

MICRO- ÉS NANOMÉRETŰ PÓRUSTEREKBE TÖRTÉNŐ GÁZÁRAMLÁS VIZSGÁLATA

Pusztai Patrik¹, Dr. Jobbik Anita²

¹BSc., műszaki ügyintéző, pusztai@afki.hu
Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet,
H-3515, Miskolc, Egyetemváros Pf.: 2.

²Ph.D., tudományos főmunkatárs, jobbik@afki.hu
MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport
Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet,
H-3515, Miskolc, Egyetemváros Pf.: 2.

Bevezetés

A világ egyre növekvő energiaigénye, valamint a fosszilis energiahordozók jövőbeli készletnövekedésének, hosszú távú prognózisok alapján jelzett csökkenése magával vonta az egyre nehezebben hozzáférhető fosszilis, illetve a megújuló energiaforrások hasznosításának növekvő trendjét. Szénhidrogének és különösen a földgáz tekintetében a világ termelésében egyre nagyobb mértékben vannak jelen az ún. nem-hagyományos vagy más néven nem konvencionális szénhidrogének. Mely nem-hagyományos szénhidrogén előfordulások kutatása és termelésbe állítása izgalmas, komoly szakmai és műszaki kihívásokat állít a jelen és jövő mérnökei elé.

Ezen nem-hagyományos szénhidrogének (jelen dolgozat esetében természetes földgáz) jellemzően rendkívül kis pórusterekben találhatóak, melyek hatással vannak az áramlásokat leíró egyenletekre és a tárolót jellemző anyagmérleg egyenletre. Magyarországi körülményeket tekintve a kis pórusterek mellett rendkívül magas nyomás és hőmérséklet értékek is jellemzőek. Az alábbi körülmények között lévő földgázt tartalmazó rezervoárok viselkedésének tanulmányozása elengedhetetlen a nem-konvencionális földgáz tárolók (tömött homokkő tárolók, palagáz tárolók) gazdaságos kitermeléséhez.

Ebben a munkában a különböző áramlási modellek összehasonlítása és elemzése kerül bemutatásra egy új bővített anyagmérleg egyenleten keresztül, mely a nem konvencionális földgáz tárolókban jelenlévő mechanizmusok valamennyiét jellemzi. A modellen keresztül egy gazdasági elemzés is bemutatásra kerül, melynek segítségével a tárolók gazdasági elérhetősége különböző hozamnövelő eljárások segítségével vizsgálható. Végezetül egy magyarországi hidraulikusan rétegrepszett földgáztároló termelési eredményein keresztül vizsgáltam a modell alkalmazhatóságát.

Alapvető mechanizmusok

Mivel az átlagos pórusméretek a nem-hagyományos földgáztárolók esetében mindössze 1-2 nagyságrenddel nagyobbak, mint az abban jelenlévő földgáz molekulák (főként metán molekula), így kimagasló fontosságú a gáztárolás szempontjából jelenlévő mechanizmusok megértése és figyelembe vétele. Jellemzően 5 mechanizmust különböztetünk meg, amelyek sorra [1]:

1. adszorbeálódott gáz a pórusok belső felületén
2. konvencionális (nyomás alatti gáz) tárolás a természetes és hidraulikusan indukált repedésben
3. konvencionális tárolás a porózus mátrixban (szerves és szervetlen)
4. formáció vízben oldott formában jelenlévő földgáz
5. abszorbeálódott földgáz a szerves anyagban

