméter, valamint a kémiai kompakció és az oldalirányú transzfer hatásait is figyelembe veszi. A szerző célja nem a lyukgeofizikai és szeizmikus módszerek helyettesítése volt, hanem a meglévő eszköztár bővítése és ezáltal az eredmények megbízhatóságának növelése.

A felsorolt tényezőket figyelembe véve megállapítható, hogy a medencemodellezés alkalmas eljárás a sebesség alapú pórusnyomás előrejelzést korlátozó tényezők kezelésére. A szerző doktori kutatásának főbb céljai: (I) 2D és 3D pórus- és túlnyomás modellek megalkotása a Duna-Tisza közén, (II) a

túlnyomás kialakulásában részt vevő hatótényezők azonosítása, (III) az egyedi tényezők túlnyomáshoz való hozzájárulásának mennyiségi meghatározása.

1.1. Kutatás célja és elvégzett feladatok

A szerző kutatási tevékenysége a medencemodellezés területén 2013-ban kezdődött, és 2017 után irányult a pórusnyomás előrejelzés irányába. A kutatási célja, hogy 2D és 3D medencemodellek segítségével modellezzem az üledékes medencék fizikai változásait és azonosítsam a túlnyomást kiváltó hatótényezőket a Pannon-medencében.

A kutatási tevékenység során egy multidiszciplináris megközelítésen dolgoztam, amely a következő területeket foglalja magába: pórusnyomás előrejelző módszerek, lyukgeofizikai szelvények értékelése, kőzetmechanikai ismereteket és sztochasztikus medencemodellezés. A kutatási tevékenység fő irányait az alábbi pontokba lehet csoportosítani:

- Rétegtani egységek azonosítása fúrólyuk-geofizikai szelvények alapján, melyek részt vesznek a túlnyomás kialakulásában.
- Alulmintázott rétegtani egységek esetén mérési program megtervezése és kivitelezése a tárolómechanikai paraméterek megismerésének céljából. A mért adatok alapján tároló mechanikai trendek meghatározása.
- Kvantitatív modellkalibrálási eljárás kidolgozása, mely képes kezelni hiányos adatrendszereket
- Az egyedi túlnyomást kiváltó hatótényezők teljes túlnyomáshoz való hozzájárulásának számszerű megismerése a Duna-Tisza közének déli részén.
- Robosztus, sztochasztikus pórusnyomás becslési eljárás és Monte Carlo szimulációval támogatott medencemodellezés megalkotása.

A litológiára érzékeny karotázs szelvények értékelése lehetővé tette a rétegtani egységek elkülönítését és a túlnyomáshoz való hozzájárulásuknak a vizsgálatát. Túlnyomást kiváltó hatótényezőket a kompressziós hullám terjedési sebesség – mélység profilok és a sűrűség – kompressziós hullám terjedési sebesség diagramok alapján vizsgáltam. A litológia és porozitáskövető szelvények együttes alkalmazása lehetővé tette, hogy a túlnyomás kialakulásában részt vevő mélységzónák azonosíthatóak legyenek.

A MOL Nyrt. tárolómechanikai adatrendszerét feldolgoztam, melynek alapján azonosítottam az alulreprezentált rétegtani egységeket. Magszemlét és mintavételezést szerveztem, mely során kőzetmintákat gyűjtöttem. A mintákon porozitás, permeabilitás méréseket végeztem az Alkalmazott Földtani Kutatóintézet (AFKI) eszközparkján. Az általam létrehozott MOL Nyrt. és AFKI tárolóparamétereket tartalmazó adatrendszer alapján azonosítottam az elkülönített rétegtani egységekhez tartozó tárolómechanikai trendeket. A Pannon-medencéből származó adatrendszeren megvizsgáltam a különböző tapasztalati egyenletek alkalmazhatóságát. A létrehozott trendek bizonytalanságát számszerűsítettem a középső-miocén és fiatalabb rétegtani egységek esetében.

A korlátozott mennyiségű rendelkezésre álló statikus pórusnyomás adat mellett különböző pórusnyomás indikátorokat is bevontam a pórusnyomás modellek kalibrációjába. Statisztikus eljárást építettem be a modellek kalibrációjának folyamatába, mely képes kezelni az egyes mélységintervallumokon mért adatokat. A kalibráció iteratív eljárásban gyakorlatilag végtelenségig folytatható, ennek elkerülése érdekében egy megállási feltételt építettem be a folyamatba, vagyis egy új kalibrációs eljárást hoztam létre.

