

Szénhidrogén-tárolókban létrejövő formációkárosodás matematikai modellezése¹

SZÜCS PÉTER², ROBONYI ANDRÁS³

A cikk a szénhidrogén-tárolókban jelentős permeabilitás csökkenést okozó formációkárosodási folyamatok matematikai modellezésével foglalkozik. A modell egyenleteinek felállításánál során mind az agyagosság, mind a finomrészecskék hatását figyelembe vesszük. A modell gyakorlati használhatóságát szakirodalomban közölt, laboratóriumi magadatokon mutatjuk be.

P. SZÜCS, A. ROBONYI: Mathematical modelling of formation damage in petroleum reservoirs

A mathematical model for the prediction of formation damage in petroleum reservoirs is presented. The combined effects of clay swelling, external particles invasion, fines generation, migration and retention are quantified. The model was validated using published laboratory data. The successful match between the measured and predicted values of permeability variations demonstrates the accuracy and the capability of the formation damage model.

1. Bevezetés

A hazai kőolaj- és földgázbányászat készleteinek folyamatos csökkenése mellett egyre inkább felértékelődnek azok az emberi tudáson és szakértelmen alapuló módszerek és technológiák, melyek lehetővé teszik, hogy szénhidrogén-tárolóinkat minél nagyobb kizozatali hatásokkal művelhessük le. Ennek a stratégiának a részeként egyre inkább előtérbe kerül a formációvédelem témaköre is. A formációvédelem fő célja az, hogy a különböző műveletek és beavatkozások során a gáz- vagy olajtároló minél kisebb mértékben károsodjon. Hogy ez az elv maradéktalanul megvalósulhasson, természetesen pontosan kellene ismerni a különböző formációkárosodási folyamatokat. Ebben lehet nagy jelentősége a formációkárosodás matematikai modellezésének, hiszen eddig főként csak kvalitatív leírások születtek annak ellenére, hogy a formációkárosodás jelenségének az ismerete szinte egyidős a kőolaj- és földgázbányászattal.

Magyarországon eddig a formációkárosodás komplex modellezésével nem foglalkoztak, ugyanakkor a nemzetközi szakirodalomban található matematikai modellek száma is igen csekélynek tekinthető. A szerzők ebben a tanulmányban az általuk kifejlesztett formációkárosodási modellt ismer-

tetik, mely az elsődleges rétegmegnyitási tevékenységhez kapcsolódik.

2. Formációkárosodás

A különböző formációkárosodási folyamatok, melyek termelékenység-, illetve permeabilitás-csökkenéssel járnak együtt, végigkísérik egy szénhidrogén-tároló „teljes életét”. Károsodás léphet fel az elsődleges rétegmegnyitás (fúrás), a bélészsövezés, a cementezés, a másodlagos rétegmegnyitás (perforálás), a termelés és minden egyéb, a mezőt érintő beavatkozás során. Ha a mechanikai deformációktól eltekintünk, a legfontosabb permeabilitáscsökkentő hatások a kőzet-folyadék kölcsönhatásokhoz köthetők az alábbi három kategória szerint [LEONE, SCOTT 1987].

a) Finomrészecskékhez kapcsolódó károsodás

A fúróiszapban, az iszapfiltrátumban és a kőzet pórusterében mm nagyságrendbe eső, különböző típusú részecskék találhatók. Ha a részecskék mozgásba jönnek, elakadhatnak a szűk pórustorkoknál, ez drasztikus permeabilitás csökkenéssel jár együtt.

b) Agyagok duzzadása

A kőzetvázban és a kőzet pórusterében található agyagásványok egy része nagymértékben duzzadhat, ha az eredeti rétegfolyadék kémiai összetétele a külső beavatkozások hatására megváltozik. Ebben az esetben mind a porozitás, mind a permeabilitás jelentős csökkenésére számíthatunk.

