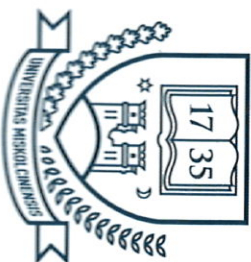


HU ISSN 2063-5508

MŰSZAKI FÖLDTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

A Miskolci Egyetem Közleményei

85. kötet, 1. szám (2015)

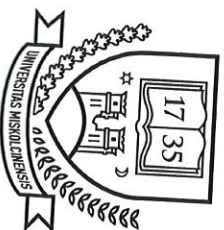


MŰSZAKI FÖLDTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

A Miskolci Egyetem közleménye
85. kötet, 1. szám (2015)

Felejtethetlen kollégánk és barátunk
Dr. Bódi Tibor
emlékére

a Kőolaj és Földgáz Intézet kollektívája



TARTALOMJEGYZÉK

<i>Bódi Tibor–Lakatos István–Pintér Ákos–Toth János–Puskás Sándor–Vágo Árpád:</i>	
Polimer-tenzides EOR eljárás besajtolási tesztjének eredményei.....	5
<i>Bölkény Illdikó–Jonay Károly–Konyha József–Vörös Csaba:</i>	
Hidrátgátlási technológiák, eredmények és jövőbeli lehetőségei az elmúlt 15 év mérési és projekjei alapján	30
<i>Dócs Roland–Bódi Tibor–Jobbik Anita:</i>	
Tapadó víz telítettségének meghatározása gázkiszorításos módszer alkalmazásával	41
<i>Füvesi Viktor–Vörös Csaba–Bölkény Illdikó–Jobbik Anita–Fedor Ferenc–Hlalki Miklós:</i>	
Geotermikus kutak kiképzésének vizsgálatára alkalmas laboratóriumi berendezések és mérési módszerek fejlesztése	48
<i>Füvesi Viktor–Vörös Csaba–Konyha József–Pintér Ákos:</i>	
Kőzetmagok CT-vizsgálatahoz fejlesztett eszközök	55
<i>Galvas Anna Bella</i>	
Gázminőségek vizsgálata az egységes európai gázszolgáltatási szabvány vonatkozásában.....	64
<i>Horánszky Beáta:</i>	
Ki fizeti a révést? A CCS-technológia lehetséges finanszírozási kérdései	73
<i>Jenei Tünde:</i>	
Hatósági eljárások helye és szerepe a távhőszolgáltató geotermikus beruházások folyamataiban.....	82
<i>Jobbik Anita–Lengyel Tamás–Pusztai Patrik:</i>	
Összetett matematikai modell hidraulikus rétegrepszteszt optimalizálására	97
<i>Jobbik Anita–Vörös Csaba:</i>	
EGS geotermikus rezervoár kialakításának főbb kérdései.....	106
<i>Kerekgyártó Tamás:</i>	
A geotermikus energiahasznosítás innovációs lehetőségei Magyarországon	114
<i>Kiss, László:</i>	
The Effect of the Articulating Inertial Torque on the Permissible Loads of Sucker-rod Pumping Units	118
<i>Koncz Ádám:</i>	
Modern hidraulikai szimulációs program használata a ovakvartárak vizsgálatában.....	118

ÖSSZETETT MATEMATIKAI MODELL HIDRAULIKUS RÉTEGREPESTÉS OPTIMALIZÁLÁSÁRA

JOBBIK ANITA¹-LENGYEL TAMÁS²-PUSZTAI PATRIK²

¹ Tudományos főmunkatárs, ME AFKI,
MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport
3515 Miskolc-Egyetemváros, Pf. 2

