

Kombinált Analízis Rendszer a Proppant Kiválasztás Optimalizálására

Lengyel Tamás, Jobbik Anita

Bevezetés

A hidraulikus rétegrepesztés célja, hogy stimulálva a kútkörnyéki zónát, a kút beáramlási tulajdonsága szignifikánsan megnövekedjen. Ehhez nagy konduktivitású kitámasztott repedésekre van szükség. A rétegrepesztési művelet sikeressége nagymértékben függ a kitámasztott repedések konduktivitásától, amely a "proppant pack" látszólagos permeabilitásának illetve a repedés szélességének szorzata. A repesztett kút produktivására egyértelműen hatással van a proppant, azaz kitámasztó anyag, illetve a kőzet fala közötti kölcsönhatás. A proppant szemcsék beágyazódnak a formációba, illetve a magas záródási nyomások miatt deformálódnak, ami összességében jelentős csökkenést eredményezhet a konduktivitást tekintve. A proppant mérete, a proppant és a formáció Young modulusza és Poisson tényezője, illetve a záródási nyomás, olyan tényezők, melyek befolyásolják a proppant beágyazódását, illetve ezen keresztül a repedés szélesség csökkenés mértékét, melyek együttesen hatással vannak a repedés konduktivitásának csökkenésére, ami jelentősen redukálhatja a termelő kutak produktivitását. Ez a hatás gyengén konszolidált formációkban még jelentősebb lehet, ezért elengedhetetlen hogy megfelelően vizsgáljuk és megértsük a proppant beágyazódás elméleti hátterét.

A jelenség vizsgálatának egyik legszofisztikáltabb módja, a statikus erőegyensúlyi állapot analízise. Az analitikus analízis egyik legfőbb előnye az empirikus kísérletekkel szemben, hogy a peremfeltételeknek megfelelően, a gyakorlatban is előforduló, széles tartományban használható. Az empirikus modellek talán pontosabban szimulálják a valóságot, ugyanakkor ezek a modellek csak abban a szűk tartományban használhatók, amelyben származtatták azokat. Ezen kívül, az empirikus összefüggések gyakran tartalmaznak különböző illesztési együtthatókat, melyeket csak kísérleti úton lehet meghatározni (paraméteres egyenletek). A kísérleti út, főként magokon végzett méréseket jelent, melyekhez sokszor bonyolult mérési rendszerek és speciális berendezések szükségesek. Mindent egybevetve, az analitikus modellre épült analízis rendszer széles tartományban használható, nem beszélve arról az esetről, hogy ha kísérleti adatok elérhetők, akkor az analitikus egyenlet ezekhez szintűgy illeszthető.

A kutatás célja

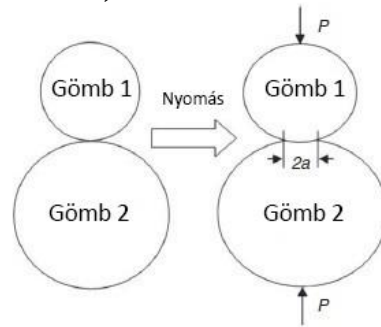
Az iparban a vállalatok, és legfőképp a projektmenedzserek, főként a projekt megtérülésében érdekeltek. A hidraulikus rétegrepesztési művelet megtérülése jelentős mértékben függ a kút megnövelt produktivitásától. A kutatómunka során, több modell és megfontolás integrációjaként egy új analízis rendszer került kifejlesztésre, melynek segítségével különböző érzékenységi vizsgálatok végezhetők el, illetve a proppant kiválasztásának egyfajta technikai optimalizációja is kivitelezhető.

A kutatás eredményeként egy új módszer érhető el a proppant kiválasztására, mely integrálja a proppant beágyazódás jelenségét vizsgáló modellt és a „Unified Fracture Design” (UFD, Economides és társai 2002) optimalizációs modellt. Gyakorlati szempontból, az analízis rendszer lehetővé teszi a megfelelő kitámasztó anyag (méret, elasztikus modulusz, fajsúly), illetve a proppant koncentráció szerinti mennyiség meghatáro-

zását, amely ahhoz szükséges, hogy az előzetesen meghatározott (nettó jelenérték számítások illetve rezervoár mérnöki megfontolások alapján) produktivitási indexet elérjük a repesztési művelet során. Ezen kívül, az analitikus modell által számított konduktivitás értékek összehasonlíthatók a proppant gyártó cégek adataival, egy alternatív lehetőséget kínálva ezáltal a konduktivitás értékek meghatározására.