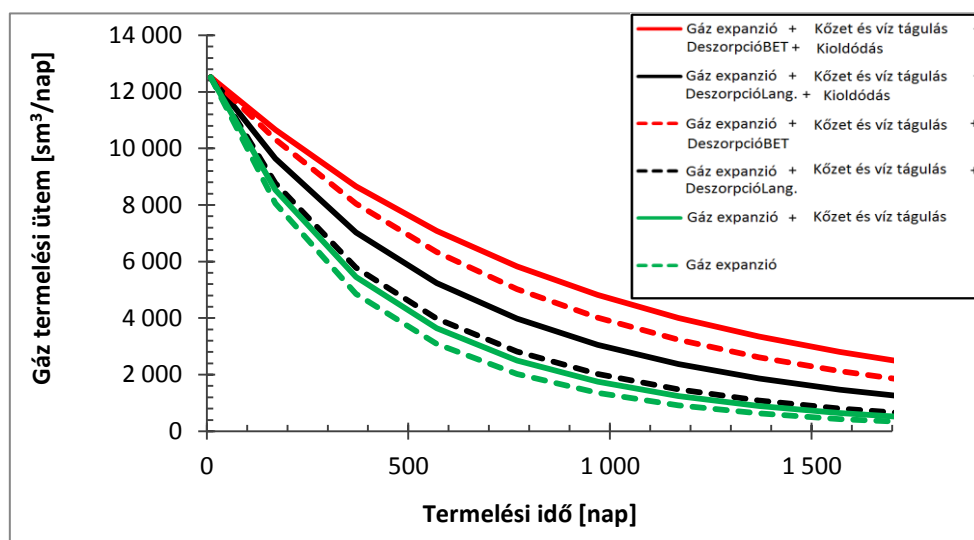
Mivel a meglévő modellek jellemzően alulbecslik az ilyen tárolókból történő termelések értékeit, így dolgozatom fő célja a lehető legtöbb jelenség integrálása egy modellbe, amely még matematikailag könnyen kezelhető. Ezért a szakirodalomban kidolgozott anyagmérleg egyenletek bővítése a fentebb említett mechanizmusokkal elengedhetetlen fontosságú volt.

Magyarországi rezervoárokat tekintve jellemzően kevésbé repedezett formációk vannak jelen, mint az Egyesült Államokban található kismélyességű palagáz tárolók, így a 2. jelenséget elhanyagolhatónak tekintettem. Ezen kívül a repedések inhomogén eloszlása nagymértékű bizonytalanságot eredményezne repedezett formációk esetén, melyeket csak modern geofizikai feltérképezésekkel és összetett rezervoármechanikai modellezésekkel lehetne csökkenteni.

A Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutató Intézetében (AFKI) vizsgált magminták általában kismértékű szerves anyag tartalommal rendelkeztek, így az 5. pont, vagyis a szerves anyagban megkötött (abszorbeált) földgáz jelenlétének vizsgálata is elhanyagolható volt. Az 1., 3. és 4. pontok modellbe való megfelelő integrálása elfogadható közelítést adott a magyarországi nem-konvencionális földgáztárolók jellemzésére.

Anyagmérleg egyenlet

Rezervoármechanikai terminológiában az anyagmérleg egyenletek egy anyag megmaradási összefüggést fejeznek ki, melyeknek köszönhetően becsülhetővé válik a tároló termeltetéséből eredő nyomáscsökkenés. Tömött kis pórusterekkel rendelkező formációk esetében rendszerint megfelelő pontossággal alkalmazhatóak a zárt tárolókra jellemző anyagmérleg egyenletek. Jelen modellben is ezt alkalmaztam. A kitermelés hatására bekövetkező nyomáscsökkenés következtében az alábbi jelenségek mennek végbe: a porózus mátrixban jelenlévő földgáz tágulása, a kőzet és a formáció víz tágulása, a pórusok belső felületén adszorbeálódott gáz leválása, valamint a formáció vízben oldott földgáz kiválása. Ezek a jelenségek redukálják a nyomáscsökkenés értékét, ezáltal kisebb mértékű nyomáscsökkenés realizálható egységnyi földgáz kitermelése esetén az ilyen tárolók vizsgálata során. Jelen vizsgálat során többretegű izotermát (BET izoterma) és egyrétegű izotermát is alkalmaztam (Langmuir izoterma). A későbbiekben történő vizsgálatokat már csak a Langmuir izoterma alkalmazásával végeztem el.



1. ábra: Termelési ütemek változása különböző mechanizmusok figyelembe vétele mellett