jobbik@afki.hu

² Olaj- és gázmérnök szakirányos földtudományi mérnök

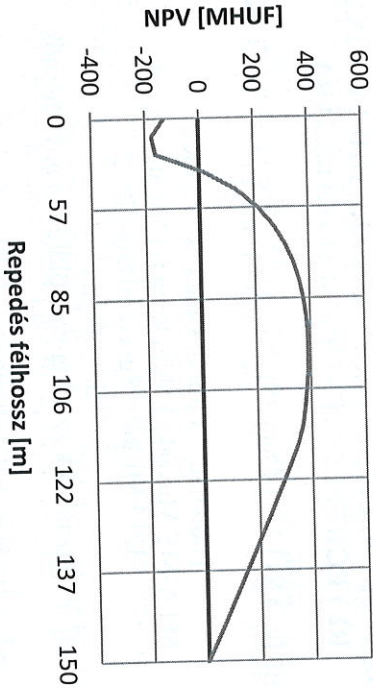
Abstract. A nem-hagyományos szénhidrogének termelésének lehetőségét alapvetően a fűtési és a repesztési műveletekre vonatkozó megtérülési számítások határozzák meg. Ennek következtében, különösen az igen volatilisnek mutakozó világi energiár környezetben, a projektek elindítása kapcsán mindenkor fontos, hogy a megtérülést ne csupán a teljes projekt teljes időtartamára és az összes műveletre együttesen tudjuk beazonosítani. A fűtés mellett, a másik legfontosabb, a hidraulikus rétegrepestés folyamataira is rendelkezünk önálló optimalizálási algoritmussal. Ehhez nyújt egyfajta, a gyakorlati szükségesség és haszon oldaláról egyszerűsített és gyorsan alkalmazható megoldást a jelen írásunkban bemutatásra kerülő számítási eljárás, mely alkalmazható vertikális, horizontális és ferdített kutak repesztési műveleteire is.

Kulcsszavak: nem-hagyományos szénhidrogének, hidraulikus rétegrepestés, proppant, NPV

1. MUNKÁNK CÉLJA

A rétegrepestés egy rendkívül összetett mérnöki feladat, tervezése során számos tudományterület együttes alkalmazása szükséges. Emellett a hidraulikus rétegrepestés számottevő költségekkel is jár, így kulcsfontosságú, hogy optimális tervezés és kivitelezés valósuljon meg. Munkánk során egy olyan többlépcsős algoritmust dolgoztunk ki [1, 2], mely integrálva kezeli a mérnöki és gazdasági számításokat, a bemenő paraméterek alapján megadja a legnagyobb profittal jelentkező rétegrepestési eljárás technikai méreteit és az ehhez tartozó költségek, bevétel és profit nettó jelen értékét, összehasonlítva a vertikális, horizontális és ferdített kutak repesztésének eredményeit.

Nyilvánvaló, mint ahogyan a számításaink eredményei is alátámasztják (1. ábra), hogy minél nagyobb a repesztési eljárás, annál kedvezőbb beáramlási körülményeket kapunk. Az összefüggés értelmében a repedés méretének van egy optimumértéke, aminél nagyobb mértékben megnövelt fakadó felszín kevesebb többletprofitot eredményez, mint az érdekében hozzáadott repesztési költség.



1. ábra

Az eljárás nettó jelenértéke

2. AZ ALKALMAZOTT MODELL

Figyelembe véve azt a tényrt, hogy a rétegrepsztes témaköre mennyire sokoldalú és összetett, a megfelelő tárgyalhatóság érdekében viszonylag szűk keretek között vizsgáltuk az algoritmus működését. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy a bemenő paraméterek mindegyike szabadon változtatható a kidolgozott eljárásban (természetesen a valós értékek keretein belül), diverzitást szolgáltatva a programnak, azaz bármilyen tulajdonságú réteg és fluidum szimulációját képes elvégezni a szükséges módosításokkal. A szükséges input paramétereket az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat
Az számításhoz szükséges paraméterek