Az általam kifejlesztett kalibrált pórusnyomás modellek minden túlnyomást kiváltó hatótényezőt figyelembe vesznek. Ugyanakkor a hatótényezők egyedi hozzájárulását a teljes túlnyomáshoz egyszerűsített modellek segítségével megvizsgálhatjuk. Az egyszerűsített modellek a végleges kalibrált modell egy másolata, mely figyelmen kívül hagy egy-egy túlnyomást kiváltó mechanizmust, így deduktív módon meghatározható az egyedi hatótényezők nagysága. Mindemellett megvizsgáltam az üledékképződés időbeliségének szerepét a túlnyomás időbeli alakulásában, két szomszédos üledékes medence esetén.

A medencemodellekbe beépített kompakciós trendek bizonytalanságait számszerűen megvizsgáltam. A medencemodellezés folyamatába Monte Carlo szimulációt építettem és így sztochasztikus medencemodelleket hoztam létre. A sztochasztikus pórusnyomás előrejelző eljárást robusztifikáltam a leggyakoribb érték módszerének (angolul MFV) az eljárásba történő beépítésével.

2. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A doktori értekezésben bemutatott eredmények alapján az alábbi új tudományos eredmények születtek, amelyeket az alábbi alfejezetekben ismertetek.

2.1. Első tézis

Olajipari fúrólyuk-geofizikai szelvények adataira alapozva azonosítottam két túlnyomást kiváltó mechanizmust a Duna-Tisza közén. A természetes gamma-intenzitás és az akusztikus terjedési idő szelvények együttes értelmezésével kimutattam, hogy a túlnyomásos zónák 2000 méteres mélységtől vannak jelen a Pannon-medence déli részén. A középső-miocén korú medencék központi részén mélyült fúrások esetén rámutattam, hogy a túlnyomás kialakulása már az Algyői és a Szolnoki Formáció agyagos kifejlődésű részeiben megkezdődik. A kompressziósshullám-terjedésisebesség adatok változását a mélység függvényében megvizsgáltam. A hullám-terjedésisebesség csökkenésének mértéke alapján bizonyítottam, hogy a nem egyensúlyi kompakció meghatározó módon részt vesz a túlnyomásos rendszer kialakulásában. Az akusztikus szelvényből származtatott kompressziósshullám-terjedésisebesség adatok alapján kimutattam, hogy a folyadéktágulási mechanizmusok nem járulnak hozzá a túlnyomás kialakulásához. A sűrűség-szeizmikus sebesség diagramok segítségével azonosítottam a kémiai kompakciót, mint jelen lévő másodlagos túlnyomást kiváltó mechanizmust.

2.2. Második tézis

Kőzetfizikai mérési rendszert dolgoztam ki és annak alkalmazhatóságát vizsgáltam a nem-szénhidrogén-tároló késő-miocén korú kőzeteken. Az AFKI műszerparkján kivitelezett mérési program segítségével pontosítottam a tömött képződmények áteresztőképesség értékeit az alacsony áteresztőképesség tartományban (10^{-2} - 10^{-8} mD között). A megfigyelt adatokra alapozva megalkottam a középső-, késő-miocén és pliocén korú kőzetekre a porozitás-mélység, porozitás-effektív feszültség és a porozitás-áteresztőképesség kapcsolatokat. A javasolt tapasztalati összefüggések alkalmasak az Újfalui, az Algyői és a Szolnoki Formáció, a Nagykörűi és a Tótkomlósi Tagozatba tartozó kőzetek kompakciójának medenceléptékű leírására. A porozitás-áteresztőképesség összefüggések esetén ellenőriztem az Ungerer-féle és a

Schlumberger „Multipoint” modelljeinek alkalmazhatóságát. Kimutattam, hogy az alacsony áteresztőképességű kőzetek (agyagok, aleurolitok, márgák és mészmárgák) esetén az Ungerer-modell, míg a tároló képződmények (homokkő, breccsa, konglomerátum és mészkő minták) esetén a Schlumberger „Multipoint” modell alkalmazható.