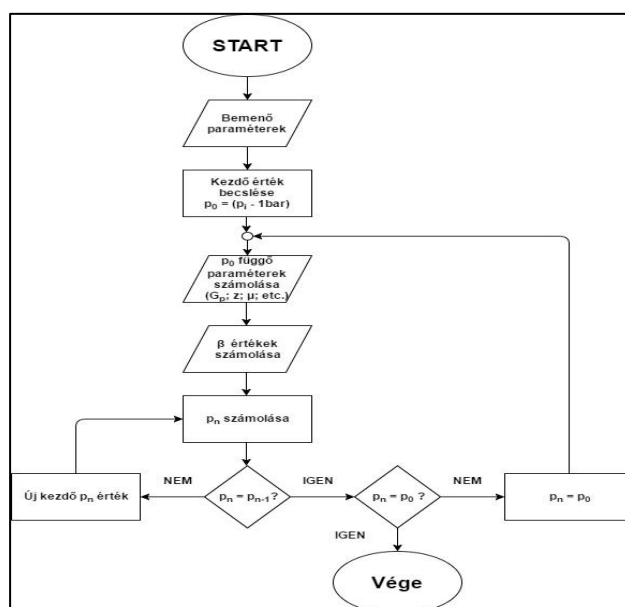
Forrás: saját szerkesztés

Ezek alapján a kumulált gáztermelés megegyezik a nyomáscsökkenés által bekövetkezett, egyes mechanizmusok hatásának összegével. Ezek a mechanizmusok matematikailag kifejezve egy rendkívül összetett függvényt eredményeznek, mivel a metán oldódása vízben csak komplex korrelációval határozható meg magas nyomású és hőmérsékletű tárolók esetében [2]. Valamint az adszorpció figyelembe vételére az egyrétegű adszorpciót feltételező Langmuir izotermát alkalmaztam. Így a nyomáscsökkenés értékét csak numerikus közelítéssel lehet meghatározni, amelyhez a Newton módszert alkalmaztam. A módszer lényege a következő: kiindulunk egy pontból, amely az igazi gyökhöz elég közel található (jelen esetünkben a kezdő rezervoár nyomástól 1 bar-os nyomáscsökkenést feltételezve). A függvényérték ebben a pontban megközelítőleg az ehhez a ponthoz húzott érintőn található (amelyet meghatározhatunk a függvény deriváltjával), majd kiszámoljuk ennek az érintőnek az x tengellyel való metszéspontját. Ezt követően a lépést megismétljük a kapott metszéspont értékét tekintve az új kezdőpontnak. Így egy iteratív lépéssorozattal pár számítási ciklust elvégezve megkapjuk a termelés hatására bekövetkezett nyomáscsökkenés értékét (jól konvergáló függvényről lévén szó).

$$f(p) = \frac{\beta_{11}}{p} + \beta_{14} - \beta_3 * p + \frac{\beta_{13}}{p} - \frac{\beta_4}{p} * \frac{V_L * p}{P_L * p} + \frac{\beta_5}{p} \\ * [\beta_6 - e^{\beta_7 - \beta_8 * (p * C_1) + \beta_9 * \ln(p * C_1) + \beta_{10} * \ln(p * C_1)}] - \frac{\beta_{15}}{p}$$

$$p_n = p_{n-1} - \frac{f(p)}{f'(p)}$$

Azonban az alapfüggvényben feltételezett konstans β értékek tartalmaznak tagokat, melyek szintén függenek a nyomásváltozástól. Így ennek megoldására egy implicit módszert javasoltam, mely során a kapott, lecsökkent nyomás értékével a konstansokat újra számolva és ismételten elvégezve a Newton módszert a tényleges nyomáscsökkenés értékre, már egy pontosabb megoldást kapunk. Ezt az algoritmust addig kell ismételni, míg a kezdő nyomás érték és a számolt értékek nagy pontossággal megegyeznek. Ez a legtöbb esetben 3-4 számolási lépés után bekövetkezik.