ELMÉLETI HÁTTÉR

A Li' és társai (2015) által kifejlesztett analitikus modell elméleti úton közelíti a proppant beágyazódás jelenségét. Fontos megjegyezni, hogy a modell származtatása kapcsán bevezetett feltételezések bizonyos korlátokat jelentenek. A feszültség-alakváltozás analízis során csak deformáció illetve beágyazódás feltételezett, azaz a modell nem számol a proppant tönkremenetelével. Ez azt jelenti, hogy az egyenletek csak olyan feszültségi tartományban használhatók, amely még nem okozza a kitámasztó anyag tönkremenetelét (*proppant crush*).



1. ábra: Elasztikus gömbök alakváltozása

Forrás: Li' és társai (2015)

A modell származtatása a Wu és társai által publikált (2001), két érintkező gömb feszültség-alakváltozás egyenletével kezdődik, mely az 1. ábrán látható. Gömb 1 és 2 a terhelésnek megfelelően deformálódik. A gömbök érintkezési felülete egy kör, melynek sugara (α) a következő összefüggéssel számítható:

$$\alpha = \left(\frac{3}{4} P C_E \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{\frac{1}{3}},$$

1

ahol α a kör sugara (mm); P a gömbökre ható külső erő (N); R_1 az 1-es gömb rádiusza (mm); R_2 a 2-es gömb rádiusza (mm). C_E (in MPa^{-1}) pedig a következőképp definiálható:

$$C_E = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2},$$

2

ahol ν_1 az 1-es gömb Poisson tényezője (dimenzió nélküli); ν_2 a 2-es gömb Poisson tényezője (dimenzió nélküli); E_1 az 1-es gömb Young modulusza (MPa); és E_2 a 2-es gömb Young modulusza (MPa).

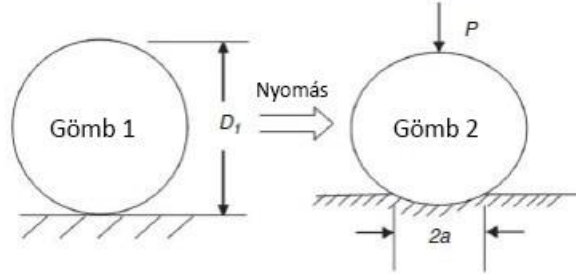
Wu és társai (2001) bebizonyították, hogy a gömbök középpontjai között távolság változása a következő összefüggéssel írható le:

$$\alpha' = \frac{\frac{3}{4} P C_E}{\left(\frac{3}{4} P C_E \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{\frac{1}{3}}},$$

3

ahol α' a gömbök középpontjai közötti távolság változása (mm).

Ha $R_2 \rightarrow \infty$, akkor a 2-es gömb felülete síklappá transzformálódik, így a két objektum egy gömb és egy síklap. A 2. ábra demonstrálja a gömb és a síklap közti kölcsönhatást. Megfigyelhető, hogy α' -re két tényező van hatással: az 1-es gömb sugarának változása, ami a *deformáció*, illetve a *beágyazódás*.



2. ábra: Gömb és felület közötti kölcsönhatás

Forrás: Li' és társai (2015)

A 2. ábrán látható szituációra a következő módosított összefüggés vezethető le a 3. egyenlet alapján:

$$\alpha' = \frac{2(\frac{3}{8}PC_E D_1)^{\frac{2}{3}}}{D_1},$$

4

ahol D_1 az 1-es gömb átmérője (mm). Ennél a pontnál a 4. egyenlet két tényezőt tartalmaz, egyrészt a gömb deformációját, másrészt a gömb "síklapba" való beágyazódását. Ahhoz, hogy megkapjuk az egyenletet, amely leírja a gömb deformációját, a 4. egyenlet másik befolyásoló tényezőjének (a beágyazódást) szeparációja szükséges. Ehhez feltételezzük azt, hogy a síklap elasztikus tényezője végtelen, tehát a gömb nem ágyazódik be a síklapba. Ebben az esetben α' csak a deformáció hatását tartalmazza. Így a gömb deformációja a következő összefüggéssel fejezhető ki:

$$\beta = \frac{2(\frac{3}{8}PD_1 \frac{1-\nu_1^2}{E_1})^{\frac{2}{3}}}{D_1}.$$

5

Az 5. egyenlet alapján megállapítható, hogy a deformációt csak a gömbre ható külső erő; a gömb átmérője, elasztikus és Poisson tényezője befolyásolja.