¹ Beérkezett: 1997. február 11-én, készült a Magyar Geofizikusok Egyesülete által 1996. április 25-26-án rendezett Ifjú Szakemberek Ankétján elhangzott, második díjat nyert előadás alapján

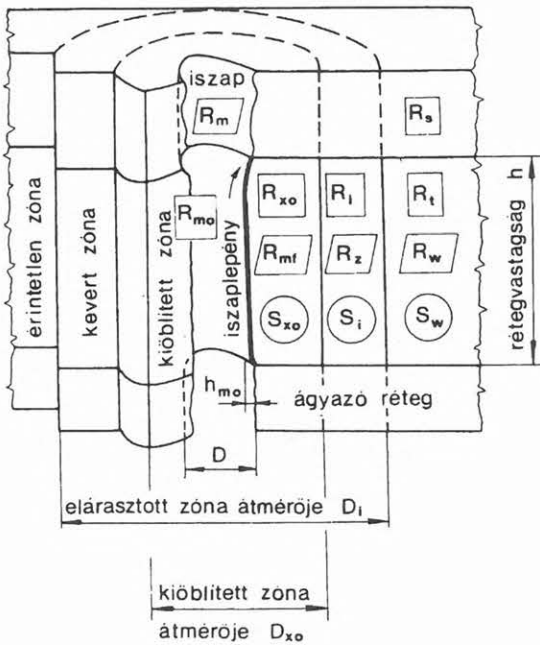
² MTA Bányászati Kémiai Kutatólaboratóriuma, H-3515 Miskolc, Egyetemváros, Pf. 2

³ MOL Rt. KTÁ KFÜ, Miskolci Távvezetési Üzem, H-3527 Miskolc, Sajószigeti út 1.

c) Geokémiai átalakulások

A különböző kémiai reakciók során olyan oldási, lerakódási és csapadékképződési mechanizmusok játszódhatnak le, melyek szintén jelentős porozitás és permeabilitás csökkenéssel járnak együtt.

A sokféle károsító beavatkozás közül leginkább az *elsődleges rétegnyitás*, azaz a *mélyfúrási tevékenység* hat leginkább egy tárolóra. Ezért a továbbiakban az itt lejátszódó folyamatokkal és azok modellezésével foglalkozunk. Maga a fúrási tevékenység igen drasztikus beavatkozás. Jelentős mértékben megváltozik a feszültségállapot, a nyomás- és hőmérsékletviszony. Létrejön az elárasztás, kialakul a külső és a belső iszaplepeny. A fúróluk körül zónák alakulnak ki, melyeket az 1. ábrán láthatunk a jól ismert fajlagos ellenállás és telítettség értékekkel. A károsodási folyamatok a fúróluk falától az elárasztott zóna határáig terjedő térrészben játszódhatnak le az idő függvényében. Ezeket a folyamatokat az alábbiakban felsorolt tényezők befolyásolják a leginkább [LIU, CIVAN 1995].



1. ábra. A fúróluk közvetlen környezete
Fig. 1. The borehole and the surrounding formation

- Részecske és pórusméret eloszlás

Teljesen nyilvánvaló, hogy a finomrészecske és a pórusméret eloszlás nagyon jelentős szerepet játszik a formációkárosodásban. Minél nagyobbak a részecskék a pórusokhoz, a póruscsatornához és a pórustorkokhoz viszonyítva, annál inkább valószínű, hogy eltömődhetnek az áramlási útvonalak. A külső és belső iszaplepeny kialakulásának a folyamatában is ezek a paraméterek játszanak döntő szerepet.

- Mobilizáló és visszatartó erők

A kőzeten belül a finomrészecskék és az apró agyagszemcsék mozgását sokfajta erő befolyásolhatja [KHILAR, FOGLER 1983]. A legjelentősebbnek számító hidrodinamikai erők mellett sokszor figyelembe kell venni a van der Waals elektromos ket-tősrétegnél fellépő erőket, a kémiai kötéseket és a gravitációs erőket.

- Sókoncentrációk

A kőzetbe bekerült fluidum (iszapfiltrátum) sókoncentrációja az egyik fő tényezője az agyagok duzzadását befolyásoló mechanizmusnak. Egy kritikus koncentráció érték alatt pedig megindulhat a pórufalon megtapadó agyagrészecskék leválása.