2. ábra: Számolási algoritmus a nyomáscsökkenés meghatározására

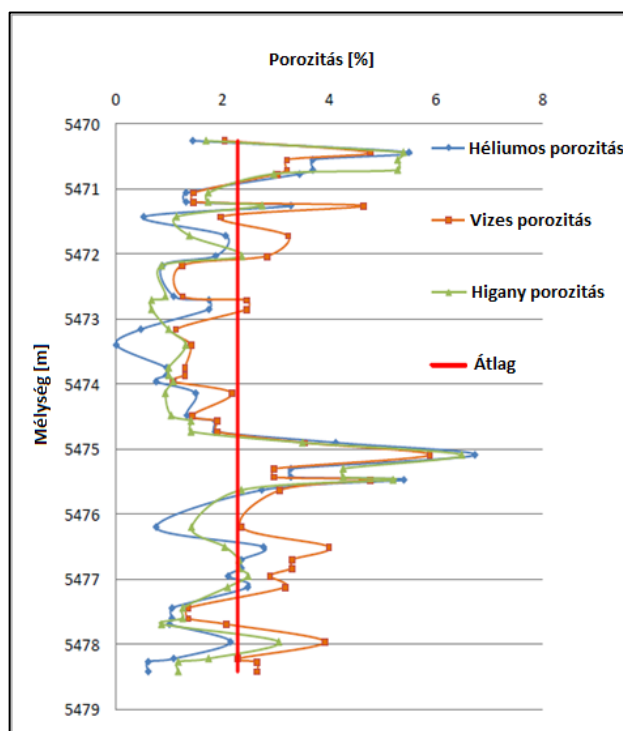
Forrás: saját szerkesztés

Az alábbiakban bemutatott bővített, zárt gáztárolókra jellemző anyagmérleg egyenlettel és annak implicit megoldásának segítségével vizsgáltam számos gázáramlási modell viselkedését, bemenő paramétereknek pedig az AFKI által mért UHPHT tartományból származó magmintáit választva.

Elvégzett mérések

43 magminta érkezett a Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutató Intézetébe, 5470-5478,5 m-es mélységű tömött homokkőves formációból, melyeken számos mérést végeztünk el. Valamennyi magmintán kivitelezve lett porozitás mérés, abszolút permeabilitás (áteresztőképesség) mérés, tapadó víztelítettség mérés, valamint pórusméret-eloszlás mérés.

Porozitás mérést három eltérő közeg besajtolásával is elvégeztük, melyek sorra formáció víz (nedvesítő folyadék), hélium gáz és higany (nem nedvesítő folyadék). A különböző fázisokkal kapott kissé eltérő értékeket átlagoltuk majd az egyes magmintákra jellemző értékeknek szintén az átlagát vettük kezdő bemenő paraméternek. Ennek értéke a tömött homokkő tárolókra jellemzően igen alacsony 2,29% lett.



3. ábra: Porozitás mérés eredményei

Forrás: saját szerkesztés

Permeabilitás mérést formáció vízzel és nitrogén gázzal végeztük el, majd a porozitás mérések kiértékeléséhez hasonlatosan határoztuk meg a formációra jellemző abszolút permeabilitás értékeket, mely a vártaknak megfelelően igen alacsony 0,0035 mD lett.

Tapadó víztelítettség mérést formáció víz és higany besajtolásával végeztük el, melynek során igen magas, átlagosan 86%-os értéket kaptunk.

Pórusméret eloszlást higany besajtolásával határoztuk meg, mivel ez a közeg nem nedvesíti a kőzetet. Átlagos pórusugárnak 55,22 nm adódott, mely prognosztizálta a Darcy áramlástól eltérő viselkedést.

Áramlási tartományok és áramlási modellek

Az áramlások leírására a szakirodalomban különböző áramlási tartományokat határoztak meg annak függvényében, hogy milyen hatások érvényesülnek [3]. Ezeket a tartományokat egy arányszám segítségével az úgynevezett Knudsen-szám bevezetésével határozták meg. A Knudsen-szám a közepes szabad úthossz és a pórusátmérő aránya. A közepes szabad úthossz a molekulák áramlása során az egymással való ütközések között megtett átlagos távolság. Ennek értéke fordítottan arányos a nyomással és egyenesen arányos a hőmérséklettel, valamint fordítottan és négyzetesen arányos a pórusátmérővel.