Mivel α' a deformáció és beágyazódás összege, ezért kombinálva a 4. és 5. egyenletet, a gömb síklapba való beágyazódása a következő összefüggéssel számítható:

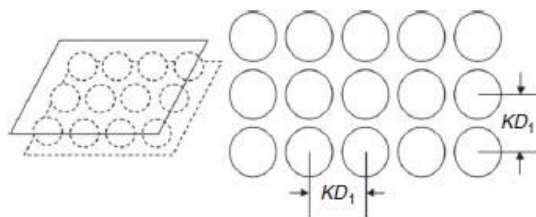
$$h = \alpha' - \beta = \frac{2(\frac{3}{8}PD_1)^{\frac{2}{3}}}{D_1} \left[\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} \right)^{\frac{2}{3}} \right], \quad (6)$$

ahol h a beágyazódás mértéke (mm).

Valódi Szituáció

Ahhoz, hogy közelítsük a repedés valódi viselkedését, a proppant szemcsék két síklap közötti helyzetét kell megvizsgálni. A repedésben elhelyezkedő proppant szemcsék súlya elhanyagolható, így azt az analitikus modell (Li' és társai 2015) nem veszi figyelembe, így azt feltételezi, hogy a proppantokra eső feszültségek illetve az alsó és felső

sík és gömbök érintkezési felülete ugyanaz. Ezen kívül egyenletes proppant eloszlás feltételezett.



3. ábra: Proppant elhelyezkedés két síklap között

Forrás: Li' és társai (2015)

A 4. ábrán megfigyelhető egyetlen proppant stressz analízise. Ha összehasonlítjuk a 2. és 4. ábrát, megfigyelhető, hogy míg a 2. ábrán a terhelés mértékegysége N, addig a 4. ábrán a feszültség mértékegysége MPa. A feszültség, illetve az érintkező határfelületekre ható terhelés közötti összefüggés a következő:

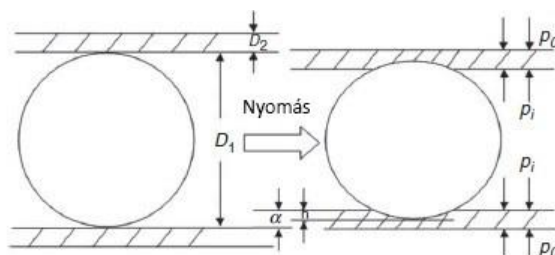
$$P = p(KD_1)^2$$

ahol P az érintkező határfelületekre ható terhelés (N), p a záródási nyomás (MPa), K a távolság koefficiens (dimenzió nélküli); és D_1 a proppant átmérője (mm).

Ezen felül, a záródási nyomásra felírható a következő összefüggés:

$$p = p_0 - p_i$$

ahol p_0 a formáció nyomás (MPa); és p_i a repesztő fluidum nyomása (MPa). Fontos megjegyezni, hogy ha $p_0 < p_i$, ami a repesztési művelet során fordul elő (a repesztő fluidum nyomása meghaladja a formáció in-situ feszültségét, így repedés keletkezik), nincs proppant deformáció és beágyazódás sem. Ha $p_0 > p_i$, ami a repesztési művelet után beállt nyomásviszonyokra jellemző (a nagy nyomású szivattyúk kikapcsolása után nincs további többletnyomás, ami fenntartaná a repedéseket, a repesztő fluidum tehát kiszűrődik, így a fluidum nyomása csökken), a proppantok deformálódnak illetve beágyazódnak. A továbbiakban levezetett egyenletek csak akkor értelmezhetők ha $p_0 > p_i$.



4. ábra: Egyetlen proppant stressz analízise

Forrás: Li' és társai (2015)

A formáció vastagsága D_2 -vel jelölt. A záródási nyomás hatására a formáció deformálódik ami Hooke törvénye szerint a következőképp számítható:

$$\Delta D_2 = D_2 \frac{p}{E_2}$$

ahol D_2 a formáció vastagság (mm); és ΔD_2 a réteg deformációja (mm), ami gyakorlatilag a proppant beágyazódás mértékét mutatja. Behelyettesítve a 7. és 9. egyenletet a 4. egyenletbe a következő összefüggés áll fenn:

$$\alpha = 1.04D_1(K^2pC_E)^{\frac{2}{3}} + D_2\frac{p}{E_2},$$

10

ahol α a repedés szélesség változását jelenti (mm). Fontos megjegyezni, hogy az α értéke valójában a repedés szélesség változás *felét* jelenti, de az egyszerűség kedvéért a következőkben szimplán repedés szélesség változásként hivatkozom rá.