2.3. Harmadik tézis

A két- és háromdimenziós medencemodellek kalibrálásához rétegvizsgálatok során mért statikus rétegnyomás adatok használtam fel, melyek jellemzően hiányos adatrendszert alkotnak. A statikus rétegnyomás adatokat független forrásból nyert pórusnyomás-indikátorokkal bővítettem. A javasolt modellek kalibrációjához statisztikai módszert fejlesztettem, mellyel lehetővé vált, a mért pórusnyomás adatok és a szimulált értékek összehasonlítása. A modellparaméterek javítása céljából a mért és számolt adatok Gauss-féle négyzetösszegét iteratív eljárásban minimalizáltam, és konvergens eljárásban meghatároztam a szimulációk optimális számát. Ennek alapján a medencemodellek kalibrálásához a hiányos adatrendszerek is hozzájárulhattak, ily módon automatizáltam a hőmérséklet modellek kalibrálását. Rámutattam, hogy további paraméterek, mint a pórusnyomás és a porozitás esetén, a kalibrációt részben manuálisan célszerű elvégezni.

2.4. Negyedik tézis

Két- és háromdimenziós medencemodelleket hoztam létre a pórusnyomás mértékének és geológiai skála léptékű időbeli változásának megismerésére. Az általam létrehozott modellek a fúrómagokon mért porozitás és áteresztőképesség adatokon alapuló kompakciós összefüggésekre támaszkodnak. A kifejlesztett modellek alapján megállapítottam, hogy a túlnyomás kialakulására a fiatal (késő-miocén és pliocén korú) alacsony áteresztőképességű üledékek nem egyensúlyi kompakciója gyakorolja a legnagyobb hatást. Egyszerű modellek formájában vizsgáltam külön-külön a kémiai kompakció, a vetők és a szénhidrogén-képződés szerepét a túlnyomás kialakulásában. Ezek az összetett modellhez képest nem tartalmaznak minden pórusnyomást kiváltó mechanizmust. Az általam létrehozott modellek lehetővé tették, hogy a túlnyomást kiváltó mechanizmusok milyen mértékben járulnak hozzá a felszín alatti nyomásrendszerhez. A medencemodellek alapján a Pannon-medence esetében azonosítottam az oldalirányú transzfert, mint túlnyomást kiváltó mechanizmust.

A regionális elterjedésű porózus és áteresztőképes kőzettesteken belüli pórusnyomás-kiegyenlítődés révén, ez a folyamat eredményezi a területileg egységes nyomásrendszer kialakulását. Rávilágítottam a különböző részmedencékben jelenlévő, eltérő nagyságú túlnyomás és az üledékképződés időbeli fejlődésének kapcsolatára.

2.5. Ötödik tézis

A kétdimenziós medencemodellek esetében a laboratóriumi mérések hibája alapján határoztam meg a becslési bizonytalanság mértékét. A mért paraméterek (rétegek mélysége, permeabilitás) esetén eltérő statisztikai eloszlású hibákat feltételezve a modellezés folyamatába beépítettem a Monte Carlo szimulációt, mely lehetővé tette a modellparaméterek becslésénél a hibaterjedés figyelembevételét. A kifejlesztett statisztikai eljárás alapján lehetővé tettem sztochasztikus prediktív pórusnyomásmodellek megalkotását a Pannon-medencében. A pórusnyomásmodell kimenő paramétereinek és hibájának meghatározására hatékony statisztikai módszert fejlesztettem, melynek során a Steiner-féle leggyakoribb érték (MFV) módszerét ötvöztem a Monte Carlo szimulációs eljárás robusztifikálása céljából.

3. AZ EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTÁSA

Az általam létrehozott pórusnyomás modellek lehetővé teszik, hogy az egyes túlnyomást kiváltó hatótényezők teljes nyomásrendszerhez való hozzájárulását megértsük a Pannon-medence déli részén. Az oldalirányú transzfer és annak pórusnyomás homogenizáló szerepe magyarázatot nyújt arra, hogy miért tapasztalhatunk iszapveszteséget a medencék belső részein és miért tapasztalunk gázbelépést az aljzati magaslatok felett. Az általam létrehozott kompakciós trendek alkalmazhatóak tektonikai szelvény rekonstrukciós tanulmányoknál, melyek esetén az üledékek kompakcióját általában elhanyagolják, annak ismeretlensége miatt. A progradáló deltarendszerek esetében, az egykori vízmélység értékének becsléséhez a szeizmikus szelvényeken azonosított klinoformok magasságát alkalmazzák. A vízmélységbecslés sem veszi figyelembe, hogy a leülepedéskor az üledékek térfogata nagyobb volt, melynek korrekciójára is használhatók az általam megalkotott kompakciós trendek.