- Áramlási viszonyok

Azt, hogy milyen áramlási viszonyok alakulnak ki a kőzeten belül, a hidrodinamikai erők határozzák meg. A hidrodinamikai erőket pedig a fúrólukban és a pórusokban lévő nyomásviszonyok alakítják. Itt lép fel annak a jelentősége, hogy a fúrólukat mennyire biztosították túl, azaz mekkora a fúróiszap nyomása az adott mélységszinten a rétegnomással szemben. Az áramlási viszonyok témaköréhez tartozik a pórustérben mozgóképes fázisok számának a meghatározása is.

- Hőmérséklet

A legtöbb esetben a fúrási tevékenység megváltoztatja a kőzetben uralkodó hőmérsékletet. Ez mechanikai szempontból termikus expanziót vagy kontrakciót eredményezhet a formáción belül. E hatás kis mértékben szintén befolyásolhatja a porozitást és a permeabilitást.

- Szerves anyag jelenléte

A különböző laboratóriumi vizsgálatok azt mutatták ki, hogy szerves anyag jelenléte csökkentheti a formációkárosodás mértékét. SARKAR, SHARMA [1990] látványos kísérletek során megmutatta, hogy a filtrátumhoz kevert nehézlaj-származék vagy a pórustérben jelenlévő maradék olajtelítettség jótékonyan hat az agyagásványok stabilizációjára.

- Nedvesedési viszonyok

A különböző részecskék, a kőzet és a pórufalak nedvesedési viszonyai jelentősen befolyásolhatják az egész folyadékrendszer mozgását. A kőzetek általában víznedvesítő jellege miatt nagy különbségek adódhatnak attól függően, hogy a pórustérben csak víz vagy esetleg olajfázis is jelen van.

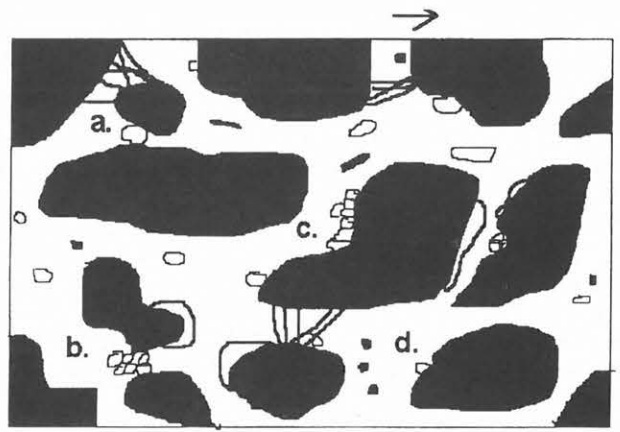
- Kapilláris nyomás

Bizonyos esetekben a kapilláris nyomás értékek erősen befolyásolhatják annak a kritikus hidrodinamikai gradiensnek az értékét, melynél megkezdődik a finomrészecskék leszakadásának a folyamata a pórusfalról.

3. A formációkárosodás matematikai modellezése

Az általános áttekintés után következhet a formációkárosodási modell leírása. Ebben a részben bemutatjuk egy korábbi modellünk [SZÜCS, ROBONYI 1995] továbbfejlesztett változatát. A fejlesztésnél figyelembe vettük azokat a kritikai észrevételeket, melyet CIVAN [1992] tett egy elemzés során, amikor összehasonlított hat különböző, a szakirodalomban publikált formációkárosodási matematikai modellt.