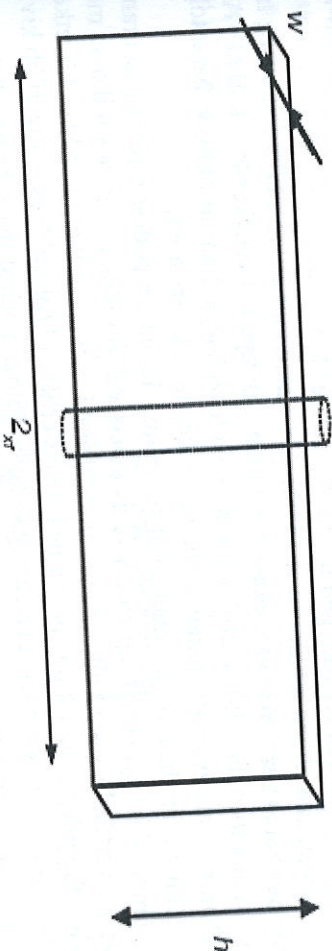
Megnevezés	Jelölés [Dimenzió]	Megnevezés	Jelölés [Dimenzió]
Tároló réteg magassága	h [m]	Gáz relatív sűrűsége	γ_g [-]
Tároló közet permeabilitása	k [mD]	Proppant permeabilitása	k_p [mD]
Tároló nyomása	P_e [bar]	Proppant halmazsűrűsége	ρ_p [kg/m ³]
Kút talpnyomás	P_{wf} [bar]	Kezdeti gáz mennyiség	G_i [mm ³]
Becáramlási terület oldalhossza	X_e [m]	Kútsugár	r_w [inch]
Tároló hőmérséklete	T [K]	Tönkremeneteli tényező (Crash)	Cr [%]
Gáz dinamikai viszkozitása	μ [cP]		

2.1. A repesztes geometriája

2.1.1. Vertikális kút

A kút méretei a kút méretei mint ahogy a neve is jelzi, annak geometriai méretei határozzák meg.

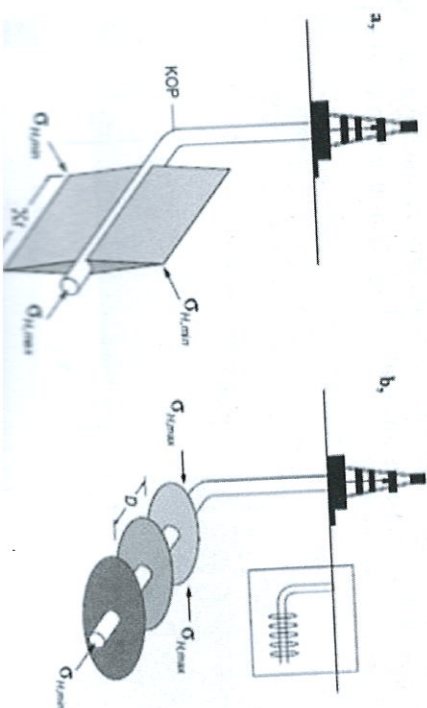
kiinduló két ellentétes, a maximális főfeszültségi irányába terjedő alakzat. Az ideális alakzatot, melyet a modellünk is feltételez a 2. ábra illusztrálja.



2. ábra
Vertikális repedés geometria

A kútból kiinduló repedések modeljeként szolgáló egyik, ill. másik irányú re-peresztett alakzatot reperesztési felszámlynak (fractured half length) nevezik. Nyilván-való, hogy a fakadó felszín annál nagyobb, minél nagyobb repedést hozunk létre, mind hosszúság, szélesség és magasság tekintetében. Ennek természetesen vannak technikai korlátai is, alapiában véve azonban az in-situ közzefeszültségek határozzák meg a kialakuló repedés geometriáját. Számításaink alapján szolgáló modellünkben, az ipari gyakorlat alapján (szervizvállalatok gyakorlati példái szerint) azt feltételez-tük, hogy a tároló teljes magasságában létrejön a repedés, így a reperesztés magassága megegyezik a tároló magasságával [3].