Folytatva a behelyettesítést (a 7. egyenletet az 5. egyenletbe, míg a 7. és 9. egyenletet a 6. egyenletbe) a következő összefüggéseket kapjuk:

$$\beta = 1.04D_1(K^2p\frac{1-\nu_1^2}{E_1})^{\frac{2}{3}},$$

11

$$h = 1.04D_1(K^2p)^{\frac{2}{3}}\left[\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1}\right)^{\frac{2}{3}}\right] + D_2\frac{p}{E_2},$$

12

ahol β a proppant deformáció (mm); h a proppant beágyazódás (mm); E_1 a proppant elasztikus modulusza (MPa); és E_2 a formáció elasztikus modulusza (MPa).

Multilayer Pattern

Az eddigiekben a proppant deformáció és beágyazódás úgy nevezett “single-layer pattern”, azaz egyetlen proppant réteg esetében volt értelmezve. A gyakorlatban “single-layer pattern” helyett “multilayer pattern”-eket alakítanak ki, ami annyit tesz, hogy több proppant réteg helyezkedik el egymáson. Így tehát elengedhetetlen, hogy ne csak a formáció és a kitámasztó anyag közötti, de a proppantok között fellépő kölcsönhatásokat is vizsgáljuk.

A cikk terjedelmi korlátai miatt, a további levezetések nem részletezettek. A proppantok közötti kölcsönhatások (deformáció és beágyazódás) vizsgálatánál, egységes proppant tulajdonságok feltételezettek, azaz a proppant szemcsék mérete, illetve elasztikus tulajdonságuk megegyezik. Ezek alapján a következő egyenletek állapíthatók meg “multilayer pattern” esetében:

$$\alpha = 1.04D(K^2p)^{\frac{2}{3}}\left\{\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1}\right)^{\frac{2}{3}} + \frac{D_1}{D}\left[\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1}\right)^{\frac{2}{3}}\right]\right\} + D_2\frac{p}{E_2},$$

13

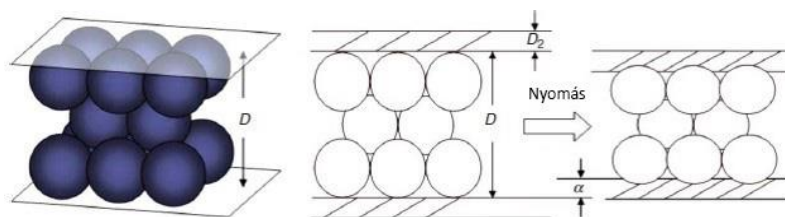
$$\beta = 1.04D(K^2p\frac{1-\nu_1^2}{E_1})^{\frac{2}{3}},$$

14

$$h = 1.04D_1(K^2p)^{\frac{2}{3}}\left[\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1}\right)^{\frac{2}{3}}\right] + D_2\frac{p}{E_2},$$

15

ahol D a kezdeti repedés szélesség (mm), ahogy azt az 5. ábra mutatja, α a repedés szélesség változása “multilayer pattern” esetében (mm); β a “multilayer pattern” deformációja (mm); és h a proppant beágyazódás mértéke (mm) “multilayer pattern” esetén, ami megegyezik a “single-layer pattern” esettel, hisz csak az alsó és felső proppant réteg érintkezik a formációval.



5. ábra: „Multilayer pattern” a repedésben

Forrás: Li' és társai (2015)

REPEDÉS KONDUKTIVITÁS

Származtatás

A repedés konduktivitás a repedés áteresztőképességének és szélességének szorzata. A kitámasztott repedés permeabilitása arányos a “proppant pack” porozitásával, a pórus torok sugarával és az ún. pórus tekervényességével (tortuosity). Ezeket a paramétereket az előzőekben vizsgált beágyazódás, deformáció, illetve ezek összege a repedés szélesség változása befolyásolja.

Yang és Wei (2004) levezettek egy általánosan elfogadott egyenletet a permeabilitás meghatározására, mely a következőképp alakul:

$$k = \frac{\Phi r^2}{8\tau^2}$$

16

ahol k a permeabilitás (μm^2 , ami 1 Darcy); Φ a porozitás (dimenzió nélküli); r a pórus torok sugara (μm); és τ a pórus tekervényessége (dimenzió nélküli).