Egy matematikai modell megalkotásánál fontos pontosan definiálni azokat a főbb jelenségeket, melyek egy rendszerben lejátszódó folyamatokért a leginkább felelősek. A formációkárosodás folyamatának a megértéséhez szükséges tudnunk azt, hogy mi játszódik le a pórustérben. Ehhez alkottunk egy pórustér modellt, mely a 2. ábrán látható. A főbb jelenségeket a., b., c. és d. betűkkel jelöltük. Először beszéljünk a finomrészecskékről. A fúróluk felől kialakuló nyomásgradiens hatására a pórustérben található szuszpenzió, melyben külső és belső eredetű finomrészecskék találhatók, elkezd áramlani. A szuszpenzióban lévő finomrészecskék egy része eltömheti a pórustorokokat és póruscsatornákat. Az eltömődés kétféle módon jöhet létre. Egy részecske önmagában is akkora méretű, hogy elzár egy csatornát (a. eset). Ezt a nemzetközi szakirodalom *plugging* névvel jelöli. Több részecske torlódik össze egy pórustoroknál (b. eset). Ezt a típusú elzáródást *bridging* névvel illetik. Természetesen a részecskék a pórusfalakon is lerakódhatnak (c. eset), illetve a hidrodinamikai erők hatására onnan újra leválhatnak. A finomrészecskék mellett az agyagásványok lehetnek felelősek még jelentős permeabilitás csökkenésért. Mivel formációkárosodási szempontból eltekinthetünk a szerkezeti és lamináris agyagok hatásától, ezért a diszperz agyagokra [BASSIOUNI 1994] kell koncentrálni. A diszperz agyagok a pórustéren belül háromféleképpen helyezkedhetnek el. Megkülönböztethetők a diszkrét agyag szemcsék (d. eset), a pórus-áthidaló agyagok és a pórusfalat kibélelő agyagok. A diszperz agyagok réteggárosító hatása a duzzadó mechanizmusokon alapszik.



2. ábra. A pórustér modellje
Fig. 2. The model of the pore-space

Az alábbiakban részletezett egyenletek leírásánál a következő modellfeltételekkel dolgoztunk:

- a közeg izotróp;
- a réteggárosító folyamat izotermális;
- az egydimenziós, horizontális, egyfázisú áramlás Darcy jellegű;
- a gravitációs hatásoktól eltekintettünk;
- a permeabilitás csökkenése a finomrészecskék lerakódásával és eltömő mechanizmusával, valamint az agyagok duzzadásával magyarázható.

Ezek után rátérhetünk azoknak az egyenleteknek a leírására, melyek lehetővé teszik a permeabilitás és a porozitás időtől és helytől való függésének a megadását a porózus közegen belül. Egy formáción belül a permeabilitás csökkenése összefügg az effektív porozitás csökkenésével, melyet matematikailag így is írhatunk:

$$K / K_0 = f(\varphi / \varphi_0), \quad (1)$$

ahol K_0 és φ_0 az érintetlen kőzet permeabilitása és effektív porozitása. Amint a fúrási tevékenység eléri az adott réteget, a porozitás értéke változhat.

$$\varphi = \varphi_0 - \sigma / \rho_p \quad (2)$$

A (2) egyenletben σ fejezi azt az egységnyi térfogatra jutó tömegmennyiséget, mely az effektív porozitást csökkenti, ρ_p pedig ennek a pórustérbe bekerült anyagnak a sűrűségét jelöli. Az (1) és (2) egyenletet figyelembe véve, valamint a σ_t jelölést bevezetve:

$$K / K_0 = f(\sigma / \sigma_t), \quad (3)$$

illetve hatványfüggvény kapcsolatot feltételezve (m — permeabilitás csökkenési index)

$$K / K_0 = (\sigma / \sigma_t)^m. \quad (4)$$

A σ_t a σ maximális értéke, amikor a porozitás zérussá válik. Így a (2) egyenlet alapján

$$\sigma_t = \rho_p \varphi_0. \quad (5)$$

A fenti egyenletekben szereplő σ a két fő károsító folyamatnak megfelelően két részre bontható:

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_{sw}, \quad (6)$$

ahol σ_p a finomrészecskék pórusokban való lerakódását fejezi ki, míg σ_{sw} a folyadék abszorpció hatására létrejövő agyagduzzadást fejezi ki. A kőzetmátrix által abszorbeált folyadék mennyisége FICK második törvénye alapján határozható meg:

$$\partial \rho_{l,s} / \partial t = D \partial^2 \rho_{l,s} / \partial x^2 \quad (7)$$

ahol D a diffúziós tényező, x a pórus felszínétől mért távolság, $\rho_{l,s}$ a kőzet által abszorbeált folyadék koncentrációja. A (7) egyenlet megoldására a kezdeti és peremfeltételeket figyelembe véve az alábbi összefüggést kaphatjuk:

$$S = Bt^{0.5}, \quad (8)$$

ahol S a folyadék abszorpció sebessége egységnyi térfogatra vonatkoztatva, B a modell egyik paramétere. A kőzet által felvett folyadékot is számításba véve meghatározható a permeabilitás csökkenés azon része, mely az agyagduzzadással kapcsolatos:

$$d(K/K_0)_{sw} / dt = ABt^{-0.5} [(K/K_0)_{sw} - (K_t/K_0)] \quad (9)$$

ahol A arányossági tényező, míg K_t egy olyan permeabilitás határérték, mely akkor lépne fel, ha a folyamat végtelen ideig tartana. Az sw index az agyag duzzadásra utal. A (9) egyenlet megoldása az alábbi formában írható:

$$(K/K_0)_{sw} = (K_t/K_0) + C \exp(2ABt^{0.5}). \quad (10)$$

Az A , B , C és K_t modell paramétereiket a későbbiekben ismertetett inverziós algoritmus segítségével lehet meghatározni. Az agyagok duzzadása után rátérhetünk a részecskék mozgásának a modellezésére.

$$\partial \sigma_p / \partial t = k_1 \mu \rho_{p,f} (\sigma_t - \sigma_p) - k_2 \sigma_p [(-\partial p / \partial x) - (-\partial p / \partial x)_{cr}] / U [(-\partial p / \partial x) - (-\partial p / \partial x)_{cr}] \quad (11)$$

A (11) egyenlet a pórusokba lerakódott finomrészecskék mennyiségét fejezi ki. A folyamat két részből tevődik össze. Az egyenlet jobb oldalának az első tagja a szuszpenzióból való lerakódás jelenségét írja le. Emellett a már kivált részecskék egy kritikus nyomás gradiens hatására újra mozgásba kerülhetnek. Ezt fejezi ki az egyenlet jobb oldalának a második tagja. A k_1 és k_2 modell paramétereiket szintén a későbbiekben ismertetett algoritmus segítségével határozhatjuk meg. A szivárgási sebesség meghatározásánál a Darcy-összefüggést érvényesnek tételezzük fel:

$$u = (K/\mu)(-\partial p / \partial x), \quad (12)$$

ahol p a fluidum nyomását jelöli egy adott x helyen. Ezenkívül a formációkárosodási modell lezárása-

ként az agyagmérleg-egyenleteket írhatjuk fel mind a folyadék, mind pedig a szilárd fázisra a következőképpen:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_{l,f}) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{l,f} u) + S = 0, \quad (13)$$

és

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_{p,f} + \sigma_p) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{p,f} u) = 0, \quad (14)$$

ahol $\rho_{l,f}$ és $\rho_{p,f}$ az áramló szuszpenzió folyadék és finomrészecske koncentrációja.