A rendelkezésünkre álló pórusnyomás becslési eljárások sorát bővítettem egy független robosztus eljárással. A kifejlesztett módszer eredményesen alkalmazható mind a tudományos kutatások mind pedig az olajipari projektek kutatási fázisában a mélyfúrások tervezése során. Mindemellett, a 2D pórusnyomás modellek szimulációs ideje lehetővé teszi, hogy a fúrások mélyítése során a pórusnyomás monitorozására alkalmazzuk a módszert. Véleményem szerint, ha a kifejlesztett módszert párhuzamosan alkalmazzuk a porozitáskövető (Logging While Drilling - LWD) szelvények alapján végzett valós idejű pórusnyomásbecsléssel, akkor elkerülhetőek lennének a jövőben a fúrások mélyítése során fellépő technikai problémák.

4. A KUTATÁSI TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

4.1. Írásos publikációk és közlemények

Nagy, Zs., Baracza, M.K., Szabó, N.P., (2019): Pore Pressure Prediction In Pannonian Hydrocarbon Reservoir Systems Using An Integrated Interpretation Approach. GEOSCIENCES AND ENGINEERING: A PUBLICATION OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC, Vol. 7 (12), pp. 105-115.

Nagy, Zs., Baracza, M.K., Szabó, N.P. (2019): Integrated Pore Pressure Prediction with 3D Basin Modeling, In: Second EAGE Workshop on Pore Pressure Prediction, pp. 1-5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900513

Nagy, Zs., Kiss, K., Baracza, M.K., Szabó, N.P. (2020): Subsurface Pressure Regime Evaluation with 2D Basin Modeling: A Case Study of Two Subbasins from Hungary, In: Third EAGE Workshop on Pore Pressure Prediction, pp. 1-6. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.202038013

Nagy, Zs., Baracza, MK., Szabó, NP. (2021): Magnitude Estimation of Overpressure Generation Mechanisms Using Quantitative Stochastic 2D Basin Models: A Case Study from the Danube-Tisza Interfluve Area in Hungary, APPLIED SCIENCES, 11, 6, p. 2841. DOI:10.3390/app11062841

4.2. Konferencia előadások

Basin model of the western part of the Hungarian Paleogene Basin, Meeting of Young Geoscientists (ISZA), Sopron, 27-28 March, 2015

Salt effects on thermal regime and maturity in 2D basin models – a case study from North Kazakhstan, Meeting of Young Geoscientists (ISZA), Kaposvár, 31 March - 1 April, 2017

Pore pressure prediction in hydrocarbon reservoir systems using an integrated interpretation approach, III. Innovatív Technológiák a Fluidumbányászatban, Miskolc, 25 October, 2018

Integrated Pore Pressure Prediction with 3D Basin Modeling, Second EAGE Workshop on Pore Pressure Prediction, Amsterdam, 19-21 May 2019

Application of Artificial Neural Networks (ANN) in geosciences – A case study from Central Hungary, Ifjú Szakemberek Ankétja, Ráckeve, 29 – 30 March, 2019

Subsurface Pressure Regime Evaluation with 2D Basin Modeling: A Case Study of Two Subbasins from Hungary, Third EAGE Workshop on Pore Pressure Prediction, Amsterdam, 14-16 December, 2020

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

Bowers G. (1995): Pore Pressure Estimation from Velocity Data: Accounting for Overpressure Mechanisms Besides Undercompaction. SPE Drilling and Completion. 10, pp. 89-95.

Eaton B. A. (1975): The equation for geopressure prediction from well logs. Society of Petroleum Engineers of AIME, Texas, SPE 5544.

Hantschel T. és Kauerauf A.I. (2009): Pore Pressure, Compaction and Tectonics. In: Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. Springer, Berlin, Heidelberg, XVI, 476, pp. 31-101.

Huffman A.R. (2002): The future of pore-pressure prediction using geophysical methods. The Leading Edge 21, pp. 199-205.

Nagy Z., Baracza M.K. és Szabó N.P. (2019): Pore Pressure Prediction In Pannonian Hydrocarbon Reservoir Systems Using An Integrated Interpretation Approach. Geosciences And Engineering: A Publication Of The University Of Miskolc 7, 12, pp. 105-115.

Swarbrick R.E. (2002): Challenges Of Porosity-Based Pore Pressure Prediction. Society of Exploration Geophysicists. 27, 7, pp. 75-77