A 7. ábrán prezentált “proppant pack” esetében a porozitás, a pórus torok sugár és a pórus tekervényesség matematikai úton könnyedén meghatározható zéró záródási nyomás esetén. Az egyenletek a következők:

$$\phi_0 = \frac{4\sqrt{2}R_1^3 - \frac{4}{3}\pi R_1^3}{4\sqrt{2}R_1^3} = 0,25951$$

17

$$r_0 = 1000 \frac{2\sqrt{3}-3}{3} R_1$$

18

$$\tau_0 = \frac{\sqrt{\left(\frac{2}{3}R_1\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{3}R_1\right)^2}}{\frac{2}{3}R_1} = \frac{\sqrt{6}}{2}$$

19

ahol a nullával indexelt tagok zéró záródási nyomásra érvényesek.

Ha a záródási nyomás nagyobb, mint nulla, az egyes egyenletek a következőképp alakulnak (Li' és társai 2015):

$$\phi = \frac{D\phi_0 - 2\beta}{D - 2\beta},$$

20

$$r = \left(\frac{D-2\beta}{D}\right) r_0,$$

21

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{D-2\beta}{D}\right)^2 (\tau_0^2 - 1) + 1},$$

22

A repedés konduktivitás definíciója alapján, kombinálva a 16., 20., 21. és 22. egyenleteket a következő egyenlet áll elő:

$$F_{CD} = kw = \frac{(D\phi_0 - 2\beta)(D - 2\beta)r_0^2}{80\left[\left(\frac{D-2\beta}{D}\right)^2 (\tau_0^2 - 1) + 1\right]D^2} (D - 2\alpha)$$

23

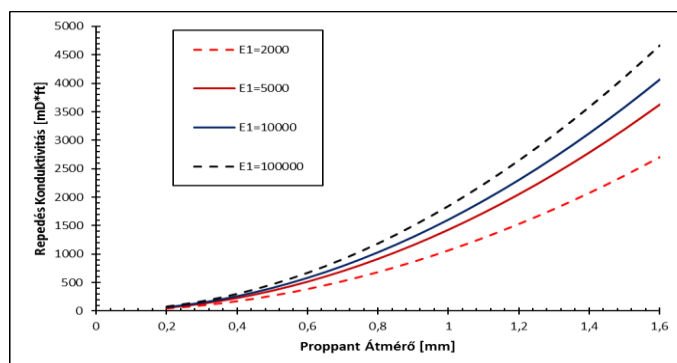
ahol F_{CD} a repedés konduktivitás ($\mu\text{m} \cdot \text{cm}$); w a repedés szélesség nem-zéró záródási nyomás esetén (cm); és α a repedés szélesség változás fele a 13. egyenlet alapján (mm).

EREDMÉNYEK

A következőkben a legfontosabb érzékenységi vizsgálatok eredményei lesznek bemutatva, elemezve ezeket fontos következtetések állapíthatók meg.

A proppant méret és a záródási nyomás

A következő érzékenységi vizsgálatok paraméterei az alábbiakban meghatározottak: $\nu_1=\nu_2=0.2$, $E_2=2000$ MPa, $D=5$ mm, $D_2=20$ mm, $p=20$ MPa, míg E_1 2000 és 100000 MPa között, és a proppant átmérő 0,3 és 1,6 mm között változik.

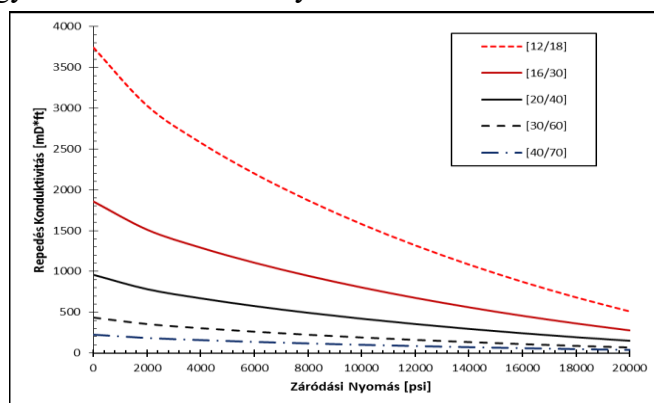


6. ábra: Repedés konduktivitás a proppant átmérő és Young m. függvényében

Forrás: Saját szerkesztés

A 6. ábrán szemléltetett eredmények a várakozásoknak megfelelőek. Minnél nagyobb és keményebb a proppant, annál nagyobb repedés konduktivitás értékek érhetők el.