2.1.2. Horizontális kút



Horizontális kútak esetén módosul a rendszer geometriája, tekintettel arra, hogy a célzónát a fűrés nem vertikális, hanem vízszintes szakasszal éri el. Vízszintes kútak repesztése esetén, a közet feszültségterének függvényében, kétirányú formáció-ke resztelés és ezáltal repedés geometria jöhet létre [4].

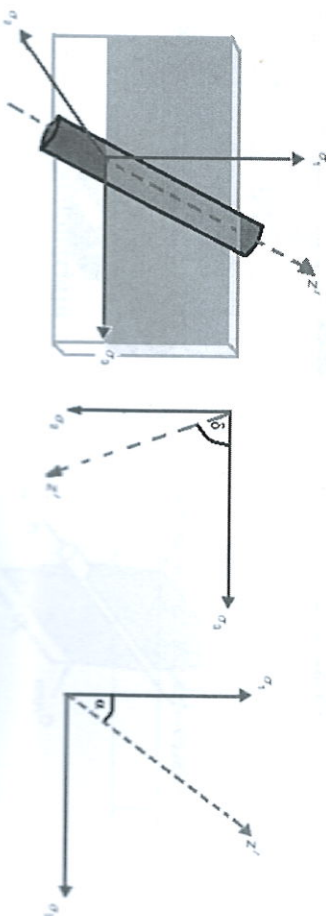
Abban az esetben, amikor a kút a tárolót a maximális horizontális feszültség irányában keresztezi (σ_{Hmax}), ekkor longitudinális repedés keletkezik (3a. ábra). Abban az esetben, ha a kút a tárolót a minimális feszültséggel párhuzamosan harántolja (σ_{Hmin}), transzverzális repedés-geometria keletkezik (3b. ábra).

Longitudinális repedéseknel a kút kommunikációja a repedéssel (és így az áramlási modell is) gyakorlatilag megegyezik a vertikális esettel. A repedés felhossz méretét a vertikális esetre alkalmazott megoldással optimalizálhatjuk. Ebből következően, függőleges kúttal ugyanaz a beáramlás érhető el (olcsóbb és egyszerűbb kivitelezéssel), természetesen a rétegmagasság korlátozó hatását figyelembe véve.

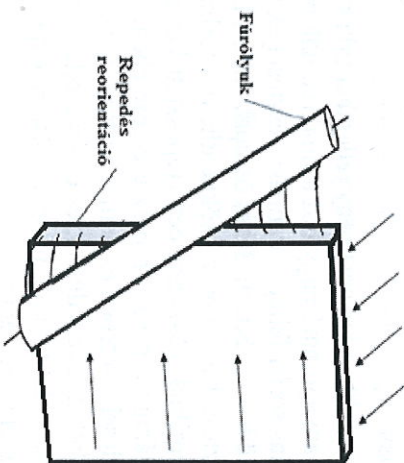
Egészen más azonban a transzverzális eset, amikor a kút rendkívül kis felületen (a repedés vastagságának megfelelő hengerpalást felületén) kerül kapcsolatba a repedéssel. Ennek matematikai leírása további hatások figyelembevételét vonja maga után. Legfontosabb a lecsökkenő keresztmetszet miatt fellépő sebességnövekedésből adódó turbulencia hatása, mely igen jelentősen hat a rendszer működésére.

2.1.3. Fordított kút

A fűrőlyuk ferdeségét a hidraulikus rétegreperesztés tervezésénél két szöggel szokás megadni, melyek a fűrőlyuk *dőlése*, illetve a fűrőlyuk *dőlésének iránya*. A fűrőlyuk dőlése alatt a fűrőlyuk irányvonala (z) és a vertikális által bezárt szöget értjük. A fűrőlyuk dőlésirányán a fűrőlyuk irányvonalaának a vízszintes síkba vett vetülete és a maximális horizontális feszültség (σ_3) iránya közötti szöget értjük. Természetesen a dőlésirány meghatározásához ismerni kell a várható repedés síkját, ezt a közet in-situ feszültségrendszere határozza meg. A 4. ábra az in-situ feszültségek és a fűrőlyuk irányvonalaának (z) ismeretében mutatja a fűrőlyuk dőlését és annak irányát. Számítási szempontból összetett problémát eredményez, amennyiben a fűrőlyuk dőlése nem esik egy síkba a repedés síkjával, mivel ilyen esetben a dőlésirányt is figyelembe kell venni.