A modell paramétereinek a meghatározása

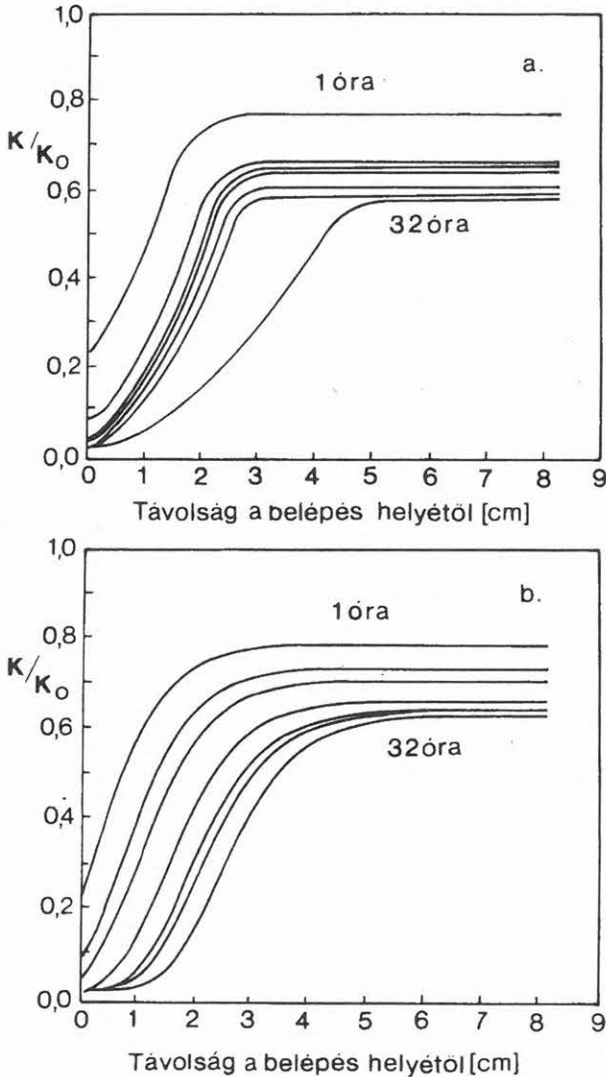
A fenti egyenletekben szereplő hat modell paraméter (A , B , C , k_1 , k_2 , K_t) meghatározására inverziós algoritmust állítottunk fel. A parciális differenciál-egyenletek megoldására a véges differenciák módszerét alkalmaztuk [SZARKA 1991]. Az inverziós algoritmus magjaként a P-normát [STEINER 1991] használtuk. A globális minimumhely megtalálását biztosító algoritmusok közül a mérnöki gyakorlatban leginkább elterjedt Simulated Annealing [KIRKPATRICK et al. 1983] módszert építettük be. Az inverziós algoritmus teljes felépítését megkönynyítette, hogy támaszkodhattunk korábbi munkáinkra. SZÜCS [1996] bemutatta a Simulated Annealing adaptálásának előnyeit a legkülönbözőbb statisztikai normákra. SZÜCS és CIVAN (1996) pedig mélyfúrás geofizikai eljárást dolgozott ki.

A matematikai modell tényleges kipróbálásához mérési adatokra volt szükségünk. A modell paramétereinek a meghatározásánál mi is laboratóriumban mért magadatokat használtunk fel, ahogy a többi eddig közölt károsodási modellnél tették. Az elméleti vizsgálatok során a mások által is feldolgozott irodalmi alap-adatrendszerek adaptálásának két fő előnye van. Egyrészt kezdetben mentesülünk a fáradságos és nagy pontosságot igénylő laboratóriumi vizsgálatoktól. Másrészt pedig így a későbbiekben lehetőségünk lesz összehasonlító vizsgálatokra, melyek különböző modellekre terjedhetnek ki. Természetesen a jövőben saját mérési anyagon is be szeretnénk mutatni a javasolt modell alkalmazhatóságát.

A tényleges inverziós vizsgálatok HART et al. [1960] adatainak a felhasználásával történtek. Ahhoz, hogy követni lehessen a formációkárosodás folyamatának jellegét, valamilyen, a jelenséggel szoros kapcsolatban lévő jellemző tértől és időtől függő mérésre van szükségünk. Ez a jellemző mennyiség leginkább a permeabilitás lehet. HART és szerzőtársai egy 8,2 cm hosszú agyagos homokkő magon keresztül iszapfiltrátumot áramoltattak,

majd mérték az idő és a hely függvényében, hogy hogyan alakul a permeabilitás a kezdeti értékhez viszonyítva. A 3. ábra (a) része a mérési eredményeken alapuló permeabilitás görbéket mutatja be, míg a (b) rész a formációkárosodási modell alapján számítottakat. A 3. ábrán jól követhető, hogy a károsodás kialakulása a korai időszakban a legnagyobb mértékű. Emellett azt is láthatjuk, hogy folyamatos elárasztás mellett a permeabilitás profil még 32 óra elteltével is változhat. A mért és számított permeabilitás görbék vizuális hasonlósága és a statisztikai mérőszámok alapján megállapíthatjuk, hogy már egy viszonylag egyszerű, hat ismeretlen-

nel rendelkező matematikai modellel is kielégítően modellezhető a formációkárosodás összetett folyamata. A számítások során felhasznált adatokat és végeredményeket az 1. táblázatban tekinthetjük meg.