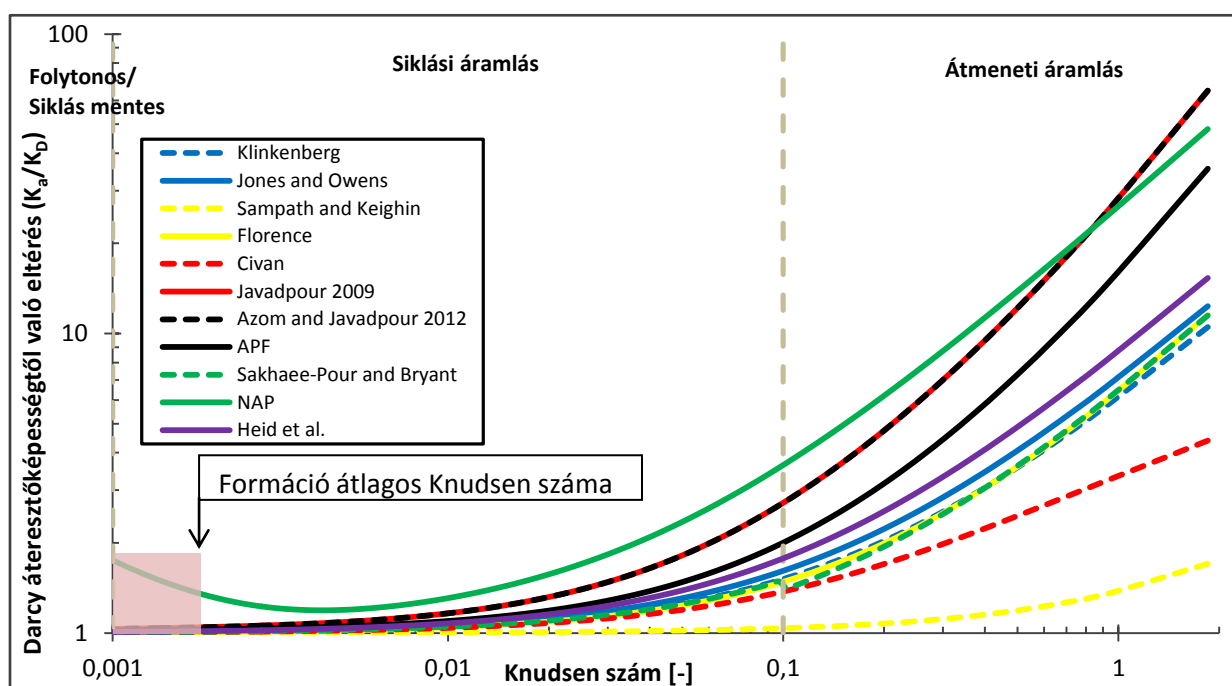
$$\lambda = \frac{K_B \times T}{\sqrt{2} \times d^2 \times \pi \times p}$$

Minél kisebb a Knudsen-szám értéke annál inkább viszkózus az áramlás és a folyamat könnyen leírható a Darcy egyenlet segítségével. Ebben a tartományba (folytonos áramlási tartomány) a kis arányszám következtében a molekulák egymással való ütközése determináns.

10^{-3} feletti Knudsen-szám esetében a siklás jelenségét is figyelembe kell venni [4], amely azért alakul ki, mivel a molekulák pórusfállal való ütközése többé nem elhanyagolható. Ennek köszönhetően az áramlás sebességprofilja a pórus falok mentén nem zero, így átlagosan nagyobb az áramlás sebessége. Ezen tartomány vizsgálatára hat, a szakirodalomban fellelhető modellt alkalmaztam.

0,1 érték felett az úgynevezett tranziens áramlási tartományba lépünk át. Ebben az esetben a molekulák pórusfállal történő ütközése a meghatározó és egy nyomás vezérelt folyamat irányából, egy koncentráció vezérelt folyamat (úgynevezett Knudsen diffúzió) irányába tolódik az áramlás. Ennek leírása összetett matematikai modelleket követel, melyeket rendszerint a Navier-Stokes összefüggések esetében alkalmazott különböző határfeltételek bevezetésével érnék el. Dolgozatomban öt tranziens áramlási tartományra javasolt modell viselkedését vizsgáltam.

10-től nagyobb Knudsen-szám esetében az áramlási tisztán diffúzió útján megy végbe.



4. ábra: Különböző modellek viselkedése eltérő Knudsen-szám esetén

Forrás: saját szerkesztés

Jól látszik minden modell az abszolút permeabilitástól eltérő, egyre nagyobb látszólagos permeabilitás értéket jelez előre a Knudsen-szám növekedésével. A modellek, melyek a diffúzió jelenségét is vizsgálják, a siklás jelensége mellett átlagosan magasabb látszólagos áteresztőképességet határoznak meg azonos Knudsen-számok esetében. Az NAP [5] modell viselkedése azért ambivalens a többi modellhez képest, mivel teljes mértékben elhanyagolja a siklási jelenséget. Rózsaszínnel emeltem ki a vizsgált tároló átlagos Knudsen-szám tartományát, amely jól látszik a folytonos és a siklási tartomány határán van. Ez az érték a kis pórusméretek ellenére azért lehetséges, mivel ultra magas nyomás tartomány (közel 1100 bar) jellemzi a formációt.