A problémát úgy küszöböltük ki, hogy az úgynevezett "No-bypass" (5. ábra) modelt alkalmaztuk [5]. Ez a modell a kút dőlésirányát úgy veszi figyelembe, hogy a fűrőlyuk mentén végig érintkezik a repedéssel, és egy rövid reorientációs szakaszt követően a repedés a közetfeszültségnek megfelelően a már korábban vázolt módon terjed tovább. Ennél a modellnél a kútba áramló összes fluidum a repedésen keresztül jut a fűrőlyukhoz. Természetesen ilyen esetekben többféle szkin-tényezővel kell számolni.

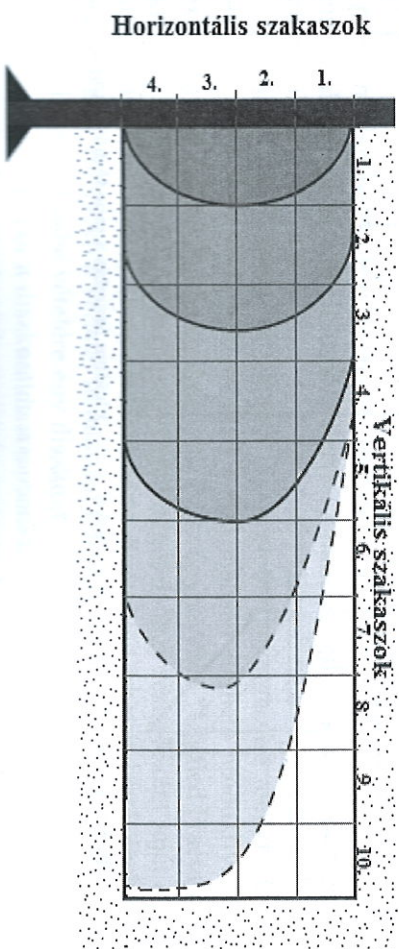


5. ábra

Ropedés reorientáció "No-bypass" modell

2.2. Proppant inhomogén eloszlása

A kitámasztó anyag inhomogén eloszlással, vagyis a fűrőlyuktól távolodva egyre csökkenő koncentrációval tölti ki a repedést (6. ábra). Az ábrán, a fűrőlyuktól távolodva szűrke árnyalatú területek, az eltérő a proppant koncentrációt jelenítik meg. Az egyre halványabb árnyalatok egyre kisebb koncentrációt jelölnek, továbbá jól szemlélteti azt is, hogy a gravitáció hatására kiülepítő kitámasztó anyag milyen módon tölti ki a repedést.



A valóságghú modellezés érdekében a programban a repedés keresztmetszetét felosztottuk vertikális és horizontális szakaszok által meghatározott cellákra (6. ábra). Ezzel a fűrőlyuktól való távolódás során fellépő inhomogenitást és a gravitáció hatása által létrejött kitüledés hatását is figyelembe tudjuk venni. A modell mindezt nem a repedést kitöltő proppant tértölgatának csökkenésével, hanem áteresztőképességének romlásával veszi figyelembe az egyes zónákban.