3. ábra. A kezdeti permeabilitással normált permeabilitás értékek az idő (1, 2, 3, 7, 14, 18 és 32 óra elteltével) és a hely függvényében: (a) HART et al. [1960] mérési adatai; (b) a szimuláció alapján kapott értékek

Fig. 3. Comparison of local permeability to initial permeability ratio for HART et al. [1960]. Case after 1, 2, 3, 7, 14, 18 and 32 h of flow: (a) experimental and (b) simulated

Kezdeti feltételek:
$\sigma_{p,t=0} = 0 \text{ g/cm}^3$
$(\rho_{p,f})_{t=0} = 0 \text{ g/cm}^3$
Peremfeltételek:
$(\rho_{p,f})_{x=0} = 0,00043 \text{ g/cm}^3$
$p_{x=0} = 3,72 \text{ atm}$
$p_{x=8,2} = 1,00 \text{ atm}$
Mag és fluidum adatok:
$\varphi_0 = 0,312$
$K_0 = 0,13 \text{ darcy}$
$m = 3$
$L = 8,2 \text{ cm}$
$\mu = 0,685 \text{ cp}$
$\rho_l = 1 \text{ g/cm}^3$
$\rho_p = 25 \text{ g/cm}^3$
A modell paramétereit:
$A = -0,4583$
$B = 0,012 \text{ g/cm}^3 / \text{s}^{0,5}$
$C = 0,41$
$k_1 = 5 \text{ cm}^2 / \text{g}$
$k_2 = 0,0000012 \text{ cm}^2 \text{ s} / \text{g}$
$(K_t / K_0) = 0,59$

1. táblázat. HART et al. [1960] adatai és a modell paramétereit
Table 1. The data of HART et al. [1960] and the model parameters

Összefoglalás

Az optimális fűrészi technológia és formációvédelmi stratégia kialakításához nélkülözhetetlenek azok az információk, melyek egy adott rétegben várható formációkárosodási folyamatokkal kapcsolatosak. A szerzők ebben a tanulmányban egy olyan matematikai modellt alkottak, mely elősegítheti a formációkárosodás jelenségének jobb megértését. A modell gyakorlati alkalmazhatóságát laboratóriumi magadatokkal történt összehasonlítás bizonyította. Távlati célként két fő irány jelölhető

ki. Egyrészt fontos a saját mérési adatrendszer előállítás és a matematikai modell továbbfejlesztése. Másrészt kiemelnék, hogy a jelenlegi modell nem in situ mérési adatokon alapszik. Fontos lenne, hogy a laboratóriumi magadatok mellett más, közvetlen mérési anyagra is támaszkodhassunk. A szerzők jelenleg azon dolgoznak, hogy hogyan használhatók a mélyfúrési geofizika adatai és információi a formációkárosodás mértékének meghatározásában [SZÜCS, HURSÁN 1996]. Ez új fejezetet nyithat meg az amúgy széles körben használt mélyfúrési geofizika alkalmazásában.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk kifejezni köszönetünket az OTKÁ-nak (F16804, W15316), melynek anyagi támogatása tette lehetővé az itt ismertetett munka megvalósítását.