Úgy tűnhet nincs lényegi eltérés az egyes modellek között a tárolóra jellemző tartományban, azonban több éves nagymértékű gáztermelést feltételezve számottevő eltérések alakulhatnak ki.

Eredmények

Első esetben nyitott lyuktalpi termelést feltételezve (mely során radiális áramlás alakul ki a kút környezetében) a termelések alakulását és a Darcy modelltől való eltérések arányát az alábbi táblázat tartalmazza. Minden egyes modell esetében le lett futtatva a program 1 napos időléptéket választva alapul, 5 éves termelési periódust feltételezve.

1. táblázat:

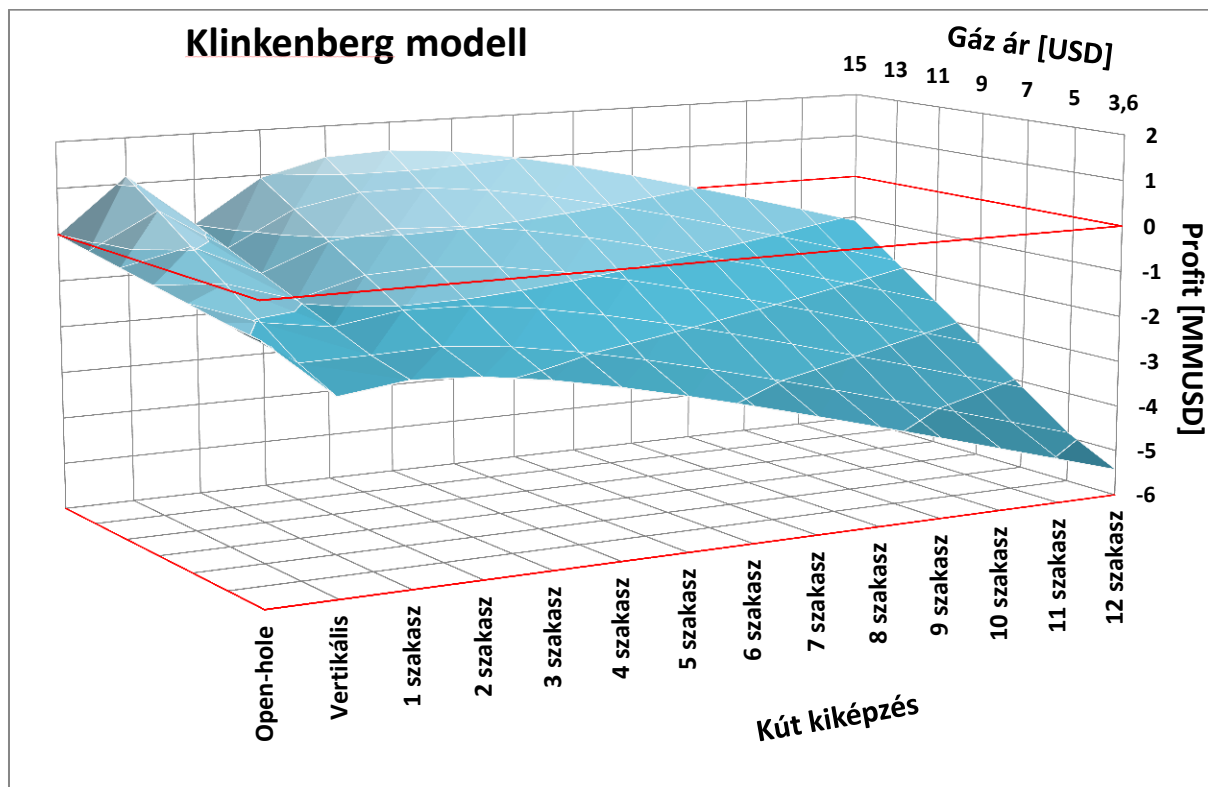
Nyitott lyuktalpi termelés esetén az eredmények