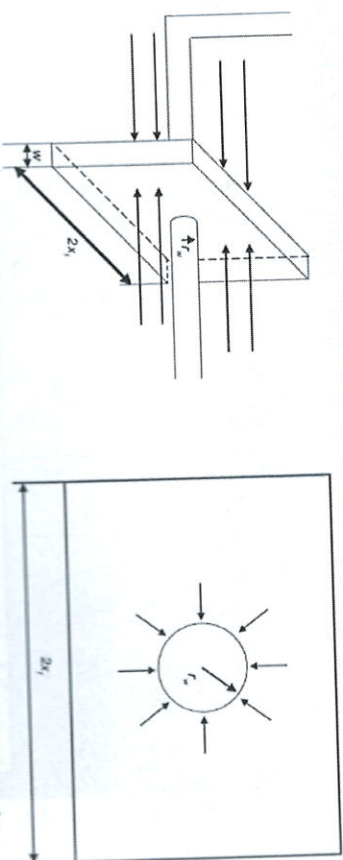
2.3. Turbulencia hatása

A turbulencia vagy pontosabban a nem-Darcy jellegű áramlás (non Darcy flow) hatása egyáltalán nem elhanyagolható nagy hozammal rendelkező gázkutaknál. A pórus térben történő áramlás során fellépő áramlási veszteségek igen jelentős hatással vannak a rendszer működésére. Ez vertikális és horizontális kutakra egyaránt igaz. Hidraulikus rétegrepesztéssel jelentősen csökkenthető a turbulencia hatása a megváltoztatott áramlási profilnak köszönhetően (repesztett kút esetében nem radiális áramlás jön létre), legalábbis vertikális repesztések esetében.

Transzverzális repedések esetében ez nem feltétlenül igaz, mivel a kút rendkívül kis felületen áll kapcsolatban a repedéssel, és ez számottevően növeli a turbulencia hatását. Ez a limitált kapcsolat további nyomásesést generál, amit egy úgynevezett *choke* szkinnel lehet figyelembe venni.

2.3.1. Choke szkin

Transzverzálisan repesztett horizontális kút esetében a keresztmetszet a horizontális kút és a transzverzális repedés között $2\pi r_w w$, ahol az r_w a horizontális kút sugara, a w pedig a repedés szélessége. Ebben az esetben az áramlási profil a rétegből a repedésbe lineáris, a repedésen belül pedig konvergens radiális (7. ábra). Ezeknek az áramlásoknak a kombinációja pedig együttesen okoz nyomásesést, amit a *choke* szkin (s_c) tényezővel szokás figyelembe venni [6].



Lineáris áramlás a rétegből a repedésbe

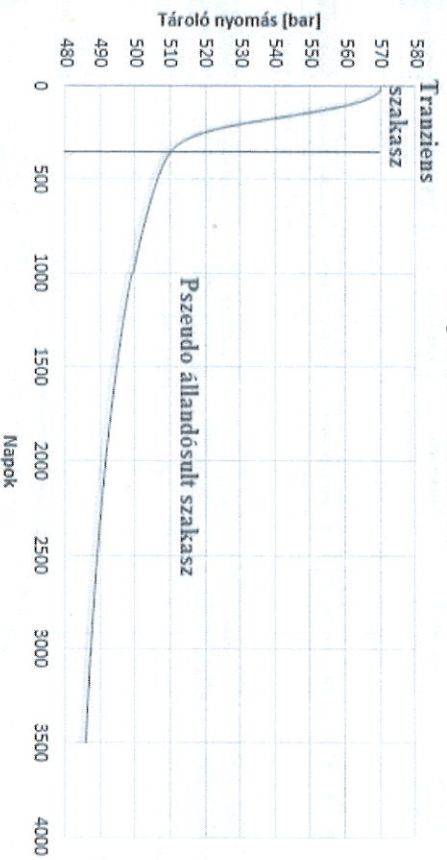
Fluidum áramlás a repedésből a kútba

2.4. A tároló nyomáscsökkenése

Annak érdekében, hogy a bevétel pontosabban számítható legyen, elengedhetetlen a tároló nyomáscsökkenésének figyelembevétele. A nyomáscsökkenés, annak jellegzetes lefutása miatt két szakaszra bontható (8. ábra), transziens, tehát időben változó és pseudo-state, azaz közel állandósult időszakokra.