A 7. ábra, a másik legfontosabb paraméter, a záródási nyomások függvényében ábrázolja a repedés konduktivitás értékeit. Megfigyelhető, hogy minnél nagyobbak ezek a nyomások (minnél mélyebben van a tároló), annál kisebb repedés konduktivitás értékek érhetők el ugyanazokra a körülményekre.



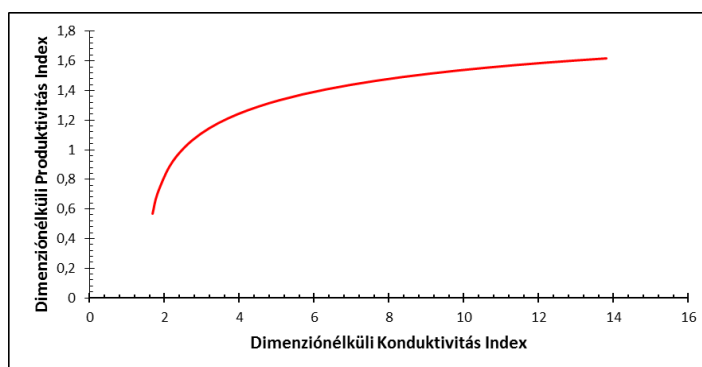
7. ábra: Repedés konduktivitás a záródási nyomás függvényében

Forrás: Saját szerkesztés

A proppant kiválasztás optimalizációja

Az analitikus és az UFD (Economides és társai 2002) modell, továbbá más matematikai megfontolások kombinációjaként a proppant kiválasztás optimalizálható. Az eljárás lényege, hogy az előre meghatározott (NPV számítások és rezervoármérnöki megfontolások) produktivitási indexekhez (PI) az UFD modell alapján számítható egy-egy konduktivitás érték, mely ahhoz szükséges, hogy elérjük az előre definiált PI-t. Az így kapott konduktivitás értéket összehasonlítva az analitikus modellel számított értékkel megállapítható, hogy az analitikus modellbe input paraméterként megadott proppant megfelelő vagy sem. Ha nem, az eljárást meg kell ismételni egy másik proppant típusra.

A 8. ábra leegyszerűsítve mutatja be az UFD modell működését. Megfigyelhető, hogy minden dimenzió nélküli PI-hez tartozik egy dimenzió nélküli F_{CD} .



8. ábra: Dimenzió nélküli PI a dimenzió nélküli konduktivitás függvényében

Forrás: Saját szerkesztés

KONKLÚZIÓ

A cikkben bemutatott analitikus modell képes a proppant beágyazódás, deformáció, illetve ezek összegének, a repedés szélesség változás meghatározására. Végső eredményként pedig a repedés konduktivitás is számítható. A modell csak matematikai és fizikai megfontolásokon alapszik, így a peremfeltételeknek megfelelően széles tartományban használható.

Az analitikus modell segítségével számos érzékenységi teszt is elvégezhető. A cikkben bemutatott eredmények elsősorban a záródási nyomás, a proppant átmérő, illetve a proppant elasztikus modulusának, a konduktivitásra kifejtett hatását mutatták be.

Kombinálva az analitikus modellt az UFD modellel, a proppant kiválasztás optimalizálható a kút produktivitását tekintve.

IRODALOMJEGYZÉK

Economides, M.J., Oligney, R.E., and Valko, P.P. (2002a): "Unified Fracture Design" Orsa Press, Houston. USA.

Lengyel, T. (2016): "Investigation of Parameters Influencing Fracture Conductivity Including Proppant Pack Properties and Rock Mechanical Characteristics" Scientific Students' Associations Conference, Faculty of Earth Science and Engineering, University of Miskolc, Miskolc.

Li', K., Gao, Y., Lyu, Y., Wang M. (2015): „New Mathematical Models for Calculating Proppant Embedment and Fracture Conductivity” SPE-155954-PA.

Wu, J.K., Wang, M.Z., and Wang, W. (2001): „Elastic Mechanics Introduction” Recension of First edition, Beijing: Peking University Press. Chinese. 200-203.

Yang, S.L. and Wei, J.Z. (2004): "Reservoir Physics" First edition, Beijing: Petroleum Industry Press. Chinese. 136-159.

Lektorálta:

Prof. Dr. Lakatos István

Akadémikus