Modellek	Kezdeti termelés [m ³ /nap]	Eltérés [%]	Kumulált termelés [m ³]
<i>L.J. Klinkenberg, 1941</i>	1 048,9	0,43	1 657 087
<i>F.O. Jones and W.W. Owen, 1979</i>	1 049,8	0,51	1 658 349
<i>K. Sampath and C.W. Keighin, 1981</i>	1 044,8	0,03	1 651 003
<i>J.G. Heid et al, 1950</i>	1 051,2	0,65	1 658 349
<i>F. A. Florence et al, 2009</i>	1 048,1	0,35	1 655 882
<i>F. Civan, 2010</i>	1 048,0	0,34	1 655 657
<i>F. Javadpour, 2009</i>	1 063,8	1,86	1 677 526
<i>P. Azom and F. Javadpour, 2012</i>	1 063,8	1,85	1 677 500
<i>H. Darabi et al., 2012 (APF)</i>	1 062,8	1,76	1 676 472
<i>A. Sakhaee-Pour and S.L. Bryant, 2012</i>	1 048,8	0,42	1 656 902
<i>H. Singh et al., 2014 (NAP)</i>	1 994,6	90,97	2 714 736

Jól látszik nincsen jelentős eltérés a Darcy modell viselkedésétől a siklási modellek esetén, ugyanis a folytonos áramlás határán történik az áramlás, így a siklás jelensége csak rendkívül kis mértékben befolyásolja a kapott értékeket. Azon modellek, melyek a diffúzió jelenségét is magukba foglalják a vártaknak megfelelően kissé nagyobb hozamokat jeleznek előre. Az NAP modell lényegesen nagyobb hozamokat jelez előre, azonban ennek a modellnek a viselkedése az előzőekben részletezettek alapján megkérdőjelezhető.

A kezdeti hozamok és az 5 éves termelési ciklusra kumulált hozamok minden modell esetén rendkívül alacsony értékeket prognosztizálnak. Ez okból kifolyólag a programot

lefutattam vertikális és többszörösen repesztett horizontális, transzverzális kútkiképzés esetére is. Hidraulikus rétegrepesztés segítségével egy lényegesen nagyobb beáramlási felület érhető el, melyen keresztül már egy közel lineáris áramlás alakul ki, így lényegesen nagyobb hozamok érhetőek el az adott tárolókból. Ezen eredményeket azonban csak a Klinkenberg modell esetén prezentáljuk, mely modell esetén a siklási faktor értéke nem korreláció segítségével számolt, hanem egy mért érték, így pontosabban determinált a siklás jelensége.