Melléklet

A jelen munkában alkalmazott jelölések

<i>A</i>	modell paraméter;
<i>B</i>	modell paraméter;
<i>C</i>	modell paraméter;
<i>D</i>	diffúziós együttható [m^2/s];
<i>f</i>	függvény;
<i>k₁</i>	modell paraméter [m^2/kg];
<i>k₂</i>	modell paraméter [m^2s/kg];
<i>K</i>	permeabilitás [m^2];
<i>K_i</i>	modell paraméter [m^2];
<i>p</i>	nyomás [kg/m^2];
<i>S</i>	a folyadék abszorpció sebessége egységnyi térfogatra normálva [$kg/m^3/s$];
<i>t</i>	idő [s];
<i>u</i>	szivárgási sebesség [$m^3/s/m^2$];
<i>U</i>	egységugrás függvény;
<i>x</i>	távolság [m];

Görög betűk:

ϕ	effektív porozitás;
σ	pórustérbe kerülő, egységnyi térfogatra vonatkoztatott tömegmennyiség [kg/m^3];
ρ	sűrűség, vagy koncentráció [kg/m^3];
μ	dinamikus viszkozitás [$kg/m/s$];

Alsó indexek:

0	kezdeti érték;
cr	kritikus;

<i>i</i>	index;
<i>l</i>	folyadék;
<i>l_f</i>	a folyadék fázis a szuszpenzióban;
<i>l_s</i>	folyadék a kőzetmatrixban;
<i>p</i>	részecske;
<i>p_f</i>	részecske a szuszpenzióban;
<i>s</i>	kőzetmatrix;
<i>sw</i>	duzzadás;
<i>t</i>	totális, teljes;
<i>v</i>	végző állapot;

Felső index:

<i>m</i>	permeabilitás csökkenési index.
----------	---------------------------------

HIVATKOZÁSOK

- BASSIOUNI Z. 1994: Theory, measurements, and interpretation of well logs. SPE Textbook Ser. 4, 1–372. Richardson, TX
- CIVAN F. 1992: Evaluation and comparison of the formation damage models. Paper SPE 23787 presented at the SPE International Symposium on Formation Damage held in Lafayette, Louisiana
- HART R. T., FEKETE T., FLOCK D. L. 1960: The plugging effect of bacteria in sandstone systems. Can. Mining Metall. Bull. 53, 495–501
- KHILAR K. C., FOGLER H. S. 1983: Colloidally induced fines migration in porous media. Review in Chemical Engineering 4, 142, 41–108
- KIRKPATRICK S., GELATT C. D., VECCHI M. P. 1983: Optimization by simulated annealing. Science 220, 671–680
- LEONE J. A., SCOTT E. M. 1987: Characterization and control of formation damage during waterflooding of a high-clay-containing reservoir. Paper SPE 16234 presented at Society of Petroleum Engineers Symposium, Oklahoma City
- LIU X., CIVAN F. 1995: Formation damage by fine migration including effects of filter cake, pore compressibility, and non-Darcy flow — A modelling approach to scaling from core to field. Paper SPE 28980 presented at the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in San Antonio, TX
- SARKAR A. K., SHARMA M. M. 1990: Fines migration in two-phase flow. Journal of Petroleum Technology 42, 646–652
- STEINER F. (Ed.) 1991: The most frequent value. Introduction to a modern conception of statistics. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1–315

- SZARKA Z. 1991: Alkalmazott matematika (Parciális differenciálegyenletek). J 14–1742, Tankönyvkiadó, Budapest, 1-486
- SZÜCS P. 1996: Theoretical and practical consequences of the global optimization methods. Acta Geodetica Geophysica Hungarica **30** (2–4), 301–312
- SZÜCS P., CIVAN F. 1996: Multi-layer well log interpretation using the simulated annealing method. Journal of Petroleum Science and Engineering **14**, 209–220
- SZÜCS P., HURSÁN L. 1996: A mélyfúrési geofizika alkalmazásának lehetőségei a formációkárosodás mértékének meghatározásában. Kőolaj- és Földgázbányászati Kommunikáció '96 c. ankét, Szolnok
- SZÜCS P., ROBONYI A. 1995: An applicable formation damage model in sandstone reservoirs. Publications of the University of Miskolc, Series A, Mining **50**, 267–273. Miskolc, Hungary