A hozamot a depresszió, azaz a réteg és a kútalpon lévő nyomásnak a különbsége nagymértékben befolyásolja, így ez a mértékű nem stacionárius változás nem hagyható figyelmen kívül. A még pontosabb leírás érdekében, a számítási modellünkben a gáz kompresszibilitási (eltérési) és ezen keresztül a teleptérfogatú tényező nyomásfüggését is figyelembe vettük.

Nyomáscsökkenés



8. ábra

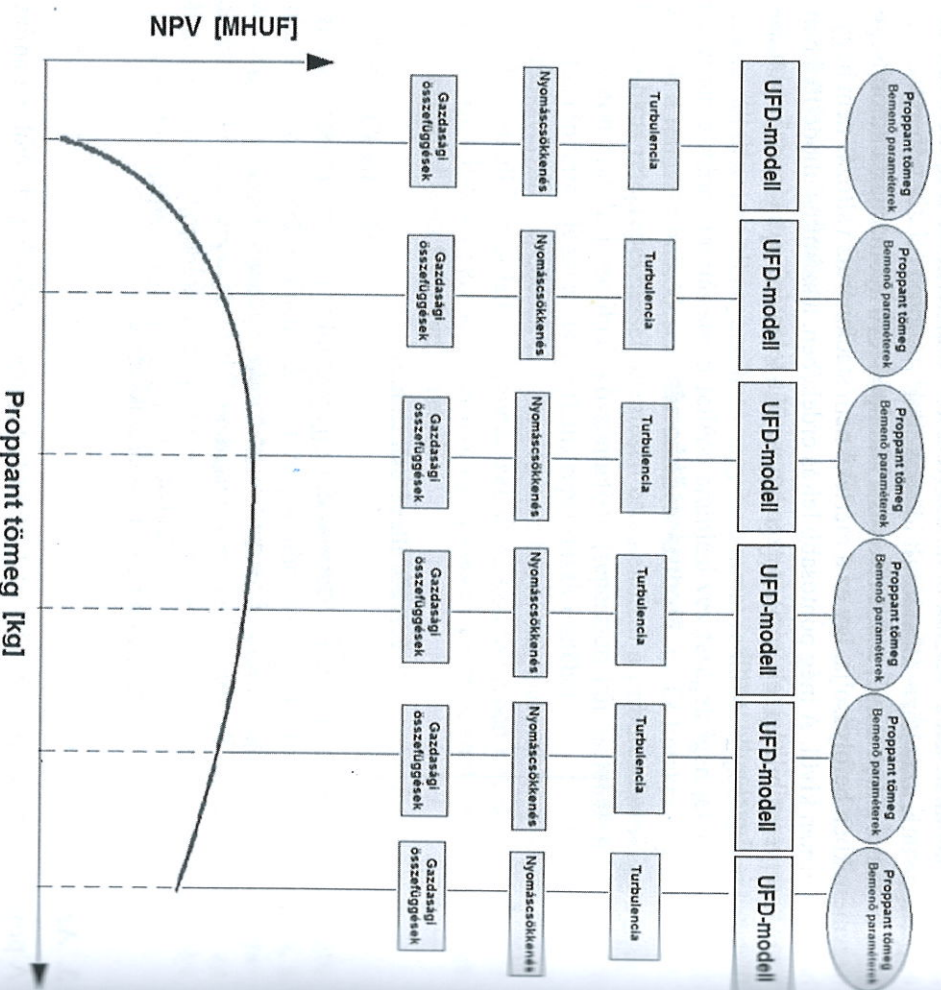
Repsztett tároló nyomáscsökkenése

3. AZ ALGORITMUS

A program alapja egy olyan összetett algoritmus, amely több főciklusból, valamint azon belül számos kisebb ciklusból, illetve számításból áll. A főbb ciklusokat a 9. ábra szemlélteti.