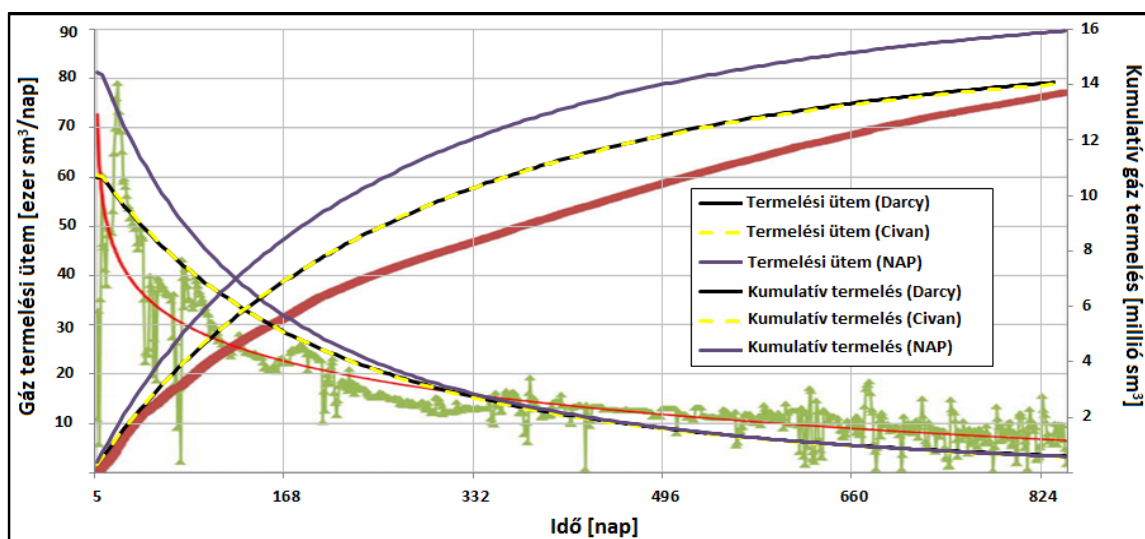


5. ábra: Különböző kútkiképzések gazdasági vizsgálata az algoritmussal

Forrás: saját szerkesztés

Megfigyelhető, hogy a földgáz jelenlegi világpiaci ára (5 USD) mellett semmilyen kútkiképzés esetében sem gazdaságos a kút termeltetése. Azonban a gázár alakulása nem csak a profit változását eredményezi, hanem meghatározza az optimális kútkiképzés módszerét is. 3,6 USD gázár mellett a legkevésbé veszteséges eljárás a nyitott lyuktalpi kútkiképzés esetén lehetséges, mivel a hidraulikus rétegrepesztéssel elért többlettermelés nem fedezi az eljáráshoz szükséges többlet kiadásokat. Azonban 9 USD gázár mellett a kút termeltetése már gazdaságos, illetve vertikálisan kivitelezett hidraulikus rétegrepesztés az optimális. Míg 15 USD gázár mellett a 4 szakaszban kialakított vízszintes rétegrepesztés eredményezi a legnagyobb profitot.

Mivel a kút hosszú távú termeltetése nem történt meg gazdasági okokból, így a modell pontos viselkedését ezen tároló esetére nem tudtuk megvizsgálni. A modell alkalmazhatóságát egy másik magyarországi hidraulikusan rétegrepesztett gáztároló esetén vizsgáltam. Ez a formáció nagyobb pórusterekkel és kisebb formációnyomással rendelkezik, mint az előbbieken vizsgált. A tárolóra jellemző Knudsen-szám folytonos áramlási tartományt feltételez. Valós termelési adatokhoz képest hasonlítottam össze az algoritmus működését különböző áramlási modelleket feltételezve. Jól látszik a Darcy modell és a siklási tartományra ajánlott Civan modell viselkedése között nincs eltérés és nagy pontossággal jelzi előre a termelési értékeket, míg az NAP modell felülbecsli a gáztermelést.



6. ábra: Modell alkalmazhatóságának vizsgálata

Forrás: saját szerkesztés

Összefoglalás

Tanulmányomban a már meglévő anyagmérleg egyenleteket bővítettem ki, ennek segítségével a micro- és nanoméretű pórusterekben történő gázáramlások vizsgálhatóak. A bővített anyagmérleg egyenlet megoldására egy több lépcsős számolási algoritmust dolgoztam ki, melynek segítségével összehasonlíthatóak a különböző áramlási tartományokra jellemző áramlási modellek.

Számos mérést végeztünk egy magyarországi ultra magas nyomású és hőmérsékletű tömött homokkő formációból származó magmintákon a modell bemenő paramétereinek meghatározására. A programot valamennyi modell esetében lefutattam és elemeztem a kapott eredményeket. Az olajiparban leggyakrabban alkalmazott rétegserkentő eljárás, vagyis a hidraulikus rétegrepesztés programba való integrálásával kiterjesztettem annak alkalmazhatóságát. Gazdaságilag megvizsgáltam az egyes kútkiképzések esetét és összegeztem eredményeimet.

Végezetül az algoritmus alkalmazhatóságát vizsgáltam meg egy magyarországi hidraulikusan rétegrepesztett tároló esetében, mellyel bebizonyítottam annak megfelelő működését és gyakorlati alkalmazhatóságát.

Felhasznált irodalom

- [1] – Haghshenas, B.; Clarkson C.R.; Chen, S.: “New Models for Reserve Estimation and Non-Darcy Gas Flow in Shale Gas Reservoirs”, SPE 167789, 2014, University Calgary Bulletin, 93, 329-40 (2014)
- [2] – Blount, C.W. and Price, L.C.: “Solubility of Methane in Water under Natural Conditions a Laboratory Study”, Department of Geology, Idaho State University, Pocatello, Idaho 83209, <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/5281520/> (1982)
- [3] – Rezaee, R. (eds): “Fundamental of gas shale reservoirs”, Wiley, New Jersey (2015)
- [4] – Klinkenberg, L.J.: “The permeability of porous media to liquids and gases.” (1941)
- [5] - Singh, H.; Javadpour, F.; Ettehadavakkol, A.; Darabi, H.: “Nonempirical apparent permeability of shale”, SPE-170243-PA, SPE Journal Paper Reservoir EvalEng; 17(03):414–24. (2014)