A műszaki optimalizálás érdekében olyan modell alkalmazása mellett döntötünk, amely a bemenő paraméterek által a maximálisan elérhető produktivitási indexhez tartozó értékeket adja eredményül. Ez az úgynevezett "Unified Fracture Design", azaz UFD-modell. A gazdasági összefüggések nagy része főként saját elgondolások útján alakultak ki. Ilyen például a nettó diszkontált árbevétel értékének meghatározása is, amelyben a vállalat fenntartási költségeit, az állami adókat, valamint a diszkontálás figyelembe vételére egy diszkontálási szorzó-tényezőt együttesen vettünk figyelembe. Ebből a diszkontált árbevételből az eljárás során felmerülő konszants költségeket kivonva kaptuk az eljárás során realizálható nettó jelenértéket. Min-

den számítási sor különböző, lineárisan növekvő proppant tömeg értékek által generált rétegrepesztési szimulációt mutat. A pontosabb NPV maximum meghatározása érdekében 99 szimulációt végez el a program.

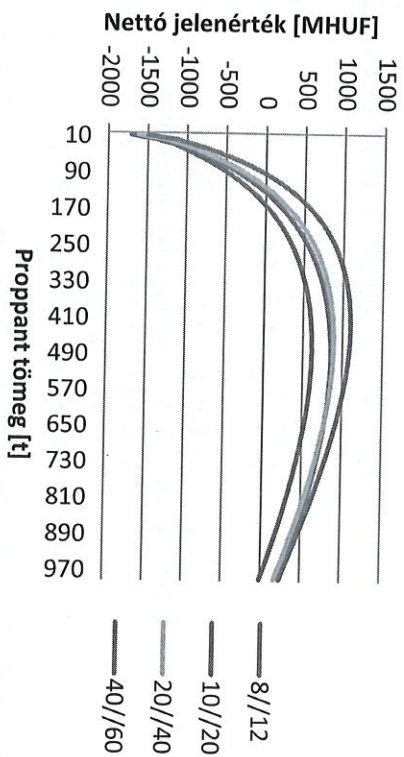


9. ábra

Az algoritmus fő számítási ciklusai

4. EREDMÉNYEINK

A bemutatott példában egy magyarországi tight tároló körülményeinek megfelelő paraméterekkel futattuk le a programot, négyféle eltérő méretű és tulajdonságú proppant alkalmazását vizsgálva. A repesztési művelet szimulációját ez esetben vertikális kútra vizsgáltuk, így jól látszik (10. ábra), hogy a program segítségével nem csak a maximális NPV-k, valamint az ehhez tartozó repedést jellemző geometriai értékek határozhatóak meg, hanem a tároló felrepedéséhez alkalmazandó optimális



10. ábra

Adott tárolón végzett reperesztés NPV értékei
a felhasznált proppant tömeg függvényében

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen írás alapjául szolgáló kutatómunka a MTA ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, valamint a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Fenntartható Természeti Erőforrás Gazdálkodás Kiválósági Központ keretében valósult meg.

IRODALOM

- [1] [1] LENGVEL, T.: *Horizontális kút hidraulikus rétegreperesztés optimalizálása*. Szakdolgozat, Miskolc, 2015.
- [2] [2] PUSZTAI, P.: *Ferdített kút hidraulikus rétegreperesztés optimalizálása*. Szakdolgozat, Miskolc, 2015.
- [3] [3] ADVANTTI, S. H.–KHATTIB, H.–LEE, J. K.: Hydraulic Fracture Geometry Modeling, Prediction and Comparisons, In: *paper SPE*, 13863, 1985.
- [4] [4] ECONOMIDES, Michael J.–MARTIN, Tony: *Modern Fracturing*. Enhancing Natural Gas Production, 2007.
- [5] [5] ZHANG, Y.–EHLIG-ECONOMIDES, C. A.: Inflow Performance for a Hydraulic Fracture in a Deviated Well. In: *paper SPE*, 119345, 2009.
- [6] [6] Shell Technology: *Hydraulic Fracturing Part II.*, EP 2000-5540, 2000.